

琵琶湖北端部への濁質流入に関する数値計算

Numerical Simulation of Turbidity Entrainment into the Northern Part of Lake Biwa

○山敷庸亮* 松井三郎** 津田良平***
熊谷道夫**** 横山康二***** 奥田節夫*****

Yosuke YAMASHIKI*, Saburo MATSUI**, Ryohei TSUDA***

Michio KUMAGAI****, Koji YOKOYAMA***** and Setsuo OKUDA*****

ABSTRACT; The turbidity dispersion caused by river water entrainment into the fresh water in the Shiozu Bay, Lake Biwa, was simulated using the LES turbulent model. The density current was observed in the simulation when the river inflow temperature was cooler than the lake water, and the surface dispersion was observed when river water was warmer. The simulation results could describe basic phenomena of turbidity entrainment obtained by the field observation.

KEYWORD; LES, Turbidity, Dispersion, Density Current, Turbulent Model

1. はじめに

琵琶湖北湖における栄養塩は流入河川から供給されるものの割合が多いが、この河川水の混合特性は湖水温との水温差に大きく影響され、また懸濁物の混入によるみかけ上の密度差の影響も受ける。この混合プロセスは成層中の栄養塩の混合形態を支配するため、プランクトンの増殖メカニズムにも影響を及ぼすと考えられている。

LES 3次元乱流モデルは近年様々な流れ場の解析に利用されているが、実際の河川からの流出計算等に利用された例は少ない。その理由には、現地データに合う適切なパラメータの選定や境界条件の設定が困難であること、また他のモデルに比較して大きなCPU時間を要する事等が考えられる。しかしながらLESでは設定パラメータが比較的少なくてすむため、非定常計算への適用が容易であることが考えられる。

本研究では、湖沼における拡散現象の解析におけるLESの適合性を探るために、琵琶湖北部の塩津湾に流入する西野水道流出部にモデルを適用し、水温と懸濁物による密度流の再現を試みた。河川水温が湖水温に比べ高い場合と低い場合の計算を行った結果、河川水の潜り込みや浮上といった特性の再現が確認された。

*日本学術振興会特別研究員 JSPS Research Fellow

** 京都大学工学部 Faculty of Engineering, Kyoto University

***近畿大学農学部 Faculty of Agriculture, Kinki University

****琵琶湖研究所 Lake Biwa Research Institute

*****京都大学防災研究所 DPRI, Kyoto University

*****岡山理科大学理学部 Faculty of Science, Okayama University of Science

2・基礎式および計算手法

本研究では密度流を再現するため、密度変化を陽に取り扱う必要がある。密度の圧力依存性は考慮せず、温度・濁度依存性を考慮したGS流れの基礎方程式を以下に示す。

<連続式>

$$\frac{\partial \rho_{(T,C)}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{(T,C)} \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\rho_{(T,C)}$:水の密度 $\bar{u}_i$:格子平均速度、 $i = 1, 2, 3$ である。

<運動方程式>

$$\frac{D(\rho_{(T,C)} \bar{u}_i)}{Dt} + (-1)^j \rho_{(T,C)} \bar{u}_k = \mu_{(T,C)} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \rho R_{ij}}{\partial x_j} + \rho_{(T,C)} F_i \quad (2)$$

$$i, j = 1, 2, 3; \quad k = 2, 1 \text{ for } i = 1, 2, \quad \mathcal{G} = 2\Omega \sin \phi = 0.000086$$

ここに、 F_i :体積力、 P :水圧、 $\mu_{(T,C)}$:水の粘性係数である。SGSモデルにはSmagolinskyモデル(式-(3))とYoshizawa-Horiuchiらの1方程式モデル(式-(4))を用いた。なお、Leonard, Cross項のモデルは用いなかった。

<Smagolinskyモデル>

$$\rho R_{ij} - \frac{1}{3} \rho \delta_{ij} = -2\tau_{ij} S_{ij}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), \quad \mu_T = \rho_{(T,C)} (C_s \Delta)^2 (2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}, \quad C_s = 0.20 \quad (3)$$

<Yoshizawa-Horiuchiモデル>

$$\rho R - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k_G = -\mu_G S_{ij}, \quad \mu_G = \rho C_v \Delta k_G^{1/2}$$

$$\frac{\partial k_G}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k_G}{\partial x_j} = P_G - \varepsilon_G + D_G \quad (4)$$

$$P_G = R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad \varepsilon_G = C_\varepsilon k_G^{3/2} / \Delta, \quad D_G = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{\rho} (C_k \mu_G + \mu) \frac{\partial k_G}{\partial x_j} \right]$$

ここに、 k_G :SGS乱流エネルギー、 P_G, ε_G, D_G :それぞれSGS生成・逸散・拡散項であり、モデル定数には C_v, C_ε, C_k : 0.05, 1.0, 2.0を用いている。ただしSGSモデルの長さスケールである Δ には、通常 $\Delta = (\Delta_1 \Delta_2 \Delta_3)^{1/3}$ を用いるが、本計算では水平方向と鉛直方向のアスペクト比が大きいため、 $\Delta_{\text{horizontal}} = (\Delta_h^{1.5} \Delta_v^{0.5})^{0.5}$, $\Delta_{\text{vertical}} = (\Delta_v^{1.5} \Delta_h^{0.5})^{0.5}$ (Δ_h, Δ_v :水平・鉛直方向格子サイズ)を用いた。また、簡単のためコリオリ項、浮力項、濁度混入による生成項は用いていない。圧力解法には、比圧縮性流体に対する流速圧力同時緩和法²⁾に密度変化の影響を組み入れたものを用いた。プログラミングに当たっては、MAC法による旗付けを行い、リスト・ベクトルを利用し非計算領域を変数領域から外し、高速化と記憶容量の節約を図った。

水温輸送式には以下のものを用い、乱流による熱拡散係数の増加をSGSモデルで補完した。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{(T,C)} \overline{T}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_{(T,C)} \overline{u_j T}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(1 + \frac{\mu_T}{\mu} \right) \left(\frac{\lambda_{(T)}}{C_p} \right) \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

$$\lambda_{(T)} = 0.561 + 0.0014 \overline{T} \quad (\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}), \quad C_p = 4190 \quad (\text{JK}^{-1}\text{kg}^{-1})$$

ここに、 $\overline{T}$:格子平均水温、 $\lambda_{(T)}$:熱伝導率、 C_p :定積比熱である。

濁質の輸送式には、粒子の平均粒径が小さく、水との相対速度がそれほど大きくないとして、以下の拡散型の方程式を用いた。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{(T,C)} \overline{C}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_{(T,C)} (\overline{u_j - w s_j}) \overline{C}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(1 + \frac{\mu_T}{\mu} \right) D_c \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

ここに、 $\overline{C}$:格子平均濁質濃度、 D_c :濁質の拡散係数、 w_s :沈降速度である。沈降速度はStokes式により行った。

流体の密度の計算には、次の式を用いた。

$$\rho_{(T,C)} = 999.9726 \times (1.0 - 0.000009297 \times (T - 273.0298)^{1.8}) + \sigma_w C \quad (7)$$

ここに、 σ_w :粒子の水中密度(=1650kgm⁻³)である。

水の粘性係数の計算には、懸濁物の濃度が低いと仮定して、30℃以下の回帰式とEinsteinの式を組み合わせた以下のものを用いた。

$$\mu = 0.001 \exp(0.5546 - 0.0269T) \times (1.0 + 2.5 \overline{C}) \quad (8)$$

水面における外力として風によるせん断力のみを考慮し、以下の式で評価した3)。

$$\tau_w = \rho_a C_D W^2, \quad \rho_a: \text{air density}, \quad C_D = 0.0013, \quad W: \text{wind velocity} \quad (9)$$

また、 $k-\varepsilon$ モデルと同様の乱れエネルギーと表面せん断力との関係式

$$\tau_s = \rho C_v^{0.5} k_g \quad (10) \text{を仮定し、} \tau_s = \tau_w \text{を仮定し、以下のように有風条件での水面での境界条件を与えた。}$$

$$k_s = \frac{\rho_a}{\rho} \frac{C_D}{C_v^{0.5}} W^2 \quad k_s: \text{Surface SGS Energy Production} \quad (11)$$

差分格子が満たされない底面付近や水面での流れは、上述の基礎式にポーラス・メディア法を適用し、SGSの長さスケールにVan-Driest型の壁面減衰関数を乗じて対応した。

計算領域の水位変動が塩津湾の内部波の周期に支配されているが、本研究では密度流の動きを明確にするために水位変動を無視した。また、有限差分法で斜め境界を扱えるように、3次元的な底斜面に対する流向の補正を行い、底面に対して平行流を作った4)。

時間積分は非線形項(対流項)に対してAdams-Bashforth法を、線形項(粘性項)に対してCrank-Nicolson法を適用し、陰陽混合法とした5)。

離散化には境界付近には2次の中心差分法を、その他の部分にはQUICK 3次精度スキームを用いた6)。

プログラミングは全てC言語により行い、UNIX上で計算を行った。プログラミングに際し、文献2)7)8)を参考にした。

3・計算条件・考察

対象水域は1990-91年に奥田・津田らにより共同観測⁹⁾が行われた琵琶湖北端の西野水道河口部であり、図1(a)に水域略図を、図1(b)に基準地点を示す(横断面での観測結果の表にこの図の番号を用いる)。現地観測において、顕著な潜り込みと浮上が観測された5月、7月の観測結果の再現を試みた。両観測日の流況の概要を下表にまとめる。

	5月11日	7月6日
水温	河川水温>湖水温(採水時約1℃)	10時まで河川水温<湖水温、
流量	10時まで毎秒2t,11時以降増水	7-19時まで毎秒2.5~2.4t
風向・風速	10時までは無風、以降南東に4-6m/s	12時までは風速は最大2-3m,以後北
流況	上層を滑るように濁度が拡散。	湖底面付近に密度流が確認された。

(1) Smagorinskyモデルによる全体計算

Smagorinskyモデルにより観測水域全体の計算を行った。本計算セルサイズでは入り江部分の計算が十分に出来ないため、計算を2段階に分けた。すなわち、上記と同様境界条件で水平メッシュサイズを半分(5M)とし、水道出口の入り江を一定時間計算した結果を初期条件として用いた(図2参照)。粒子の粒径は 10μ とし、 $D_c=0.00001$ とした。

図3に計算開始4時間後の計算結果の比較を示した。条件1では冷水が流入するため密度流となって下方に流れこんでいる。条件2においては逆に上層に集中した拡散が確認され、観測結果を大まかに説明出来ることがわかった。ただし水面セル付近の広がりには乱れが見られ、拡散速度も遅い。

(2) 1方程式モデルによる詳細計算

1方程式モデルにより、領域を制限し解像度を上げた計算を行った。この計算では風の効果を考慮し、観測点近くの尾上での観測地をスプライン補間したもの、時間・空間的に周期性の揺らぎを与えた風速値を与えた。ハイドログラフは西野水道のデータをスプライン補間した。この計算においては、条件4において水面付近へのブルームの発達を確認することが出来た。水平・鉛直方向の Δ に変化を与えたことにより、鉛直混合が抑制されている。条件3においても、底面付近を発達する密度流がより明確にわかった。

	条件1(case 1)	条件2(case 2)	条件3 case 3)	条件4(case 4)
モデル	Smagorinsky	Smagorinsky	1-equation	1-equation
計算領域	500x400x7(m)	500x400x7(m)	350x300x7(m)	350x300x7(m)
格子サイズ	10x10x0.5(m)	10x10x0.5(m)	5x5x0.5(m)	5x5x0.5(m)
初期湖水温	21℃	14℃	21℃	14℃
河川流量	2.1t/s	2.1t/s	2.1t/s	1.8~2.1t/s(hydrograph)
河川水温	20℃	15℃	20℃	15~16℃
河川濁度	5ppm	5ppm	5ppm	5-15ppm

4・結論

LESを利用した計算を行ったが、河川水の3次元的な挙動を計算で再現することが出来た。今後は更に、浮力・濁度混入・コリオリ力等の影響をSGSモデルにも活かした計算を行っていく予定である。

・本研究は、平成六年度・鉄鋼業環境保全技術開発基金の援助を受けて行われた。

図 1(a) 計算比較水域

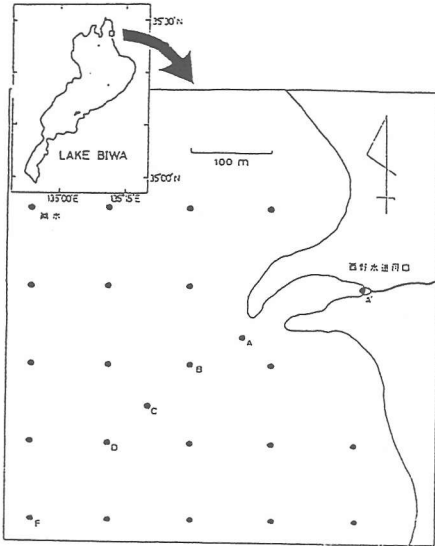


図 1(b) 基準地点

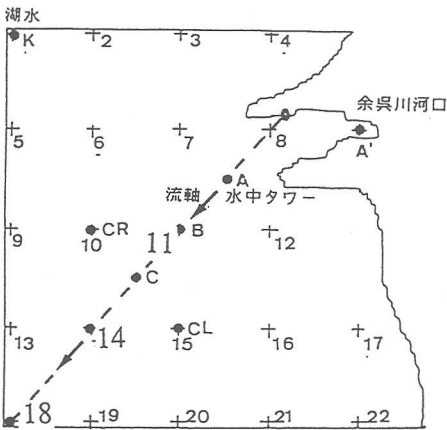


図 2 ・ 計算の初期条件
(条件 1)

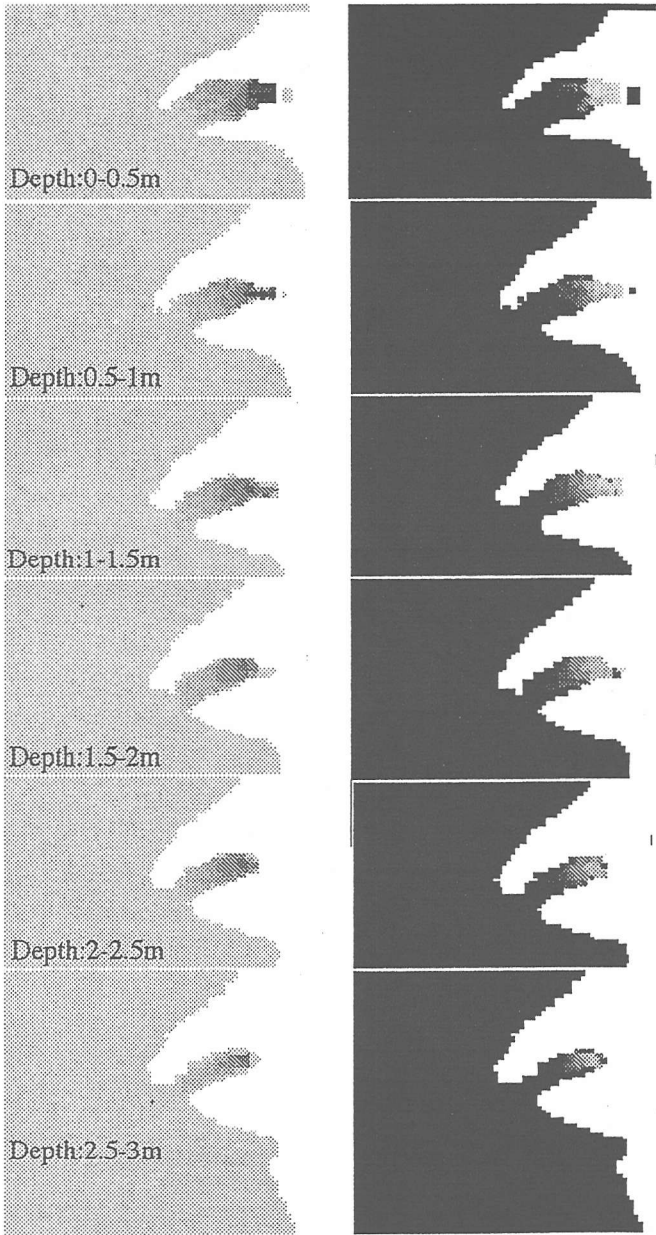


図3 西野水道河口部における計算結果 - その1
Smagorinsky model, 50 x 50 x 14

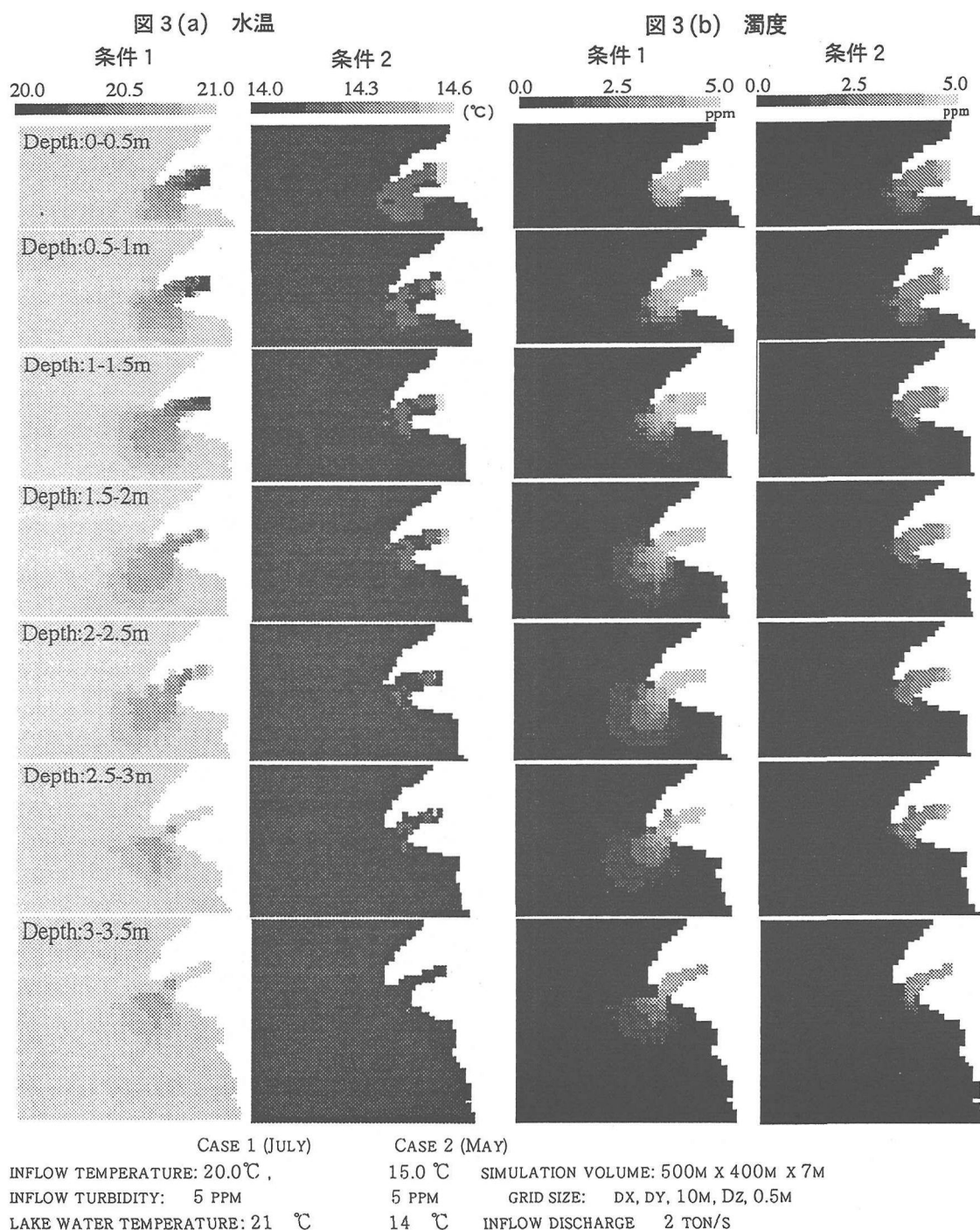


図4 西野水道河口部における計算結果 - その2
1-equation model, 70 x 60 x 14

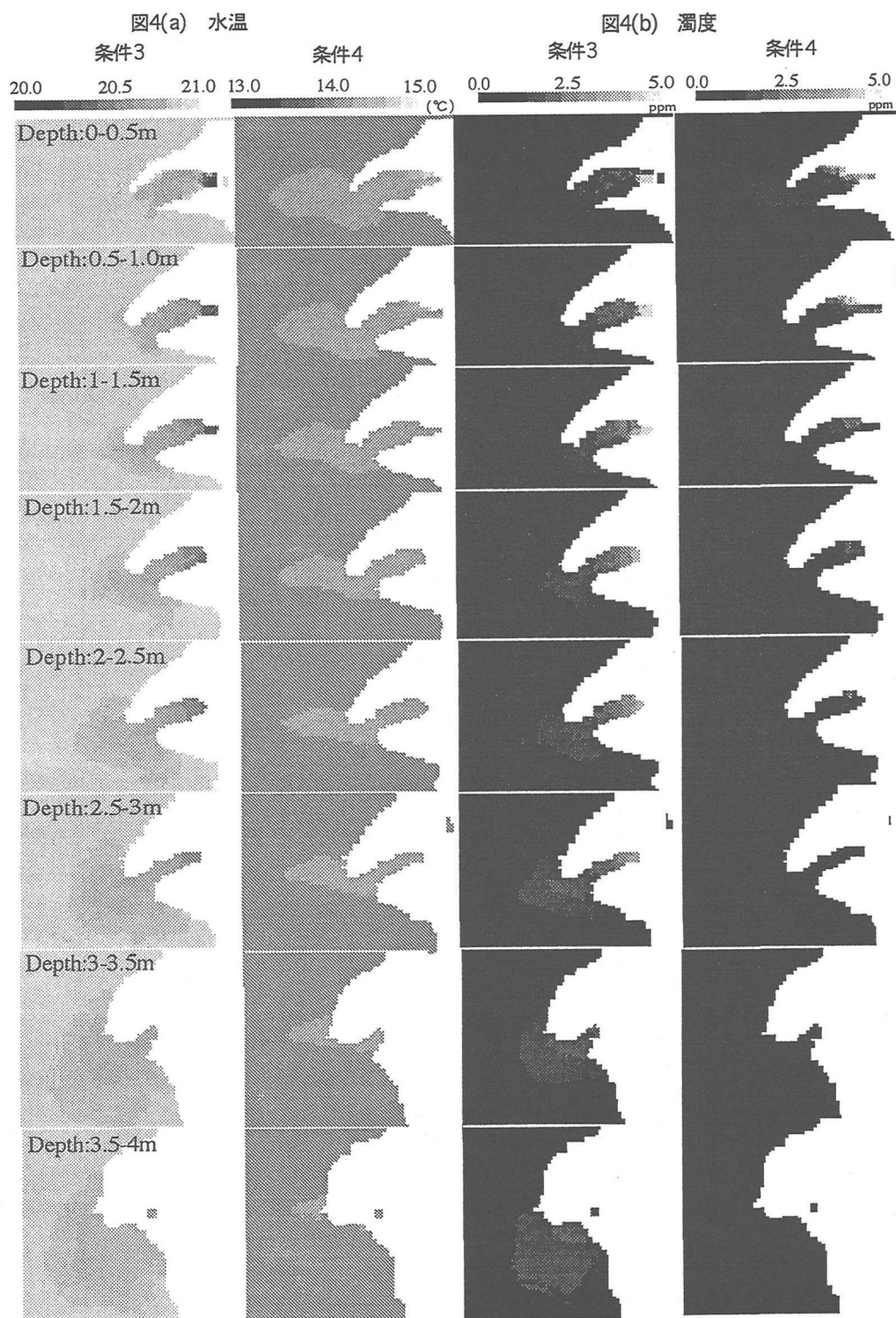
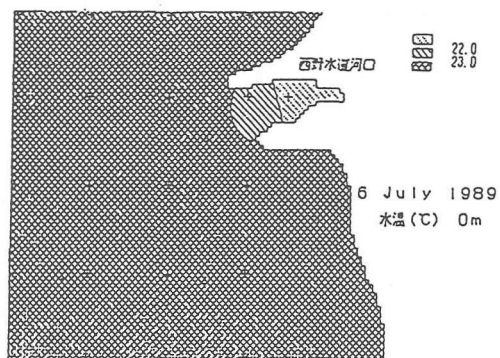


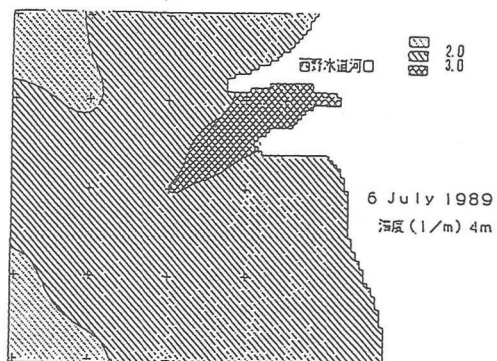
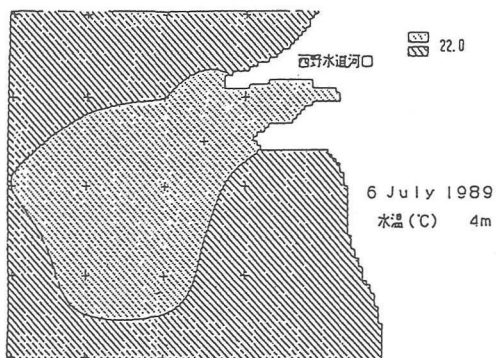
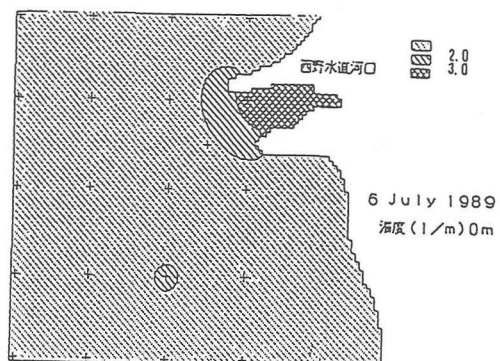
図5 観測結果 (津田ら9)

7月 (条件1 対応)

水温

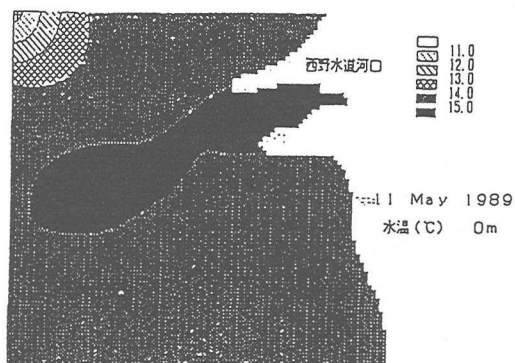


濁度



5月 (条件2 対応)

水温



濁度

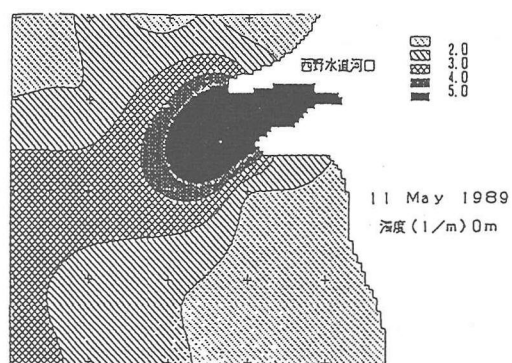
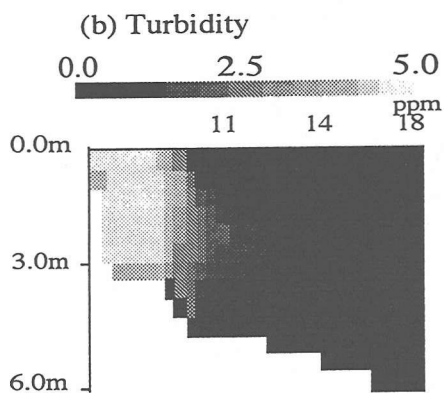
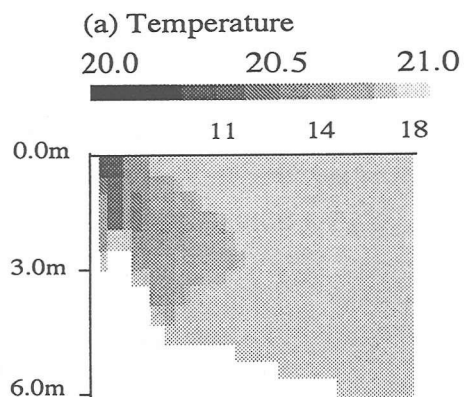
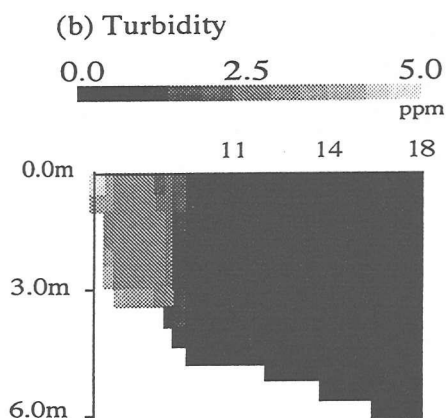
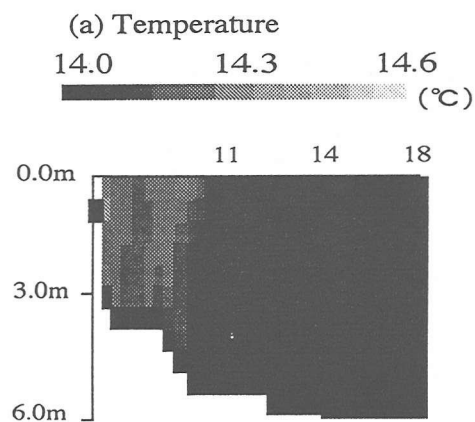


図6・計算結果 横断面に沿った鉛直分布

条件1



条件2



条件3

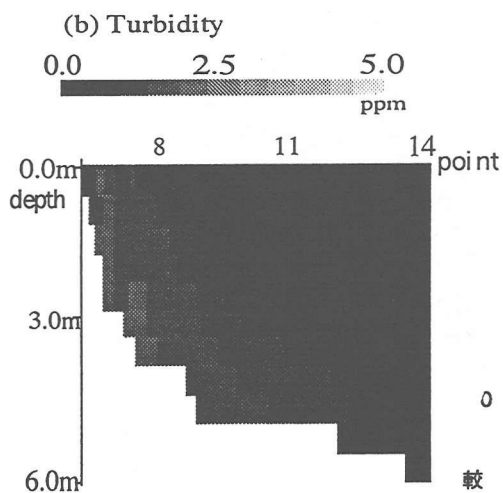
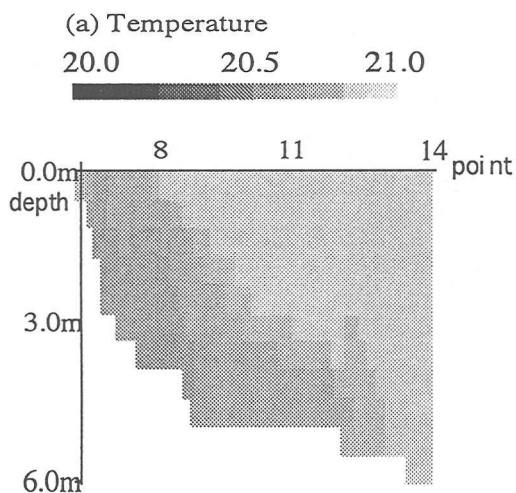
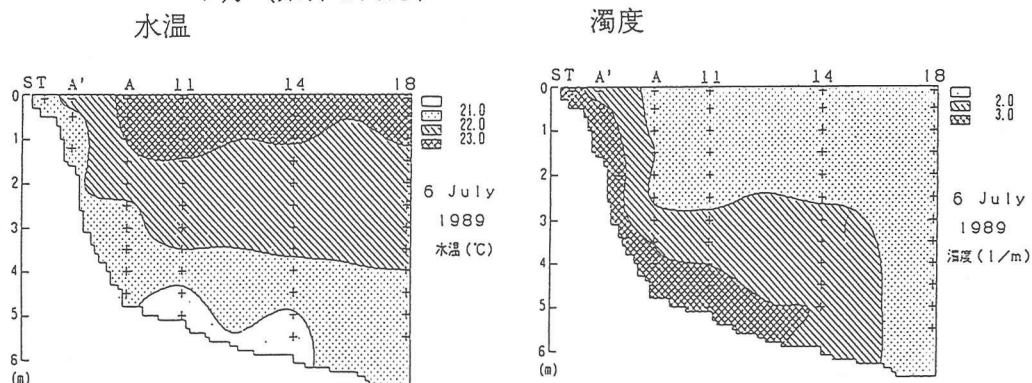
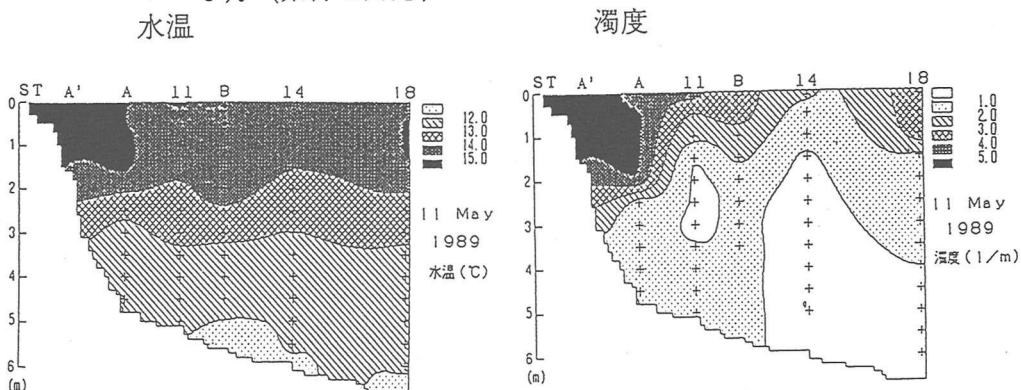


図7 観測結果 (津田ら9) 横断面に沿った鉛直分布

7 月 (条件 1 対応)



5 月 (条件 2 対応)



参考文献

- 1) 小林敏雄・森西洋平: LESによるはく離乱流の数値的研究, 東京大学生産技術研究所報告第38巻第3号
- 2) 武本行正・阿部芳彦(1983), 自由表面をもつ3次元鉛直噴流の数値解析法・2方程式モデルを用いて, 農業土木学会論文集第106号pp.87-97,
- 3) 大久保賢治・村本嘉雄・久保田一(1983): 琵琶湖南湖の湖流解析, 京都大学防災研究所年報第26号B-2別刷
- 4) 武本行正他(1983) 堰上の流れの数値解析、農業土木学会論文集第104号pp53-59
- 5) 森西洋平(1992): LESモデルによる乱流解析手法, 水工学シリーズ92-A-2, 土木学会水理委員会.
- 6) B.P.LEONARD(1979), A Stable and Accurate Convective Modelling Procedure based on Quadratic Upstream Interpolation, Comp.Meth.Appl.Mech.&Engineering 19 59-98.
- 7) 平岡久司(1993): 植物群落内の放射伝達と運動量輸送のモデル化に関する研究, 京都大学学位論文
- 8) 富士総合研究所編, 汎用流体解析システム・FUJI-RIC/ α -FLOW, 丸善出版社
- 9) 奥田節夫(1990) 河口遷移領域におけるリンの収支, 平成元年度琵琶湖研究所委託研究報告書