

琵琶湖北湖の水質鉛直分布の季節変化に関する 簡易モデルと温暖化の影響への適用

A SIMPLIFIED MODEL TO PREDICT SEASONAL VARIATIONS OF VERTICAL
WATER QUALITY DISTRIBUTIONS IN LAKE BIWA AND ITS APPLICATIONS

細田 尚¹・細見知彦²

Takashi HOSODA and Tomohiko HOSOMI

¹正会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²非会員 工修 大阪市政策調整局 (〒530-8201 大阪市北区中ノ島1-30-20)

This paper describes a one-dimensional simplified model to predict the seasonal variations of the vertical temperature and water quality distributions through a year in Lake Biwa, which is the largest lake in Japan, using the monthly averaged meteorological data. A hydrodynamic model with a $k-\varepsilon$ turbulence model and the thermodynamic exchanges at a water surface was firstly tested to reproduce seasonal variations of temperature distributions in the vertical direction. Then the water quality parameters such as phytoplankton (Chlorophyll a), zooplankton, organic and inorganic nutrients are combined with a water temperature prediction model, using a standard modeling of ecological processes. It was shown that the calculated water quality distributions agree with the observed ones qualitatively, and the model may be applicable to predict the effect of global warming, though further investigations are required to identify the model parameters.

Key Words : environmental hydraulics, lake eco-hydraulics, water quality, temperature stratification

1. はじめに

琵琶湖北湖の水環境に関しては、これまで環流の発生・維持機構、内部静振や界面波による混合機構、プランクトンや水質分布の季節及び経年変化、底質などについて数多くの研究が行われてきた。本研究はそれらの研究に基づき、水温及び水質鉛直分布の年間を通じた変化過程をおおまかに再現できる簡易な鉛直1次元モデルを作成するとともに、水質鉛直分布の長期変化を解析するための簡易モデルの同定を目的としている。

すなわち、琵琶湖北湖の水温、植物プランクトン、動物プランクトン、栄養塩類、溶存酸素 (DO) など水質鉛直分布の季節変化を再現する鉛直1次元簡易モデルを考え、水温・水質公開データベース (琵琶湖生物地球化学生態系データベース, 京大大学生態学研究センター) を用いてモデルパラメータの同定及び簡易モデルの再現性の検証を行う。さらに、温暖化したときの底層での溶存酸素濃度など水質指標の応答について、同定された簡易モデルを用いて考察する。

2. 水温鉛直分布に関する簡易予測モデル¹⁾

(1) 基礎式

基礎式は鉛直1次元熱輸送方程式、水平方向の運動方程式、及び乱流輸送量評価のための $k-\varepsilon$ (乱れエネルギー及び乱れエネルギー散逸率) 方程式で構成される。[熱輸送方程式]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial Q_z / \partial z}{\rho_0 c_p} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

[運動方程式]

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial U}{\partial z} - \overline{u'v'} \right) \quad (2)$$

[$k-\varepsilon$ 方程式]

$$\frac{\partial k}{\partial t} = -\overline{u'v'} \frac{\partial U}{\partial z} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{D_{mz}}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + \frac{g}{\rho_0} D_{Tz} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'v'} \frac{\partial U}{\partial z} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{D_{mz}}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + c_{\varepsilon 3} \frac{g}{\rho_0} \frac{\varepsilon}{k} D_{Tz} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (4)$$

$$-\overline{u'v'} = D_{mz} \frac{\partial U}{\partial z} \quad (5)$$

ここに、 z ：鉛直方向座標(湖底を原点にして上向きに正)、 t ：時間、 T ：水温、 D_{Tz} ：鉛直方向の乱流拡散係数、 Q_z ：日射による熱フラックス、 ρ_0 ：基準密度($\rho_0=1000\text{kg/m}^3$ とする)、 c_p ：比熱、 U ：水平流速、 p ：圧力、 ν ：分子粘性係数、 k ：乱れエネルギー、 ε ：乱れエネルギー散逸率、 D_{mz} ：渦動粘性係数である。

式(3)、(4)式中のモデル定数は標準値を用いており、 $c_{\varepsilon 1}=1.44$ 、 $c_{\varepsilon 2}=1.92$ 、 $c_{\varepsilon 3}=0$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ である。

渦動粘性係数 D_{mz} は次式で評価される。

$$D_{mz} = c_\mu f_b \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad f_b = \frac{1}{1+0.2B}, \quad B = \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{k}{\varepsilon} \right)^2 \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (6)$$

f_b は成層効果による乱れの減衰効果を考慮するための関数であり、分母に流速勾配の2乗を含む勾配型リチャードソン数を用いるよりも数値計算を安定して行うことができる²⁾。 B はLaunder³⁾により提案された成層強度を表す無次元のパラメータ。また、 $c_\mu=0.09$ である。

渦動拡散係数 D_{Tz} についても同様に次式を用いる。

$$D_{Tz} = \frac{1}{P_{r10}} \frac{1}{1+0.24B} D_{mz}, \quad P_{r10} = 1/1.6 \quad (7)$$

ここに、 P_{r10} は拡散係数と粘性係数への成層効果の違いを表す乱流プラントル数である。

本研究ではさらに、風波や内部波に起因する混合を考慮するため粘性係数および拡散係数に次式を加えている。

$$D_{EX} = c_{EX} \sqrt{k_s} l_s \exp(-d_{dump} \frac{z_s - z}{l_s}) \quad (8)$$

ここに、 l_s ：混合の長さのスケール(=0.5m)、 c_{EX} ：風波などによる混合の大きさに関する定数(=0.2)、および d_{dump} ：混合の水深方向の減衰に関する定数(=0.1)。また、 $\sqrt{k_s}$ は式(9)に示す表層での乱れ強さの平方根で、風波などによる混合の速度スケールとして用いている。

(2) 計算の条件

水面($z=z_s$)におけるせん断応力は次のように表される。また、水面での乱れエネルギー k_s および散逸率 ε_s には乱れエネルギーの平衡を仮定した次式を用いた。

$$(\nu + D_{mz}) \frac{\partial U}{\partial z} = u_{*s}^2, \quad k_s = \frac{u_{*s}^2}{c_\mu^{1/2}}, \quad \varepsilon_s = \frac{c_\mu^{3/4} k_s^{3/2}}{0.4 \Delta z_s} \quad (9)$$

上式中、 u_{*s} ：水面摩擦速度、 Δz_s ：定義点の水表面からの水深(本計算では格子間隔の0.5倍)である。

気象条件から与えられる風速により水面せん断応力を計算し、運動方程式(2)中の圧力項をパラメータとして、流速を水深で積分して得られる流量が0になるように変化させた。

水面($z=z_s$)における境界条件には次式の水面・大気間の熱交換を与える⁴⁾。

$$D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_0}{\rho_0 c_p} \quad (z=z_s) \quad (10)$$

ここに、 Q_0 ：水面で単位時間に吸収される単位面積あたりの熱量である。

Q_0 は下記の各素過程の和として表される。

$$Q_0 = \beta Q_S - (Q_e + Q_c + Q_{rw} + Q_a) \quad (11)$$

ここに、 Q_S ：湖内に伝達される太陽からの放射熱、 Q_e ：蒸発による熱損失、 Q_c ：伝導による熱損失、 Q_{ra} ：有効逆放射($Q_{ra} = Q_{rw} + Q_a$)、 Q_{rw} ：逆放射、 Q_a ：大気放射。

Q_S のうち βQ_S が水面で吸収され残りが水面下に到達するが、表面から水深($z_s - z$)での熱量は指数関数による次式で評価している。

$$Q_z = (1 - \beta) Q_S \exp(-\kappa(z_s - z)), \quad \kappa = \kappa_0 + \kappa_p P \quad (12)$$

湖底($z=0$)では熱交換がないとして、次式を用いた。

$$D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

成層が不安定なとき、つまり水温の逆転成層が生じたときには、従来と同様に水面($z=z_s$)から次式で定義される z_c まで瞬時に対流混合が発生し、水温一定の混合層が形成されるとするとして計算している。

$$\int_{z_c}^{z_s} T dz = (z_s - z_c) T_{ave} \quad (14)$$

水深 H は50mとし、格子間隔 $\Delta z=0.5$ (m)とした。時間ステップを $\Delta t=0.5$ (sec)、初期水温 T_0 を全層一定で 9°C とし計算は1月1日から始めた。

放射熱の算定に用いた気象データは、全天日射量、風速、相対湿度、気温、および雲量であり、それぞれ彦根気象台での月平均値⁵⁾を用いた。気温については日最高気温の月平均値を用いた。また、計算を簡便にするため気象の日周変化は考慮していない。

(3) 計算結果の考察

水深50mの場合の、水温、流速および拡散係数の鉛直分布の年間変化を図-1に示した。

図-1の水温鉛直分布の季節変化を見ると、水深50m付近の水温は年間を通してほぼ一定に保たれており 7°C 前後である。4月から8月にかけての受熱期において、表層水温は徐々に上昇し、8月に最高となる。この間表層の水温分布は線形成層になっている。9月になり放熱期に入ると上層水温は下降し始め、熱対流の効果により上層は水温一定となる。水温一定の混合層の層厚はその後次第に深くなり、1月になると水温成層は消滅する。2月には一様な水温分布を保ちながら水温はさらに低下する。

上記の水温分布の季節変化の特徴に関する計算結果は、図-2に示した琵琶湖生物地球化学生態系データベース(京大生態学センター)の観測結果とも定量的に適合している。

3. 水質鉛直分布の季節変化に関する数値解析

水温鉛直分布の年間変化解析モデルに水質の予測モデ

ルを組み込むことにより、水質鉛直分布の季節変化の数値解析を行う。

(1) 基礎式

湖沼や貯水池の水質に関する従来の研究^{6,7,8)}をもとに、本研究で用いる水質予測モデルの基礎式を示せば以下のようなになる。

[植物プランクトン]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = (G_P - D_P)P - \frac{\partial w_{OP}P}{\partial z} + D \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (15)$$

$$G_P = S_P \cdot R_{Ph} \cdot \theta_{Ph}^{(T-20)} \frac{I_Y}{I_S} \exp\left(1 - \frac{I_Y}{I_S}\right) \cdot \frac{C_{IN}}{K_{IN} + C_{IN}} \cdot \frac{C_{IP}}{K_{IP} + C_{IP}}$$

$$D_P = R_{CP} \cdot \theta_{CP}^{(T-20)} + C_g \cdot \frac{K_{PP}}{K_{PP} + P} \cdot Z$$

[動物プランクトン]

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = (G_Z - D_Z)Z + D \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \quad (16)$$

$$G_Z = a \cdot a_z \cdot C_g \cdot \frac{K_{PP}}{K_{PP} + P} \cdot P, \quad D_Z = R_Z \cdot \theta_Z^{(T-20)}$$

[無機態窒素]

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{IN}}{\partial t} = & -\beta_N \cdot G_P \cdot P + \beta_N (1 - a_z) \cdot C_g \cdot \frac{K_{PP}}{K_{PP} + P} \cdot P \cdot Z \\ & + R_N \cdot \theta_N^{(T-20)} \cdot (C_{ON} - \beta_N P - \gamma_N Z) + E_{IN} \theta_{EIN}^{(T-20)} / \Delta z \\ & + D \frac{\partial^2 C_{IN}}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (17)$$

[有機態窒素]

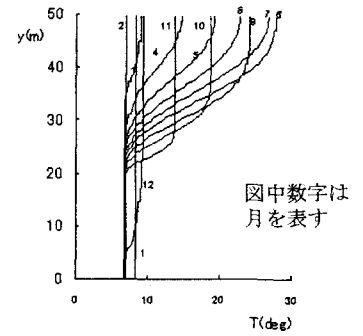
$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{ON}}{\partial t} = & \beta_N \cdot G_P \cdot P - \beta_N (1 - a_z) \cdot C_g \cdot \frac{K_{PP}}{K_{PP} + P} \cdot P \cdot Z \\ & - R_N \cdot \theta_N^{(T-20)} \cdot (C_{ON} - \beta_N P - \gamma_N Z) \\ & - \frac{\partial}{\partial z} (w_N (C_{ON} - \gamma_N Z)) + D \frac{\partial^2 (C_{ON} - \gamma_N Z)}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (18)$$

[無機態リン]

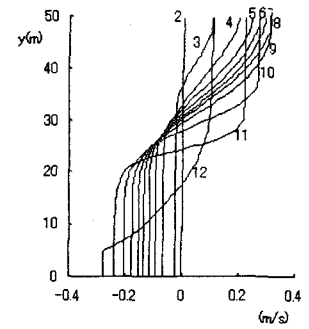
$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{IP}}{\partial t} = & -\beta_P \cdot G_P \cdot P + \beta_P (1 - a_z) \cdot C_g \cdot \frac{K_{PP}}{K_{PP} + P} \cdot P \cdot Z \\ & + R_P \cdot \theta_P^{(T-20)} \cdot (C_{OP} - \beta_P P - \gamma_P Z) + E_{IP} \theta_{EIP}^{(T-20)} / \Delta z \\ & + D \frac{\partial^2 C_{IP}}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (19)$$

[有機態リン]

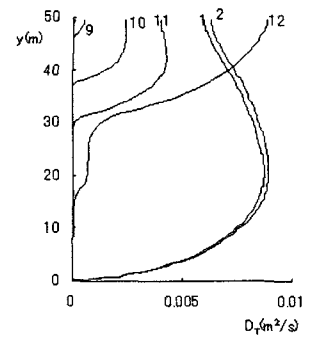
$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{OP}}{\partial t} = & \beta_P \cdot G_P \cdot P - \beta_P (1 - a_z) \cdot C_g \cdot \frac{K_{PP}}{K_{PP} + P} \cdot P \cdot Z \\ & - R_P \cdot \theta_P^{(T-20)} \cdot (C_{OP} - \beta_P P - \gamma_P Z) \\ & - \frac{\partial}{\partial z} (w_P (C_{OP} - \gamma_P Z)) + D \frac{\partial^2 (C_{OP} - \gamma_P Z)}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (20)$$



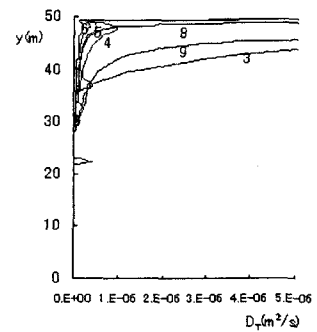
(a) 水温鉛直分布の季節変化



(b) 流速分布



(c) 非成層期の乱流拡散係数の分布



(d) 成層期の乱流拡散係数の分布

図-1 計算結果の水理諸量の鉛直分布

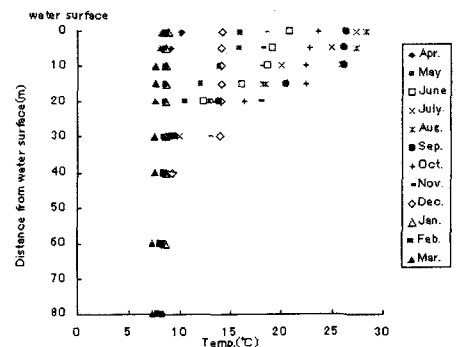


図-2 水温鉛直分布の観測結果

[溶存酸素]

$$\frac{\partial DO}{\partial t} = K_{DO1}(DO_{sat} - DO) + K_{DO2}(G_P - R_{CP} \cdot \theta_{CP}^{(T-20)})P - K_{DO3}\theta_{DO}^{(T-20)}COD - E_{DO}\theta_{DO}^{(T-20)}/\Delta z + D\frac{\partial^2 DO}{\partial z^2} \quad (17)$$

$$K_{DO3}COD \approx K_{DO4}(C_{ON} - \beta_N P - \beta_N Z)$$

記号の説明と用いたモデル定数を付録に示す。

(2) 計算結果の考察

初期条件として植物プランクトン $0.5 \mu\text{g/l}$ 、動物プランクトン 0.1mg/l 、無機態窒素 $100 \mu\text{g/l}$ 、有機態窒素 $15 \mu\text{g/l}$ 、無機態リン $10 \mu\text{g/l}$ 、有機態リン $1 \mu\text{g/l}$ の一定値を与えて10年間計算した。計算開始から10年目の表層での水質指標の季節変化を図-3に示した。

植物プランクトン濃度は早春(3月下旬4月)に急激に増大し、その後急に減少してほぼ一定値の状態が続き、秋に再び増加して晩秋に再び極大値をとっている。冬に大きな鉛直混合により表層に無機栄養塩が供給され、早春の水温の上昇に伴い、この栄養塩を活発に摂取することで植物プランクトンの急激な増加が生じている。植物プランクトンによる無機栄養塩の摂取により表層の無機態リンは直ちに枯渇するが、動物プランクトンは増加を続けるため、植物プランクトンは極大値をとった後急速に減少している。その後、夏から早秋まで表層ではリン制限の状態が再現されている。

図-4に表層の植物プランクトン、表層と底層の溶存酸素濃度の季節変化に関する観測結果(琵琶湖生物地球化学生態系データベース)を示した。植物プランクトンの季節変化の中に、春と晩秋の2回極大値が存在する場合が多く(晩秋の値の方が大きい)、計算結果の妥当性を示唆している。ただし、観測結果の濃度は計算結果より大きく、さらにパラメータの同定を行う必要がある。

また、表層の溶存酸素の観測結果には、4月に極大値、10月に極小値がみられるが、図-3の計算結果にも同時期に極値が生じており、濃度の値も観測結果に適合している。底層の計算結果も観測結果にほぼ適合している。

同様に、計算開始から10年目の植物プランクトンと溶存酸素鉛直分布の季節変化を図-5に、観測結果を図-6に示す。植物プランクトンについては計算結果の濃度が少し小さいが、分布形の季節変化は観測結果にほぼ適合している。溶存酸素も、例えば10月の分布形において成層界面上方に極小値が存在することなど、計算結果は観測結果を良好に再現していると考えられる。

(3) 温暖化の影響

上記の簡易モデルを用いて、気温が 3°C 上昇したときの水質の応答について予測した。

温暖化の前後の、底層での溶存酸素の季節変化を図-7に示した。温暖化後に底層の溶存酸素濃度が 2mg/l 程度減少していることが分かる。

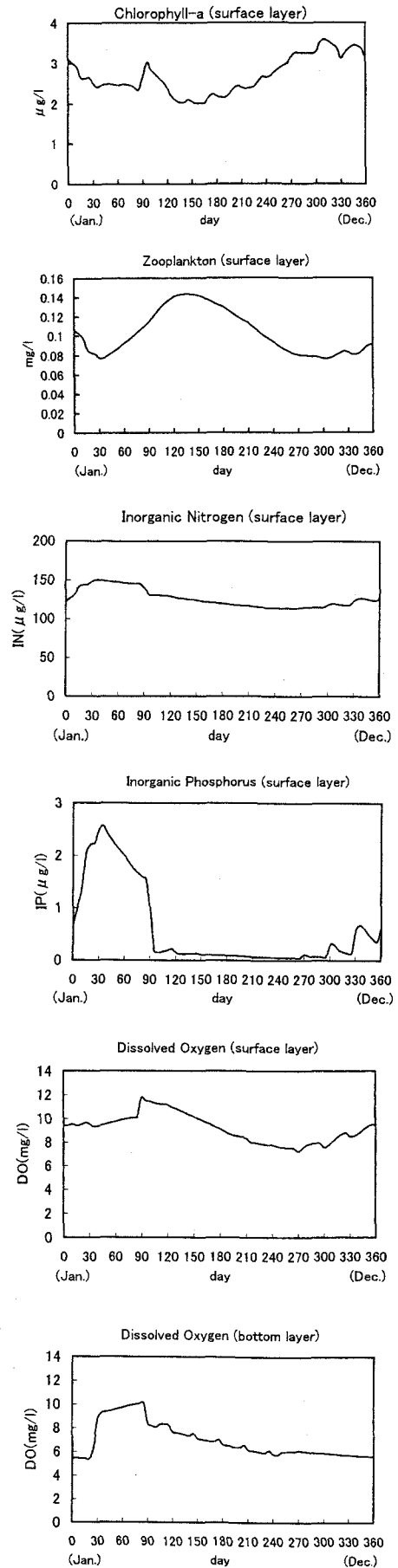


図-3 表層または底層での水質指標の季節変化

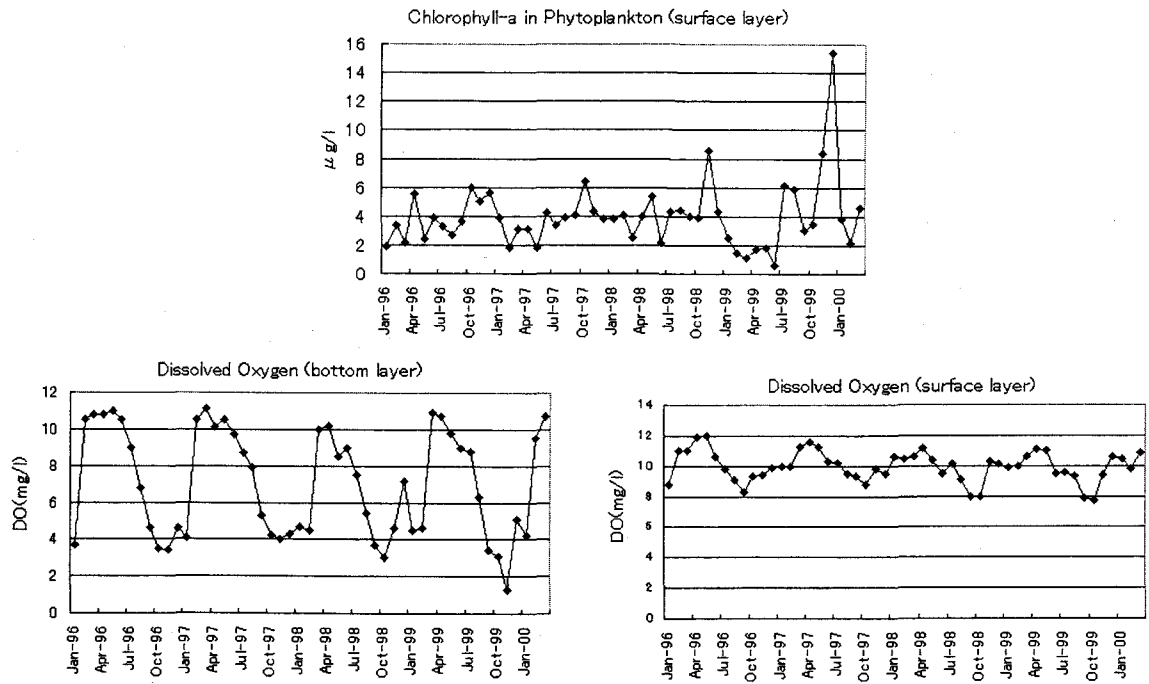


図-4 Chlorophyll-aとDOの季節変化に関する観測結果

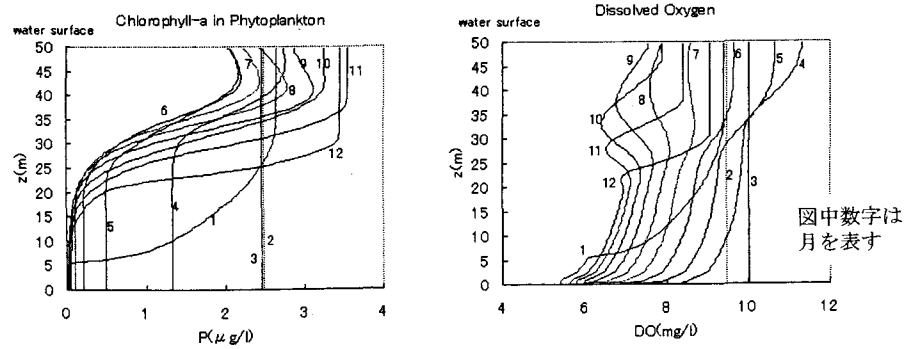


図-5 Chlorophyll-aとDOの鉛直分布に関する計算結果

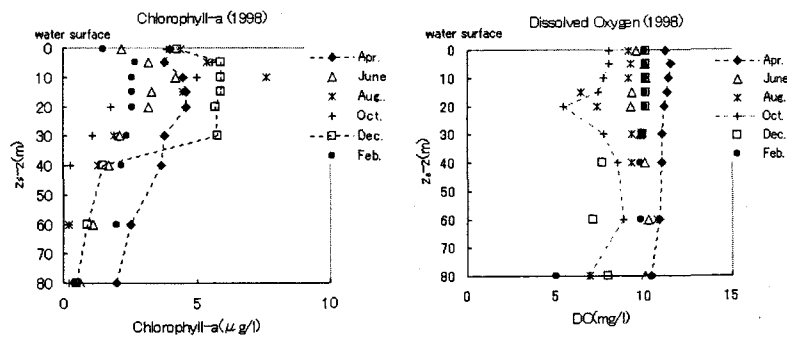


図-6 Chlorophyll-aとDOの鉛直分布に関する観測結果

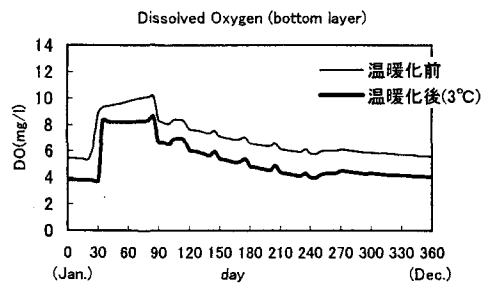


図-7 底層でのDOの季節変化に及ぼす温暖化 (3°C) の影響

4. 結論

本研究で得られた結論を箇条書きにして記述すれば次のようになる。

- (1) 琵琶湖北湖の水温及び植物プランクトン、動物プランクトン、栄養塩類、溶存酸素 (DO) など水質鉛直分布の季節変化を再現する鉛直1次元簡易モデルを考え、水温・水質公開データベース (琵琶湖生物地球化学生態系データベース、京都大学生態学研究中心) を用いてモデルパラメータの同定及び簡易モデルの再現性の検証を行った。植物プランクトンの濃度が十分適合しない等、さらにモデルパラメータの同定を行う必要があるものの、簡易モデルにより観測結果をほぼ再現できることが示された。
- (2) 簡易モデルを用いて、気温が3℃温暖化したときの溶存酸素濃度など水質指標の応答解析を行い、底層での溶存酸素濃度が3mg/l程度減少することを示した。

謝辞: 本研究を遂行するにあたり、モデルの同定に琵琶湖生物地球化学生態系データベース (京都大学生態学研究中心) として提供されている観測結果を使用した。ここに記して謝意を表す。また図面の作成等に協力を惜しまれなかった京都大学工学部地球工学科4回生 (当時) 志萱香織氏及び太田茂樹氏に深謝する。

付録

$P(\mu\text{g}_{\text{Chla}}/l)$: 植物プランクトン中のクロロフィル-a濃度
 $Z(\text{mg}_{\text{C}}/l)$: 動物プランクトン中の炭素濃度
 $C_{IN}(\mu\text{g}_{\text{N}}/l)$: 無機態窒素濃度
 $C_{ON}(\mu\text{g}_{\text{N}}/l)$: 有機態窒素濃度
 $C_{IP}(\mu\text{g}_{\text{P}}/l)$: 無機態リン濃度
 $C_{OP}(\mu\text{g}_{\text{P}}/l)$: 有機態リン濃度
 $DO(\text{mg}/l)$: 溶存酸素濃度
 $S_p = \exp(-\mu_s \cdot P)$, $\mu_s = 0.00385$: 植物プランクトンのスペース効果を表す関数
 $R_{Ph}(1/\text{sec})$: 20℃の植物プランクトン増殖率(=2/(24・60・60))
 θ_{Ph} : 植物プランクトン増殖率に対する温度係数(=1.05)
 $I_s(\text{kcal}/\text{m}^2/\text{sec})$: 最大増殖速度を与える最適日射量(=2000/(24・60・60)), $I_y \equiv Q_z$: 水中日射量
 $|w_o|(\text{m}/\text{sec})$: 沈降速度(=0.1)
 $K_{IN}(\mu\text{g}/l)$: 無機態窒素に関するミカエリス定数(=25)
 $K_{IP}(\mu\text{g}/l)$: 無機態リンに関するミカエリス定数(=2)
 $R_{CP}(1/\text{sec})$: 植物プランクトン死滅率(=0.01/(24・60・60))
 θ_{CP} : 植物プランクトン死滅率の温度補正係数(=1.05)
 $C_g(l/\text{mg}_{\text{C}}/\text{sec})$: 動物プランクトンのろ過速度(=0.25/(24・60・60))

$K_{PP}(\mu\text{g}/l)$: 飽食効果に関するミカエリス定数(=60)
 G_z : 動物プランクトン増殖率, D_z : 動物プランクトン死滅率
 $\alpha(\text{mg}_{\text{C}}/\mu\text{g}_{\text{Chla}})$: 植物プランクトン中の炭素量とクロロフィルa量の比(=0.05)
 a_z : 動物プランクトン摂取効率(=0.6)
 $R_Z(1/\text{sec})$: 動物プランクトンの呼吸による分解速度定数(=0.005/(24・60・60))
 θ_Z : 動物プランクトンの呼吸による分解速度の温度補正係数(=1.05)
 $\beta_N(\mu\text{g}_{\text{N}}/\mu\text{g}_{\text{Chla}})$: 植物プランクトン中のN/Chl. a比(=10)
 $R_N(1/\text{sec})$: 有機態窒素の無機化率(=0.027/(24・60・60))
 θ_N : 有機態窒素の無機化率に関する温度補正係数(=1.05)
 θ_{EIN} : 無機態窒素の溶出に関する温度補正係数(=1.12)
 $\gamma_N(\mu\text{g}_{\text{N}}/\text{mg}_{\text{C}})$: 動物プランクトン中のN/C比(=200)
 $E_{IN}(\text{mg}/\text{m}^2/\text{sec})$: 無機態窒素溶出速度(30/(24・60・60))
 $\beta_P(\mu\text{g}_{\text{P}}/\mu\text{g}_{\text{Chla}})$: 植物プランクトン中のP/Chl-a比(=1)
 $R_P(1/\text{sec})$: 有機態リンの無機化率(=0.2/(24・60・60))
 $\gamma_P(\mu\text{g}_{\text{P}}/\text{mg}_{\text{C}})$: 動物プランクトン中のP/Chl-a比(=26)
 $E_{IP}(\text{mg}/\text{m}^2/\text{sec})$: 底泥からの無機態リン溶出速度(=0.0/(24・60・60))
 θ_P : 有機態リンの無機化率に関する温度補正係数(=1.05)
 θ_{EIP} : 無機態リンの溶出に関する温度補正係数(=1.12)
 DO_{sat} : 飽和溶存酸素濃度 (水温の関数)
 $K_{DO1}, K_{DO2}, K_{DO3}$: 定数(=0.000035, 0.06, 0.00000002)
 θ_{DO} : CODの無機化に関する温度係数(=1.05)
 $E_{DO}(\text{mg}/\text{m}^2/\text{sec})$: DOの底泥での消費率(=15/(24・60・60))
 θ_{EDO} : 底泥でのDOの消費に関する温度係数(=1.12)

参考文献

- 1) 細田 尚・細見知彦: 琵琶湖水温鉛直分布の年間変化解析に関する簡易モデル, 日本流体力学会, 第5回環境流体シンポジウム講演論文集, pp.611-612, 2000.
- 2) 牛島 省: 温度成層流における乱流現象のモデル化とその適用性に関する研究, 京都大学博士論文, 1989.
- 3) Launder, B. E. : On the effects of a gravitational field on the turbulent transport of heat and momentum, J. Fluid Mech., Vol.67, pp.569-581, 1975.
- 4) 安芸周一: 貯水池濁水現象, 水工学シリーズ 75-A-1, 土木学会水理委員会, 1975.
- 5) 彦根地方気象台編: 滋賀県の気象, 彦根地方気象台創立100周年記念, 1992.
- 6) 宗宮 功: 第2回富栄養化問題シンポジウム 4-3 湖沼の物質循環モデル, 国立公害研究所調査報告 第18号, pp.114-155, 1981.
- 7) 土木学会水理委員会編: 平成11年度版 水理公式集, 第6編 水環境編, 1999.
- 8) 松尾直規: 貯水池における水温, 濁度ならびに富栄養化指標の予測に関する水理学的研究, 京都大学博士論文, 1982.

(2002. 4. 15 受付)