

流動場－生態系結合数値モデルによる琵琶湖の水質解析

北澤大輔¹⁾・石塚瞳¹⁾・金野祥久²⁾・熊谷道夫

要 約

3次元の流動場－生態系結合数値モデルを構築し、琵琶湖の水質解析を行った。流動場のモデルは、z座標の流体力学モデルであり、生態系モデルは7つの状態変数からなる低次生態系のモデルである。栄養塩などの化学物質やプランクトンの輸送は、移流・拡散方程式によって記述される。このモデルを用いた数値計算を行ったところ、水質空間分布の季節変動が概ね再現された。今後は、富栄養化や地球温暖化による水質の経年変化を再現、予測するために、結合数値モデルのさらなる高度化が必要である。

1. はじめに

琵琶湖における水質・底質環境は、1960年代から富栄養化の影響を受けて大きく変化し、南湖では赤潮等の問題が頻繁に発生するようになった(宗宮, 2000)。また、1980年代半ばには、化学的酸素要求量(COD)、窒素、塩素イオン、珪酸濃度や底生生物の種類が急速に変化し、生態系のレジームシフトが起こったと考えられている(滋賀県琵琶湖研究所, 2005)。1990年代には、北湖でも藻類の異常繁茂が確認されており、汚染は南湖から北湖へと確実に拡がりつつある。さらに、21世紀になってからも、湖底付近での低酸素化が進行するなど、より深刻な状況になりつつある(Kumagai and Vincent, 2003)。このような状況において、琵琶湖の生態系を保全し、近畿圏の水資源を持続的に供給するためには、琵琶湖の環境の変化を正確に把握し、環境の悪化が懸念される場合は現実的な対応策を講じる必要がある。

琵琶湖の環境変化を検証し、今後の変化を予測する方法として、数値モデルによるシミュレーションがよく用いられる。Akitomo *et al.* (2004) のまとめによると、琵琶湖の流動場に関しては、

1970年代に数値モデルを用いた研究が行われはじめ、夏季の北湖表層にみられる特徴的な複数の環流系が風成循環あるいは熱循環によって形成されることが示された。これらの環流系は、ADCP流速計による現地観測や回転水槽を用いた水理模型実験によっても確認されている。また、最近は3次元の流動場シミュレーションが行われるようになり、複数の環流系が熱循環によって再現されることが明らかとなった。同様の数値シミュレーションは、北米の五大湖(Schwab *et al.*, 2003)など他の湖沼に対しても実施されており、複数あるいは単数の環流と風成循環・熱循環との関連性について調査されている。

一方、琵琶湖の生態系に関しても、富栄養化が顕在化した1970年代より数値モデルを用いた研究が行われはじめた。Ikeda and Adachi (1978) は、琵琶湖を5つのボックスに分割した生態系モデルを開発し、南湖の富栄養化の進行を抑制するためには、陸域からの汚濁物質の負荷量を極力減らす必要があると提案した。また、Matsuoka *et al.* (1986) は、霞ヶ浦を対象とした生態系モデルを構築し、汚濁物質の負荷削減対策を行った場合は水

1) 東京大学生産技術研究所 2) 工学院大学機械工学科研究室

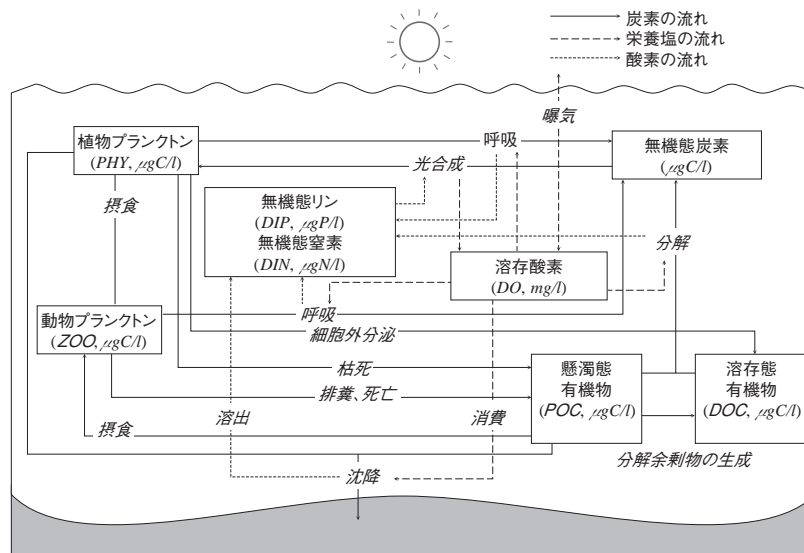


図1 琵琶湖における生態系と物質循環。

四角で囲まれた変数は状態変数(ただし無機態窒素を除く)であり、矢印で示されているのはフラックスである。(グラビア3頁参照)

質が大幅に改善されることや、湖底からの汚濁物質負荷を抑制するための施策の実施が望まれることを示した。

このように、琵琶湖の流動場と生態系に関する調査はそれぞれ独立に行われてきたが、近年は流動場が生態系に及ぼす影響に関心が集まり、流動場モデルと生態系モデルの結合モデルを用いた水質解析が行われるようになった。細田・細見(2002)は、琵琶湖を対象として、鉛直一次元の結合モデルを開発し、温暖化と溶存酸素濃度の関係について検討した。また、Chen *et al.* (2002) は、ミシガン湖において、Schwab *et al.* (2003) の物理モデルと生態系モデルを結合させた鉛直一次元モデルを構築し、生態系の季節変動を再現した。本報では、これらの研究の延長線上として、3次元の流動場－生態系結合数値モデルを用いた数値シミュレーションを行い、観測結果との比較によってモデルの再現性について検討する。

2. 流動場－生態系結合数値モデル

2.1 流動場モデル

本研究で用いる流動場モデルは、著者らがこれまで用いてきたものである(北澤・熊谷, 2005)。デカルト座標系における基礎方程式は、ブジネス近似と静水圧近似を仮定した湖水の運動方程式、

連続の式、水温の移流・拡散方程式、湖水の状態方程式である。これらの式に含まれる渦動粘性係数と渦動拡散係数は経験的なパラメータであり、適切に決める必要がある。まず、水平方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数については、Akitomo *et al.* (2004) の検討結果に従って一定値を与える。一方、鉛直方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数を評価するモデルとして、リチャードソン数に基づく成層化関数(中辻ら, 1991)、Mellor－Yamadaレベル2.5モデル(Blumberg and Mellor, 1987)、 $k-\epsilon$ モデル(Burchard and Petersen, 1999)を構築したが、石塚ら(2005)の検討結果によると、3つの乱流モデルを用いた結果に有意な差がみられなかったため、計算時間の面で経済的な成層化関数を用いる。境界条件として重要な項目は、湖面における運動量と熱フラックスの流入条件であり、本報ではバルク法によって推定される。

2.2 生態系モデル

生態系モデルは、琵琶湖における低次生態系を簡略化して構築したモデルである(Kitazawa and Kumagai, 2005)。図1に示すように、モデルの状態変数は、植物プランクトン(PHY)、動物プランクトン(ZOO)、懸濁態有機炭素(POC)、溶存態有機炭素(DOC)、無機態リン(DIP)、無機態窒

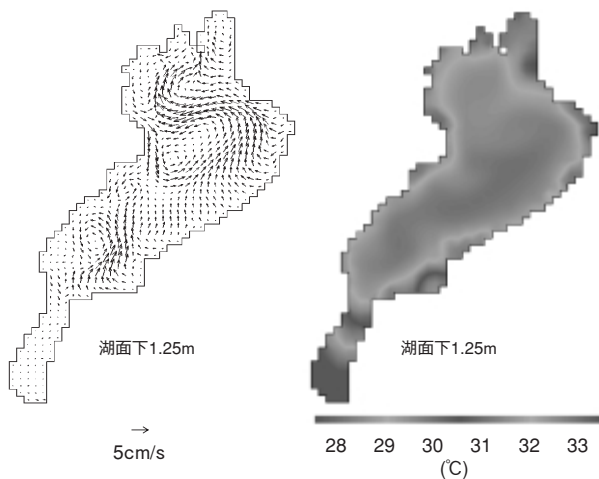


図3 8月25日の流動場と水温の水平分布（湖面下1.25m）（グラビア4頁参照）

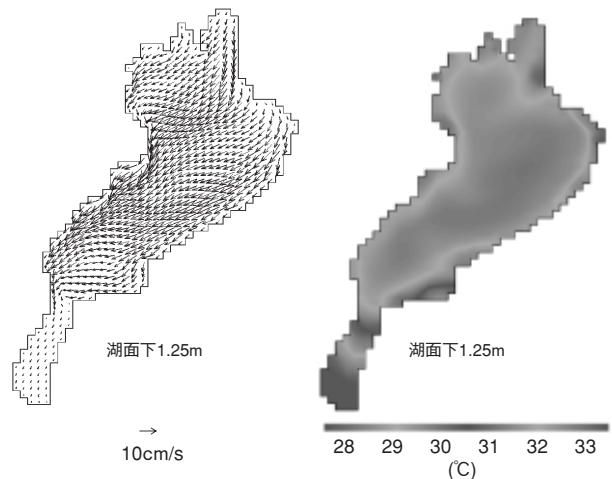


図4 8月27日の流動場と水温の水平分布（湖面下1.25m）（グラビア4頁参照）

素濃度とする。これらの濃度を与えた場合、琵琶湖への化学的酸素要求量 (COD)、全リン (T-P)、全窒素 (T-N) の負荷量がそれぞれ24000t、1000t、8000t程度であることに相当する。

4. 計算結果と考察

4.1 流動場と水温場の計算結果

本報では、流動場の数値シミュレーションに関しては、熱循環に加えて風成循環も考慮に入れている。図3に8月25日における表層の流速ベクトル図と水温の水平分布図を示す。この日は、平均風速が3.19m/sで比較的風が弱かった日である。沿岸域と沖合域との間で水温差、すなわち密度差が生じ、地形性貯熱効果により反時計回りの環流が形成されている。また、表層には湖全体を覆う1つの環流ではなく、複数の環流が現れている。一方、8月27日の表層の流速ベクトル図と水温の水平分布図を図4に示すが、この日は平均風速が7.76m/sであったため、表層流は風による影響を強く受けている。すなわち、環流を形成しうる密度差が沿岸域と沖合域との間で形成されているものの、環流系が実際にみられるのは風が弱まった場合のみであることが分かる。風成循環を考慮することは、秋季から冬季にかけての混合層の深化を再現する上で極めて重要であり、例えば今津沖（図2）における水温の鉛直分布は、熱循環のみ

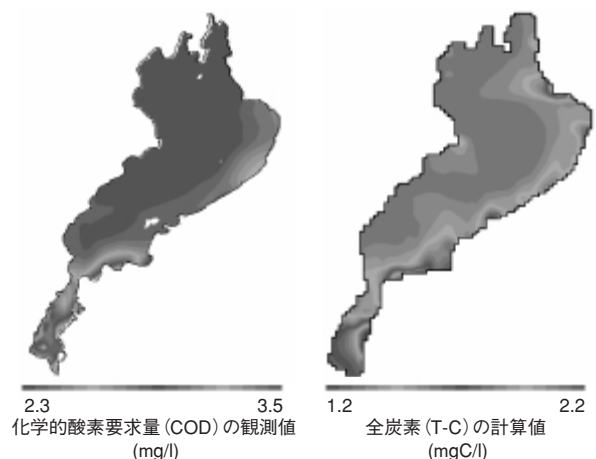


図5 観測された化学的酸素要求量と計算された全炭素濃度の年間平均値の水平分布（グラビア4頁参照）

を考慮した場合に比べ、風成循環も考慮した場合の方が観測結果との対応が良いことが報告されている（石塚ら、2005）。

4.2 流動場－生態系結合モデルの計算結果

次に、流動場－生態系結合数値モデルによる計算結果を示す。ただし、先に述べたように、生態系モデルにはまだ風成循環は考慮されていない。図5に、表層で観測された化学的酸素要求量 (COD) と計算された全炭素濃度 (T-C) の年間平均値の水平分布を示す。CODの水平分布は、月に1回の頻度で琵琶湖表層47地点において観測されたデータをもとにして描かれている。COD、T

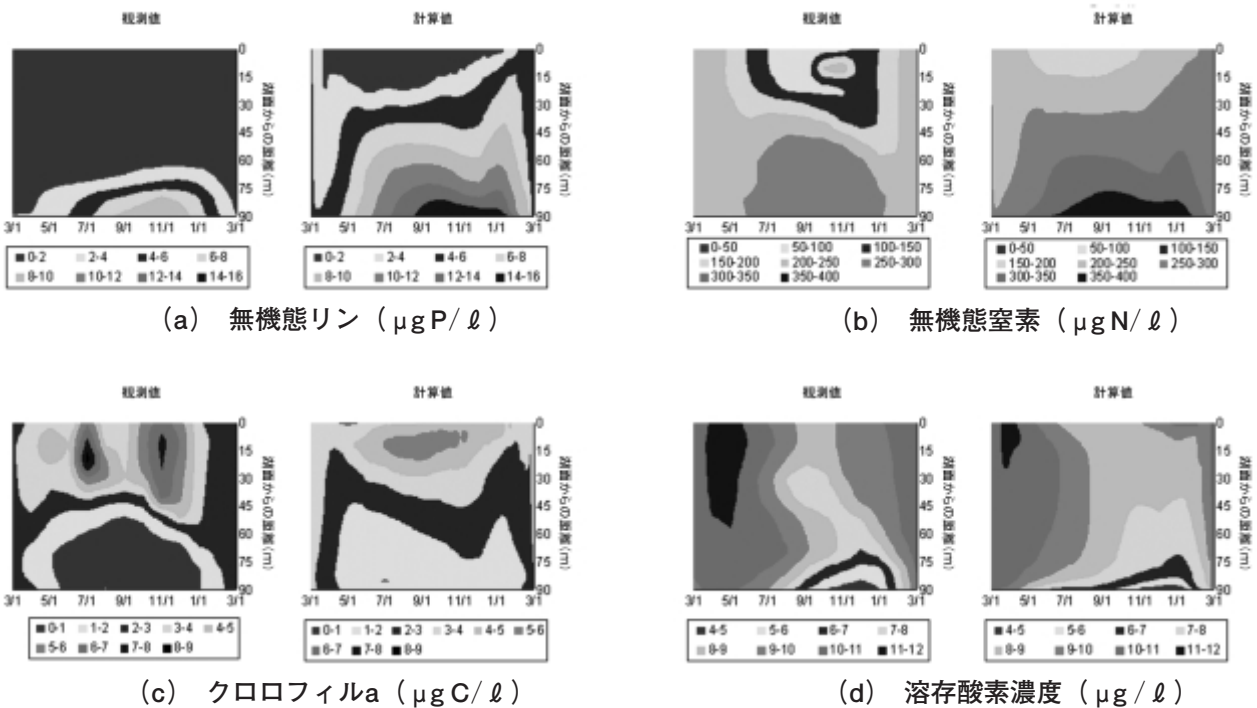


図6 北湖今津沖における水質鉛直分布の季節変動に関する観測結果と計算結果の比較（グラビア5頁参照）

—Cともに水深が小さい南湖で大きな値となっており、南湖と北湖の境界線において値が大きく変化する。これは、南湖では系外からの汚濁物質の負荷が相対的に多いのに加え、湖底に沈降した有機物が栄養塩として速やかに水中に回帰するためである。また、北湖においても、沖合域と沿岸域とで全炭素濃度が異なっており、東岸域で濃度が最も高く、西岸域、沖合域の順に濃度が低い。まず西岸域よりも東岸域の方がCOD値やT-C値が大きいのは、東岸域では水深が小さいために湖底からの栄養塩回帰があり、また汚濁物質の負荷量が相対的に多いためである。一方、沿岸域と沖合域とで水質に大きな違いが見られるのは、夏季の反時計回りの環流系や、冬季の時計回りの環流系の存在による影響が大きい。すなわち、陸域から負荷された汚濁物質は、強風による流れや洪水流による影響を受けない限り、環流の中心部にすぐに流れ込むことはない。したがって、沖合域と沿岸域とではそれぞれ異なった生態系が形成される。以上に述べた特徴は、全リン（T-P）や全窒素（T-N）など他の水質項目にもあてはまる（Kitazawa and Kumagai, 2005）。

次に、琵琶湖北湖の今津沖（図2）における水質の鉛直分布に着目する。図6は、無機態リン、無機態窒素、クロロフィルa、溶存酸素濃度の鉛直分布の季節変動を示す。成層の発達とともに、表層20m付近までは植物プランクトンが活発に光合成を行い、クロロフィルa濃度が上昇する。同時に、植物プランクトンは栄養塩を消費するため、栄養塩濃度は急速に低下する。特に、無機態リン濃度は春季から秋季にかけて常に低いレベルに保たれており、無機態窒素よりも強く一次生産を制限している様子が分かる。一方、成層よりも下層では沈降してきた有機物の分解により栄養塩が再生するため、栄養塩濃度は相対的に高くなる。ただし、計算結果では観測結果に比べて栄養塩濃度が高くなっているが、この原因として、リンに関しては鉄やマンガンなどの懸濁無機物質との共沈が考慮されていないこと、窒素に関してはリン不足時に窒素を消費して成長するシアノバクテリアの存在が明確に考慮されていないことなどが挙げられる。また、本報のモデルでは、湖底からの栄養塩の溶出は、沈降した有機物の量に依存するものと仮定しており、水温や溶存酸素濃度と溶出量

との関連性を含んだ底質モデルを用いていないことも原因であると考えられる。最後に、溶存酸素濃度の変化をみてみると、溶存酸素濃度は、鉛直混合と溶解度の上昇により、冬から春にかけて湖全体ではほぼ飽和酸素濃度となる。成層期に水温の上昇とともに溶解度は低くなるが、表層では飽和酸素濃度のレベルに保たれる。一方、下層では、表層から沈降してきた有機物の分解に酸素が消費されるため、溶存酸素濃度は少しずつ減少し、12月頃には極小値4 mg/l程度となる。その後、湖面冷却に伴う全循環により、表層の飽和酸素水が底層に供給され、溶存酸素濃度は飽和酸素濃度近くにまで回復する。これら一連の過程が、流動場－生態系結合数値モデルによって再現されている。

5. まとめ

本研究では、3次元の流動場－生態系結合数値モデルを開発し、琵琶湖の水質解析を行った。その結果、琵琶湖における水質の季節変動を概ね再現することができた。ただし、富栄養化や地球温暖化が水質に及ぼす影響を調査するためには、水質の経年変化を再現、予測することが重要であり、そのためには流動場モデルのさらなる精度向上と複数種のプランクトン、底質モデルの導入などによる生態系モデルの高度化が必要である。

備考

本研究の一部は、平成14～16年度の滋賀県琵琶湖研究所からの委託研究、および平成17年度の滋賀県琵琶湖・環境科学研究センターからの委託研究として行われた。ここに謝意を表す。

引用文献

Akitomo, K., M. Kurogi and M. Kumagai(2004): Numerical study of a thermally induced gyre system in Lake Biwa. *Limnology*, 5, 103-114.
Blumberg, A. F. and G. L. Mellor(1987): A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In *Three Dimensional Coastal Ocean Models*, N. S.

Heaps (ed.), 1-16, American Geophysical Union, Washington, D. C.
Burchard, H. and O. Petersen(1999): Models of turbulence in the marine environment - a comparative study of two-equation turbulence models. *Journal of Marine Systems*, 21, 29-53.
Chen, C., R. Ji, D. J. Schwab, D. Beletsky, G. L. Fahnenstiel, M. Jiang, T. H. Johengen, H. Vanderploeg, B. Eadie, J. W. Budd, M. H. Bundy, W. Gardner, J. Cotner and P. J. Lavrentyev(2002): A model study of the coupled biological and physical dynamics in Lake Michigan. *Ecological Modelling*, 152, 145-168.
細田尚・細見和彦 (2002) : 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. *河川技術論文集*, 8, 495-500.
Ikeda, S. and N. Adachi(1978): A dynamic water quality model of Lake Biwa. -A simulation study of the lake eutrophication-, *Ecological Modelling*, 4, 151-172.
石塚暉・北澤大輔・金野祥久 (2005) : 琵琶湖物理環境の数値計算における乱流モデルの比較検討. 第19回数値流体力学シンポジウム, C2-4.
北澤大輔・熊谷道夫 (2005) : 琵琶湖における物理環境の数値シミュレーション. *日本流体力学会年会2005*, AM05-09-004.
Kitazawa, D. and M. Kumagai(2005): Numerical simulation on seasonal variation in dissolved oxygen tension in Lake Biwa. *The 2nd Joint Japan/Korea Workshop on Marine Environmental Engineering*, 71-90.
Kumagai, M. and W. F. Vincent(2003): *Freshwater Management. Global Versus Local Perspectives*, Springer-Verlag, Tokyo.
Matsuoka, Y., T. Goda and M. Naito(1986): An eutrophication model of Lake Kasumigaura. *Ecological Modelling*, 31, 201-219.
中辻啓二・許再寧・室田明 (1991), 三次元表層密度流の数値実験, *土木学会論文集*, 434, 19-28.
宗宮功 (2000) : 琵琶湖, その環境と水質形成. 技報堂出版.
Schwab, D. J. and D. Beletsky(2003): Relative effects of wind stress curl, topography, and stratification on large-scale circulation in Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research*, 108, 3044, doi10, 1029/2001JC001066.
滋賀県琵琶湖研究所 (2005) : 平成14～16年度琵琶湖北湖低酸素化問題検討委員会最終報告書.