

北浦の優占藻類遷移の生態系シミュレーション

2010年3月 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 環境システム学専攻

86659 國料 尚貴 指導教員 多部田 茂 准教授

キーワード：生態系モデル、水質浄化、優占藻類、アオコ、環境影響評価

1. 背景・目的

北浦は、茨城県南東部に位置する南北に細長い富栄養湖で、湖面積 36km²、平均水深 4.8 mの浅い湖である。北浦の下流に設置された常陸川水門の操作により水位管理が行われ、水道用水や工業用水として利用されている。

1960年代より周辺の産業廃水や生活排水が大量に流入し富栄養化が進行したため、富栄養化対策として茨城県は昭和 56 年に霞ヶ浦富栄養化防止条例を制定した。それ以降霞ヶ浦では河川対策、生活排水対策、アオコ対策等が施行されている。その結果、湖内水質は改善傾向となったものの、近年は横ばい傾向で環境基準を超過し、富栄養化に伴う *Microcystis* や *Cyclotella* 等のプランクトンの大量発生が報告されている¹⁾。これらのプランクトンのうち *Microcystis* はミクロキスティンと呼ばれる肝臓毒を持つため、魚類に悪影響を及ぼし北浦の漁業に被害をもたらしている。2008 年以降は、従来の *Microcystis* や *Cyclotella* といった藻類種に変わり *Planktothrix* の大量発生が報告されている。*Planktothrix* はカビ臭を有するため、水道用水に混入すると、カビ臭除去のための対策が必要とされる。このように、北浦では優占藻類種の遷移に伴った様々な問題が発生している。

優占藻類の遷移に関わる重要な環境要因として、窒素濃度、リン濃度、NP 比、日射、水温、流れ、動物プランクトンからの捕食圧、栄養塩類の細胞内貯留、混合状態などが挙げられる。これらの環境要因の影響は、培養実験や現地観察などによりその影響が確認されている。一方で、優占藻類の遷移に関する数値シミュレーションも行われているものの、特定の期間や単一の環境要因を抽出して計算を行ったものである。

このように優占藻類の遷移について様々な研究が行われ原因も指摘されているものの、実際の湖で発生している優占種の遷移はこれらの環境要因が相互に影響しており、単一の環境要因では説明できないことが多い²⁾。特に、北浦の優占藻類種の遷移には様々な環境要因に加え、水門操作による西浦の湖水の流入が影響していると考えられ、より多面的な影響を考慮した解析が必要である。本研究で

は藻類に対する複数の環境要因の影響や異なる湖からの流入による影響を考慮するために、物理モデルと化学生物モデルを結合した生態系モデルによる数値シミュレーションを行う。

本研究の目的を以下に述べる。まず、北浦における優占藻類である *Microcystis*、*Planktothrix*、*Cyclotella* の 3 種を区別出来る生態系モデルを構築する。そして、陸域からの流入負荷量や底質からの溶出、水門操作による西浦の湖水の流入等を考慮した計算を行い、北浦の優占藻類の遷移を再現する。モデルを用いて、有害藻類 (*Microcystis*、*Planktothrix*) の発生を抑える方法を検討する。

2. 数値モデル

モデルは物理・化学生物結合モデルを使用する。物理過程の基礎方程式は、静水圧近似を仮定した運動方程式、連続の式、水温の移流・拡散方程式、水温の関数である密度の状態方程式からなる。化学・生物過程は動物・植物プランクトン、栄養塩、有機物、溶存酸素を状態変数とし、それらの挙動は流れ場に依存するものと仮定して移流・拡散方程式によって解いた。運動方程式および水温の移流・拡散方程式に含まれる水平方向の渦動粘性係数と渦動拡散係数についてはパラメータの感度解析を行い一定値で与えた。鉛直方向の渦動粘性係数および渦動拡散係数は成層化関数で計算した値を用いた。

内部負荷として、底質からの栄養塩負荷を

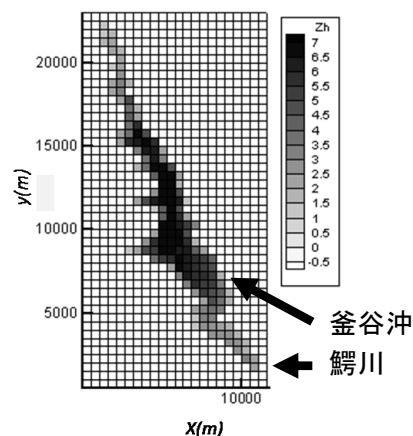


図 1. 北浦の計算領域

考慮し、外部負荷として鰐川を通じた順流・逆流を考慮出来るようにした。

本研究では、植物プランクトンとして *Microcystis*、*Planktothrix*、*Cyclotella* の 3 種を扱うが、3 種を区別するためにモデルの変更及び、パラメータの調整を行った。高温阻害を考慮出来るモデルに変更し、各プランクトンの最適温度を与えた。また、*Microcystis* はガス胞により沈降速度を変えることで他のプランクトンに比べ有利に増殖出来るとされるため、Basak の浮上・沈降モデルを加えた³⁾。各プランクトンの栄養塩による光合成の制限の違いを考慮するために、栄養塩摂取速度に関わる反飽和定数の調整を行った。

3. 計算条件

湖底面では、運動学的条件、海底摩擦条件を与え、熱フラックスはないものとする。また、湖面では力学的条件、運動学的条件、風摩擦条件、熱フラックス条件を考慮し、風摩擦と熱フラックスの条件についてはバルク式に基づき推定した。

計算格子は図 1 のように水平方向 500m とし、鉛直方向は 50cm の格子で分割し、最大水深は 7.5m とした。計算期間は 2008 年以降の優占藻類の遷移が確認でき、検証用データの揃っている 2005 年 6 月 28 日～2009 年 3 月 16 日とした。計算に用いる気象データとして水戸の気象観測データおよび鹿嶋水道沖の風向、風速データ、西浦の湖上の気温データを線形補間して入力した。河川条件は、公共用水域および地下水の水質測定結果を参考に主要 8 河川の流量及び栄養塩、有機物、溶存酸素、水温を与えた。鰐川を通じた湖水の順流・逆流は、鰐川の流量に外浪逆浦で観測された栄養塩、有機物、溶存酸素、水温、植物プランクトンを掛けたものを与えた。

4. モデルの検証

栄養塩濃度の季節変動及び経年変化の様子を観測値と比較した。図 2 は釜谷沖における DIP 濃度の観測値と計算値である。DIP 濃度は 6 月以降に上昇し始め 8 月頃にピークを迎える。計算結果では上記の特徴がよく捉えられている。また、2006 年以降に DIP 濃度が年々高くなる様子が再現出来た。図 3 は釜谷沖における DIN 濃度の観測値と計算値である。観測値は 12 月～3 月頃に高濃度を示し

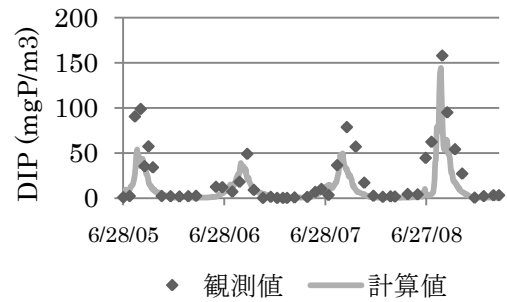


図 2. 釜谷沖の DIP 濃度の観測値及び計算値

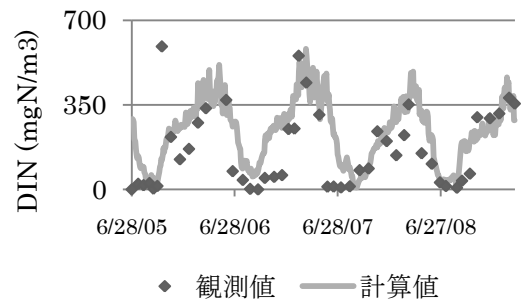


図 3. 釜谷沖の DIN 濃度の観測値及び計算値

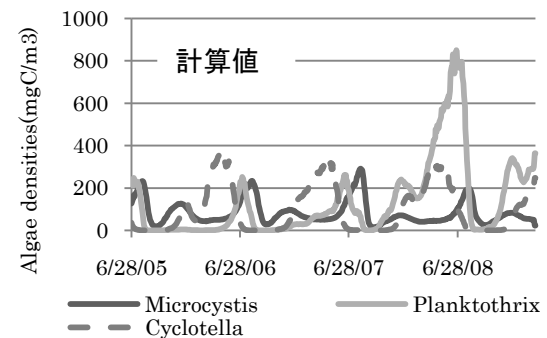
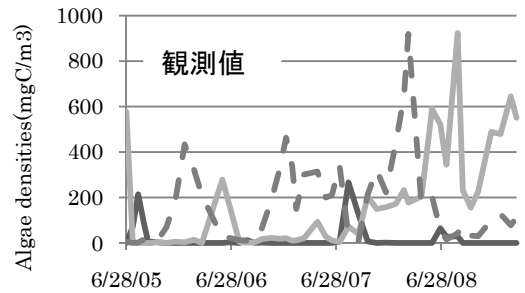


図 4. 釜谷沖の植物プランクトン濃度の観測値及び計算値

夏季は低濃度を示すが、計算結果も上記の特徴がよく捉えられている。

次に植物プランクトンの季節変化及び経年変化の様子を観測値と比較した。図 4 は釜谷沖における植物プランクトンの観測値及び計算結果を比較した図である。計算値を見てみると、*Microcystis* と *Planktothrix* が夏季に

増え、Cyclotella が冬季から春季に増える様子が再現出来ている。そして、2008年以降に Planktothrix が大量発生し 優占藻類が Cyclotella から Planktothrix に遷移していく様子が再現出来た。

5. 結果・考察

5.1 汚濁負荷が与える影響

北浦の水質は汚濁負荷の影響を受けている。外部負荷として河川からの流入及び鰐川からの流入、内部負荷として底泥からの溶出を採りあげ、それぞれの負荷が北浦の水質に与える影響を評価した結果、底泥からの溶出が最も影響を与えていることが分かった。図 5、図 6 に釜谷沖における栄養塩濃度の比較を示す。底質の負荷を無くした場合、DIP の変化率は凡そ -60% 程で大きな地域差は見られなかった。DIN の変化率は -60% ~ -90% であり、特に巴川沖の変化率は他の場所に比べ小さい。これは巴川及び鉾田川から大量の DIN が供給されるため、底質が与える影響が相対的に小さくなったためである。

5.2 優占藻類の遷移理由の考察

2008 年以降に発生した優占藻類の遷移理由について考察する。特に、優占藻類が遷移した理由として Planktothrix の大量発生が挙げられるため、Planktothrix の 2008 年以降の大量発生に着目して考察を行う。

Planktothrix を含めた藍藻類は低い DIN/DIP 比の時に優占する傾向がある。

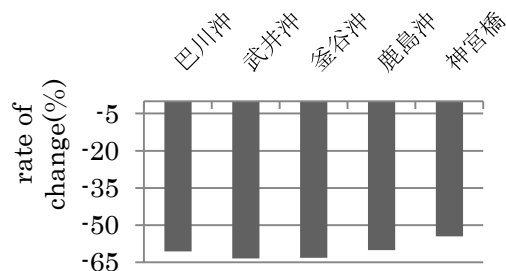


図 5. 底質負荷を無くした場合の DIP 濃度の変化率

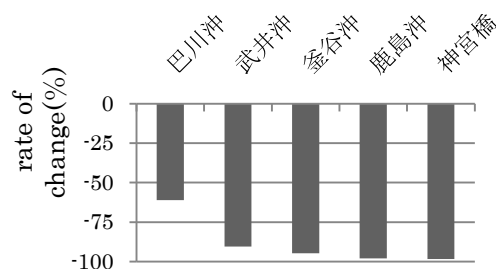


図 6. 底質負荷を無くした場合の DIN 濃度の変化率

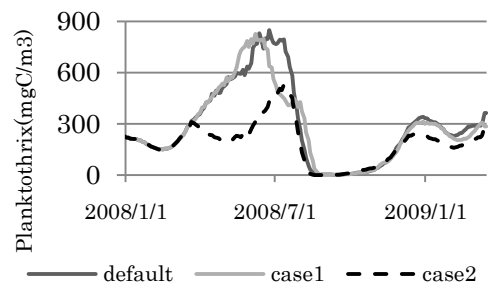


図 7. 内部影響の変化及び外部影響の変化による Planktothrix の生物量の比較

また、藍藻類は珪藻類に比べて成層時に優占しやすいと言われている。

2007 年～2009 年の北浦湖内の内部環境の変化について調べると DIN/DIP 比は低下傾向にある。また、表層と底層の温度差を見てみると 2007 年は最大 2.5℃程度に対し 2008 年は最大 3.5℃であるため、成層も強くなっている。外部環境として鰐川からの Planktothrix の流入量を見てみると、2008 年以降に増加しており、北浦の Planktothrix の生物量にも影響を与え得ると考えられる。このように、2008 年以降の北浦の内部環境及び外部環境は、Planktothrix にとって優占しやすい条件だったことが分かるが、上記の考察では内部環境の変化と外部環境の変化のどちらが主要な原因であるかまでは分からない。2008 年度以降に発生した優占藻類の遷移が発生した理由が、内部環境の変化に依るものか、鰐川から流入したプランクトン量に依るのかを調べた。

内部環境の変化は気象条件の変化に影響を受けているとし、以下の 3 ケースを比べることにより遷移理由を考察した。

- default
- 2008/3/16～2009/3/16 の気象条件として 2007/3/16～2008/3/16 の気象条件を入力し 2008/3/16 以降の気象による影響を無くしたもの (case1)
- 2008/3/16～2009/3/16 の鰐川の逆流に関する入力データとして 2007/3/16～2008/3/16 のデータを入力し 2008/3/16 以降の鰐川の影響を無くしたもの (case2)

図 7 は内部影響の変化及び外部影響の変化による Planktothrix の生物量の比較を示した図である。case2 の計算結果で Planktothrix が減少していることが分かる。この結果から優占藻類の遷移が発生した理由は、鰐川の逆流の影響で Planktothrix が大幅に増加し、こ

れまで優占藻類であった *Cyclotella* の生物量を超えたためだと考えられる。

5.3 有害藻類の対策の検討

本節では北浦の優占藻類のうち有害プランクトン(*Microcystis*、*Planktothrix*)に焦点をあて、どのような湖沼管理をすれば効率よく有害プランクトンを減らすことが出来るかを検討する。本研究では浚渫、逆流の規制、鉛直混合の促進の3つを検討し、釜谷沖での効果を確かめた。

浚渫による溶出速度の削減効果を溶存態リンで60%、溶存態窒素で50%と見積もり計算を行った。図8は浚渫を行った場合の植物プランクトン及び栄養塩濃度の変化率である。浚渫を行うと、DIP濃度が約40%減少し、DIN濃度が約60%減少する。栄養塩濃度の減少に伴い、有害プランクトンである*Microcystis*は90%減少し、もう一種の有害プランクトンの*Planktothrix*は30%減少することが分かった。

逆流による湖水の流入量を現状の30%に減らした状態で計算を行い有害藻類増減を調べた。図9は逆流を規制した場合の植物プランクトン及び栄養塩濃度の変化率である。逆流の規制量を増やすに伴い、鰐川を通した*Planktothrix*の供給も少なくなるため、*Planktothrix*は減少している。しかし、もう一種の有害藻類である*Microcystis*は競合種

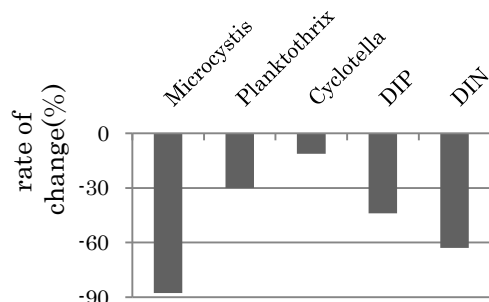


図8. 浚渫を行ったときの植物プランクトン及び栄養塩の変化率

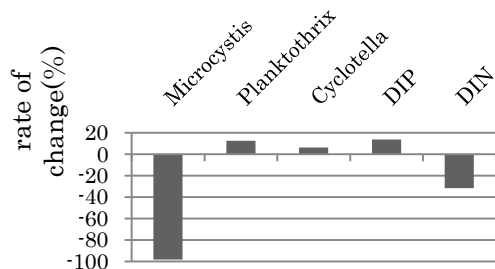


図9. 逆流の規制(x0.3)を行ったときの植物プランクトン及び栄養塩の変化率

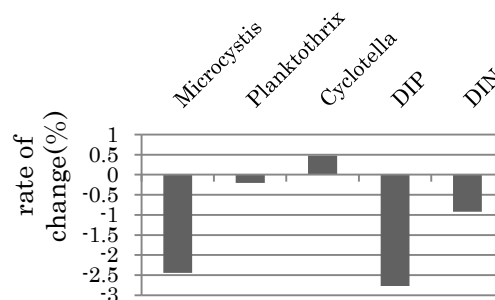


図10. 鉛直混合の促進を行ったときの植物プランクトン及び栄養塩の変化率

である *Planktothrix* が減少することにより増加することが分かった。

一般的に成層状態では軽い藍藻が優占しやすく、混合状態を促進した状態では重い珪藻類が優占しやすいとされる。従って、混合を促進することは有害藻類(藍藻)を抑えるうえで有効な対策になり得ると考え、混合状態を促進した条件で計算を行った。具体的には釜谷沖に相当するセルの鉛直方向の拡散係数を大きくすることで鉛直混合を促進して計算を行った。図10は鉛直混合を促進した場合の植物プランクトン及び栄養塩濃度の変化率である。混合が促進され、混合に不利な藍藻が減少しているものの、植物プランクトン量にはほとんど影響を及ぼさないことが分かった。

以上の結果より、有害藻類の対策には浚渫による底質負荷の削減が最も効果があることが分かった。

6. 結論

本研究で得た結論を以下に述べる。

- *Microcystis*、*Planktothrix*、*Cyclotella*の3種を考慮した生態系モデルを構築し、北浦の優占藻類の遷移を再現することが出来た。
- 北浦の主な汚濁負荷源は底質からの溶出である。
- 有害藻類を減らすためには浚渫が効果的であることが分かった。

参考文献

- 1) 茨城県生活環境部 霞ヶ浦対策課：霞ヶ浦学入門、八幡印刷株式会社, 268 p.
- 2) 吉永育生：農業用調整池ならびに水田中の水質環境の形成に関する研究、農工研報 47, pp.31、2007
- 3) Bask Guven, Alan Howard : Modelling the growth and movement of cyanobacteria in river systems, Science of the Total Environment 368, pp.898, 2006