

霞ヶ浦土浦入を対象に構築したアオコ予測システムの紹介

長濱 祐美¹, 阿部 真己², 松本 俊一¹, 福島 武彦¹¹ 茨城県霞ヶ浦環境科学センター, ² いであ株式会社 国土環境研究所

キーワード:アオコ, 回帰, 生態系モデル, 深層学習, 行政利用

抄録

霞ヶ浦土浦入におけるアオコ発生の問題に対し、迅速な対策のためにアオコ発生の予測が求められている。そこで本研究では、アオコ予測のため、アオコのシードとなる湖底泥中の *Microcystis* に着目し、その存在量を明らかにした。また生態系モデルを用いて、アオコ発生メカニズムを検証した。その結果、底泥中には *Microcystis* が存在し、湖水中に回帰している可能性が示された。一方で生態系モデルによる検証からは、底泥中からの回帰だけでなく、風による輸送の影響も大きいことが示され、底泥中の存在量のみでは予測が難しいことが示された。これらの結果を受け、生態系モデルに深層学習モデルを組み合わせたハイブリットモデルを構築したところ、過去のアオコ発生状況を再現でき、アオコ予測システムが構築できた。

1. はじめに

霞ヶ浦では、夏季に *Microcystis* を主とするアオコが発生することがある。なかでも土浦港をはじめとする土浦入湾奥部(図1)は JR 土浦駅に近く周辺人口が多いため、景観の悪化や腐敗臭などの面からアオコの発生が社会問題化しやすい。茨城県ではアオコフェンスの設置や、アオコ回収、土浦港浄化施設の設置などの対策を講じているが、効果的な運用のためにアオコの発生場所や量の予測が必要とされている。これに対し、茨城県霞ヶ浦環境科学センターでは、水質調査結果をまとめた「アオコ情報」を発信している。そのなかでは、湖水質と気象予報から翌週のアオコの発生しやすさを A~C で評価しているが、もっと早いタイミングでの予報や、面的な分布の情報が必要とされている。

アオコが発生する水域では藍藻類のコロニーや休眠細胞が底泥中に高密度で存在していることが多く、これらが水中へ回帰することで、アオコの発生を促進させていると考えられている^[1]が、霞ヶ浦全域において、底泥に堆積した *Microcystis* 細胞濃度を測定した例はなく、回帰量も不明である。

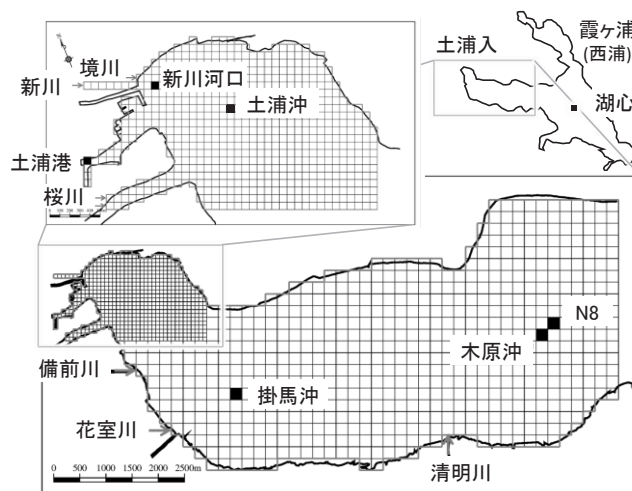
また、アオコの発生予測は需要があるものの極めて難しく、運用事例・研究事例は少ない^[2]。北澤ら^[2]は、湖水流動と水質変動のシミュレーションモデルを構築し、アオコの発生を説明できるモデルが構築できたとしているが、実運用については言及がない。芹沢ら^[3]は神奈川県相模湖と津久井湖を対象に2変数数理モデルを作成して検討した結果、アオコの発生量、発生パターンの変動には生態学的、生理学的要因とともに偶発的要因も深く関与していると考察している。

これらのことから、本研究では①底泥中の *Microcystis* 量を把握し、回帰量を検討した^[4]。次に、②土浦入におけるアオコ発生メカニズムを検討した^[5]。そしてこれらの知見をもとに③アオコ予測システムを構築し、その応用可能性について検討した^[6]。

2. 方法

2.1 底泥中の *Microcystis* 量の把握^[4]

2015 年に、新川河口、土浦港、土浦沖、掛馬沖、湖心(図 1)で底泥を採取した。なお、新川河口の調査地点は、図1に示すよりも河道内に寄っている。改良した湖沼型コアサンプラー(離合社)を用いて 0~1cm 深さの底泥を採取し、rDNA 用チューブにいれ-80℃で保存した。その後、Extrap Soil DNA Kit Plus ver.2 (J-BIO)を用いて rDNA を抽出・精製し、リアルタイム PCR(7500

図 1 対象水域と地点図^[5]

Real-Time PCR System, Applied Biosystems)を用いて遺伝子量を測定した。その際、既知細胞濃度培養液からのrDNA抽出液を段階希釈したものを標準列として用いて、細胞濃度が未知であるサンプルのCt値から細胞濃度へと換算した。

2.2 アオコ発生メカニズムの検討⁵⁾

Microcystis の底泥からの回帰、鉛直移動、風による輸送に着目し、アオコ発生を説明する生態系シミュレーションモデル(以下、生態系モデル)を構築した。生態系モデルは、流体力学の基礎方程式を直交座標系において差分化して解く流動サブモデルと、物質循環を考慮した水質サブモデルから構成した。計算範囲・格子サイズは図1のとおり、層分割は0.5mである。植物プランクトンは*Microcystis*とその他の植物プランクトンを想定し、水温と栄養塩に対する応答を変化させて表現した。また、底泥からの*Microcystis*の回帰フラックスは、底泥中の存在量と湖底に到達した光量で説明されると仮定した。鉛直移動は、沈降速度を時間別に与えることで表現した。風による輸送は、水柱第1層上部にアオコ用の仮想層(第0層)を設定することで表現した。アオコ発生メカニズムの検討は、構築した生態系モデルを用い、表1に従ってそれぞれの因子の寄与を変化させ、計算結果と実測値を比較することで行った。

2.3 アオコ予測システムの構築⁶⁾

アオコの予測可能性を、二つのモデルを用いて評価した。一つは方法2.2で構築した生態系モデル、もう一つは生態系モデルに統計モデルを組み合わせたモデル(以下、ハイブリッドモデル)である。統計モデルは、畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network: 以下、CNN)と変分オートエンコーダ(Variational Autoencoder: 以下、VAE)を組み合わせた。統計モデルのための学習用データは湖心(36° 02' 17" N, 140° 24' 15" E)表層20または50cmにおけるフィコシアニン濃度とし、既存モデルを用いて算出した計算値を日平均値に圧縮したものと、実測値を基に補間した日平均値のデータセットを用いた。期間は2007年から2016年とし、*Microcystis*が増殖する6月から9月を対象とした。実測値は、2012年から2017年は、およそ週に1度の頻度で当センターによって配信された「アオコ情報」におけるフィコシアニン濃度を用いた。2012年以前は、国立環境研究所の霞ヶ浦データベース⁷⁾の*Microcystis*細胞体積を用いて補間した。*Microcystis*細胞濃度からフィコシアニン濃度への換算は、2013-2015年の*Microcystis*細胞濃度とフィコシアニン濃度の関係

から求めた係数 7.3×10^6 を掛けて行った。

また、生態系モデルは気象条件によって計算結果が変化するため、将来予測のためには気象予測が必要であった。そこで、気象庁の暖候期予報と三カ月予報を利用した。2007年から2016年までの気温と降水量から、平年より高い(多い)年と平年より低い(少ない)年を割り出し、暖候期予報と三カ月予報の結果に従って適当な年度を選び、その年の気象を予測値として与えた。

3. 結果と考察

3.1 底泥中の*Microcystis*量⁴⁾

土浦入の底泥表層には*Microcystis*細胞が存在し、6月初旬に減少し8月にかけて増加する傾向がみられた(図2)。底泥表層中の*Microcystis*細胞数の減少要因として、底泥からの回帰のほか、降雨に伴う流出と、底泥中での分解が考えられたが、降水量と濁度には特徴的な上昇が見られなかったため、湖水中への回帰に伴うものであると示唆された。そこで、この期間における5地点の平均減少濃度を日数で割り、土浦入の底泥における*Microcystis*細胞のみかけの回帰速度を算出したところ、 5.6×10^2 cells/g-wet sediment/dayと示された。

3.2 アオコ発生メカニズム⁵⁾

流動サブモデルを用いた物理場の再現状況は良好であった。アオコ発生機構検討のための比較結果を図3に示す。Case 1とCase 2を比較すると、風による拡散の影響が加わったことで2013年や2014年の再現性が向上したと考えられた。また、底泥からの回帰量は現存量の増加を促進したが、実測ベースの底泥中現存量を用いる必要が示唆された。また、実測値で見られるような、局所的かつ一時的な集積を表現するためには、風による輸送の影響を加えることが有効であることが示された。

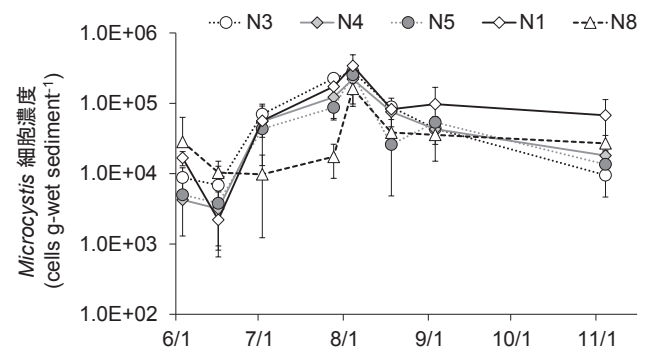


図2 霞ヶ浦土浦入における各地点の底泥表層中の*Microcystis*細胞濃度。なお、N3は湖心、N4は掛馬沖、N5は土浦沖、N1は土浦港、N8は新川河口を示す。⁴⁾

3.3 アオコ予測システムの検討^[6]

生態系モデルで計算されたフィコシアニン濃度と過去の実測値を比較した結果、相関性は高くなかった。一方で、2007年から2016年までの湖心フィコシアニン濃度と実測値のデータセットを用いて学習させたところ、深層学習モデルは生態系モデルと実測値の差異をうまく学習した。湖心における、2007年から2016年までの実測値と (a) 生態系モデルの計算値, (b) 生態系モデルに深層学習モデルを組み合わせたモデル(以下、ハイブリッドモデル)の計算値を比較した(図4)。その結果、ハイブリッドモデルにおいてのみ実測値と有意な正の相関が示された(n=97, (a): $r = -0.08$, n.s., (b): $r = 0.75$, $p < 0.05$)。また、掛馬沖, 土浦沖, 土浦港でも同様の検討をした結果、同様にハイブリッドモデルのほうが高い相関性を示すことが分かった。

4. 結論

霞ヶ浦土浦入におけるアオコの発生予測のために底泥中の *Microcystis* 量を把握し、生態系モデルを用いて発生メカニズムを検討した。その結果、底泥中には *Microcystis* が存在し、湖水中への回帰が示唆された^[4]が、発生メカニズムの検討からは、風による輸送の影響が大きいことが示唆された^[5]。これらの研究結果をもとにアオコ予測モデルを構築した結果、深層学習モデルの組み込みは、過去の再現精度を向上させた^[6]。過去9年の再現性について、どの地点でも向上が見られたことから、霞ヶ浦におけるアオコ予測に対し、今までの生態学モデルを中心としたものよりも、高い精度で予測できることが期待される。今後は、今回の学習に用いていないデータセットや気象データを用いてテスト運用を行い、将来予測の可能性について検証していく。

謝辞

底泥中の *Microcystis* rDNA の測定に関しては国立環境研究所の富岡典子先生にご尽力いただき、重要なお助言を数多く頂いた。本研究で使用した *Microcystis* の細胞体積データは、国立環境研究所の霞ヶ浦長期モニタリング事業によって提供された。ここに記して感謝を記す。

引用文献

[1] Rengefors et al. : Factors regulating the recruitment of cyanobacterial and eukaryotic phytoplankton from littoral and profundal sediments. *Aquatic Microbial Ecology*, 36,

表1 計算ケース一覧とその条件^[5]

	輸送 (第0層)	回帰 (vmax)	鉛直移動 (Setvel)
Case 1	- 無	- 0	- 0
Case 2	+ 有	- 0	- 0
Case 3	+ 有	+ 1	- 0
Case 4	+ 有	+ 1	+ 0.24, -4.0
Case 5	- 無	- 0	+ 0.24, -4.0

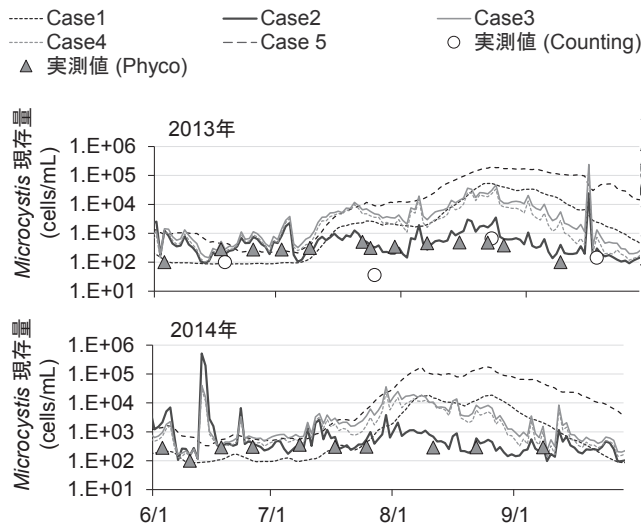


図3 土浦沖表層における *Microcystis* の現存量の経時変化の実測値と一時間毎の計算値。実測値(Counting)は検鏡値, 実測値(Phyco)はフィコシアニンからの換算値^[5] (一部改)

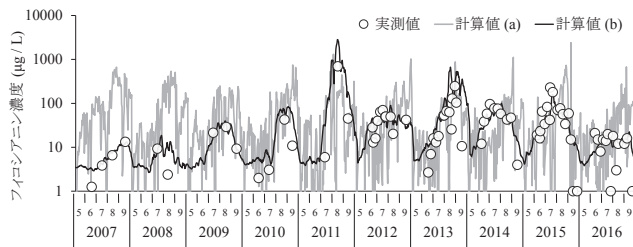


図4 土浦沖におけるアオコ予測モデル計算値と補間された実測値の比較^[6]

213-226, 2004

[2] 北澤ら: 小河内貯水池における湖水流動・水質モデルの構築. *水道協会雑誌*, 76, 7, 16-30, 2007

[3] 芹沢ら: 相模湖と津久井湖におけるアオコ異常発生現象の数理モデル解析. *技術マネジメント研究*, 9, 1-14, 2010

[4] 長濱ら: 霞ヶ浦底泥における *Microcystis* rDNA の分布と季節変動. *水環境学会誌*, 40, 4, 183-188, 2017

[5] 長濱ら: 生態系モデルを用いた霞ヶ浦土浦入におけるアオコ発生機構の検討. *土木学会論文集 G (環境)* 73, 7, III_115-III_123, 2017

[6] 長濱ら: 霞ヶ浦土浦入におけるアオコシミュレーションモデルの構築とその応用. 第52回日本水環境学会年会講演要旨集, 12, 2018