

## 八郎潟調整池におけるアナベナ属の増殖因子を用いた細胞数再現モデルの構築

佐藤 信也・珍田 尚俊・藤田 賢一\*

## 要 旨

アオコの形成は、藍藻類の増殖の段階と、これらが水面付近に浮上したり吹き寄せられて集積する段階の二つのプロセスからなると考え、この第一段階である増殖のプロセスについて、藍藻類の一種であるアナベナ属の増殖特性に基づく細胞数再現モデルを構築した。増殖因子と考えられる温度、光、炭酸塩類、硝酸イオン・リン酸イオン及び反応時間については、すべての因子が整わなければ増殖しないことから、アナベナ属の細胞数を各因子の特性関数の積として表すこととした。各因子に関係する指標として、八郎潟調整池において平成14年及び平成15年夏季に約7日間隔で測定した細胞数、水温、pH、硝酸性窒素・リン酸態リン濃度の実測値、湖水の滞留時間及び日射量を用いることとし、既知の増殖特性に基づき関数形を仮定した。温度については、温度－光合成速度曲線に類似した指数関数を仮定し、光については、細胞数実測値と最も相関の高い前6日間積算日射量に比例するものと仮定し、炭酸塩類についてはアナベナ属が利用する炭酸水素イオンの濃度を10のpH乗に比例すると仮定した。硝酸性窒素・リン酸態リン濃度及び滞留時間については、細胞数との相関を検討した結果、特性関数としては、定数として取り扱うこととした。各関数の細部については、細胞数再現値と実測値との差の二乗和が最小となるように定数を定めた。この再現モデルの精度は、調査期間中のアナベナ属細胞数実測値0～4,800 cells/0.1mlに対して確率誤差約490 cells/0.1mlであった。

## 1. はじめに

平成11年、12年の夏季に八郎潟調整池(図1)では、ほぼ全域においてアオコが形成され、飲料水や漁業に被害を生じたことから、当センターは、平成13年度から3年間の計画でアオコ形成機構の解明を目的とした研究を行った。平成13年度は、アオコの形成状況と水質を把握するための調査を行ったが、既報<sup>1)</sup>のようにアオコはほとんど形成されなかった。

アオコの形成機構については、アオコを形成する藍藻類の増殖の面と、藍藻類の垂直移動・水平移動による水面への集積の両面からそれぞれ研究されている<sup>2,3)</sup>。一方、当センターのアオコ形成時の現地調査において、異常増殖が生じないと思われるような気象条件でアオコが形成されること、このようなときには凧の状態であることを確認したことがあった。そこで我々は、先の二面の研究を関連付け、アオコの形成機構は、藍藻類の増殖の過程と、各水深で増殖した藍藻類が水面付近に集積したり、これらが平面移動をして濃度の高い領域が生じる過程の二

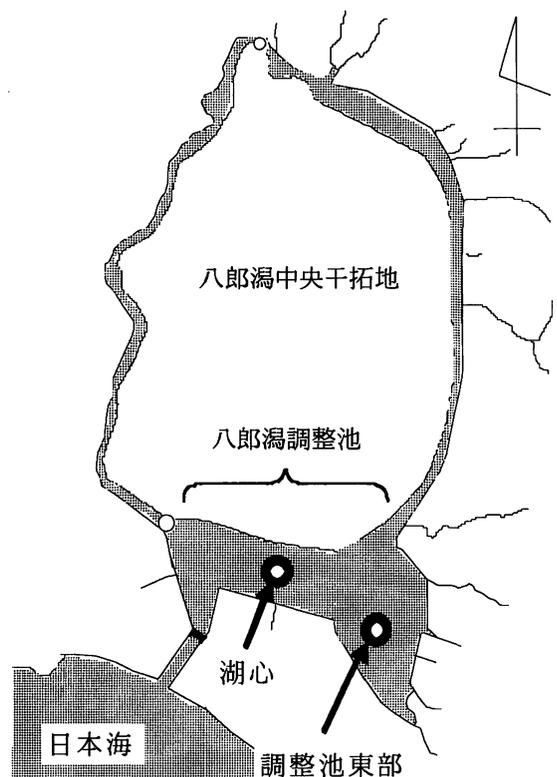


図1 八郎潟調整池の調査地点

\*現秋田県北秋田地域振興局大館福祉環境部

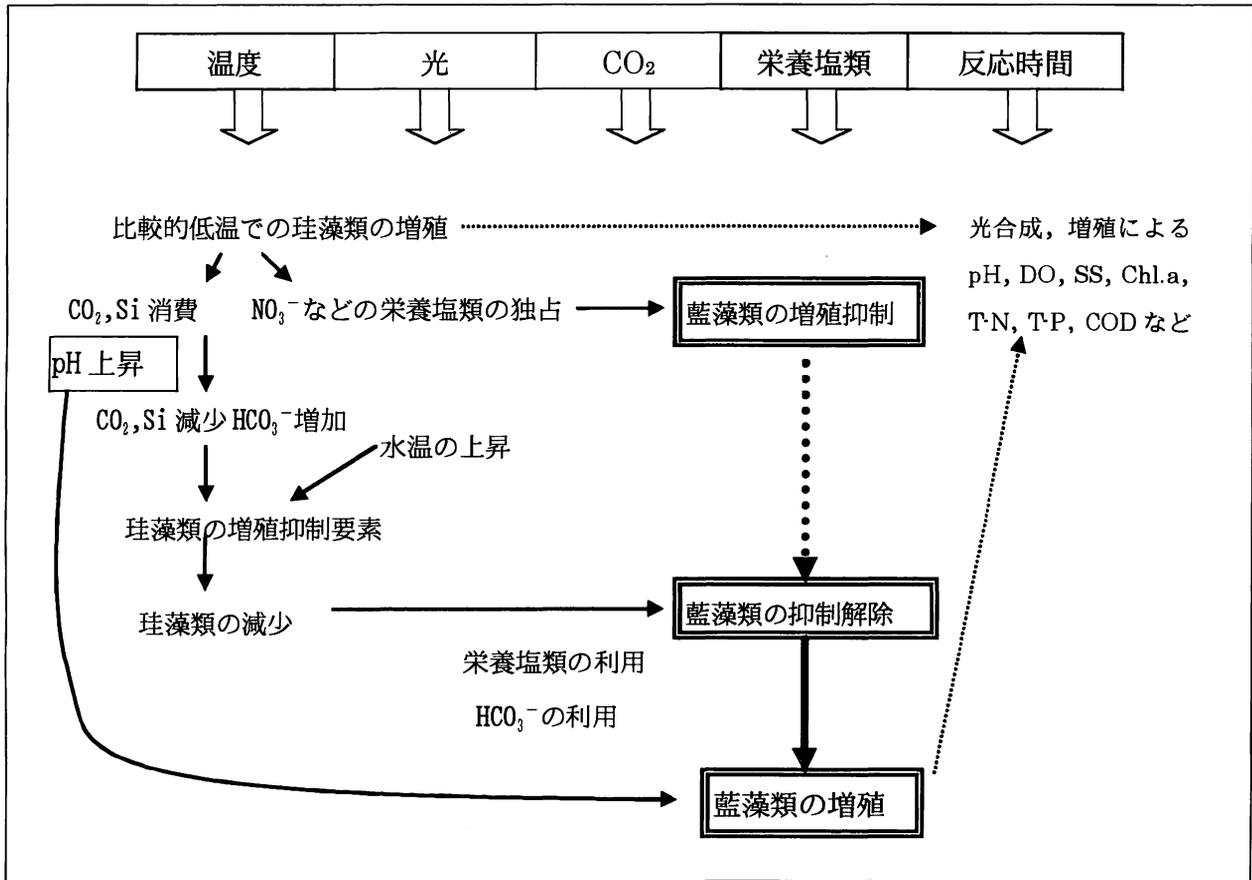


図2 八郎瀧調整池における藍藻類の増殖因子と増殖過程

段階からなると考え、平成14年度及び15年度の調査では藻類各属の濃度を直接的に把握するため細胞数の計数を行い、これら各段階の特性を明らかにすることとした。本報告は、この第一の段階である藍藻類の増殖に関するものである。

八郎瀧調整池における藍藻類の増殖については、光合成の基本要素である水、光、二酸化炭素の他に、図2のように珪藻類の増殖<sup>4)</sup>、温度、栄養塩類、反応時間も関連する因子と考えられる。春の比較的低い水温では、珪藻類が優占して増殖し、藻類に共通の栄養塩類や珪藻類に必須の二酸化炭素やケイ酸などを消費するとともにpH値を上昇させる。この時期は、藍藻類にとっては水温が増殖に適さないだけでなく、利用可能な栄養塩類も制限されていると考えられる。春から夏に向かって水温が上昇するにつれて、珪藻類の適温である水温15～20℃の範囲を超えると珪藻類の増殖速度は低下する<sup>5)</sup>とともに、既に消費されて濃度が低下している二酸化炭素やケイ酸などは、珪藻類の増殖を制限する<sup>6)</sup>ことにもなり、珪藻類は数を減じることとなる。一方、水温は藍藻類にとって適温に近づき、栄養塩類も藍藻類の

利用可能分が増加し、pH値も上昇して藍藻類の炭素源である炭酸水素イオンが増加する、など有利な条件が整い、藍藻類が優占して増殖することになると考えられる。このように、フィールドにおける藍藻類の増殖は、他の藻類の増減も関連している複雑な系であると考えられる。

このような藍藻類の増殖を定量的に取り扱った研究としては、岡田らの水面・水中照度と水温から藍藻類の一種であるマイクロキスティス属の増殖特性に基づいてコロニー径を予測する研究<sup>7)</sup>及び小林の藍藻類の一種であるアナベナ属の群体数、水温、珪藻類細胞数、気象、滞留時間など過去のデータからニューラルネットワーク法により導き出した経験式によりアナベナ属の群体数を予測する研究<sup>8)</sup>がある。

このような増殖予測は、八郎瀧調整池においても期待される場所である。しかし、八郎瀧調整池で頻りに観察されているアナベナ属<sup>9)</sup>については、増殖特性の詳細に関するデータが少なく、また、ある程度増殖理論に根拠を置く必要があると考えたため、既存の予測手法を応用することができなかった。

表1 八郎瀧調整池におけるアナベナ属の増殖因子の特性と指標

増殖因子	増殖因子の特性	増殖因子の指標
温度	光合成速度には最適温度がある。最適温度から外れるほど光合成速度は低下する。水中では、温度の指標は水温である。	水温
光	光は光合成に必須である。光量の指標として、日射量を用いる。	日射量
二酸化炭素及び炭酸塩類	二酸化炭素及び炭酸塩類は、光合成に必須である。pH6～10では、炭酸塩類は主に炭酸水素イオンであり、アナベナ属は、これを炭素源として利用できる。その指標はpHである。	pH
栄養塩類	増殖には硝酸イオン、リン酸イオンが必須である。	硝酸性窒素、リン酸態リン濃度
反応時間	反応時間に対応する時間の指標として、ある個体が湖に留まった時間、つまり滞留時間を用いる。	湖水の滞留時間

そこで、本研究では、アナベナ属の増減を定量化するため、既存の知見を基にアナベナ属の増殖特性の概略の形を決め、さらに実測値に適合するようにその細部を決めることにより、アナベナ属細胞数再現モデルを構築した。平成14年度、平成15年度に八郎瀧調整池において調査を行って得られたアナベナ属細胞数実測値と水質データ、気象データなどアナベナ属の増殖因子と関連が深い指標を用いて、アナベナ属細胞数再現値を求め、実測値との比較による精度評価も行った。

## 2. 方法

藍藻類の増殖因子(図2)を基に、八郎瀧調整池におけるアナベナ属の増殖因子とその特性、増殖因子の指標を整理すると表1のとおりである。これらアナベナ属の各増殖因子については、アナベナ属の増殖にとって必須であることから、この条件を満たすアナベナ属細胞数再現値は、式(1)のように各特性関数の乗算の関係で表すことができるものと考えた。

$$\begin{aligned} \text{アナベナ属細胞数再現値} &= (\text{比例定数}) \\ &\times (\text{水温特性関数}) \times (\text{日射量特性関数}) \\ &\times (\text{pH特性関数}) \times (\text{栄養塩類濃度特性関数}) \\ &\times (\text{滞留時間特性関数}). \end{aligned}$$

(単位: cells/0.1ml) (1)

各因子の特性については、既知の増殖特性を踏まえてモデル化し、実測データを基にパラメータを定めることとした。水質については、平成14年夏季に10回、平成15年夏季に16回、八郎瀧調整池の湖心(以下、「湖心」という。)及び東部(以下「調整池東部」という。)の2地点(図1)で水温を現地測定するとともに、湖心(4層)及び調整池東部(3層)で水深毎に湖水を採取してpH、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、リン酸態リンの分析を行って得られたデータを使用した。珪藻類及び藍藻類の細胞数の計数については、水質調査と同時に採取したサンプルを使用し、平成14年夏季には藍藻類の計数を表層について行い、平成15年夏季には珪藻類と藍藻類の計数を各層について行った。日射量については、秋田地方気象台における観測データを利用した。湖水の滞留時間については、秋田県八郎瀧基幹施設管理事務所による平成14年度、15年度の防潮水門放水量、各排水機場排水量、干拓地取水量のデータを使用した。

これらのデータをアナベナ属の増殖因子として使用するに当たって、調査日の間隔が約7日と離れているので、水温、pH、栄養塩類濃度については、調査日当日のデータを用いる方法と、調査日当日と前回調査日との平均値を用いる方法の二通りを比較し、それぞれに求められたアナベナ属細胞数再現値と細胞数実測値の平均二乗誤差(差の二乗和の平均値の平方根)の小さい方を採用することとした。また、式(1)の右辺の比例定数についても、全地点一括

して定数を求める方法と、地点毎に定数を定める方法が考えられるが、これも同様に再現値の平均二乗誤差の全地点平均値が小さな方を採用することとした。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 アナベナ属の各増殖因子の特性

アナベナ属の増殖因子の指標とした水温、日射量、pH、栄養塩類濃度、滞留時間のそれぞれについて、細胞数との関係を定量化した。

##### 3.1.1 水温特性

藻類の光合成速度の温度特性には、図3のように最適温度があることが知られている。珪藻類の最適温度は 17℃ 付近<sup>9)</sup>であり、アナベナ属の最適温度については、複数の説<sup>3,5,9)</sup>があり、総合すると 25℃～30℃の範囲内にあるものと考えられる。

平成 14 年、15 年に調査したアナベナ属の細胞数と水温は、図4のとおりで、約 25℃～約 28℃の間に最適温度があるように思われる。

そこで、アナベナ属の細胞数は、光合成速度に比例すると考え、図3と類似の関係として、

$$\text{アナベナ属細胞数} = A \cdot \exp\{- (t - B)^2 / C\}$$

(単位：cells/0.1ml) (2)

の式を仮定した。ここに、 $t$  は、水温、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  は、定数である。定数  $B$  は、式の値が最大となる水温を示し、定数  $C$  は、式(2)の右辺の関数の幅に関係する。定数  $B$  を 25、 $C$  を 1 とすると、この関数は、図5のような形となる。

定数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  は、平成 14 年と 15 年夏季の調査日当日の各水深におけるアナベナ属細胞数実測値及び水温の実測値を式(2)に代入し、初期値を  $A=920$ 、 $C=1.4$  として、左辺と右辺の差の二乗を全データについて合計し、これが最小となるように試行錯誤法で定める方法により、 $B$ 、 $C$ 、 $A$  の順に求めると、 $A=863$ 、 $B=25.8$ 、 $C=2.82$  となった。これらの定数を代入した式(2)は、純粋培養におけるアナベナ属の水温と増殖の関係を表すものではなく、フィールドにおいて他の藻類の増減とその栄養消費の影響を受けて増減するアナベナ属の細胞数の増減特性を表すものと考えられることができる。

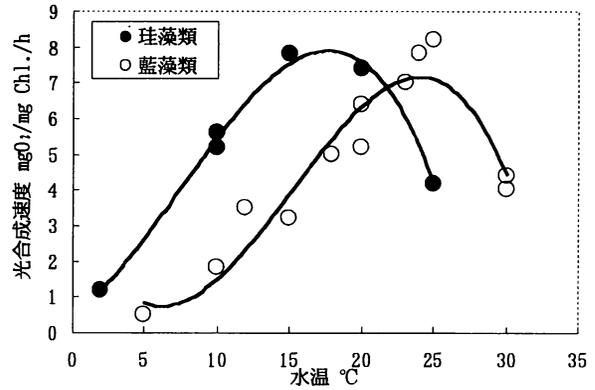


図3 藻類の光合成速度と水温の関係 (Ichimura<sup>9)</sup>を改変)

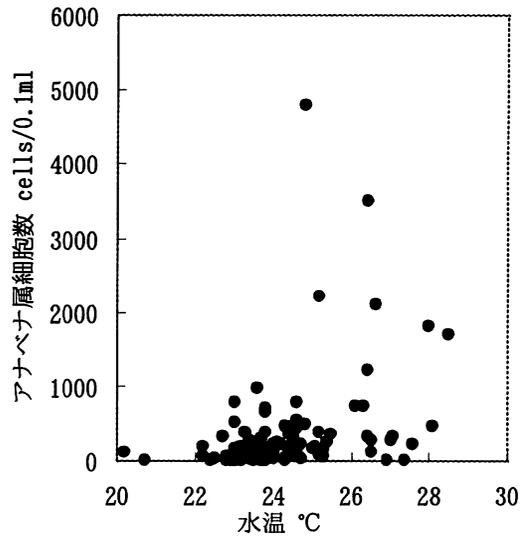


図4 水温とアナベナ属細胞数実測値 (平成 14 年、15 年夏季の八郎瀧調整池湖心及び東部各層)

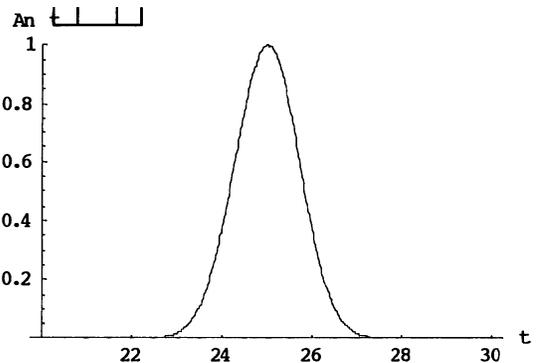


図5 水温特性関数の関数形  $An(t)=\exp\{-(t - 25)^2\}$

##### 3.1.2 日射量特性

光強度が大きくなると光合成速度もそれにつれて増加し、光強度が一定レベルを超えると飽和する、

といわれる<sup>3)</sup>ことから、水中における光強度は、飽和に達するほど強くならず、アナベナ属の細胞数は、日射量に比例して増減すると仮定した。平成14年、15年夏季の湖心及び調整池東部の各層で測定したアナベナ属細胞数実測値と、調査日の前日から前X日間(X=1~10)の積算日射量との相関係数を求めると、両地点の平均値で0.07~0.39の範囲で、最大値を与えるのは前6日間積算日射量であった。よって、日射量としては、前6日間積算日射量を用いることにした。

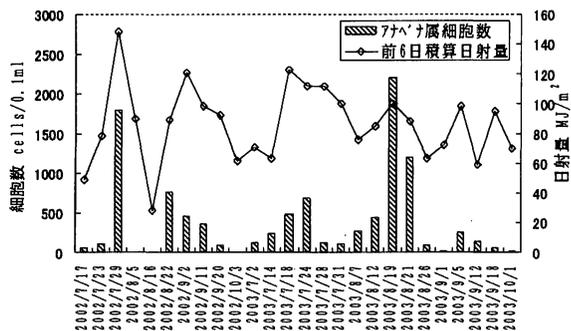


図6 湖心表層のアナベナ属細胞数と前6日積算日射量(平成14年、15年夏季の八郎瀧調整池)

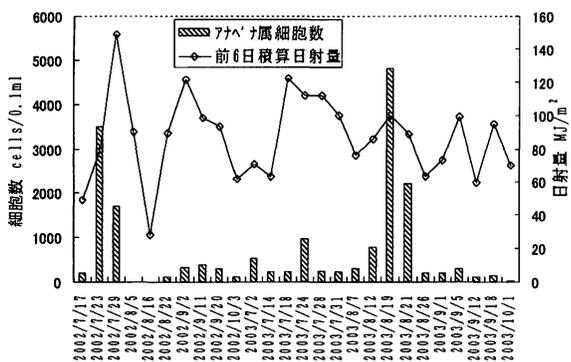


図7 調整池東部表層のアナベナ属細胞数と前6日積算日射量(平成14年、15年夏季の八郎瀧調整池)

湖心、調整池東部の表層におけるアナベナ属細胞数と前6日間積算日射量の関係は、それぞれ図6、図7のとおりで、前6日間積算日射量が多いときに細胞数も多い傾向が認められた。

### 3.1.3 pH特性

アナベナ属は炭素源として炭酸水素イオンを利用するといわれ<sup>6)</sup>、pHが6~10の範囲では炭酸水素

イオンの濃度はpHが高いほど高く、炭酸塩の平衡状態においては近似的に、

$$\text{炭酸水素イオン濃度} \propto 10^{\text{pH}} \quad (3)$$

の関係がある。また、光合成反応において光強度が飽和していないときには、光合成は無機炭酸塩類濃度で制限されているといわれている<sup>9)</sup>。そこで、pHが6~10の範囲では、pHとアナベナ属細胞数との間に次式のような関係があると仮定した。

$$\text{アナベナ属細胞数} = D \cdot 10^{(E \cdot \text{pH})} \quad (\text{単位: cells/0.1ml}) \quad (4)$$

ここに、pHはpH値であり、D、Eは定数を表す。定数D、Eについては、平成14年、15年夏季の調査日当日の各水深におけるアナベナ属細胞数実測値及びpHの実測値を式(4)に代入し、初期値Dを $1.2 \times 10^{-11}$ として、左辺と右辺の差の二乗を全データについて合計し、これが最小となるように試行錯誤法によりE、Dの順に求めると、Eは1.51、Dは $1.21 \times 10^{-11}$ となった。

なお、図8に示すpHとアナベナ属細胞数実測値は、式(4)と同様の傾向が認められる。

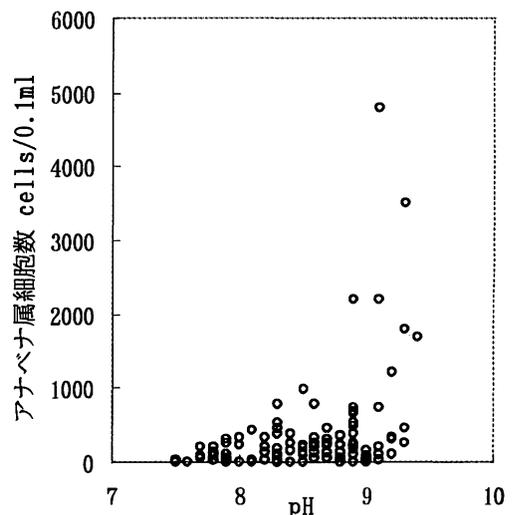


図8 pHとアナベナ属細胞数実測値(平成14年、15年夏季の八郎瀧調整池湖心及び東部各層)

### 3.1.4 栄養塩類濃度特性

アナベナ属細胞数と栄養塩類濃度との相関を調べたところ、平成14年、15年の2地点を併せた相関

係数は、アンモニア性窒素についてはマイナス 0.10、硝酸性窒素についてはマイナス 0.11、リン酸態リンについてはマイナス 0.28 であった。亜硝酸性窒素については濃度が低く、相関が取れなかった。この事実は、栄養塩類濃度と藻類の増殖量については正の相関があるはず、という一般的な認識と食い違っている。この理由については、次のように二つの観点から考えることができる。

第一は、測定される湖水の栄養塩類濃度が、湖水に対する栄養塩類の供給量とは相似しないと考えられることである。湖水に供給された栄養塩類は、そこに存在する藻類に速やかに吸収されるため、その結果として湖水中に残存する栄養塩類濃度には、栄養塩類の供給量の変化が反映されにくいと考えられるからである。

第二は、栄養塩類が多量に供給される降水時には、日射量や水温の低下という藻類にとって増殖抑制因子が同時に働き、これらが打ち消しあう可能性が考えられることである。八郎瀧調整池において、湖水の栄養塩類濃度が増加するのは、降水により河川から栄養塩類が一時的に多量に供給されたときと考えられるが、これと同時に降水に伴う水温や日射量の低下などの増殖抑制要因も作用することが考えられる。その結果、増殖抑制因子の方が強く働いたと仮定すれば、相関係数が負となる可能性もあると考えられる。

以上のことから、八郎瀧調整池におけるアナベナ属の栄養塩類濃度の特性関数については、定数と考えることとした。ただし、八郎瀧調整池では、藻類の増殖に必要な栄養塩類が供給されていないということではなく、常に何らかの藻類の増殖が認められることから、藻類が増殖するに十分な栄養塩類は供給されているものと考えられる。また、降水時の水温や日射量低下については、それぞれの項目で考慮される。

### 3.1.5 滞留時間特性

アナベナ属の増殖に関係する時間の経過を考慮するため、同一の状態が継続した時間の目安として、湖水の滞留時間を考える。滞留時間は、同一の個体が湖の中に留まって増殖を続けた時間を表す、と考えることもできる。複雑に水利用が行われている調整池の滞留時間を正確に求めることは困難であるが、湖心から水門までの水域に限定し、農業用取排水施

設では取水と排水の両方がバランスしていると考え、水門からの放水量のみの単純化したモデルを仮定すると、湖水の滞留時間は放水量の逆数に比例すると考えることができる。そこで、湖心におけるアナベナ属細胞数と調査日の前 1 日～10 日の積算放水量の逆数との相関を調べたところ、相関係数はマイナス 0.17～プラス 0.04 で相関は低いと考えられた。よって、滞留時間については、増殖因子として定数と考えることとした。

## 3.2 アナベナ属細胞数再現モデルの構築

これまでに吟味した各因子の特性を基にして、式(1)により八郎瀧調整池におけるアナベナ属細胞数再現モデルを構成し、各因子の再現値への寄与割合及びモデルの再現精度を示す。

### 3.2.1 アナベナ属細胞数再現モデル

これまでに明らかにした各因子の特性を式(1)に代入するとアナベナ属細胞数の再現値は、式(5)で表される。

$$\begin{aligned} \text{アナベナ属細胞数再現値} = \\ F \cdot \max_{\frac{t}{\text{日}}} [\exp\{-(t-B)^2/C\} \cdot L_6 \cdot 10^{(E \cdot \text{pH})}] \\ \text{(単位: cells/0.1ml)} \quad (5) \end{aligned}$$

この式は、表面的には、水温特性、日射量特性、pH 特性だけで表されているが、栄養塩類濃度及び反応時間についても、定数として考慮されている。この式において、 $\max[\ ]$ は、各層について $[\ ]$ の中を計算し、その中の最大値を採用するという意味を表す。これは、アナベナ属の浮上沈降性を考慮したものである。変数  $t$  は、当日の各層における水温、 $\text{pH}$  は、当日の各層における  $\text{pH}$  値、 $L_6$  は前 6 日積算日射量であり、 $F$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $E$  は定数である。定数  $F$  以外の定数は、すでに得られている。定数  $F$  については、平成 14 年、15 年夏の 2 地点全層の全データを用いて最小二乗法により決定し、 $3.31 \times 10^{-13}$  と求められた。なお、水温と  $\text{pH}$  に、調査日当日のデータを用いたのは、調査日当日のデータを用いた場合と、調査日当日と前回調査日のデータの平均値を用いた場合との比較で、前者方が、平均二乗誤差が小さかったためである。また、定数  $F$  を求めるのに、湖心、調整池東部の両地点のデータを一括して用いたのは、地点ごとに求めるよりも平均二乗誤

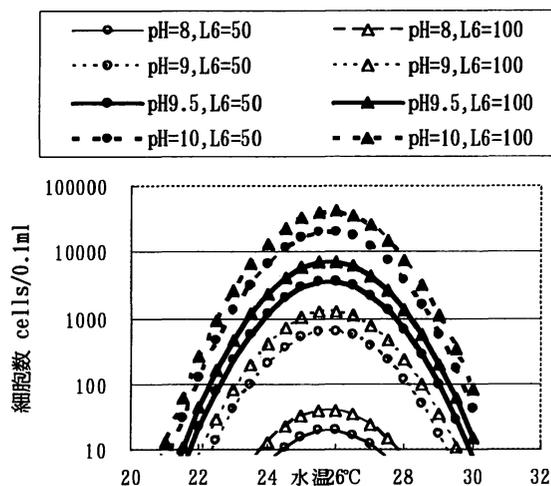


図9 アナベナ属細胞数再現モデルの特性

注) L<sub>6</sub>は、前6日積算日射量(単位: MJ/m<sup>2</sup>)。

差が小さかったためである。

### 3.2.2 モデルの特性

アナベナ属細胞数の再現値に対する各因子の影響は、表2のとおりである。また、各因子の値を仮定

して再現モデルを適用すると、図9のようになる。水温が最適に近くても pH が低かったり日射量が少なければ細胞数は増えず、三要素が整わなければ細胞数が増えない形になっている。そこで、再現値が一定の細胞数となるための各指標の条件を考える。

まず、アナベナ属細胞数再現値について、アオコが形成される可能性があるレベルの目安を、次のように考える。調査地点においてアオコの形成が確認されたのは、平成14年(2002年)7月23日の1回だけだった。その他の日で、調整池のどこかでアオコの形成が確認されたのは、平成15年(2003年)8月19日及び8月21日であった。これらの日のアナベナ属細胞数再現値は、湖心では、約2,000 cells/0.1ml、約1,600 cells/0.1ml及び約2,000 cells/0.1ml、調整池東部では、約2,600 cell/0.1ml、約1,300 cells/0.1ml及び約800 cells/0.1mlであった。そこで、アナベナ属によりアオコが形成される可能性のある細胞数の目安を1,000 cells/0.1ml程度と考えることにする。

図9において、1,000 cells/0.1ml以上となる条件

表2 細胞数再現値に対する各指標の影響

指標	影響
水温特性	最適温度 25.8 度における細胞数が最も多く、水温が 2 °C 離れると細胞数は約 1/4 となり、水温が 3 °C 離れると細胞数は約 1/25 となる。
日射量	細胞数は前 6 日積算日射量に比例する
pH 特性	pH が高いほど細胞数が多く、pH が 8 における細胞数に対して pH が 9 では約 30 倍、pH が 10 では約 1,000 倍となる。

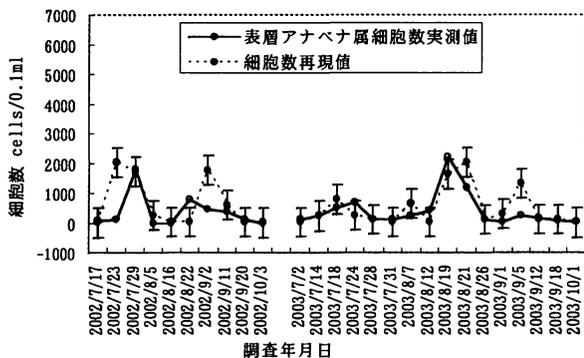


図10 湖心表層におけるアナベナ属細胞数の実測値と再現された細胞数の比較(平成14年、15年夏季の八郎瀧調整池)

注)再現値の上下に「±確率誤差」を線分で示した。

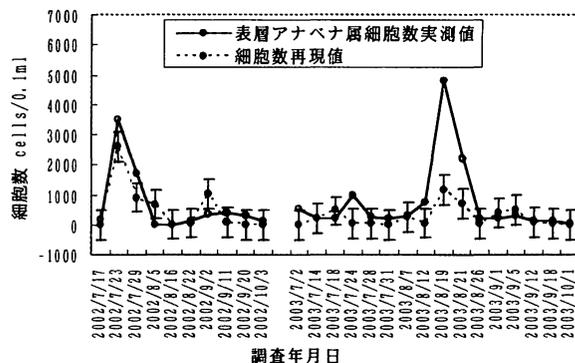


図11 調整池東部表層におけるアナベナ属細胞数の実測値と再現された細胞数の比較(平成14年、15年夏季の八郎瀧調整池)

注)再現値の上下に「±確率誤差」を線分で示した。

としては、pHが9以上であることが必要で、pHが9のときには、 $L_6$ （前6日間積算日射量）が100 MJ/m<sup>2</sup>ならば、水温は25.5～26.5℃の範囲でなければならない。pHが9.5～10の時には、 $L_6$ は50～100 MJ/m<sup>2</sup>ならば、水温は23～29℃の範囲でなければならない。このような条件が揃えば、細胞数再現値は1,000 cells/0.1mlを超えることになり、さらにこれらの細胞が表層に集積するような条件が整えば、アオコが形成される可能性が高まるといえる。

### 3.2.3 モデルの再現精度

式(5)によるアナベナ属細胞数再現値と湖心及び調整池東部の表層におけるアナベナ属細胞数実測値とを比較すると、図10及び図11のとおりである。再現の精度を評価するために、各地点の表層におけるアナベナ属の細胞数実測値と、式(5)による細胞数の再現値の平均二乗誤差を求めると、約730 cells/0.1mlであった。この平均二乗誤差は、再現値の再現精度の目安と考えることができ、細胞数の実測値は、平均的に再現値±730 cells/0.1mlの範囲にあると考えることができる。確率誤差<sup>10)</sup>は、平均二乗誤差の約0.67倍の約490 cells/0.1mlで、実測値が再現値±490 cells/0.1mlの範囲に入る確率が1/2である。図10及び図11には、再現値に重ねて「再現値±確率誤差」を線で示した。

なお、図11において、平成15年(2003年)8月19日及び8月21日の実測値と比べて再現値が低いのは、これらの日に調整池の他の地点でアオコが形成されていることから、調整池東部においてもアナベナ属が表層へ集積する傾向があった考えることもできる。なお、調整池全体におけるアオコの形成状況、気象とアナベナ属の垂直分布及び平面分布の関連については、本年報の後に掲載される「八郎瀧調整池におけるアオコ形成藻類の細胞数の増加及びアオコ形成の原因推定」において報告される。

## 4. おわりに

アナベナ属の細胞数再現モデルについては、今後、基礎データの少ないアナベナ属の増殖特性に関する研究が進み、さらにフィールドにおける、より精度の高い測定や検証を行うことにより、再現性を改善

することができるものと考えられる。このことによって、アナベナ属の増殖を予測することができるようになれば、次の段階であるアナベナ属の垂直移動や平面移動に関する予測と統合することによって、アナベナ属によるアオコ形成予測技術確立の可能性が高まるものと考えられる。また、アオコの形成を予測するためには、八郎瀧調整池において稀に増殖してアオコを形成するマイクロキスティス属の特性を十分に把握することも必要と考えられる。

## 参考文献

- 1) 藤田 賢一, 佐藤 信也, 珍田 尚俊: 八郎瀧調整池におけるアオコ発生機構解明調査(中間報告), 秋田県環境センター年報, 29, pp. 42-48, 2001.
- 2) 岡田 光正, 須藤 隆一, 合葉 修一: 水の華の生成と消滅のシミュレーション, 国立公害研究所研究報告, 25(R-25-'81), pp. 83-123, 2000.
- 3) Reynolds, C. S. and A. E. Walsby: Water-blooms, Biol. Rev., 50, pp. 437-481, 1975.
- 4) 村上 和仁, 瀧 和夫, 松島 眸: 富栄養化湖沼における植物プランクトン優占種の遷移機構—優占種の変遷に及ぼす温度及び照度の影響に関する実験的検討, 環境情報科学論文集, 17, pp. 331-334, 2003.
- 5) Ichimura, S.: Some Characteristics of Photosynthesis of Fresh Water Phytoplankton, Bot. Mag. Tokyo, 71, pp. 261-269, 1958.
- 6) John T. O. Kirk: 水圏の生物生産と光合成, pp. 239-255, 恒星社厚生閣, 2002.
- 7) 小林 千秋: 琵琶湖南湖におけるアオコ発生予測, 第9回世界湖沼会議, 9(3), pp. 361-364, 2001.
- 8) 吉田 昇, 加藤 潤, 渡辺 寿: 八郎湖のアオコ毒素等水質動態調査(平成10～12年度環境省委託調査), 秋田県環境センター年報, 28, pp. 73-78, 2000.
- 9) 南篠 吉之, 福田 明彦, 平尾 優年, 杉本 多恵子: アオコ(*Anabaena Affinis*)の増殖特性—水温, 塩素イオン濃度との関係について, 鳥取県衛生研究所報, 34, pp. 59-62, 1994.
- 10) 一瀬 正巳: 誤差論, pp. 19-21, 1953.

## 付録

付録表1 2002年湖心表層の水質測定結果

	'02/7/17	'02/7/23	'02/7/29	'02/8/5	'02/8/16	'02/8/22	'02/9/2	'02/9/11	'02/9/20	'02/10/3
水深 (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水温 (°C)	22.2	26.5	28.0	27.4	23.8	23.0	28.1	25.5	23.5	20.7
pH	7.7	9.2	9.3	8.8	8.4	8.6	9.3	8.8	8.5	8.0
NH4-N (mg/l)	0.09	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
NO2-N (mg/l)	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NO3-N (mg/l)	0.19	<0.05	<0.05	<0.05	0.21	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
PO4-P (mg/l)	0.022	0.007	0.004	0.006	0.035	0.014	0.007	0.015	0.024	0.038
藻類細胞数 (cells/0.1ml)										
アナベナ属	60	110	1800	0	0	770	460	360	92	0
ミクロキスティス属	0	0	0	0	0	0	0	400	70	0
メロシラ属	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

付録表2 2002年調整池東部表層の水質測定結果

	'02/7/17	'02/7/23	'02/7/29	'02/8/5	'02/8/16	'02/8/22	'02/9/2	'02/9/11	'02/9/20	'02/10/3
水深 (m)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
水温 (°C)	22.2	26.4	28.5	26.9	23.7	23.1	27.6	25.2	22.7	20.2
pH	7.7	9.3	9.4	9.0	8.4	8.9	9.2	8.3	8.0	7.8
NH4-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
NO2-N (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NO3-N (mg/l)	0.2	<0.05	<0.05	<0.05	0.19	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
PO4-P (mg/l)	0.022	0.008	0.003	0.007	0.029	0.016	0.005	0.017	0.029	0.037
藻類細胞数 (cells/0.1ml)										
アナベナ属	190	3500	1700	0	0	110	330	380	320	120
ミクロキスティス属	0	0	50	0	180	0	0	0	7000	0
メロシラ属	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

付録表3 2003年湖心各層の水質測定結果

	'03/7/2	'03/7/14	'03/7/18		'03/7/24				
水深 (m)	0	0	0	2	0	1	2	5	
水温 (°C)	23.2	24.5	24.8	23.5	23.8	23.8	23.8	23.5	
pH	8.5	8.8	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.6	
NH4-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
NO2-N (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
NO3-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
PO4-P (mg/l)	0.01	0.016	0.01	0.013	0.008	0.005	0.012	0.012	
藻類細胞数 (cells/0.1ml)									
アナベナ属	130	230	490	12	690	390	650	240	
ミクロキスティス属	0	0	0	0	0	0	0	0	
メロシラ属	76	140	39	270	180	160	150	160	
水深 (m)	0	1	2	5	0	1	2	5	
水温 (°C)	24.0	23.6	23.5	22.8	23.5	23.4	23.2	22.9	
pH	8.6	8.6	8.6	7.9	8.3	8.2	8.1	7.5	
NH4-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	<0.05	<0.05	0.05	0.11	
NO2-N (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
NO3-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	
PO4-P (mg/l)	0.015	0.013	0.014	0.025	0.016	0.016	0.016	0.031	
藻類細胞数 (cells/0.1ml)									
アナベナ属	120	190	62	48	110	130	7	0	
ミクロキスティス属	0	0	0	0	0	0	0	0	
メロシラ属	190	270	320	200	240	250	220	180	



付録表4 2003年調整池東部各層の水質測定結果

水深 (m)	'03/7/2		'03/7/14		'03/7/18		'03/7/24		
	0		0		0	2	0	1	2
水温 (°C)	23.0		24.2		24.7	24.0	23.6	23.6	23.5
pH	8.3		8.9		8.8	8.8	8.5	8.5	8.3
NH4-N (mg/l)	<0.05		<0.05		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
NO2-N (mg/l)	<0.01		<0.01		<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NO3-N (mg/l)	<0.05		<0.05		<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
PO4-P (mg/l)	0.013		0.021		0.004	0.012	0.012	0.011	0.015
藻類細胞数 (cells/0.1ml)									
アナベナ属	520		220		220	120	980	220	80
ミクロキスティス属	0		0		0	0	0	0	0
メロシラ属	50		240		94	200	160	200	210
水深 (m)	'03/7/28			'03/7/31			'03/8/7		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2
水温 (°C)	23.5	23.3	23.2	23.7	23.5	23.4	27.1	27.0	26.4
pH	8.4	8.4	8.3	7.8	7.9	7.8	8.6	8.7	8.7
NH4-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	<0.05	<0.05	<0.05
NO2-N (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NO3-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
PO4-P (mg/l)	0.008	0.011	0.008	0.017	0.02	0.016	0.014	0.012	0.013
藻類細胞数 (cells/0.1ml)									
アナベナ属	250	370	180	210	240	94	320	260	310
ミクロキスティス属	0	0	0	0	0	0	60	0	0
メロシラ属	180	190	160	170	190	210	260	340	330
水深 (m)	'03/8/12			'03/8/19			'03/8/21		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2
水温 (°C)	24.6	24.5	24.4	24.8	24.3	24.0	26.6	25.4	25.3
pH	8.3	8.3	8.2	9.1	8.7	8.5	8.9	8.9	8.7
NH4-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
NO2-N (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
NO3-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
PO4-P (mg/l)	0.014	0.015	0.012	0.012	0.017	0.012	0.012	0.011	0.014
藻類細胞数 (cells/0.1ml)									
アナベナ属	770	460	340	4800	450	210	2200	250	130
ミクロキスティス属	0	0	0	90	0	0	0	36	0
メロシラ属	240	270	220	52	280	240	100	470	400
水深 (m)	'03/8/26			'03/9/1			'03/9/5		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2
水温 (°C)	25.0	24.5	24.3	24.0	24.0	23.4	23.7	23.6	23.5
pH	8.2	8.3	8.1	9.1	9.1	8.8	9.2	9.1	9.0
NH4-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	—	—	—	<0.05	<0.05	<0.05
NO2-N (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	—	—	—	<0.01	<0.01	<0.01
NO3-N (mg/l)	0.06	0.06	0.07	—	—	—	<0.05	<0.05	<0.05
PO4-P (mg/l)	0.014	0.017	0.018	—	—	—	0.014	0.012	0.014
藻類細胞数 (cells/0.1ml)									
アナベナ属	200	76	24	200	16	52	300	110	76
ミクロキスティス属	0	0	0	0	0	0	0	0	0
メロシラ属	110	200	180	370	380	460	300	400	450
水深 (m)	'03/9/12			'03/9/18			'03/10/1		
	0	1	2	0	1	2	0	1	2
水温 (°C)	23.5	23.2	22.9	23.1	22.9	22.8	18.3	18.3	18.2
pH	8.9	8.8	8.7	8.6	8.5	8.4	7.8	7.9	7.8
NH4-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	—	—	—	<0.05	<0.05	<0.05
NO2-N (mg/l)	<0.01	<0.01	<0.01	—	—	—	<0.01	<0.01	<0.01
NO3-N (mg/l)	<0.05	<0.05	<0.05	—	—	—	<0.05	<0.05	<0.05
PO4-P (mg/l)	0.01	0.009	0.011	—	—	—	0.023	0.023	0.026
藻類細胞数 (cells/0.1ml)									
アナベナ属	110	0	50	130	0	0	21	30	67
ミクロキスティス属	0	0	0	0	0	85	0	0	0
メロシラ属	94	150	210	85	130	140	57	100	93