

貯水池における水質予測技術の向上（JWAモデルの開発）

○丹羽 賢一¹ 岩崎 健次²・酒井 健寿³

概要：

ダム貯水池や調整池等の閉鎖性水域では、アオコ・カビ臭・淡水赤潮などの藻類の異常増殖、放流濁水の長期化、底層の嫌気化や、冷水・温水放流などの水質障害が発生する場合がある。

水質障害の発生抑制対策や水質保全設備の導入・運用の効果等の検討に使用する水質予測モデルは、藻類増殖機構、水質現象及び水理・流動状況の他、水質保全対策設備などを適切に表現することが必要とされる。水資源機構総合技術センターでは、従来のモデルに比べ水質予測精度（再現精度）を高めた水質予測モデル（以下「JWAモデル」という。）の開発を行ってきた。

JWAモデルは、新たに各種藻類増殖機構等をモデル化し、生態系モデル等の改良を行うことで、藻類増殖によるアオコや淡水赤潮の発生など水質現象の再現性を高めた。また、ダム貯水池等で導入している各種水質保全設備についても、その効果メカニズムに基づきモデル化して組み込んでおり、貯水池流動や水質現象への影響を適切に表現でき、信頼性の高い検討が可能なモデルに改良されている。さらに、操作支援システムにより、計算の条件設定など準備作業を大幅に改善することができた。

本稿は、新しく開発したJWAモデルの概要とその再現性及び利便性について紹介するものである。

キーワード：水質障害 水質予測モデル 生態系モデル 水質保全設備

1. はじめに

一般に、水質予測モデルは表-1 に示す項目で構成される。水温・濁質・水質モデルについては境界条件が適切に与えられれば高い再現性が得られるが、生態系モデルによる藻類の発生予測については未だ不明な点も多く改良の余地が多く残っている。

藻類発生再現性を高めることは水質障害対策を検討する上で極めて重要な課題であり、総合技術センターでは2008年から機構が自ら管理するダム貯水池等の調査データ等を活用して藻類の発生メカニズムや種別の増殖特性などを解析し、再現性と予測精度の向上に繋がる要因を検討してきた。

本報告では、JWAモデルとして新たに改良した生態系モデルを組込んだ三次元モデルの開発と、併せて二次元モデルの生態系モデルの改良を行い、藻類増殖の再現（予測）精度を高めるとともに局所的な入り江に滞留する藻類の発生などの再現を可能とすることに成功し、各種水質保全対策設備についても検討が可能となるよう設備効果のメカニズムに基づきモデル化したので積極的な活用を図る目的でその概要を紹介する。

表-1 右にJWAモデルの水質予測モデルの各項目における概要を示す。

表-1 水質予測モデルの項目とJWAモデルの概要

モデル項目	JWAモデルの概要
1. 水理・流動モデル	●鉛直・水平の両方向の連続式・運動方程式を考慮 ●放流設備の各方式に応じた流動層厚を考慮
2. 水温・濁質・水質モデル	●水温：水面での熱収支と移流拡散を考慮 ●濁質：粒度分布毎の沈降・巻上速度を考慮 ●水質：N, P, Si, COD, Chl-a, DOの収支を考慮
3. 生態系モデル	●藻類の増殖、死滅・分解、捕食（動プラ）、沈降浮上、巻上・溶出、を考慮し水質変化に反映
4. 水質保全設備組み込みモデル	●浅層曝気循環設備による循環流 ●分画フェンス・放流設備等による流動現象 ●深層曝気設備による揚水と酸素移動等を考慮

2. 藻類増殖機構等のモデル化（モデルの改良）

藻類種別の増殖特性の解析結果等を基に、生態系モデルに表-2 に示す項目を追加したことで藻類の季節的な増殖特性の再現の精度が高くなった。また、水理・流動モデルの改良により局所的な藻類の滞留などの再現が可能となった。以下にその概要を示す。

2.1 生態系モデル

アオコの原因となる藍藻類のミクロシスティスは細胞内にガス胞を持ち、夜間は下層に沈降して栄養塩を

吸収し、日中は表面に浮上して増殖するため貯水池表面付近で集積が生じる、この現象を再現し曝気循環設備による循環効果を検討するため、アオコの日射量に応じた浮上・沈降の日周運動をモデル化した(図-1)。

また、藻類は種によって有する光合成色素に違いがあるため、利用する光の波長帯に違いがある(図-2)。このような各藻類が利用する光の波長に対応した減衰特性から係数を設定しモデル化を行った。

表-2 JWAモデルに追加改良した項目

項目	内容
● 水理・流動モデル	・ 風速流によるせん断力
● 水温・濁質モデル	・ 濁質の堆積、巻き上げ ・ 日射による時間変動 ・ 濁質の粒径区分を追加
● 生態系モデル	・ アオコの浮上・沈降 ・ 渦鞭毛藻類の生活史 ・ 藻類別光波長吸収特性 ・ 珪藻類のケイ酸取り込み ・ 藻類毎の栄養塩取込速度 ・ 動物プランクトンの捕食

アオコの日周運動について長柄ダムを対象に、流入出や風の影響がない条件で、アオコの浮上・沈降のみ(増殖・死滅なし)の感度分析を行った(図-3)。アオコの浮上・沈降有りにおいて、日周変動による表層の集積が表現されていることが分かる。

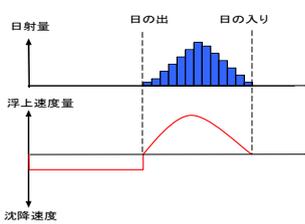


図-1 アオコの日周運動
【浮上・沈降無し】

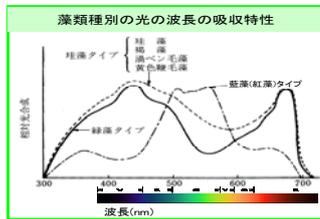


図-2 藻類の光波長吸収特性
【浮上・沈降有り】

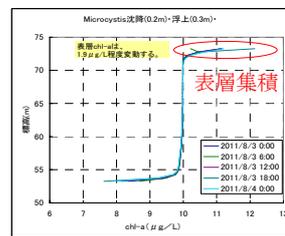
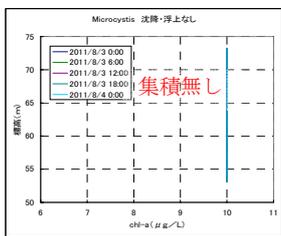


図-3 クロロフィル a の鉛直分布 (浮上・沈降有無)

淡水赤潮の原因となる渦鞭毛藻類のペリディニウムは、シストを形成して湖底に沈積・休眠し、増殖に好適な環境となると発芽し、再び栄養細胞として水中に回帰する(図-4)。シストは概ね 15~20°Cの水温範囲で発芽率が高く、ある程度(概ね 60 日)の堆積期間が必要であることが発芽実験により分かった(図-5)。

この結果を踏まえ、渦鞭毛藻類の生活史をシストの堆積日数と発芽条件(水温)によりモデル化した。また渦鞭毛藻類は、鞭毛による遊泳能力を有し、走光性により水面に集積し淡水赤潮を形成する。この走光性について、山田らの研究成果を踏まえ¹⁾、水温・光(日射量)の関数とし、モデル化した。

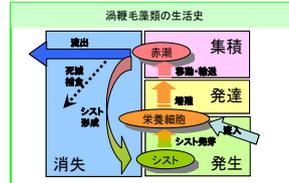


図-4 シストの生活史

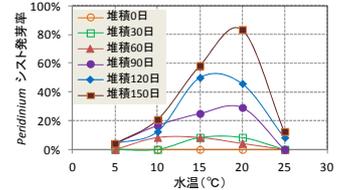


図-5 シストの発芽条件

浦山ダム 2009 年を対象にシストの堆積と発芽条件を取り込み改良したモデルを使用して貯水池表層クロロフィル a の再現計算を行った結果を第 5 章の図-14 に示す。上段の a)改良前のシストを設定しないモデルで再現出来ていない 5 月頃の渦鞭毛藻類の増殖が、b)シストの発芽を設定した場合に再現されていることが分かる。

その他、珪藻の増殖に必要なケイ酸を珪藻類増殖モデルに追加、ミクロキスティス・渦鞭毛藻類体内へのリン蓄積特性をモデル化し、アオコや淡水赤潮の増殖による集積現象を表現しやすくなった。さらに動物プランクトンによる捕食をモデル化することにより植物プランクトンの季節による増減を表現しやすくなった。

2.2 水理・流動モデル及び水温・濁質モデル

水理・流動モデルに、風によるせん断力をモデル化し、アオコや淡水赤潮の吹送流による局所的な集積状況の表現が可能となった。また、日射量を時間毎に扱い、日射による水温の日周変動を再現可能となった。

3. 水質保全設備のモデル化

JWAモデルは、機構が管理するダム貯水池等の主要な水質保全設備と放流設備の運用について各設備の効果のメカニズムに基づきモデル化を行った(表-3)。

3.1 浅層曝気循環設備

浅層曝気循環設備は、吐き出し空気の気泡の浮力で上昇流を生じさせ、循環混合層を形成させることで表層水温の低下、藻類の有光層以深への引き込み、拡散などで藻類の増殖や集積を抑制する。JWAモデルでは散気式(図-6左)と揚水筒式(図-6右)を対象に、

散気式は浅枝らの提案したダブルブルームモデルを基に三次元流動解析により、また揚水塔の揚水量は池田ら²⁾の簡易評価式を用いモデル化した。

表-3 JWAモデルでモデル化した水質保全設備

項目	水質障害	内容
浅層曝気循環設備	アオコ	1. 散気式 2. 揚水筒式(連続・間欠・一部散気)
深層曝気設備	嫌気化	1. 浮上層式 2. 水没式 3. 複合型(2次元モデル)
分画フェンス	淡水赤潮	1. 固定式 2. 浮沈式
バイパス水路	富栄養化 冷濁水	1. 直接放流方式 2. 湖内放流方式
放流設備	冷濁水	1. 選択取水設備運用(高濁度、等水温)
遮光	アオコ	1. 遮光対策(2次元モデル)

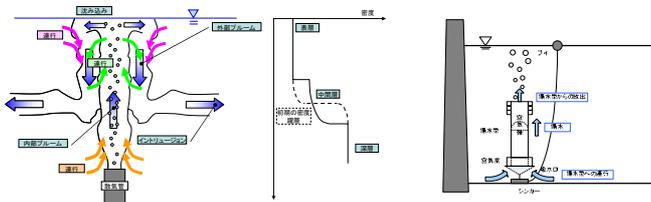


図-6 浅層曝気循環設備(散気式) (揚水筒式)

3.2 深層曝気設備

深層曝気設備は、気泡による底層水の揚水と上昇管中での気泡からの酸素溶解により、底層水の DO を改善し、下降管によって再び底層へ送水、水温躍層を破壊せず底層 DO を改善する。深層曝気設備は、浮上層式、水没式その他、水没式とその余剰空気を利用した浅層曝気との複合型のモデル化を行った(図-7)。

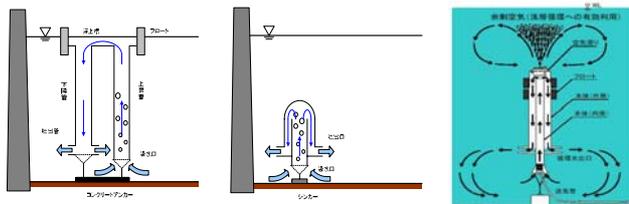


図-7 深層曝気設備(左~浮上槽式, 水没式, 複合型)⁽³⁾

3.3 分画フェンス

分画フェンスは、上下流の流動を遮断することで、淡水赤潮の流入端への集積阻害等を図る(図-8)。分画フェンスは、固定式及び浮沈式のモデル化を行った。

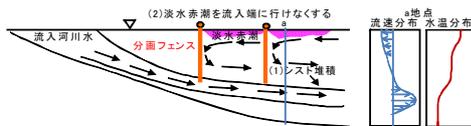


図-8 分画フェンスによる淡水赤潮対策概念図

3.4 バイパス水路

バイパス水路は、栄養塩バイパスと清水バイパスがある。

前者は、高い栄養塩濃度の河川水を貯水池下流にバイパスし貯水池の富栄養化対策を行う。後者は放流水の濁水長期化対策等のため流入河川の清水等をダム下流へ放流する。バイパス水路は、ダム下流に放流する場合と湖内に放流する場合のモデル化を行った。

3.5 放流設備の運用

放流設備による対策は、冷・温水放流対策として選択取水位置を適切な位置に移動させ流入水と同等の水温層から放流する等水温取水と、濁水放流対策として出水時に高濁度の層を選択的に放流して濁質の早期排除に努め、その後濁度が低い表層等からの放流を行う高濁度取水(図-9)のモデル化を行った。

3.6 遮光

藻類の増殖に必要な条件の一つである光を遮断する対策であり、機構施設ではファームポンドなど小規模で浅い貯水池で実施している(図-10)。遮光は、貯水池全体を覆う必要はなく、光が当たる時間を一定時間以下にすれば良いためこれらを考慮したモデル化を行った。

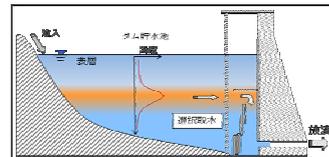


図-9 高濁度取水モード図 図-10 遮光対策の例

4. 操作性の向上

JWAモデルでは、通常プログラムの知識が必要な境界条件等の設定を操作支援システムにより容易に操作可能とし、また演算結果のグラフ化(図-13 参考)の労力を大幅に削減し分析が迅速に行えるようにした。

5. 再現計算結果

上記の各種モデルの改良によって、藻類の再現性が実現象に近くなるとともに、これまで検討が不可能であった曝気循環設備の間断運転や分画フェンスによる淡水赤潮対策の効果予測などが可能となった。

再現性について長柄ダム・浦山ダムにおいてJWAモデルを使用し、各ダム貯水池水質の再現計算を行った。

長柄ダムのモデル計算による貯水池基準地点表層の藻類種類別のクロロフィル a の時系列変化を図-11、貯水池平面コンターを図-13 に、藻類(植物プランクトン)

の定期調査及び水質障害発生状況を図-12 に示す。実測の定期採水調査結果（図-12 上段）から2011年は、2月に珪藻類の細胞数が増加、8～10月頃に藍藻類マイクロキスティスが増殖しアオコの発生がみられていた（図-12 下段）。最大値（2月）について検討の余地はあるが、モデル計算により概ね藻類の季節毎の発生種の増減状況を再現できていることが分かる（図-11）。

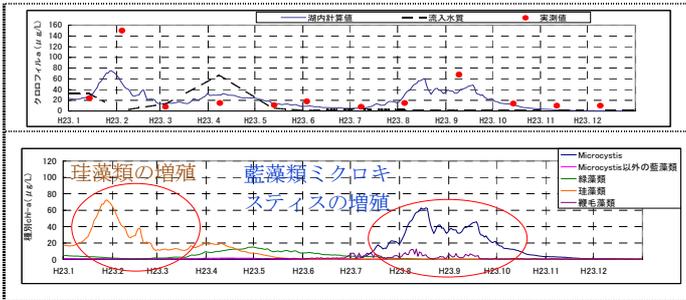


図-11 藻類種類別のクロロフィル a 時系列変化 (実測値とモデルによる再現計算 (長柄ダム 2011 年))

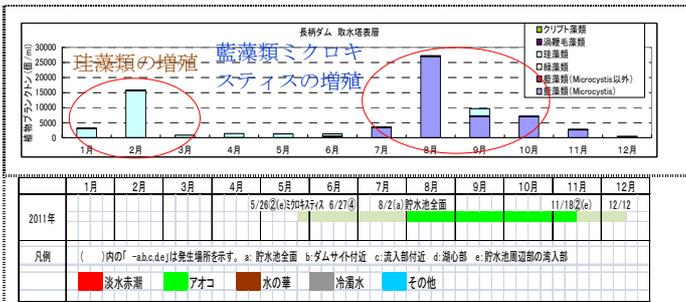


図-12 藻類定期調査及び水質障害(長柄ダム 2011 年)

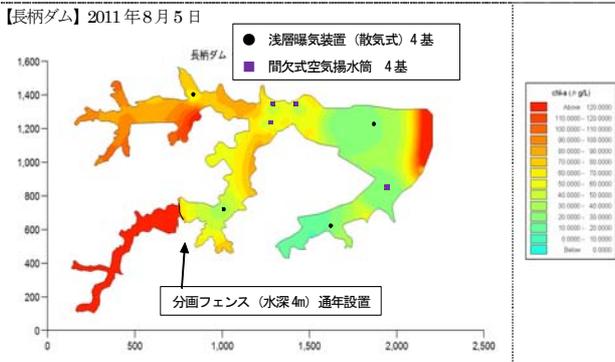


図-13 表層クロロフィル a の平面分布 (モデル計算)

同様に浦山ダムを対象に計算を行い、藻類種類別のクロロフィル a の時系列変化を図-14 に示す。また、比較のため改良前のシストを設定しない場合を併せて示す。

2009 年は、4～7月に淡水赤潮が発生しており（図-15）モデルによる再現計算も、同時期（4月～7月）に渦鞭毛藻類の増殖が再現されており、季節毎の発生種の増減状況を再現出来ている（図-14）。改良前のシストを設定しないモデルでは再現されておらず、シストの発芽のモデル化により再現が可能となったことが分かる。

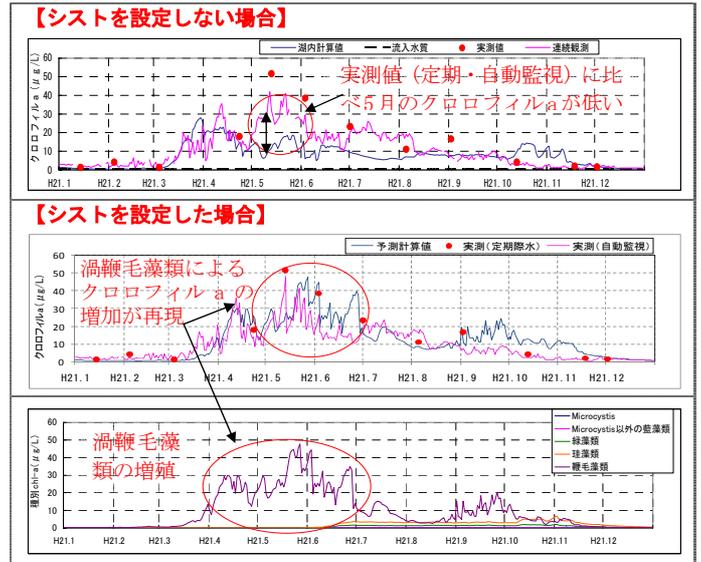


図-14 藻類種類別のクロロフィル a 時系列変化 (実測とモデルによる再現計算 (浦山ダム 2009 年))

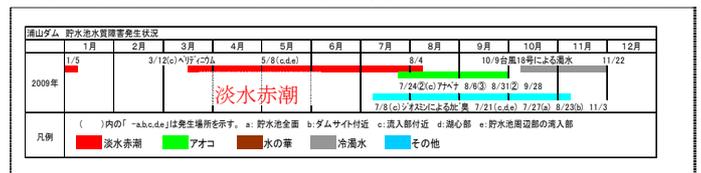


図-15 水質障害発生状況(浦山ダム 2009 年)

6. まとめ

水質障害への対策としての水質保全設備の導入や効果的・効率的（経済的）運用の検討にあたり JWA モデルを使用することで、効果や設置の比較検討を、機構の従来モデルに比べ高い精度で行うことが可能となった。

今後も機構管理のダムにおけるモデルによる水質予測（今年度 5 ダムを予定）を通じて引き続きモデルの検証を行い改良に取り組む。

総合技術センターでは、貯水池における総合的な管理実績を踏まえ、現場のニーズに応じて、的確にかつ迅速にシミュレーションを使用した水質保全対策等の検討を実施出来る体制を整えたので、総合技術センター試験・解析グループまで相談されたい。

参考文献

- 1) 山田ら. 1995. ダム貯水池における *Peridinium* 淡水赤潮の集積機構の評価. 水環境学会 Vol. 18, No. 10
- 2) 池田ら. 1994. 気砲弾を用いた深層水揚水施設による密度成層の混合効率. 土木学会論文集 NO. 485, II-26
- 3) ”新たな曝気装置の開発「水没式複合型曝気装置」の実現報告”平成 23 年度水資源機構 技術研究発表会