

ダム貯水池におけるアオコ発生予報技術の研究開発

Development of blue-green algae occurs forecast technology in dam reservoir

企画部 主任研究員 木村 文 宣
企画部 上席主任研究員 塩見 裕 亮
企画部 上席主任研究員 富岡 浩
企画部長 高橋 定雄

我が国ではダム貯水池で発生するアオコやカビ臭等の富栄養化現象への対応策として、曝気循環施設等の水質保全対策を実施してきたが、問題の解消には至っていない。この現状を鑑みると、これら富栄養化現象の発生を早期に察知し、関係機関へ周知する等の体制を構築することも重要と考えられる。しかし、現時点でアオコ発生を早期に察知する実用的な手法は確立されていない。筆者は、DCMU 蛍光法を用いたアオコ発生予報技術の確立へ向けての調査研究を 2014 年より開始した。初年度の調査研究では、出水等の大きな貯水池環境の変化がない条件下でアオコ発生 2 週間～1 ヶ月前にアオコ発生の予兆と認識できる F_v / F_m の変化を確認し、アオコ予報として実用可能であることが示された。本稿はこの結果を取りまとめるとともに、本手法の一般化へ向けた課題や展望について論じたものである。

キーワード：アオコ、発生予報、DCMU、藍藻類

In Japan, we have been conducting water quality improvement measures typified by air diffusing type circulator in order to cope with eutrophication phenomena such as blue-green algae and musty odor generated by the water reservoir. However, it is not yet to resolve problem. In view of the current situation, it is also important to establish a system which perceive the occurrence of eutrophication phenomenon at an early stage, and disseminate relevant organizations. However, it have not been established the practical approach to perceive the water bloom. The authors started the study of toward the establishment of blue-green algae occurs forecast techniques using DCMU fluorescence method in 2014. In the first year of research, we confirmed the change of F_v / F_m that can recognize a sign of blue-green algae in 2 weeks to one month before the blue-green algae in conditions there is no large change in water reservoir environment, and has shown that this method can be practical as blue-green algae forecast. In this paper, we have summarized the results of research in first year, and discussed the challenges and prospects towards generalization of this method.

Key words : blue-green algae, occurs forecast, DCMU, cyanobacteria

1. はじめに

我が国のダム貯水池では、特定の藍藻類の異常増殖に伴い、アオコによる景観障害やアオコの集積・腐敗による悪臭が問題となっている。発生する藍藻類の種類によってはカビ臭による浄水障害等が発生する場合もある。

これら富栄養化に伴う水質問題への対応策としては、曝気循環施設に代表されるような貯水池内の水質保全対策のほか、流入水に含まれる栄養塩類の除去を目的とした礫間浄化対策、流域での下水道整備や畜産排泄物の処理規制等がこれまで行われてきている。各種対策については、一定の効果が認められているが、依然として問題の解消には至っていない。

平成 23 年度に全国 242 の多目的ダム（国土交通省直

轄：95 ダム（当時の全管理ダム）、水資源機構：22 ダム（当時の全管理ダム）、補助：125 ダム（各県 3 ダム程度を抽出）を対象に実施したアンケート調査¹⁾によると、富栄養化に伴うアオコやカビ臭等の問題を経験したことのあるダムは、全体の 26%（63 ダム）に及んでいた。平成 14 年に全国 432 ダムを対象に実施したアンケート調査においても同様の結果が得られている²⁾ことから、我が国のダム貯水池で発生する富栄養化に伴うアオコやカビ臭の問題が深刻且つ根深いものであることが窺える。

このような現状を鑑みると、ダム貯水池で発生するアオコやカビ臭等の問題の発端となる藍藻類の異常増殖を完全に抑制することは困難であると考えられるので、その発生予兆を早期に察知し、関係機関等へ連絡・周知する等の体制も同時に用意しておくことがアオコ

障害の低減のためには有効と考えられることから、本研究では、ダム貯水池においてアオコやカビ臭の原因となる藍藻類が異常増殖する前に、その予兆を察知するための技術的手法を確立することを目的とする。

藍藻類の発生は気象・水象・水質の微妙な違いに左右されることから、事前に発生の予兆を察知することは極めて難しく、数週間～数ヶ月スパンでの予報を行っている事例はほとんどない。

先進的な事例としては、定点設置された水質自動観測機器や同機器を船舶に設置して面的に湖内水質を収集し、予め構築した貯水池水質モデルに予測される気象・水象データとともに入力することで数週間後の水質やアオコ発生を予測する取り組みもある³⁾が、施設設置や維持管理にかかるコストが大きくなること、管理者自らが水質モデルを操作して予測することの難しさ等もあり、現場における管理負担が大きいことに課題があるものと推察される。

以上のような現状や課題を解決する一手法として、筆者らは藍藻類の増殖過程での光化学系Ⅱの代謝経路の変化に着目し、現場で適用可能なアオコ発生予測手法の確立へ向けての調査研究を行った。本稿は、2014年に実施した現地調査及び解析結果について取りまとめたものである。

2. DCMU 蛍光法の概要

本手法は、慶應義塾大学助教の程木義邦氏により提案されたもの^{4),5)}であり、分光蛍光光度計を用いて藍藻類に特異的な光合成色素を直接励起し、その蛍光強度を計測することで、アオコの発生状況を予測するものである。

光合成の阻害効果のあるDCMU試薬を添加した場合の蛍光強度 (F_M) と添加しない場合の蛍光強度 (F_0) を測定し、その差分から光化学系Ⅱの最大量子収率 (F_V / F_M) を求めることにより光合成活性のポテンシャル、すなわちアオコの元気度を定量的に把握するところが本手法の大きな特徴である。

以下に F_V / F_M の算出式を示す。

- ・ $F_V / F_M =$ 光化学系Ⅱの最大量子収率
- ・ $F_V = F_M - F_0$
- ・ F_M : DCMU添加後の蛍光強度
- ・ F_0 : DCMU添加前の蛍光強度

この手法を用いてダム貯水池での F_V / F_M を継続的にモニタリングし、 F_V / F_M の増大が認められると、

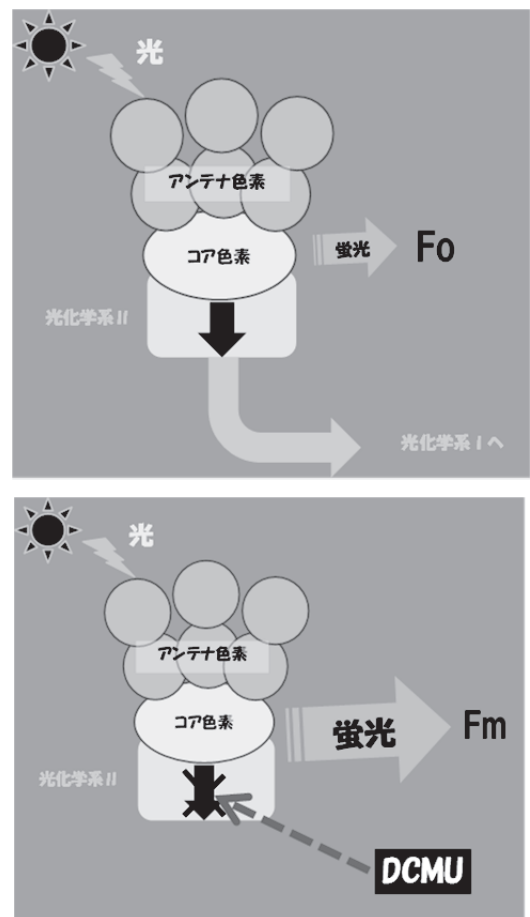


図-1 DCMU蛍光法の概念図

それ以後2週間～1ヶ月以内にアオコ原因藻類が増殖し、アオコ現象が顕在化するものと想定される。つまり、アオコ現象が顕在化する前にその予兆を察知することが可能となる。

3. 研究対象ダムの概要

(1) ダム概要

城山ダムは、神奈川県最大の一級河川である相模川の上流部に建設(1965年竣工)された総貯水容量 $62.3 \times 10^6 \text{m}^3$ 、集水面積 $1,221.3 \text{km}^2$ の多目的ダム(洪水調節、灌漑用水、水道用水、工業用水、発電)であり、ダム貯水池は津久井湖の名で知られている。

なお、城山ダムの直上流には、相模ダム(1947年竣工、相模湖)があり、城山ダムとの統合運用が行われている。

(2) 城山ダムにおける水質問題

城山ダムとその上流にある相模ダムでは、1960年代からの高度経済成長に伴い流域での宅地開発や観光開発が進み、ダム貯水池の富栄養化が進行した。その結果、1972年に初めてアオコが確認され、以降、



図-2 城山ダム位置図

1980年代からは夏季を中心にアオコの異常発生が頻繁に確認されるようになった^{6),7)}。

アオコの原因となっている藍藻類は、主にミクロキスティス属であるが、それ以外にもアナベナ属やアフアニゾメノン属等も確認されている。

ミクロキスティス属は、毎年 $10^4 \sim 10^5$ cells/mLレベルで発生しており、多い年では 10^7 cells/mLに達することもある^{6),7)}。

(3) 水質保全対策

城山ダムでは、前項に示したアオコ対策として、1993年～1997年の間に合計9基の水質保全施設（空気揚水筒×1基、散気管：4基、流動化装置：4基）が設置された。

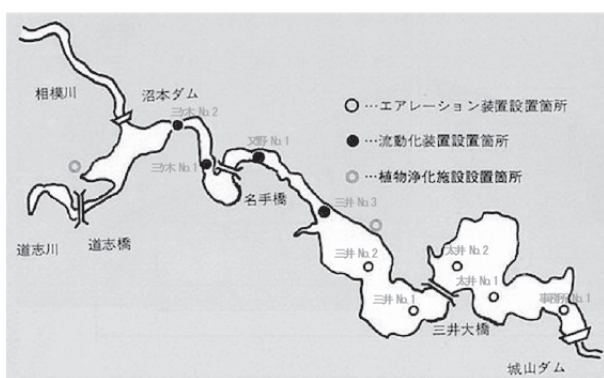


図-3 城山ダムの水質保全施設位置図⁸⁾

その結果、アオコの発生量は従前よりかなり減少したが、完全に抑制されるには至っておらず、現在もほぼ毎年、アオコの発生が確認されている^{6),7)}。

4. 計測・解析方法

(1) 現地調査

城山ダム湖水の採取は、2014年5月上旬から9月中旬の間に概ね2週間に1回の頻度で計13回実施した。

採水位置は、城山ダム貯水池内の下流部に位置する三井大橋と同上流部に位置する名手橋とし、橋上からのバケツ採水によりサンプルを採取した。



図-4 採水位置図

(2) 室内分析

現地で採取した試水について、クロロフィルの蛍光測定（590nm励起、680nm蛍光）を行った。計測については、文献^{4),5)}を参照するとともに、当該論文の執筆者である慶應義塾大学の程木助教に指導を仰ぎ、以下に示す方法で実施した。なお、今回の分析には、日本分光株式会社製の「FP-8200DS」を用いた。

表-1 分光蛍光光度計の諸元

機種名	FP-8200DS
メーカー	日本分光株式会社
光源	150Wキセノンランプ
測定方法	単色光モニタ比演算方式
測定波長範囲	200～750nm
感度	S/N=500以上 バンド幅10nm(Ex, Em)
スペクトルバンド幅	2.5, 5, 10, 20nm
波長正確さ	±2.0nm
波長繰り返し性	±1.5nm
寸法	490(W)×545(D)×270(H)mm
重量	34kg
所要電力	AC100V±10V 270VA
設置環境	周辺温度 15～35℃ 湿度85%以下

① サンプルング

- ・必要サンプル量：50mLを採取する。（1回の蛍光測定に必要なサンプル量は3mL）
- ・測定前30分程度サンプルを暗所に置いた後、速やかに測定する

②F₀測定

- ・サンプルを3mL分取する
- ・590nm励起、680nm蛍光の測定条件でDCMU添加前の蛍光強度 (F₀) を測定する
- ・スキャンスピードは1sec、バンド幅は10nmに設定する

③DCMU添加

- ・DCMU溶液3mM (Me-OH溶媒) を15 μL添加し、十分に混合する (サンプル3mL + DCMU3 μLで最終濃度は15 μMとなる)

④F_M測定

- ・DCMU添加後、正確に30秒で蛍光強度 (F_M) を測定する

なお、藍藻類等の不純物を多く含むサンプルでは、計測値にバラつきや異常値が含まれることが多いことから、以上の方法による計測は1サンプルにつき3回実施することとした。

表-2 分光蛍光光度計の測定条件

測定モード	蛍光強度
励起側バンド幅	10nm
蛍光側バンド幅	10nm
レスポンス	0.5sec
励起波長	590nm
蛍光波長	680nm
繰り返し回数	7回
繰り返し間隔	1sec

また、採取した試水は、植物プランクトンの同定・計数を行うとともに、生体積の測定も行った。

(3) F_V / F_Mの算出方法

今回使用した分光蛍光光度計は、1回の計測で連続7回の蛍光強度の測定を行う。一般的に、蛍光強度は測定時間とともに徐々に上昇する傾向がある。このため、測定された7つの値のうちどの値を採用するかによって、F_V / F_Mの値が大きく変わり、適切に増殖の予兆を察知できるかが左右されることから、値の採用方法は本手法の確立にあたり極めて重要な要素である。

そこで、アオコ発生予測という本研究の観点を考慮し、蛍光吸収が過小評価されないように以下の基準に基づいてF_V / F_Mを算出することにした。

- ・F₀は自動算出された値の平均値を採用する
- ・F_Mは自動算出された値の最大値を採用する

- ・但し、3回平均を求めた時の偏差が大きい場合、F₀の3回の値に大きく変動がある場合は、全データの中から任意で抽出する

5. 結果

以下に2014年に採取したサンプルについてF_V / F_Mを算出した結果と実際の藍藻類の増殖状況、そして増殖環境に影響を与える気象状況等について整理する。

(1) 名手橋のF_V / F_Mと藍藻類生体積との関係

F_V / F_Mの経時変化と藍藻類生体積の経時変化を調査地点毎に整理した結果を図-5、図-6に示す。

- ・F_V / F_Mは、名手橋・三井大橋ともに6月中旬～7月中旬に上昇した。
- ・その後、名手橋では8月中旬に一旦低下し、三井大橋では増減を繰り返した。
- ・F_V / F_Mのピーク値は名手橋よりも三井大橋のほうが低く、増減も緩やかであった。
- ・名手橋の藍藻類は、6月中は確認されず、7月上旬から増加を始め、8月上旬にピークを迎えた。
- ・三井大橋の藍藻類は、名手橋と同様の傾向だが、加えて5月にも確認された。

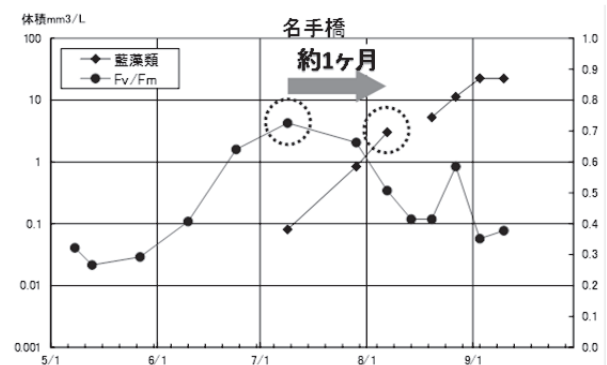


図-5 名手橋のF_V/F_Mと藍藻類生体積の変化

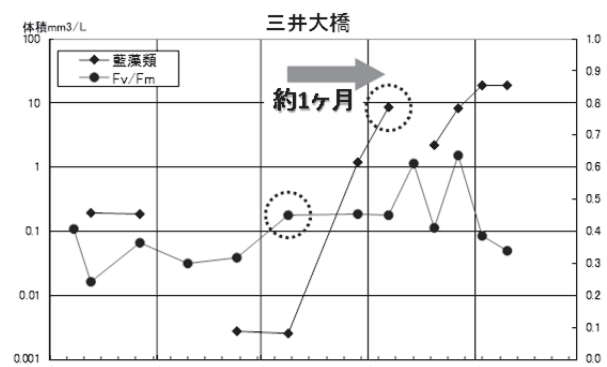


図-6 三井大橋のF_V/F_Mと藍藻類生体積の変化

以上の結果から、本手法により F_V / F_M を求め、その値の推移をモニタリングすることで、夏季の藍藻類によるアオコ発生（藍藻類体積が $1\text{mm}^3/\text{L}$ を超えると明確なアオコ状態として認識される場合が多い）の予兆を約1ヶ月前に察知できる可能性が確認された。

(2) 名手橋 F_V / F_M の推移と藍藻類増殖との関係

名手橋における F_V / F_M の経時変化と藍藻類の属別の生体積の推移、環境要因として気温、水温、日照時間、降水量を整理した結果を図-7に示す。

名手橋における F_V / F_M は、7月末から8月中旬にかけて一時的に低下し、同時期に藍藻類の優占種がアナベナ属からアフアニゾメノン属に変化していた。この時期の環境要因に着目すると、降雨や日照時間の低下が認められた。

以上より、貯水池内での鉛直混合が促進することにより、アナベナ属の増殖に適した環境が弱体化して F_V / F_M が低下する一方で、アフアニゾメノン属の増殖に適した環境が形成されたことにより、 F_V / F_M が再度増大したため、一時的に F_V / F_M の低下が確認されたものと推察される。

(3) 三井大橋 F_V / F_M の推移と藍藻類増殖との関係

三井大橋における F_V / F_M の経時変化と藍藻類の属別の生体積の推移、環境要因として気温、水温、日照時間、降水量を整理した結果を図-8に示す。

三井大橋における F_V / F_M は、名手橋のそれと比べて全般的に低い傾向がある。実際に確認された藍藻類の現存量も名手橋より三井大橋のほうが若干少なく、藍藻類の増殖環境として三井大橋は名手橋よりも適していなかったものと推察される。

三井大橋は、名手橋よりも開放的で滞留しにくい地形条件であるほか、近傍で2つの曝気循環施設が稼働していることから、貯水池内の循環混合状態が良好である。このような環境条件の差が、 F_V / F_M のピーク値の違いや変動幅の違いに影響したことが想定される。

6. まとめ

本報では、DCMU蛍光法によりアオコ発生を事前に察知する手法の実用化へ向けて実施した調査結果について取りまとめた。2014年に実施した調査からは、以下に示す成果を得ることができた。

- ・ F_V / F_M が藍藻類の増殖に1ヶ月程度先駆けてピー

クを示したことから、夏季の藍藻類によるアオコ発生の予兆を察知することができる可能性があることが示された。

- ・藍藻類の優占種が変化する際には、大きな貯水池内の環境変化がなくとも F_V / F_M の一時的な低下が認められたことから、 F_V / F_M をモニタリングすることによりアオコ発生の予兆だけでなく種の変化の予兆をも察知することができる可能性があることが示された。
- ・この結果は、アオコ衰退時期の予測にも活用できる可能性がある。
- ・ F_V / F_M は、アオコの原因となる藍藻類の増殖環境に応じて変化することから、曝気循環設備等の水質保全対策の効果を確認するための指標としても活用できる可能性が示された。
- ・ F_V / F_M の算出方法は、計測された複数の値の中から「 F_0 ：平均値」「 F_M ：最大値」を採用することにより、顕著な F_V / F_M 値の変化を捉えることができることが示された。

F_V / F_M のモニタリングによってアオコの発生時期や衰退時期、種の変化のタイミングが事前に把握できれば、複数の藍藻類が発生してアオコ問題とカビ臭問題が生じているダム貯水池では、カビ臭の発生時期や終息時期を事前に把握できることとなる。

水道事業者が浄水処理を行う際には、活性炭の確保量や確保が必要な時期を把握することが極めて重要であり、この予測はそれらを推量するにあたって非常に有益な情報になりうる。

また、 F_V / F_M を継続的にモニタリングすることによって、水質保全対策の効果が藍藻類の増殖過程にどのような影響を及ぼすかを評価するための指標としても活用できる可能性があり、水質保全対策の評価精度向上や適切な運用のために活用することも期待される。

しかし、これまでに述べた成果は、1年のフィールド調査に基づく結果であり、且つ気象や水象が安定した条件下で実施した調査結果であることから、異なる貯水池や同じ貯水池でも異なる環境条件においても同様の傾向が読み取れることを確認し、本手法の確実性・汎用性を確保する必要がある。

また、今回の成果は、調査結果を一通り整理した後で、 F_V / F_M 値の変化と藍藻類の増殖過程とを見比べて、その関係性を整理することで得られたものである。

したがって、調査の途中段階で F_V / F_M 値を見るだけで、本当にアオコ発生の予兆と認識できるかについ

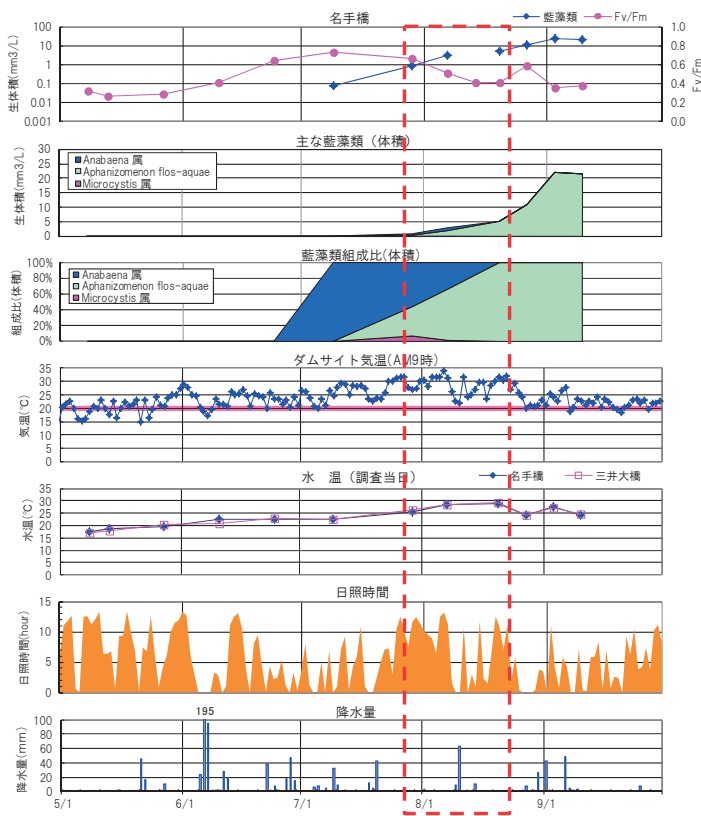


図-7 名手橋における F_V / F_M ・藍藻類生体積・環境要因の推移と湖面状況の変化

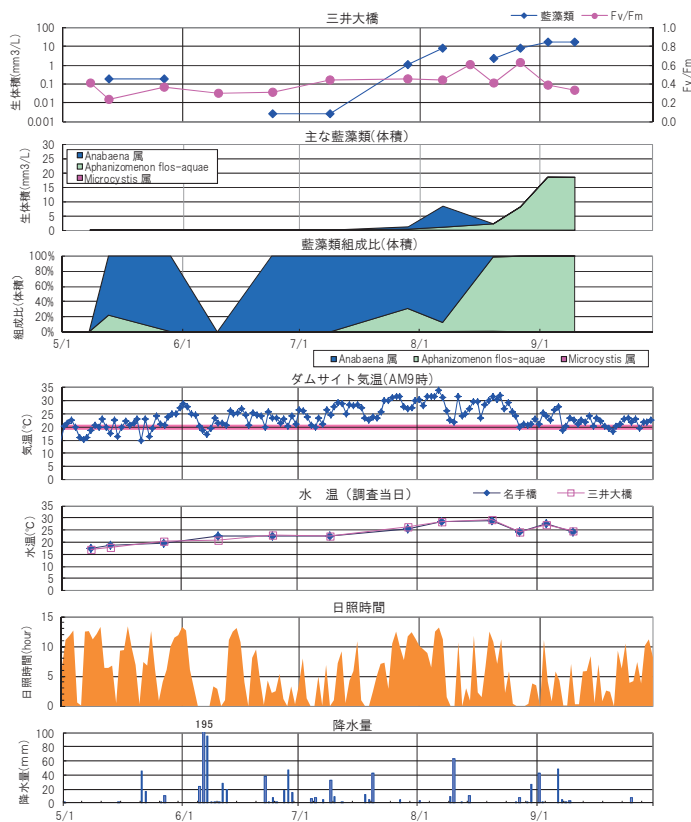


図-8 三井大橋における F_V / F_M ・藍藻類生体積・環境要因の推移と湖面状況の変化



図-9 分光蛍光光度計の設置例



図-10 DCMU試薬の使用環境の例

て確認する必要がある。

筆者らは、2015年にも同フィールドで調査を実施しており、引き続き本手法の妥当性を検証していく予定である。

そして、最終的には全国のダム貯水池において適用可能な「アオコ発生予報マニュアル」といった形で取り纏めることを目標としている。

F_V / F_M 値を算出するために測定する分光蛍光光度計は、現時点ではまだ比較的高額な製品であり、また設置にも一定のスペースを要する。また、添加するDCMU試薬は使用後の処理に一定の施設が必要であるため、今のままでは現場での適用にやや難があることは否めない。

したがって、本手法の汎用性が確認され、マニュアルとして整備されると同時にメーカー側での製品改良が進み、よりコンパクトで簡便な測定方法が開発されることを期待する。

謝辞

本研究にあたり神奈川県 県土整備局及び企業局よりダム運用に係る諸データを、同相模川水系ダム管理事務所よりフィールド使用にあたりご配慮頂いた。

分析方法や分析結果の整理方法について、本手法の開発者である慶應義塾大学 生物学教室の程木義邦助教から多くのご指導を賜った。

本研究結果は、「ダム貯水池水質保全対策研究会」(委員長: 埼玉大学大学院 浅枝隆教授) において報告し、有益な助言を賜った。

現地調査やデータ整理等では、森川敏成氏、斎藤聖喜氏、小関昭徳氏、高山尚子氏、水上紗智氏をはじめとする株式会社日水コン 技術第一部及び環境・資源部に尽力頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 木村文宣・田中靖：カビ臭産生／非産生に着目した藍藻綱ユレモ目の分類同定手法開発の試み，平成23年度 ダム水源地環境技術研究所 所報，2012
- 2) 曝気循環施設及び選択取水設備の運用マニュアル(案)，国土交通省 河川局 河川環境課，P2-17,18,19
- 3) 香出ら：アオコ事前検知システムの紹介，土木学会第64回年次学術講演会，平成21年9月
- 4) Y.HODOKI, K.OHBAYASHI, K.KOBAYASHI, N.OKUDA and S.NAKANO：Temporal variation in cyanobacteria species composition and photosynthetic activity in experimentally induced blooms, Journal of Plankton Research, 33, 1410-1416, 2011
- 5) 程木義邦ら：蛍光法によるラン藻類の現存量と光合成活性の評価，日本陸水学会第76回大会，2011
- 6) 県営水道の水質，神奈川県企業庁水道局，1987～2006
- 7) 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値モデル解析
- 8) 神奈川県ホームページ，<http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f8018/p45936.html>