

ダム貯水池の冬季の淡水赤潮の発生状況と 数値解析によるフェンスの対策効果の検討

NUMERICAL SIMULATION ANALYSIS OF FRESH WATER RED TIDE AND EFFECT OF WATER QUALITY IMPROVEMENT BY FENCE

松梨 史郎¹・今村 正裕¹

Shiro MATSUNASHI and Masahiro IMAMURA

¹正会員 工博 電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

Fresh water red tide arose in the upper area of the reservoir in summer and winter in 2004 from the result of field study in the reservoir for electric power. The dominant species was also dinoflagellate (*Peridinium bipes*) on anyway, and it was arising in the winter in which the water temperature became about 5 degree.

We constructed water quality model considering swimming velocity of dinoflagellate which is one of the features of fresh water red tide, and reproduced almost the generation status of fresh water red tide which arose in the winter. On the improving water quality effect by the installation of the fence proposed as the improvement countermeasure recently, the possibility of assumed effect was indicated by the numerical simulation.

Key Words : reservoir, water quality model, fresh water red tide, fence

1. はじめに

従来の研究^{1)~8)}により, ダム貯水池に発生する淡水赤潮は, 栄養レベルが貧栄養, または中栄養レベルの貯水池での発生が報告されてきている。貯水池によって, 発生の時期が特定されている場合もあれば, 年間を通じて発生する場合もある¹⁾。また交換率や栄養レベルなどが同程度の特性を持った貯水池でも, 一方では発生し他方では発生しないなど, よくわかっていないのが現状である⁶⁾。藻類の種類としては, 渦鞭毛藻の比率が高く, これらは鞭毛を有して貯水池内を鉛直方向に移動できるため, 他の種類に比べて光制限や栄養塩の制限を受けにくいことが考えられる。またシスト(休眠細胞)を形成して底泥内に生息し, 環境条件が揃うと発芽して栄養細胞になって水中に生息すると言う特性を有している。

淡水赤潮の予測については, 幾つかのダム貯水池において再現のための数値シミュレーションが実施されているが, 検討例は少ない^{5), 6), 8), 9), 10)}。これは非常に富栄養化した湖沼や貯水池に発生する藍藻類とは違って, 淡水赤潮の発生メカニズムが未だ十分に解明されていないことによるのではないかとと思われる。

また, その対策方法として, 従来から赤潮回収船による回収や紫外線の照射などが挙げられてきているが¹¹⁾, 最近では, 濁水対策として導入例が増加しているフェンスを, 淡水赤潮の対策としても検討されつつある状況にある^{6), 9), 10), 13), 14)}。しかしフェンスの目的は, 自然の流動の制御であり, 赤潮の遊泳能力との相互関係については, 必ずしも定量的な評価が十分になされているわけではない。

このような状況に鑑み, 本研究では, 電力用ダム貯水池に発生した淡水赤潮に関する現地調査結果を考察すると共に, 当所の富栄養化予測モデル¹⁵⁾において赤潮プランクトンの鉛直移動速度を考慮して, 淡水赤潮の再現計算を実施することにより, 赤潮発生の特性について考察した。次に, フェンスの効果について, 数値解析に基づいて定量的な検討を行った。

2. 対象貯水池の淡水赤潮発生状況

(1) 調査内容

対象としたダム貯水池は, 交換率が9~11回/年であり, 成層型から中間型に位置する。淡水赤潮は, 1991年度の発生以来, 通年に亘って毎年断続的に発生しており,

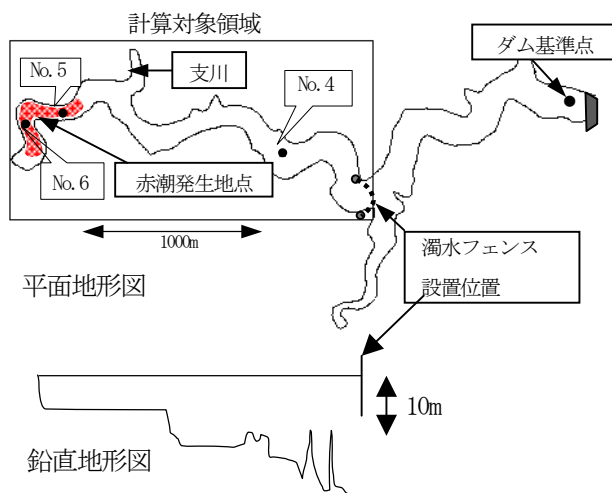


図-1 淡水赤潮の発生状況（2005年1月28日）

最近では2001年は6月以降、2002年は冬季を除いて通年、2003年は7月～11月にかけて発生していた。

2004年度～2006年度には、詳細な現地調査が実施された。本調査では、月に1回と赤潮発生時に、流入河川、No.4, 5, 6 地点（各水深20m, 6m, 4m）、支川（5m）、赤潮発生地点（4m）、ダム基準点（32m）において、上（水深0.5m）・中（1/2水深）・下層（湖底上1m）における水質調査を行った。水質の調査項目は、クロロフィルa、各態の窒素、リンと植物プランクトンの種類と細胞数（上層のみ）等である。濁水フェンスは貯水池全体のほぼ中央付近に深さ10mのものが設置されている。

(2) 発生場所・時期

表-1に淡水赤潮の発生状況を示す。細胞数が1000個/ml以上発生すると、目視上も明瞭な赤潮状態であると言われており²³⁾、この時期を赤潮発生時として、2004年度は9月22日、12月22日と、12月22日以降2005年2月7日までの間に、図-1に示すように、貯水池の上流端から測点No.5と4の間の支川との合流部付近にかけて規模の大小はあるものの、発生が確認された。優先種はいずれも*Peridinium bipes*であった。

しかしながら2005年度は、6月22日に支川で若干発生したのみである。また2006年度は、10月18日、11月22日に若干の発生が見られたが、高濃度の発生は12月20日、2007年1月17日の冬季のみであり、その後2007年度においては発生が確認されていない。

*Peridinium bipes*は、水温が15～25℃が最適であるとの報告¹²⁾や、2月に8℃で発生と言う報告もあるが²³⁾、本貯水池では約5℃になる冬季においても発生した。

表-1に示すように流入流量の大小はフラッシュ効果

表-1 赤潮発生状況と流入流量、降雨量の関係

月日	発生状況	日平均 流入流量(m³/s)	前10日間の 降雨量(mm)
2004/8/27	無	0.7	555
2004/9/22	有	1.9	153
2004/10/28	無	0.9	578
2004/11/17	無	2.3	154
2004/12/22	有	0.5	7
2005/1/19	有	0.3	1
2005/1/28	有	0.3	21
2005/2/7	有	0.3	18
2005/2/16	無	6.4	55
2005/3/16	無	30	30
2005/4/20	無	6.3	25
2005/5/18	無	0.8	1
2005/6/22	有	0.3	16
2005/7/20	無	0.8	103
2005/8/17	無	0.4	17
2005/9/21	無	0.4	5
2005/10/19	無	0.8	41
2005/11/16	無	1.3	123
2005/12/21	無	0.5	0
2006/1/18	無	2.2	115
2006/2/22	無	2.1	83
2006/3/22	無	3.3	94
2006/4/21	無	2.8	203
2006/5/25	無	2.8	143
2006/6/21	無	2.0	170
2006/7/27	有	3.2	277
2006/8/16	無	0.6	12
2006/8/23	無	4.0	454
2006/9/15	無	3.6	171
2006/9/23	無	2.8	246
2006/10/18	有	0.6	0
2006/11/22	有	0.9	75
2006/12/20	有	1.2	42
2007/1/17	有	1.0	15
2007/2/21	無	1.3	72

として、降雨量の大小は日射の状況として見てみると、流入流量は赤潮発生時には小さい。降雨量は赤潮発生前には比較的大きく、赤潮発生時には小さい傾向があり日照時間が長かったことが伺える。

また特に、赤潮の発生頻度が高く、規模が大きかった2004年度は、台風の上陸により、降雨や出水が多い年であった。このため2004年度は、他年度に比較して比較的水出時における栄養塩の流入等による影響を受けている可能性が考えられる。

(3) 栄養塩との関係

総じて栄養レベルは低く、2004年度は硝酸態窒素は0.02～0.44 mg/l、リン酸態リンは0.002～0.023mg/lであった。*Peridinium bipes*が赤潮を起こすのに必要な栄養レベ

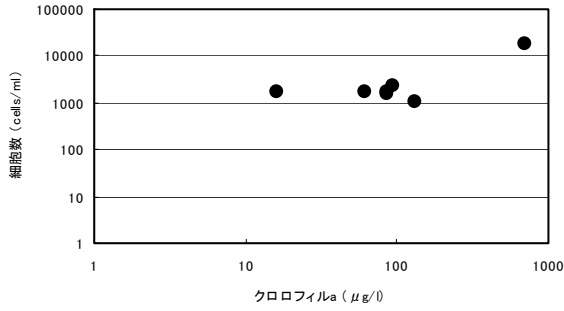


図-2 クロロフィルaと細胞数の関係

ルは、硝酸態窒素で 0.1~0.5mg/l, リン酸態リンで 0.01~0.05mg/l 程度との報告¹⁾があり、本貯水池の濃度は、前者については同レベル、後者については若干低めであった。また全窒素／全リン比はほぼ 10 以上であり、リン制限であることが確認された。

(4) 細胞数とクロロフィルaとの関係

図-2 に、細胞数が 1000 個/ml 以上で、かつ *Peridinium bipes* が全細胞数の 90%以上を占める場合におけるクロロフィルa-細胞数データ（上層のみ）の関係図を示す。1 測点を除いて 60 μgChl-a/l 以上が赤潮状態になっている。更にクロロフィルaが最小値となっている上述の 1 測点においても中層では 49 μgChl-a/l である。後述のように、実測値には上層よりも下層の濃度が高くなっている測点があり、採水時に赤潮のパッチ状態を上層では外し、下層では捉えていることなどが原因の 1 つとして考えられる。従ってこれらを勘案すると赤潮の発生が、細胞数が 1000 個/ml 以上とするならば、これはほぼ 40 μgChl-a/l 程度以上に相当するものと考えられる。

岸本²⁾は、*Peridinium bipes* の実測細胞数と細胞内の炭素量の関係を $3.8 \times 10^6 \text{ mgC/cell}$ としている。この値は、 $50 \text{ mg C/l} = 1 \text{ mg Chl-a/l}$ とするならば、 1000 cells/ml では、 $3.8/50 \times 10^6 \times 10^6 \text{ mgChl-a/l} = 0.076 \text{ mg/l} = 76 \mu\text{gChl-a/l}$ となる。また畑²⁾は赤潮状態を 25 μgChl-a/l 程度以上としており、値の幅が非常に大きい。今回の値は、これらの値の中間に当たる。

3. 淡水赤潮のシミュレーション

本ダム貯水池において淡水赤潮が発生している状況の水質モデルを用いて再現する事を試みた。

(1) モデルの概要

モデルは流動モデルと淡水赤潮モデルから成る。流動は、鉛直方向に静水圧近似を設けた準 3 次元モデル

である。密度差に基づく流れは、水温計算を連立させ、水温の変化が密度変化を介して生じるとした。貯水池は、基本的に鉛直 2 次元でも十分な精度で再現計算が可能な場合が多いが、本貯水池では、支川近傍でも赤潮発生が見られる場合があるため、支川と本川の水の交換を、地形や種々の流量・水位に応じて汎用的に扱えるように 3 次元モデルとした。

淡水赤潮が発生するときは、ほぼその種のみが発生が卓越し、他の種はほとんど発生しないため、本モデルでは、東京湾や手賀沼で適用したモデル¹⁵⁾を基礎として、淡水赤潮が単独で発生する様子を再現する事を想定して、クロロフィルaとして*Peridinium bipes*のみを対象とすることにした。本モデルではクロロフィルaを中心として動物プランクトン、無機態窒素・リン、有機態窒素・リン、CODの時空間変化を計算するものである。以下、クロロフィルaの基礎式を示す。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \{G_y - R_{y20} \theta_{RY}^{T-20}\} Y - C_{g20} \theta_{CG}^{T-20} ZY - \frac{\partial W_{CP} Y}{\partial z} + F(Y) \quad (1)$$

$$G_y = G_{y \max} f_T f_I \text{Min}(f_P, f_N) \quad (2)$$

ここに、Y: クロロフィルa, Z: 動物プランクトン, f_T : 水温の関数, f_I : 日射量 I の関数, f_P, f_N : 栄養塩の関数, $F(X)$: 水質Xに対する移流・拡散項である。

山田ら⁴⁾は *Peridinium bipes* の走光性による遊泳速度について、実験的に検討した。また岸本^{5,6)}も *Peridinium bipes* の遊泳速度について、実験的に検討している。岸本のモデル式では、貯水池における混雑効果係数や、限界細胞密度など、貯水池固有で実測の困難なパラメータが存在するため、本論文では、水温と日射量のみによって決定されるとする山田らの式を用いることとした。

以下に、山田ら⁴⁾が提案した *Peridinium bipes* の走光性による鉛直移動速度式を示す。

$$W_{CP} = e(V - V_s) - (1 - e)(V + V_s) \quad (3)$$

$$e = (0.0114 T + 0.686) \times \left(\frac{0.295 I}{I + 1000} + 0.74 \right) \quad (4)$$

$$V = 8.6 \times 10^{-6} \exp \left(- \frac{4550}{T + 273.16} \right) \quad (5)$$

$$V_s = 0.12 + 0.006 (T - 10) \quad (6)$$

ここに、 W_{CP} : *Peridinium bipes* の鉛直移動速度（上向きを正）、 e : 上方へ遊泳する藻体の割合、 V : *Peridinium bipes* の平均遊泳速度(m/hour)、 V_s : *Peridinium bipes* の平均沈降速度(m/hour)、 T : 水温 (°C)、 I : 照度 (日射

量)で、式(4)における I の単位は $\mu\text{E}/\text{m}^2$ ある。

(2) 計算条件

畑²⁾によると、シストの発芽は水温が 15°C 以上で見られ、 10°C 以下では全く起こらなかったとしている。また暗条件下でも発芽しており、光は不要であるとしている。本計算では赤潮が発生した1月19日～28日を対象とし、水温は 5°C であるため、シストの影響は無いとしている。

計算領域は、貯水池のほぼ中央の濁水フェンスの設置位置までとした。メッシュサイズは水平方向 20m 、鉛直方向 1m である。また、渦動粘性係数、渦動拡散係数は、共に水平方向は $10^3\text{cm}^2/\text{s}$ 、鉛直方向は $1\text{cm}^2/\text{s}$ とした。

水質の実測調査は、ほぼ11時～13時の範囲で実施されているため、実測調査時刻を12時として計算した。

境界条件は、流動については上流側では河川流量 $0.3\text{m}^3/\text{s}$ を、下流側では水位を与えた。水温については、流入水温は 4.0°C を、下流側では流入時は実測値に基づくデータを与え、流出時は一次微分 $=0$ とした。初期値としては、流動は $0\text{m}/\text{s}$ 、水温は 5.0°C で貯水池内一様を与え、流動が定常になるまで計算した。この時点で流入水温に伴う湖内の密度流が十分に形成されたものと判断した。水質計算については、先に述べたような本モデルを構成する各水質項目について、赤潮発生時として、1月19日の各測定点における水質濃度の実測値を鉛直方向、水平方向に補間して初期値とした。境界条件は、上流側からは水質の実測値に基づくデータを与え、下流側では流入時は実測値に基づくデータを与え、流出時は一次微分 $=0$ とした。また支川からの流入流量は無いため、一次微分 $=0$ とした。

(3) 計算結果

流れの中心軸上の鉛直分布を見ると、測点No.6, No.5を含む上流域では河川からの低水温の流入水が、密度差の影響で下層に流下し、表層では戻り流れが生じており、鉛直循環流が形成されていた。またNo.5地点よりも下流側では下流に向かって流下していた。

クロロフィルaの計算結果について、図-3に表層平面分布を、図-4に各観測点における実測値と計算結果の鉛直分布の比較を、図-5に表層の時系列変化を示す。

2. で述べたように赤潮を $0.04\text{g}/\text{m}^3=40\mu\text{g}/\text{l}$ 程度以上と考えると、図-3の表層分布からは、図-1に見られるような上流側からNo.5地点付近に亘って発生している状況が認められ、計算結果の妥当性が見られた。

図-4において、No.5,6地点では、実測値には鉛直方向に濃度差があり、上層よりも下層の濃度が高くなっているが、図-1の赤潮発生の平面分布から考えると、

上層の濃度は低すぎると考えられる。採水時に赤潮のパッチ状態を上層では外し、下層では捉えていることなどが原因の1つとして考えられる。

本計算は、1月19日～28日の赤潮発生の継続状況をシミュレートしたものである。計算結果は、表層で若干高いが鉛直方向にほぼ一様であり、これは夏季のような強い水温成層が無く、鉛直混合が進んでいることの反映であると考えられる。

上述のように、濃度レベルを見るとNo.6では表層の実測値が赤潮のパッチを外している可能性が高く、むしろ表層も底層と同レベルの濃度であったであろうこと、また図-1と図-3の比較から、赤潮の発生範囲がほぼ同様である事を考慮すると、計算結果はほぼ妥当であると考えられる。

また図-5に見られるように、日射量の日変動及びそれに伴う遊泳速度の変動の影響を受けて、クロロフィル濃度は、日中には上昇し、夜間には減少する日変動(例えばNo.6地点では最大 $0.005\text{g}/\text{m}^3=5\mu\text{g}/\text{l}$ 程度)が生じていた。これに対して底層では日射量の変動影響が小さく、クロロフィルaの日変動はほとんど無かった。天野⁷⁾は、貯水池末端におけるクロロフィルaの連続観測を実施しており、水温が $15\sim 6^\circ\text{C}$ である11月初旬の表層において、 $10\sim 30\mu\text{g}/\text{l}$ 程度の日変動を観測している。鉛直移動速度が水温と日射量の関数であり、特に照度よりも水温上昇による鉛直移動速度増大の影響が大きい事を考慮すると、直接の比較はできないが、水温が 5°C の本計算結果による藻類の日間の変動幅は、ほぼ妥当なのではないかと考えられる。

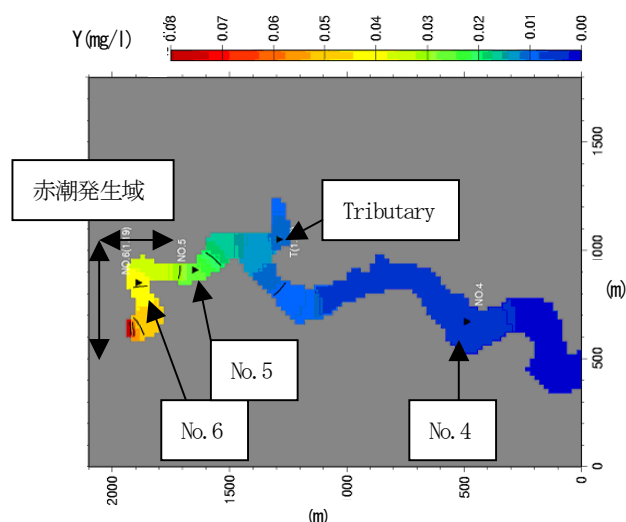


図-3 クロロフィルaの空間分布
(2005年1月28日12時、表層)

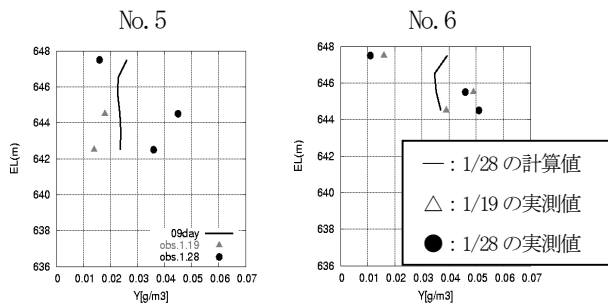


図-4 クロロフィル a の実測値と計算結果の比較

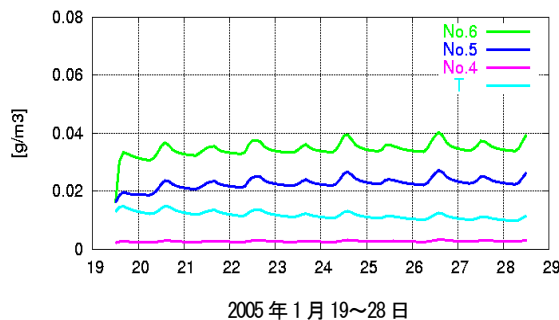


図-5 クロロフィル a の時間変化 (表層)

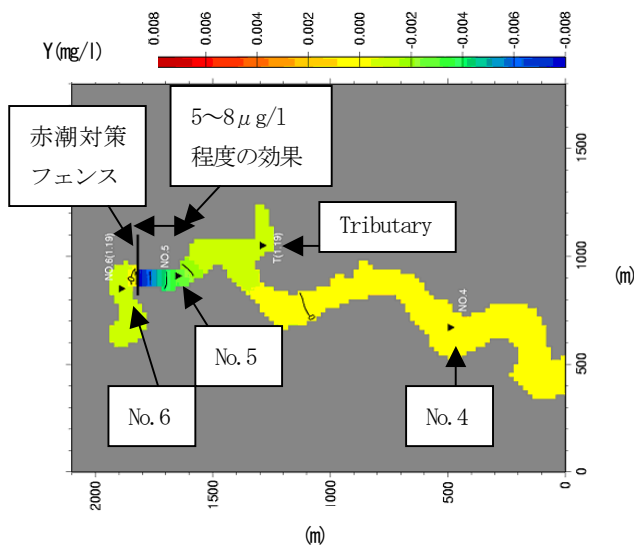


図-6 クロロフィル a の空間分布 (フェンス有り無しの差)
(2005 年 1 月 28 日 12 時, 表層)

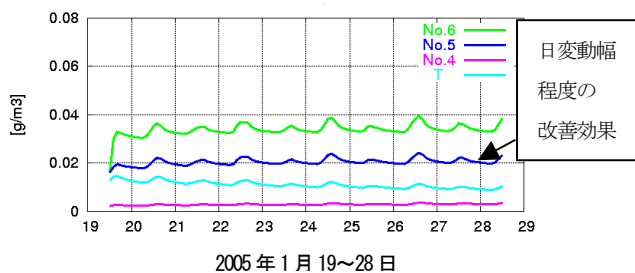


図-7 クロロフィル a の時間変化 (表層, フェンス有り)

4. 数値解析によるフェンスの設置効果について

近年、濁水対策だけでなく、淡水赤潮対策としても提案され、設置例が増えつつあるフェンスによる藻類の抑制対策は、以下のような効果があると考えられる¹³⁾。すなわち、流入水の制御による流入水の潜り込みの促進や、栄養塩の供給の阻止、表層水の分断による藻類の上流への移動の阻止や、藻類の下流への拡散の阻止、藻類の沈降の促進等である。

松尾ら^{9),10)}は、フェンスが実際に設置されている蓮ダムと青蓮寺ダムにおいて、調査結果を検討している。蓮ダムでは赤潮の下流側への流下防止を主目的としており、フェンスの下流側では赤潮の濃度が下がり、上流側での封じ込めに成功しているが、出水時の後にはフェンスを越えた赤潮がフェンス下流側に集積しているとしている。また青蓮寺ダムでは、流入水の潜入点下流部表層の高濃度が分散しているとしている。

このような状況を踏まえて、本論文ではフェンスの下流で下層に潜りこまれた赤潮が遊泳能力による表層への再集積が可能か否かについて着目し、検討した。

現場に設置されたフェンスの効果の、現地実測による検討は、当然必要であるが、複雑な現場の環境条件が重なるため、フェンスを設置する前段階において、数値計算による検討は、フェンスのみの影響、効果を取り出せるものとして意義のあるものと考えられる。

(1) 計算条件

フェンス設置に当たっては、淡水赤潮発生水域、ダム貯水池の運用による水位変化を考慮する必要がある。

本貯水池では、淡水赤潮の発生位置はこれまでの経験から、上流域から支川との合流点までの領域に限られている。また、透明度の実測値 (冬季 2~3m 程度) から判断すると有光層はその 2~3 倍である 5~6m 程度である。更に、冬季には水位低下をさせており、湖水の流下を妨げないためには、フェンスの下端から湖底までの距離を最低 2m 程度は維持する必要がある。これら状況を勘案し、No.5 と No.6 との中間地点に、深さ 7m のフェンスを設置することを想定した。この設置位置では、表層の流れは下流に向かう位置になっている。

(2) 計算結果

流動計算の結果から、フェンスの設置により、フェンス下流 50m 近傍までフェンスで遮断された深さまでは流動が制御され、フェンスの下端から湖底までは流速が大きくなっていた。図-6 にクロロフィル a の表層の平面分布のフェンスの有無による差 (フェンス有り

の結果から無しの結果を差し引いたもの。マイナスになっている青い部分が、改善効果があった領域)を、図-7にクロロフィルaの表層の時系列変化を示す。

図-6、及び図-5, 7 の比較から、フェンスの設置により、フェンス上流側のクロロフィルaは、フェンス下流では下層に潜り込み、濃度が低下することが示された。図-6 からフェンスの直下 (No.5 と 6 の中間点) から No.5 地点近傍までの、距離にして 200m 程度の下流まで $5\sim 8\mu\text{g/l}$ 程度、すなわち日変動相当分程度の濃度低下が見られた。これにより、下層に潜り込んだ植物プランクトンは鉛直移動速度による日周変動をしても増殖できなかったことになる。

本計算では、冬季のために貯水池の水位変動等を考慮して設置場所と深さを想定したため、2. で示したような最上流域の $40\mu\text{gChl-a/l}$ 以上の高濃度の赤潮そのものの改善には至っていない。しかし前述のような定性的に想定されるフェンスによる藻類の抑制効果の可能性のうち、主として表層水分断による藻類の下流への拡散の阻止の効果があったものと考えられる。

フェンスによる対策は貯水池水の自然の流動のみに拠っているが、淡水赤潮の発生時は、濁水発生時と異なり、流入流量が非常に小さい。このため湖内の流動が小さく、濁水フェンスほど有効な対策にはなりにくいと考えられる。しかし本計算では、流入流量が $0.3\text{m}^3/\text{s}$ で、本貯水池への流入量としても非常に小さいにもかかわらず効果があった。

残念ながら、冬季の発生に際し、水位が低下する事を勘案しての最善のフェンス設置であるため、最上流の赤潮対策については、遮光等の別途の方法が必要である。しかし夏季、秋季の他の時期には、流入量が $2.0\text{m}^3/\text{s}$ 程度であっても発生しており、水位低下は無い事を考えると、これらの時期にはフェンスの効果は、より大きく現れてくる可能性があると考えられる。

5. 結語

淡水赤潮に関して実施された現地調査の結果から、2004 年度の夏季、冬季において、上流域に赤潮発生が確認された。優先種は渦鞭毛藻類 (*Peridinium bipes*) であり、従来から報告されている水温よりも低い、約 5°C になる冬季においても発生していた。

淡水赤潮の特徴の一つである鉛直移動速度を考慮した水質モデルによるシミュレーションを実施したところ、日射による鉛直移動速度の変化の影響を受けながら、冬季に発生した淡水赤潮がほぼ再現された。

更に、フェンスの設置による水質改善効果について

検討した結果、流入流量が $0.3\text{m}^3/\text{s}$ という小流量であるにもかかわらず、フェンス設置場所から下流 200m 付近まで、淡水赤潮の日周変動程度の改善効果が見られ、想定された効果が得られる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 石田祐三郎：淡水赤潮の現状と問題点，水質汚濁研究，Vol.14, No.5, pp.270-275, 1991.
- 2) 畑幸彦：永瀬ダム湖における淡水赤潮の発生機構に関する研究，高知県委託研究報告書，p.226, 1984.
- 3) 門田 元編：淡水赤潮，恒星社厚生閣，p.290, 1987.
- 4) 山田正人，宗宮功，安永望，小野芳朗：渦鞭毛藻 *Peridinium* の走光性による遊泳速度に関する研究，陸水学雑誌，Vol.56, No.2, pp.125-135, 1995.
- 5) 岸本直之：河川整備基金助成事業，電力ダムにおける淡水赤潮対策技術の評価手法の開発，報告書，1999.
- 6) 岸本直之：ダム貯水池における渦鞭毛藻 *Peridinium bipes* による淡水赤潮の形成要因に関する研究，京都大学学位論文，2000.
- 7) 天野邦彦，田中康泰，鈴木宏幸，安田佳哉：貯水池末端における持続的な淡水赤潮に関する研究，水工学論文集，第44巻，pp.1083-1088, 2000.
- 8) 松尾直樹，山田正人，宗宮功：貯水池上流端における流動特性と淡水赤潮現象との関係，水工学論文集，第40巻，pp.575-581, 1996.
- 9) 加藤正治，武田誠，松尾直樹：流動制御設備を有する貯水池での流動制御と淡水赤潮現象に関する数値解析，環境工学研究論文集，第37巻，pp.435-444, 2000.
- 10) 松尾直樹，武田誠：流水制御フェンスによる貯水池の淡水赤潮対策について，土木学会中部支部研究発表会，pp.297-298, 1998.
- 11) 田野襄一郎，佐々木正彦，井芹寧：紫外線照射によるダム湖の淡水赤潮処理，電力土木，No.239, 1992.
- 12) 井芹寧：ダム貯水池における淡水赤潮とアオコの発生機構および対策について，九州技報第23号，pp.33-40, 1998.
- 13) 井芹寧，森雅佳，松岡陽子：閉鎖性水域における異常発生藻類の制御技術，資源環境対策，9, pp.1-14, 2002.
- 14) 秋山壽一郎，重枝未玲，安藤祐馬，小野修平，小川真由子：フェンスによる貯水池潜入密度流の流動制御，水工学論文集，第50巻，pp.1285-1290, 2006.
- 15) 松梨史郎，井野場誠治，下垣 久，宮永洋一：手賀沼における流動・水質・底質の時空間変動シミュレーションと底泥からの栄養塩溶出の水質への影響，土木学会論文集，No.712/II-60，pp.161-173, 2002.

(2009. 9. 30受付)