

(22) 三春ダムの植物プランクトンと濁質堆積を中心とした物質循環解析

梅田信^{1*}・柴田光彦²・牛島健³・田中仁¹

¹ 東北大学大学院工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

² 茨城県土木部 (〒310-8555 茨城県水戸市笠原町 978-6)

³ 北海道大学大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

* E-mail: umeda@civil.tohoku.ac.jp

貯水池の長期的な水質変動を予測する上で、植物プランクトンの内部生産による負荷の蓄積を把握することが重要であるため、富栄養湖である三春ダムにおいて、内部生産物の堆積フラックスに着目した検討を行った。セディメントトラップを用いた沈殿量の現地観測および水質解析の数値モデルを用いた検討を実施した。その結果、夏期の植物プランクトンの増殖が活発な期間における物質の沈殿量を把握することができた。また沈殿物の成分分析結果から植物プランクトンの沈殿量比率を推定したところ、重量の点からは小さい比率であることが分かった。しかし、数値解析から窒素やリンの循環量を推定した結果、20 日程度の短期間でも、湖内に溶存している全量以上が摂取、分解の循環をしていることが分かった。

Key words : reservoir, water quality, phytoplankton, sediment trap, material cycle

1. 序論

貯水池における藍藻類の異常増殖（アオコ）は浄水ろ過障害や景観障害といった利水及び環境面で問題視されている。それは窒素やリンの過剰な供給に起因していることが一般的である。貯水池内への窒素・リンの負荷源には、主として流入水によるもの（外部負荷）と底泥からの溶出によるもの（内部負荷）の二つである。我が国を代表する内湾での調査結果¹⁾によると、リンの内部負荷／外部負荷の比率は、東京湾 0.29、大阪湾 0.46、三河湾 1.4、広島湾 4.3 となっている。また、富栄養化が顕著な手賀沼（千葉県）でのシミュレーション結果²⁾では、約 0.2 という比率が報告されている。これらの内湾や湖沼では、底泥からの溶出による栄養塩の負荷量が大きいため、長期的な水質変動を予測する上で、系内への負荷の蓄積を把握することが重要であると考えられる。

湖外から SS として流入して沈殿、堆積する量の把握は、流入水の濁度モニタリングのような方法によって把握がしやすい^{3) 4)}。しかし、三春ダムのような富栄養化した湖沼では、内部生産された物質が湖内にどの程度捕捉されるかは、なかなか把握するのが難しい。

また堆積物としての底泥は、流入濁質が沈殿するものと湖内で増殖したプランクトンの死骸（デトリタス）の混合である。植物プランクトン及びデトリタスは易分解性成分の比率が高い有機物であるため、このような堆積物からの溶出が水質変化（悪化）に寄与する度合いは大きいと考えられる。

本研究では、富栄養化現象が見られるダム湖における湖底への堆積物質の質と量に関する検討を、現地観測と数値解析の両面から実施した。本研究で対象とする三春ダムは、元々土砂による濁りが比較的目的立つ河川に存在する。そのため、湖内への堆積は、河川から流入する SS 成分と湖内で生産される植物プランクトン由来の成分とを考慮する必要があると考えられる。また、湖内への蓄積という点からは、無機態の溶存性の栄養塩類が湖内で捕捉される効果も重要である。そこで本論文では、貯水池の水質管理へ寄与しうる知見を得ることを目的として、植物プランクトンによる湖内の内部生産物を含む懸濁物質の湖内堆積フラックスに着目した検討の結果についてとりまとめた。

2. 対象ダム

福島県三春町の阿武隈水系大滝根川上に位置する三春ダムを、本研究の対象とした。総貯水量は $42.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、有効貯水量は $36 \times 10^6 \text{ m}^3$ であり、貯水池の湛水面積 2.9 km^2 、集水面積 226.4 km^2 である。図-1 に示すようにヤツデ状のやや複雑な形状をしている特徴がある。上流に田村市（人口約 4 万人）の市街地や農地等を抱えているため、その負荷により、ダムが完成した平成 9 年度以降アオコの発生が見られる。

三春ダムでは各種の水質保全施設が設置されている。そのうち、図-1 に示すような配置で、深層曝気施設は 2 台、浅層曝気施設は 5 台設置されている。

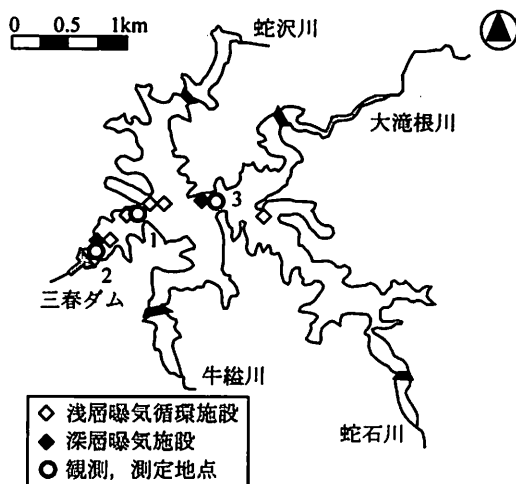


図-1 三春ダム貯水池の平面図と観測地点

3. 観測・解析手法

(1) 現地観測

現地観測は 2009 年 7 月 16 日から 8 月 13 日に行った。実施内容は、下記の植物プランクトン増殖に伴う水質的な変化を追うため、以下に述べるような大きく 3 区分の測定を行った。

a) 多地点水質測定

投げ込み式の多項目水質計 (JFE アドバンテック社製、AAQ-I183) を用いて、水温、濁度、溶存酸素 (以下 DO)、クロロフィル a (以下 Chl-a) の鉛直分布を、湖内 3 地点で計測した。測定は 7 月 16 日、21 日、28 日、8 月 4 日、13 日の計 5 回実施した。測定地点は図-1 に示した通りである。また Chl-a については、計器測定値との比較をするために、植物プランクトンの現存量が大きい表層付近 (水深 0.5m ほど) の採水を測点 3 で行い、アセトン抽出による吸光法 (ユネスコ法、たとえば文献⁹⁾) により Chl-a 濃度の分析を行った。

b) セディメントトラップによる堆積物分析

セディメントトラップは、7 月 16 日に設置した後、概ね 1 週間の間隔で回収と再設置を行った。設置箇所は図-1 における測点 1、3 の 2 地点であり、トラップを水深 5m 及び底上 2m に固定して設置した。設置したトラップの大きさは、口径 8cm、高さ 20cm である。分析は堆積物の質量及び成分分析 (炭素、窒素、リン) を行った。回収した試料は遠心分離機を用いて、固液分離を行った上で固体を十分乾燥し、堆積質量を測定した。成分分析のうち、炭素、窒素については Vario EL III 元素分析装置 (ドイツ・エレメンタル社製) により行った。リンについては、乾燥試料を蒸留水に再懸濁させた後に、全リン濃度の水質分析 (JIS K102) を行い、含有率を算出した。なお、セディメントトラップの各設置期間について、

7 月 16 日～21 日を期間 A、7 月 21 日～28 日を期間 B、7 月 28 日～8 月 4 日を期間 C、8 月 4 日～8 月 13 日を期間 D と以下に表記する。

c) 水質連続観測

昇降機付きの自動測定装置を用いた水質鉛直分布の測定が、ダム管理所により行われている。測器は、春田大橋 (測点 3 付近) の橋脚に設置されている。測定水深は 0.5m、1m および 2m から 34m (貯水位によってはそれ以下) までの 2m 間隔である。測定は 1 日 7 回 (2 時および 6 時から 21 時までの 3 時間間隔) である。測定項目は水温、濁度、DO、Chl-a である。

(2) 数値解析

a) 流動解析モデル

湖水の流動解析は、準 3 次元解析モデル⁶⁾を用いた。基礎方程式は、静水圧近似及びブシネスク近似した運動方程式、連続式、全水深にわたって積分した連続式、水温の輸送方程式であり、方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{Du}{Dt} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + A_H \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + A_V \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho dz \quad (2)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + A_H \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + A_V \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho dz \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_H^\eta u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_H^\eta v dz = 0 \quad (4)$$

$$\frac{DT}{Dt} = K_H \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + K_V \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + S_T \quad (5)$$

ここに、 x : 流下方向の水平座標、 u : x 方向流速、 y : 横断方向の水平座標、 v : y 方向流速、 z : 鉛直座標、 w : z 方向流速、 η : 自由水面の高さ、 g : 重力加速度、 ρ_0 : 湖水の参照密度、 ρ : (x, y, z, t) における水の密度、 A_i : i 方

向の渦動粘性係数, τ_w : 底面に作用する i 方向のせん断応力である。

水面における (x, y) 方向への風によるせん断応力 (τ_{wx}, τ_{wy}) は以下に示した吹送方向のせん断ベクトル τ_w の x, y 方向成分として与えた。

$$\tau_w = \rho_a C_f U_{10}^2 \quad (6)$$

ここに, ρ_a は空気密度, C_f は摩擦係数, U_{10} : 風速である。 C_f は文献⁷⁾に倣い風速の関数として与えた。

b) 水質モデル

水質の解析は, 文献⁸⁾に基づくモデル化を行った。解析対象項目は, 植物プランクトン, デトリタス, 溶存酸素, 硝酸態窒素, 溶存性リン酸態リンおよび SS の 6 つとした。湖沼生態系を詳細に解析するためには, 動物プランクトンを含む高次栄養段階やより細分化した栄養塩分画を考慮する必要があると考えられる。しかし, 本研究では生態系自体の解析というよりは, 懸濁物質の挙動により注目しているため, モデル化はやや簡略な手法を取った。なお, 湖沼における動物プランクトンの生産量は植物プランクトンの 10 分の 1 オーダーとする知見もある⁹⁾ことから, 単純化した解析を採用した。

基礎方程式は, それぞれの要素に対する移流拡散方程式であり, 次式で表される。

$$\frac{DC}{Dt} - w_c \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_c \quad (7)$$

ここに, C : 計算対象項目の濃度, w_c : 沈降速度, K_i : i 方向の渦動拡散係数, S_c : 生成項である。以下に, 各要素に対する生成項の与え方について述べるが, それぞれの式中に現れる定数は, 計算時に採用した値と併せ, 変数名を表-1 に示している。

植物プランクトン C_{PPL} の増減項 S_{PPL} は, 光合成による増殖, 呼吸および枯死を考慮した。

$$S_{PPL} = (G_{PPL} - R_{PPL} - m_{PPL}) C_{PPL} \quad (8)$$

ここに, G_{PPL} : 植物プランクトンの比増殖速度, R_{PPL} : 植物プランクトンの呼吸による自己分解速度, m_{PPL} : 植物プランクトンの枯死速度である。ここで, 呼吸は光合成で生成した有機物を分解し消費する過程を指している。一方, 枯死の限定的な定義は, 細胞の老化による生物量の減衰過程を指す。ただし本研究の解析では, 動物プランクトン等のより高次の栄養段階を考慮していないため, これらによる捕食も含んだものとして考慮していることになる。

比増殖速度 G_{PPL} の算出は, 次式に基づいて行った。

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{I}{I_{opt}} \exp \left(1 - \frac{I}{I_{opt}} \right) \frac{T}{T_{opt}} \exp \left(1 - \frac{T}{T_{opt}} \right) L(C_{NO3}, C_{PO4}) \quad (9)$$

ここで, G_{max} : 植物プランクトンの最大比増殖速度であり, 次のような水温の関数として求めた¹⁰⁾。

表-1 計算に用いた定数

項目	変数名	値
最適日射量 ^{a)}	I_{opt}	$0.717 [\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}]$
最適水温	T_{opt}	$25 [^{\circ}\text{C}]$
最大比増殖速度 (水温 0°C)	G_{max0}	$6.83 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}]$
窒素に対する半飽和定数	K_{NO3}	$6.3 \times 10^{-2} [\text{gm}^{-3}]$
リンに対する半飽和定数	K_{PO4}	$7.22 \times 10^{-3} [\text{gm}^{-3}]$
枯死速度	m_{PPL}	$1.16 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}]$
沈降速度 ^{a)}	w_{PPL}	$1.16 \times 10^{-6} [\text{ms}^{-1}]$
20 $^{\circ}\text{C}$ における比呼吸率	R_{PPL20}	$1.04 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}]$
Chl-a と炭素量の比率	R_{CN}	$0.005 [\text{mg Chl-a/mg C}]$
デトリタスの沈降速度 ^{a)}	w_{DET}	$1.16 \times 10^{-6} [\text{ms}^{-1}]$
デトリタスの 0°C における バクテリアによる分解速度	V_{DET0}	$2.45 \times 10^{-7} [\text{s}^{-1}]$
温度係数	θ	1.07
有機物中の窒素含有率	a_{NO3}	6.32×10^{-2}
有機物中のリン含有率	a_{PO4}	8.45×10^{-3}
窒素の溶出速度	B_N	$2.94 \times 10^{-4} [\text{s}^{-1}]$
リンの溶出速度	B_P	$3.94 \times 10^{-5} [\text{s}^{-1}]$
バクテリアによる分解に関する 酸素半飽和定数	K_{DO}	$0.5 [\text{gm}^{-3}]$
再曝気係数	K_a	$6.9 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}]$
飽和溶存酸素量	C_{sat}	$8.0 [\text{gm}^{-3}]$
底泥の酸素消費速度	B_{DO}	$3.33 \times 10^{-3} [\text{s}^{-1}]$

a) 1~8 番目の項目は, 植物プランクトンの消長に関する定数である。

b) ※印のついたものを除いて, 文献⁸⁾から設定した。

$$G_{max} = G_{max0} e^{0.06337T} \quad (10)$$

栄養塩濃度に対しては, 次式のように Monod 式と Liebig の最小律の考え方をを用いて窒素濃度 C_{NO3} とリン濃度 C_{PO4} で制限の強いほうを選ぶように表した。

$$L(N, P) = \min \left(\frac{C_{NO3}}{K_{NO3} + C_{NO3}}, \frac{C_{PO4}}{K_{PO4} + C_{PO4}} \right) \quad (11)$$

また, 水深 z [m] における日射量 I [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$] は, I_0 : 水面における日射量として, Lambert-beer の法則に従う形で表した。

$$I = I_0 \exp(-\gamma z) \quad (12)$$

ここで, 係数の γ は一般には水中の懸濁物質濃度など, 濁りの関数となる。しかし, 本論文では γ を評価するための十分なデータが得られていないことから, 水温分布が概ね再現することができる定数 (0.46) を用いた。ただし, 光合成量を含む物質循環に関わる量であることから, より精度の高い議論のためには, 変数として扱う必要がある。

呼吸による自己分解は 20°C を基準とした水温の関数とした。

$$R_{PPL} = R_{20} \theta^{T-20} C_{PPL} \quad (13)$$

なお植物プランクトンは, 炭素量としてモデル上の計算を行っている。そこで, 計算結果の実測値との比較などにおいてクロロフィル a 濃度 C_{CN} に換算する際は, 次式のように計算した。

$$C_{CH} = R_{CH} C_{PPL} \quad (14)$$

デトリタス C_{DET} は、本研究では植物プランクトンの死骸のみを構成要素に考慮した。その増減項 S_{DET} は、バクテリアによる分解及び植物プランクトンの枯死を考慮し、以下のようにした。

$$S_{DET} = -V_{DET} C_{DET} + m_{PPL} C_{PPL} \quad (15)$$

ここで、バクテリアによる分解速度 V_{DET} は、次のように水温と溶存酸素 C_{DO} の関数とした。

$$V_{DET} = V_{DET0} e^{0.007T} \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} \quad (16)$$

DO の増減項 S_{DO} は、光合成による生成、有機物の分解による消費、植物プランクトンの呼吸による消費、水面での曝気、底泥での消費を考慮した。底泥での酸素消費 E_{DO} は、次の式で求めた。

$$E_{DO} = B_{DO} \theta^{T-20} \quad (17)$$

栄養塩の増減項は、有機物の分解による回帰、光合成の際の摂取、呼吸による回帰及び底泥からの溶出を考慮した。

$$S_{NO3} = a_{NO3} [(-G_{PPL} + R_{PPL}) C_{PPL} + V_{DET} C_{DET}] + E_{NO3} \quad (18)$$

$$S_{PO4} = a_{PO4} [(-G_{PPL} + R_{PPL}) C_{PPL} + V_{DET} C_{DET}] + E_{PO4} \quad (19)$$

窒素とリンの溶出は、温度依存性を考慮し、文献¹¹⁾による式(20)、(21)を採用した。

$$E_{NO3} = B_{N} \theta^{T-20} \cdot C_{NO3} \quad (20)$$

$$E_{PO4} = B_{P} \theta^{T-20} \cdot C_{PO4} \quad (21)$$

SS に関しては、ダム管理所で実施された出水時を含む粒度組成のデータを参考に、粒径成分を3区分し、それぞれの成分に関する沈降を考慮して式(7)の移流拡散式を解いた。沈降速度は、区分した粒径範囲にそれぞれ代表粒径を表-2のように設定し、ストークス則から沈降速度を推定して与えた。また、もっとも微細な成分については、梅田らの方法¹²⁾による沈降過程のモデル化を行った。

本研究では、海岸環境(内湾)を対象に開発されたモデルを基本に援用し、ダム湖に適用した。このことの妥当性は、次のように考えることができる。まず、低次生態系の構成要素(モデル上の変数)は、比較的単純な分割をしたものである。栄養塩も有機物も、より詳細な分割をしたモデルは、多く存在する一方で、解析の目的や対象に応じて少ない構成要素とするモデルもまた多く存在する。本研究では、湖沼生態系自体の解析を目的としている訳では必ずしもないため、単純なモデル化を用いた。次に、植物プランクトンが海洋性の種と陸水(淡水)性の種では、構成が異なる。実際、三春ダムのアオコの原因となっている *Microcystis* 属は、海洋では生息しない。しかし、本研究のようなモデル化では、藻類種ごとの詳細な特徴をモデル化しているわけではない。パラメータとして与える特性(増殖率や沈降速度など)を持つ種で

表-2 SS の沈降速度組成の設定

区分	粒径[μm]	沈降速度[ms^{-1}]	比率[%]
1	4	1.38×10^{-6}	37.3
2	7	4.61×10^{-6}	36.7
3	35	1.11×10^{-3}	26.0

あるという、やや抽象化した見方を取ることになる。一方たとえば、 0°C における最大比増殖速度を $6.83 \times 10^{-6} [\text{s}^{-1}] (=0.59 [\text{d}^{-1}])$ とした。 Q_{10} を2ほどとすると、増殖の最適水温となる 20°C 以上の環境では、 $2 [\text{d}^{-1}]$ を超えるような値となる。文献など¹³⁾と比較すると、陸水性の藻類にしては、やや大きな値となる。この点の評価は難しいが、後述するクロロフィル a の再現計算の結果が実測値と大きく乖離していないことから、適用は可能だと判断した。

(3) 植物プランクトンの堆積量の検討

現地観測と数値解析から得られる情報を組み合わせて、湖内への植物プランクトンの堆積量を推定した。しかし、植物プランクトンの消長(特にアオコの状態になる場合を含む)は、時空間的な変動が大きい。一方、現地データでは離散的な計測を行うだけでも多大な労力を要する。そのようなことから、湖内での挙動を正確に把握することは難しい。そこで本研究では、不確実な要素をそれぞれに含んでいることを考慮しつつ、用いることができる情報を可能な限り活用して、複数の方法により沈殿、体積量の検討を行った。

a) 堆積物分析による推定方法

植物プランクトン(内部生産)由来の沈殿物量を、観測で得られた日平均沈殿量と沈殿物中の炭素含有率を用いて推定した。まず、上層沈殿物の炭素含有率 P_{UP} は次のように表すことができる。

$$P_{UP} = \frac{P_T (M - M_P) + P_P M_P}{M} \quad (22)$$

ここに、 M : 上層トラップ内の日平均沈殿量[$\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$]、 M_P : 植物プランクトン由来の日平均沈殿量[$\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$]である。また、 P_T : 流入濁質の炭素含有率である。また、 P_P : 植物プランクトンの炭素含有率で、文献¹⁴⁾より40%とした。 M_P の推定式は式(22)を変形して、下記の式(23)となる。

$$M_P = \frac{P_{UP} - P_T}{P_P - P_T} M \quad (23)$$

この式で、 P_T の実測値が得られなかったため、本研究では次のように考えて設定をした。三春ダムの位置する大滝根川は、土砂の精算が比較的多く、濁りの高い川であることが知られている。実際、ダム管理所により毎月実施されている水質定期調査(平水時)の結果によると、貯水池上流河川での SS の平均値は約 10mg/l ある。さら

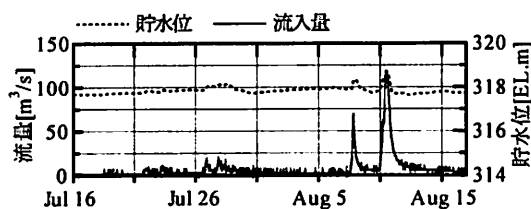


図-2 検討対象期間のダム貯水位と流入量

に後述するとおり、小規模なものも含め、本研究の観測期間中には、出水の流入が数回あり、それらによる濁りと推測される濁度が下層に観測されている。このような現地の状況を踏まえ、底層の堆積物の構成に対しては、内部生産による堆積が十分に小さく無視できる（大部分が湖外からの流入物質の堆積である）と仮定し、 P_T には測点3下層の沈殿物の分析値を与えた。ただし、流入濁質のうち易分解性の有機成分は、分解されている可能性があるなどの理由から、この推定から得られる結果の評価には、留意が必要と考えられる。

b) 連続水質測定からの推定方法

測点3上層における植物プランクトン堆積量を Chl-a 濃度 C_{CH} [mg/m³] の時系列を用いて推定した。Chl-a の堆積量 M_{CH} [g/m²] は以下の式から推定した。

$$M_{CH} = \int_{t_0}^{t_1} C_{CH} (8.64 \times 10^4 w_p) dt \quad (24)$$

ここに、 w_p : 植物プランクトンの沈降速度 (0.1m/day), t_0 : トラップ設置時刻[day], t_1 : トラップ回収時刻[day] である。したがって、 M_p は式 (25) で求まる。

$$M_p = \frac{M_{CH}}{R_{CH}(t_1 - t_0)} \quad (25)$$

c) 流動・水質モデルによる算出方法

3 つめの方法として、流動・水質解析モデルを用いて、 M_p を求めた。算出式は以下の通りである。

$$M_p = 8.64 \times 10^4 \int_{t_0}^{t_1} (C_{pp} w_p + C_{dt} w_{dt}) dt \quad (26)$$

ここに、 C_{pp} : トラップ設置地点における植物プランクトン濃度 [g/m³], C_{dt} : 同地点におけるデトリタス濃度 [g/m³], w_{dt} : デトリタスの沈降速度である。デトリタスは、すでに述べたとおり本研究では植物プランクトンの死骸として定義している。そのため、植物プランクトン由来の沈殿物量の推定には、デトリタスの沈降分も考慮している。一方、実測のクロロフィル a 濃度に基づく式(25)では、測定されている量がクロロフィル a であり、死骸となった植物プランクトンの成分については、フェオ色素への分解が進んで、ごく一部を除いて現場における蛍光法での測定に反応しなくなっていると考えられる。そのため、式(25)による推定は、植物プランクトン由来物質の沈殿量としては、過小評価していることになる。

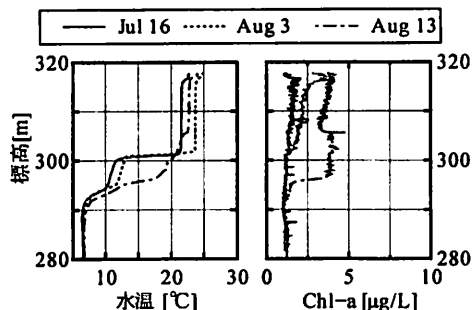


図-3 測点2における水温およびChl-aの鉛直分布の測定結果

4. 観測・解析結果

(1) 現地観測結果

観測期間におけるダム管理条件（流入量・放流量、水位）を図-2に示す。8月7日～11日にピーク流量100m³/sを超える洪水が生じた。測点3における水温及びChl-aの鉛直分布を図-3に示す。7月16日～8月4日には、流動制御（浅層曝気及び選択取水）が行われている標高301m付近で水温躍層下端が安定的に維持されていた。しかし8月13日には、出水により躍層下端が標高295m付近に低下した。植物プランクトンの消長について、Chl-aの測定値で見るとはっきりしないが、観測時の目視やダム管理所からの情報によると、8月に入った直後から *Microcystis* によるアオコが顕著になっていた。

回収した試料ごとの日平均沈殿量を図-4に示す。また、各試料の成分別含有率を表-3に示す。図-4より、測点1, 3ともに、下層トラップへの堆積量は、上層よりかなり大きい。特に地点3で顕著である。三春ダムにおける透明度が1～2m程度であることから、補償深度は上層トラップの設置水深に概ね対応する。したがって、生産層からの沈降物は概ね上層で捕捉されていると考えられる。下層の捕捉量が多いのは、中層に流入した濁水が下層に沈殿したためであると推測される（図-5に濁度の鉛直分布を示す）。また表-2より、測点1, 3ともに、上層の炭素含有率が底層の値より大きい傾向があり、上層と下層のそれぞれの平均は、5.8%と4.6%である。この差は、植物プランクトンの由来の沈殿物の割合が大きいためであると考えられる。ただし上層と下層の炭素含有率の差について、統計的な有意性は見いだせなかった。

地点3で行われた自動測定装置によるChl-aの測定結果を、水深0.5m及び4mについて図-6に示す。これらデータは流動・水質モデルの再現性確認及び植物プランクトン由来の沈殿物量の推定に用いた。

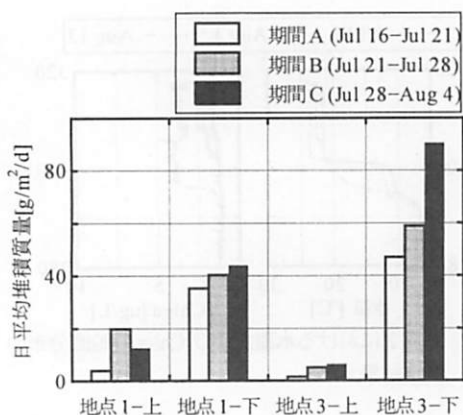


図-4 測定箇所別，期間別の日平均濁質沈殿量

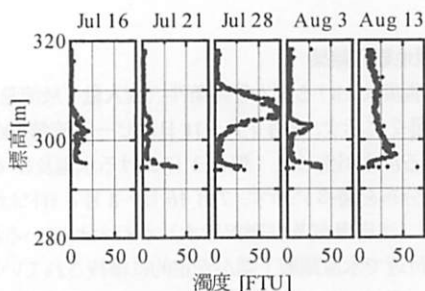


図-5 地点3における各観測日の濁度の鉛直分布

(2) 流動・水質モデルの再現性

観測実施期間（2009年7月16日から8月13日）を対象に，計算モデルの再現性を確認した。計算格子は $\Delta x=40\text{m}$ ， $\Delta y=40\text{m}$ ， $\Delta z=0.25\text{m}$ とした。安定条件を考慮して，時間間隔は $\Delta t=20$ 秒とした。貯水池の地形は，別途実施されていた深浅測量結果を基に作成した。計算期間中の流入及び放流量は，実績値に基づいて，図-2ののとおりに与えた。気象条件（気温，日射，湿度，風向風速）は，ダム管理所の記録を用いた。流入水温は，大滝根川筋にある光大寺地点での毎時の測定値を用いた。貯水池への流入水質は，ダム管理所で実施した既往の水質調査結果から，比流量と比負荷量の相関式（べき関数）をつぎのように設定して与えた。

$$L_{PO_4} = 0.2160 Q^{1.4623} \quad (27)$$

$$L_{NO_3} = 0.8967 Q^{0.8887} \quad (28)$$

$$L_{SS} = 2.5043 \times 10^3 Q^{2.3791} \quad (29)$$

ここに， Q は比流量 [$\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$]， L_{PO_4} ， L_{NO_3} ， L_{SS} はそれぞれオルトリン酸態リン，硝酸態窒素，SS の比負荷量 [$\text{g}/\text{s}/\text{km}^2$] である。流量と負荷量の関係式を実測値に基づいて作成する方法は，単純な流出過程のモデル化である

表-3 沈殿物の成分分析結果

測点	期間	含有率[%]		
		炭素	窒素	リン
地点1 上層	A	6.23	0.76	0.20
	B	5.24	0.65	0.16
	C	4.75	0.57	0.22
	D	4.99	0.61	0.18
地点1 下層	A	5.21	0.57	0.19
	B	4.86	0.56	0.20
	C	4.85	0.59	0.18
	D	3.98	0.39	0.15
地点3 上層	A	8.90	1.34	0.15
	B	5.85	0.74	0.33
	C	5.13	0.65	0.22
	D	5.07	0.60	0.20
地点3 下層	A	4.55	0.56	0.21
	B	4.29	0.44	0.18
	C	4.13	0.42	0.17
	D	4.53	0.37	0.16

ことから多くの適用事例が存在する（たとえば文献¹⁵⁾など）。本研究の対象ダム湖では，流入河川が複数あるのに対して，実測値が本川である大滝根川でしか得られていないため，比流量と比負荷量の関係に直した式を用いた。この式を用いて，各流入支川からの流入濃度を算出した。また植物プランクトンに関しては， $0.01\text{g}/\text{m}^3$ の一定値を仮定して与えた。

貯水池の初期水位は管理所のデータより標高 317.7m とし，水温の湖内初期分布は7月16日に測定したダムサイト地点における鉛直分布を，同一水深では一様として与えた。曝気循環施設の稼働するダム湖における水温の鉛直分布は，曝気のごく近傍を除いて，水平的には概ね一様に分布している¹⁰⁾ことから，このような仮定は妥当である。Chl-a の初期条件は7月16日に測定した管理所による自動測定の結果を与えた。

水質変動の検証に用いることができる実測データは多くないが，測点3において連続的に計測された Chl-a 濃度を，水深 0.5m について実測値と計算値と比較した。結果を図-7に示す。7月28日以前は連続測定値と比較して，変動傾向が概ね再現できていると言える。しかし，7月28日以降は連続測定値に対して，計算値が多少過大評価している傾向がある。しかしながら，8月4日と13日に行った採水分析の結果と比較すると，概ね一致している。以上をまとめると，植物プランクトンの時空間的なバラツキの範囲内で，概ね現象を再現していると評価しようと判断できる。

(3) 植物プランクトン由来の堆積物

測点1と測点3の上層における M_p の値を，図-8に示して，推定方法による結果の比較をした。測点1については，計算値と沈殿物からの推定値を比べると，やや誤差が大きいように見える。ただし，微細な懸濁物質の沈

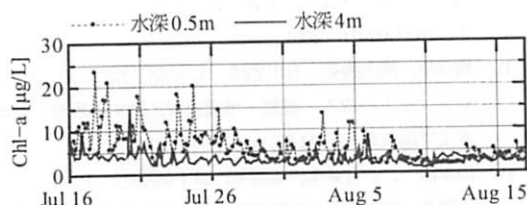


図-6 地点3におけるクロロフィルaの連続計測結果

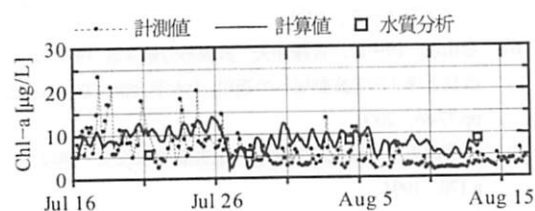


図-7 地点3のクロロフィルaに関する数値計算結果

殿量は、乱流や本貯水池に設置されている曝気による流動などの局所的な現象の影響にも左右されるようなことが多い。このようなことを考慮すると、一般に微細粒子の挙動を現地スケールで評価することは難しい。そのため、「倍半分」程度の範囲内で、それぞれの方法からの推定値が一致していることから、精度的には十分な結果だと考えられる。地点3については、いずれの推定方法についても、期間AからDにかけて植物プランクトン由来の沈殿量が漸減している傾向が見られる。また、地点3では上層のトラップの概ね直上と言える水深4mの位置で連続的に計測したChl-aの値(図-6参照)を用いることができた。沈殿物量からの推定と同様に、非常に大ざっぱな方法での算出ではあるものの、相互によく一致していると考えられる。

(4) 湖内の窒素とリンの循環

図-9は、出水を含まない期間である7月16日から8月4日における数値シミュレーションから、窒素とリンの循環量についてまとめた結果である。本研究で用いたモデルにおける窒素とリンの扱いは、第3章に述べたとおりで、やや簡便に扱った箇所がある。たとえば河川からの流入は無機態のみとしていること(平常時であれば概ね妥当とは考えられる)や、窒素は硝酸態のみであること、硝化や脱窒などの過程を考慮していないことなどが挙げられる。結果の評価には、そのような点で若干留意が必要ではあろうが、本研究のように比較的短期間での植物プランクトンを中心とした変化を追う目的には、十分と考えて用いている。

さて図-9の推定結果では、平常時(出水を含まない期間)を設定したということもあり、流入出の収支は概ね

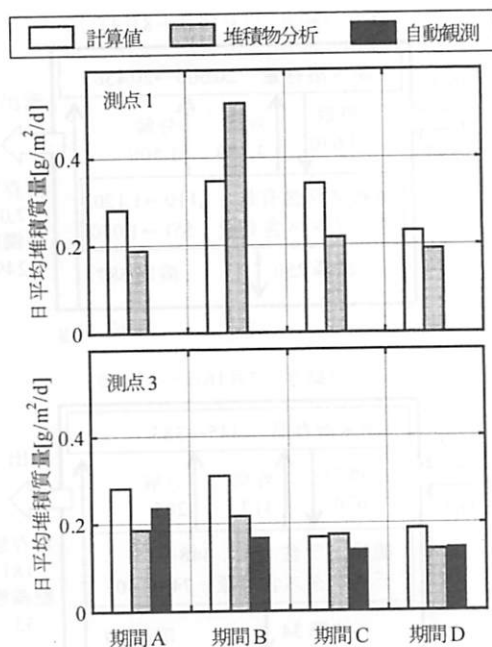


図-8 地点1と地点3の上層(水深5m)における植物プランクトン沈殿量の推定結果の比較

釣り合いが取れていることが分かる。また、湖内での存在量構成も、大きな変化は見られなかった。しかし、植物プランクトンの増殖や枯死・分解の過程に伴って循環している量は、20日ほどの短期間であるが、非常に大きいことが分かる。本貯水池はリン制限の水質環境であるため、特にリンに関しては、湖水に溶存している全量を上回る延べ量が植物プランクトンに摂取されている。なおこれらの湖内での変換過程に伴う移動量は、湖内全体で計算期間を通して、各要素の時間積分を行って算出したものであるが、数値積分の誤差のため、全体の収支にやや誤差が生じている。

5. 結論

本研究では、富栄養化現象が生じている三春ダム貯水池を対象として、植物プランクトンおよび窒素、リンの湖内循環過程に関する研究を実施した。現地観測では、夏期の植物プランクトンの増殖期に上層と下層で沈殿物を捕捉し、沈降量および成分分析を行った。この方法に加え、クロロフィルaの連続的な計器測定結果および数値解析と比較をし、沈殿物中の植物プランクトン由来の組成を推定した。沈降物に占める比率は、数%程度であり必ずしも大きくはない。その一方、数値シミュレーションで推定した、植物プランクトンを通じた窒素やリン

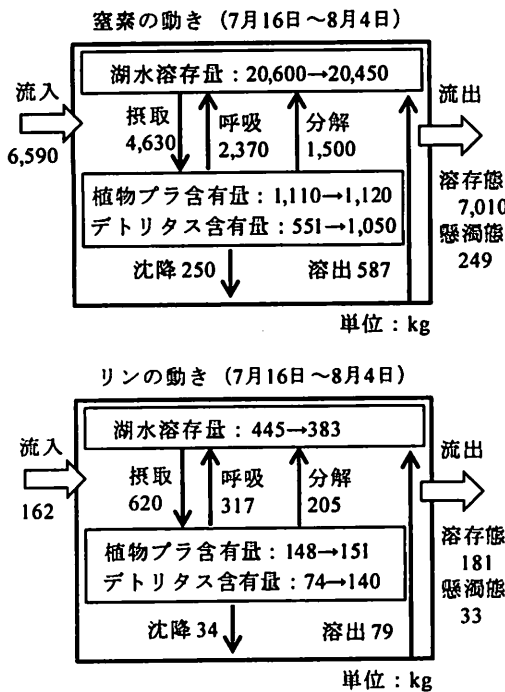


図-9 窒素とリンの夏期（非出水時）における湖内循環量の数値解析に基づく推定結果

の循環量は、かなり大きいことが分かった。

謝辞：本研究は水源地生態研究会における活動の一環として実施された。国土交通省三春ダム管理所および財団法人ダム貯水池環境整備センターの木村文宣研究員には現地観測やデータの取得にご助力を頂いた。東北大学の千葉信男技術専門職員には、水質分析に関してご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 堀江毅, 井上聰史, 村上和男, 細川恭史: 三河湾での覆砂による底質浄化の環境に及ぼす効果の現地実験, 土木学会論文集, NO.533/II-34, pp.225-235, 1996.
- 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・底質のシミュレーションと底泥からの栄養

塩溶出の湖内水質への影響, 電力中央研究所報告・研究報告, NO.U00071, 2001.

- 梅田信, 横山勝英, 石川忠晴: セキ宿貯水池におけるウォシュロードの流入・流動・堆積過程に関する観測と考察, 水工学論文集, 第41巻, pp.777-782, 1997.
- 山本浩一, 二村貞幸, 坂野章, 日下部隆昭, 末次忠司, 横山勝英: 濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究, 河川技術論文集, 第9巻, pp.515-520, 2003.
- 西条八束, 三田村緒佐武: 新稲湖沼調査法, 講談社サイエンティフィック, 1995.
- 金山進, 田中仁, 首藤伸夫: 非線形分散多層波動モデルの改良と準3次元波動場への適用, 土木学会論文集, No.642, pp.77-86, 2000.
- 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, p.170, 1994.
- 佐々木淳, 佐賀宏, 磯部雅彦: 東京湾における富栄養現象の再現計算, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.1036-1040, 1998.
- 岩佐義朗編著: 湖沼工学, p.316, 山海堂, 199.
- Kremer, J. N. and S. W. Nixon, 中田喜三郎訳: 沿岸生態系の解析 A Coastal Marine Ecosystem Simulation and Analysis, 生物研究社, pp.227, 1987.
- 松梨史郎: 閉鎖性水域の窒素・リン・溶存酸素の予測モデル, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.1076-1080, 1993
- 梅田信, 池上迅, 石川忠晴, 富岡誠司: ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析, 水工学論文集, 第48巻, pp.1363-1368, 2004.
- 梅田信, 富岡誠司: 貯水池における水質環境要素と藻類増殖の関連, 水工学論文集, 第51巻, pp.1373-1378, 2007.
- 田中庸央: 愛研技術通信, 第2号, pp.1-4, 2006
- 長林久夫, 小川裕正, 真野明: 出水時の阿武隈川における栄養塩負荷と輸送に関するモデル化の検討, 河川技術論文集, 第11巻, pp.41-46, 2005.
- 梅田信, 宮崎貞紅子, 富岡誠司: 曝気式循環施設により生じる貯水池内流動の現地観測, 土木学会論文集, No.775/II-69, pp.55-68, 2004.

(2010. 5. 21 受付)

Analysis of Phytoplankton Behavior and Material Cycle in Miharu Reservoir

Makoto UMEDA¹, Mitsuhiro SHIBATA², Ken USHIJIMA³ and Hitoshi TANAKA¹

¹Dept. of Civil and Environmental Engineering, Tohoku University

²Dept. of Public Works, Ibaraki Prefectural Government

³Dept. of Eng., Hokkaido University

One of water quality problems in reservoirs is overgrowth of phytoplankton, especially cyanobacteria. Miharu Reservoir has been suffered from water bloom since the dam construction. Therefore, influence of the internal production on the water quality of the reservoir needs to be evaluated. In this study, algal growth in the reservoir is investigated by way of field measurements and numerical simulation, focusing on quantity and quality of sedimentation flux. Through measurement using sediment traps, the results showed that the estimated sedimentation amount was rather small compared to the total amount of deposit material. However, the results of the numerical simulation revealed the internal movement of nutrients through uptake and decomposition of phytoplankton was quite active.