

◆特集：閉鎖性水域の環境保全◆

# 貯水池底泥からの栄養塩類溶出量推定方法の開発

中蘭孝裕\* 阿部千雅\*\* 鈴木 穰\*\*\*

## 1. はじめに

日本の多くの多目的ダム貯水池においては、夏期に水温成層が形成されるため底層が貧酸素化し、底泥からの栄養塩、有機物や金属などの溶出速度が大きくなる。こうした底層での貧酸素化対策としては、間欠揚水筒方式や、散気管方式など気泡噴流により鉛直混合流を起こす成層破壊型の曝気循環方式や、底層部に空気や酸素を供給する深層曝気方式がこれまで取られてきた。成層破壊型の曝気循環方式では底層水の浮上や酸素溶解量の限界などに課題があることから、近年、我が国においても深層曝気方式の導入や、新たな微細気泡発生装置を用いた方式や溶存酸素の豊富な表層水を底層へ送り込む方法などが検討されている<sup>1)</sup>。

底泥からの栄養塩類などの溶出量を推定するため、平成14年度より平成16年度までの3箇年にわたり、湖沼等の現地における水柱及び表層底泥のモニタリングシステムを検討した。これは、水温、DO及びORPセンサー等による連続測定結果を行うことにより貯水池内環境を把握し、その結果から栄養塩類の溶出を推定するとともに、測定結果を活用した効率的な運転制御を行いながら、高濃度酸素水を底層部に供給することにより底層環境を改善することを目的としたシステム<sup>2)</sup>である。今回、現地連続モニタリングの水質結果からシミュレーションモデルによる貯水池底泥からのリン・窒素の溶出量推定方法の検討を行った。

## 2. 現地連続モニタリングによる推定

### 2.1 貯水池における溶出量及び水質モニタリング実験

2002年7月から9月に福島県三春ダムの牛縊前貯水池にて実施した高濃度酸素水による底層環境改善システムの結果に関し、現地実験と水温、DO及びORPセンサーによる連続モニタリングの値と栄養塩類の溶出量との関係について検討を行った。モニタリング装置等の配置を図-1に示す。

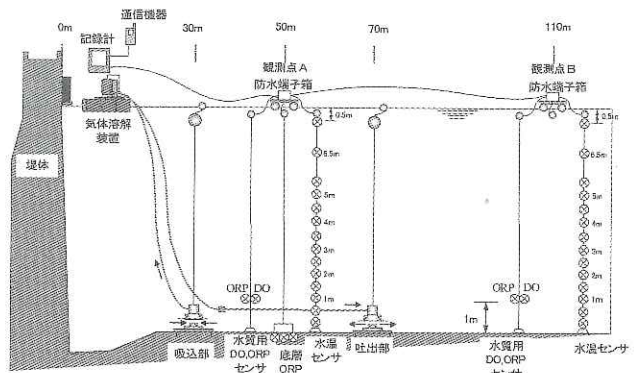


図-1 連続測定装置の概要

表-1 実験条件と稼働状況 (2002年)

Run No.	期間	日数	吐出流量 (m <sup>3</sup> /h)	酸素供給	稼働時間 (h)	稼働時間率 (%)
1	7/23~7/28	6日間	90	無し	59	47.9
2	7/30~8/12	14日間		有り	142	44.6
3	8/12~8/19	8日間	30		151	90.4
4	8/20~9/2	14日間	0	無し	0	0
5	9/3~9/18	16日間	30	有り	323	88.9
6	9/19~9/25	7日間	0	無し	0	0

また、実験条件を表-1に示す。Run1では、吐出流量90m<sup>3</sup>/h、酸素供給は行わずに運転を行い、続くRun2において酸素供給を開始した。溶解装置出口で測定した吐出水のDOは、運転開始から約5時間で50mg/lに達し、その後は概ね50~60mg/lで推移した。Run3では高濃度酸素水の吐出量を30m<sup>3</sup>/hに低下させ、攪拌および酸素供給の効果を調べた。Run4では装置の運転を全面的に停止し、攪拌も酸素供給も行わない状態での水質変化を調査した。Run5では再度、高濃度酸素水の吐出量を30m<sup>3</sup>/hとして運転を行い、酸素供給が底層水質に与える影響を調べた。Run6は、Run4と同様に酸素消費過程を調査するため、装置の運転を停止した。

Run2では水温による自動制御の結果、稼働時間率(実験期間に対する装置運転稼働時間の割合)が約45%となる間欠運転となった。Run3及びRun5では流量を30m<sup>3</sup>/hとしたところ、稼働時

Development of Evaluation Method of Nutrients Release from Sediment in Dam Reservoir

表-2 高濃度酸素水供給システム稼働状況

	期 間	吐出流量 (m <sup>3</sup> /h)	酸素 供給
2002年	7/23~7/27	90	×
	7/27~7/28	ほぼ0	-
	7/30~8/12	90	○
	8/12~8/19	30	○
	8/20~9/2	0 (停止)	-
	9/3~9/18	30	○
2003年	9/19~9/25	0 (停止)	-
	6/30~7/2	30	○
	7/2~7/8	30	×
	7/8~7/18	30	○
	7/18~7/29	0 (停止)	-
2004年	7/29~8/18	90 (4h毎インターバル運転)	○
	7/28~8/6	90	○
	8/6~8/30	0 (停止)	-
	8/30~9/9	90	○
	9/9~10/1	90 (稼働時間率9%)	○

間率が約90%とほぼ連続運転となった。

2.2 シミュレーションモデルによる推定方法の検証

3箇年間の現地実験で得られたデータを用いて貯水池水質予測モデルにより推測した底泥からの栄養塩類溶出速度を検証した。モデルの検証は実験期間のうち出水のない期間のデータを用いて行った。なお、3箇年間の実験における高濃度酸素水供給システムの運転状況は表-2に示す。

(1) 水質予測モデルの概要

貯水池の水質予測は、旧土木研究所水資源開発研究室開発の鉛直二次元モデル（「貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル<sup>3)</sup>（その1)（建設省土木研究所 昭和62年3月)」。以下、既往モデルという。）(図-2)を基本に、牛轡前貯水池での連続モニタリングシステムで用いている高濃度酸素供給システムをモデル化して組み込んだ。貯水池の富栄養化現象は、水理流動モ

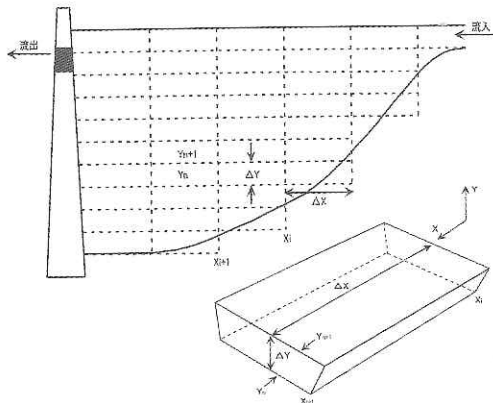


図-2 2次元モデルの水域分割及びコントロールボリューム

デルにより計算された流速を用いて生態系モデルにより水温と植物プランクトンの増殖を計算して予測した。

①水理流動モデル

水理流動モデルは、図-2に示す各コントロールボリュームにおいて以下に示す基礎式を適用する。

・連続式

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

・運動量保存式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (式2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\rho g \quad (式3)$$

・水温収支式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{H}{\rho C_w} \quad (式4)$$

・濃度（密度算出用）収支式

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S \quad (式5)$$

ここに、x：流下方向の座標、y：鉛直方向の座標、u、v：x、y方向における流速、T：水温、H：発生熱量、C<sub>w</sub>：水の比熱、C：水質濃度、S：生産・消費項、A<sub>x</sub>、A<sub>y</sub>：x、y方向における渦動拡散係数である。

②生態系モデル

水理流動モデルにより算出された流速をもとに、以下に示す物質収支式により、各水質項目が計算される。

$$\frac{\partial X}{\partial t} + u \frac{\partial X}{\partial x} + v \frac{\partial X}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_x \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_y \frac{\partial X}{\partial y} \right) + G(X) + S(X) \quad (式6)$$

ここに、X：水質項目（植物プランクトン、栄養塩など）、G：沈降項、S：生産・消費項（生物・化学的变化項）である。

従来のモデルでは無機態窒素は合計値のみで扱われているが、今回、底層における栄養塩溶出機構をより詳細に表現するため、無機態窒素をNH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-Nの3態に分けてモデル計算を行うこととした。

このモデルを用いた解析により予測した水質項目は次のとおりである。

- ・水温
- ・ DO
- ・ SS
- ・ 植物プランクトン (Chl-a 換算)
- ・ 動物プランクトン (炭素換算)
- ・ COD (P-COD、D-COD)
- ・ 窒素 (NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、O-N)
- ・ リン (I-P、O-P)

※P: Particulate (懸濁態)、D: Dissolved (溶存態)、I: Inorganic (無機態)、O: Organic (有機態)

これらの水質項目は図-3に示すように、互いに関連を持ちながら時々刻々変動している。これら実現象を(式6)を基本とした計算式に置きかえて、各水質項目を算出する。なお計算条件は表-3のとおりである。

図-3中に示す摂取、分解、死滅等の生物・化学的変化項S(X)及びこの式中にあるモデルパラメータは次項で述べる。

(2) モデル検討

既往モデル<sup>3)</sup>より摂取、分解、死滅等の生物・化学的変化項S(X)は表-4に示す形で表わされる。

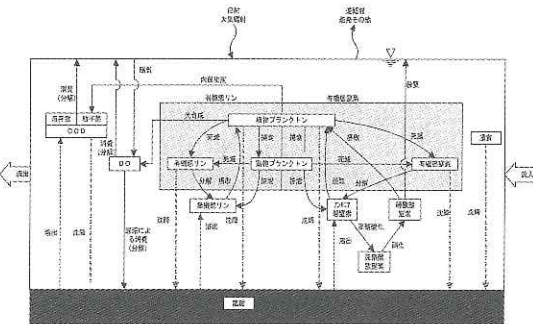


図-3 生態系モデル概念図

表-3 計算条件の設定

項目	設定方法	
水理流動	流入量	ダム日報記録及び比流量による
	流域面積	三春ダム全流域 = 226.4km <sup>2</sup> 牛縊前ダム流域 = 5.1km <sup>2</sup>
	放流量	流入量 = 放流量 (越流型ダム)
気象データ	放流水位	ダムの越流高
	気温	ダム管理所データによる
	湿度	
	風速	
	日射量	
雲量	福島地方気象台データによる	
流入水質	水質	実測値及び実測値からの推定値をもとに線形補完により設定
	水温	気温と水温の関係式から流入水温を設定
	DO	飽和DOとして設定
貯水池水質	貯水池初期水質	St0.50の実測値からの線形補完により各ボックス中央水質を設定

なおここで、無機態窒素を3態に分割するにあたって文献等より次に示す各種関数等を設定した。  
○植物プランクトンの無機態窒素吸収に関する影響関数

植物プランクトンの無機態窒素の吸収については、硝酸態窒素よりもアンモニウム態窒素を優先的に吸収するとされている<sup>4),5)</sup>。これを踏まえ、植物プランクトンの無機態窒素の吸収に関する影響関数を設定した<sup>6),7)</sup>。

(植物プランクトンのアンモニウム態窒素吸収に関する影響関数)

$$f_{NH4} = \frac{NH4}{K_{NH4} + NH4}$$

(植物プランクトンの硝酸態窒素吸収に関する影響関数 (アンモニウム態窒素を優先して吸収))

$$f_{NO3} = \frac{NO3}{K_{NO3} + NO3} \cdot \exp(-\phi \cdot NH4)$$

○硝化・脱窒の補正係数

無機態窒素の硝化・脱窒は、DOの依存性を考慮して、補正係数として以下の式を設定した。

(硝化 (亜硝酸) に関する補正係数 (DOの関数))

$$f_{N1} = \frac{DO}{K_{DO1} + DO}$$

ここに、K<sub>DO1</sub> : 硝化速度 (亜硝酸への変換) におけるDOの依存性に関する係数 (硝化 (硝酸) に関する補正係数 (DOの関数))

$$f_{N2} = \frac{DO}{K_{DO2} + DO}$$

ここに、K<sub>DO2</sub> : 硝化速度 (硝酸への変換) におけるDOの依存性に関する係数 (脱窒に関する補正係数 (脱窒の境界DO濃度))

$$f_{DN} = 1 \quad DO \leq DO_{DN} \text{ のとき}$$

$$f_{DN} = 0 \quad DO > DO_{DN} \text{ のとき}$$

①リン溶出速度の検討

牛縊前ダムにおいて、底層が嫌気条件になるとPO<sub>4</sub>-Pが増加する傾向にあった。そこで、牛縊前ダム貯水池水質調査結果について、2002年及び2004年の主要調査地点であるA地点 (st.0.50) の底層 (水深5~6m) のPO<sub>4</sub>-P、DO、NO<sub>3</sub>-Nについて着目した。A調査結果を図-4、5に示す。調査結果をみると、溶出によりPO<sub>4</sub>-P濃度が増加している時期の条件としては、底層のDO濃度が低く嫌気条件にあり、NO<sub>3</sub>-N濃度も低い傾向が見られた。また、底層のDOが低く嫌気条件にあっても、NO<sub>3</sub>-N濃度が低くなければPO<sub>4</sub>-Pが増加しておらず溶出が生じていない。

(a) : DOは0mg/LだがNO<sub>3</sub>-Nが0.05mg/l以上

表-4 生物・化学的变化項のモデル式 (既往式)

$S(P) = (G_P - D_P - G_Z) \cdot PP$ <p style="text-align: center;">増殖 呼吸 補食 (死滅)</p>	
$G_P = \beta_P \cdot \mu_m \cdot \left\{ \frac{T}{T_s} \cdot \exp\left(1 - \frac{T}{T_s}\right) \right\}^5 \cdot \frac{I_y}{I_s} \exp\left(1 - \frac{I_y}{I_s}\right) \cdot (f_{NH4} + f_{NO3}) \cdot \frac{IP}{K_{IP} + IP}$	
$D_P = R_{PP} \cdot \theta_{PP}^{T-20}$	
$G_Z = R_z \cdot \frac{K_{PP}}{K_{PP} + PP} \cdot ZP$	
$S(ZP) = a \cdot a_z \cdot G_Z \cdot PP - R_Z \cdot \theta_Z^{T-20} \cdot ZP$ <p style="text-align: center;">増殖 死滅</p>	
$S(DO) = K_1(DO - DO) + K_2 \cdot \theta_{DOP}^{T-20} \cdot PP - (K_{3D} \cdot DCOD + K_{3P} \cdot PCOD)$ <p style="text-align: center;">再曝気 (表層のみ) 光合成による DO 生産 COD 物質による DO 消費</p>	
$- r \cdot \frac{AB}{V} - 3.43 \cdot R_{N1} \cdot f_{N1} \cdot \exp(K_{N1} \cdot T) \cdot NH4$ <p style="text-align: center;">底泥による DO 消費 硝化 (亜硝酸) による DO 消費</p>	
$- 1.14 \cdot R_{N2} \cdot f_{N2} \cdot \exp(K_{N2} \cdot T) \cdot NO2$ <p style="text-align: center;">硝化 (硝酸) による DO 消費</p>	
$S(DCOD) = -R_{DC} \cdot \theta_{DC}^{T-20} \cdot DCOD + R_{WC} \cdot \theta_{WC}^{T-20} \cdot \frac{AB}{V}$ <p style="text-align: center;">DCOD の分解 底泥からの溶出</p>	
$S(PCOD) = K_P \cdot G_P \cdot PP - R_{PC} \cdot \theta_{PC}^{T-20} \cdot PCOD$ <p style="text-align: center;">内部生産 PCOD の分解</p>	
$S(IP) = -\beta_P \cdot G_P \cdot PP + \beta_P \cdot (1 - a_z) \cdot G_Z \cdot PP$ <p style="text-align: center;">植物プラによる摂取 動物プラの排洩</p>	
$+ R_{OP} \cdot \theta_{OP}^{T-20} \cdot (OP - \beta_P \cdot PP - \gamma_P \cdot ZP) + R_{WP} \cdot f_D \cdot \theta_{WP}^{T-20} \cdot \frac{AB}{V}$ <p style="text-align: center;">無機化 底泥からの溶出</p>	
$S(OP) = \beta_P \cdot G_P \cdot PP - \beta_P \cdot (1 - a_z) \cdot G_Z \cdot PP$ <p style="text-align: center;">植物プラによる摂取 動物プラの排洩</p>	
$- R_{OP} \cdot \theta_{OP}^{T-20} \cdot (OP - \beta_P \cdot PP - \gamma_P \cdot ZP)$ <p style="text-align: center;">無機化</p>	
$S(NH4) = -\beta_N \cdot G_P \cdot \frac{f_{NH4}}{f_{NH4} + f_{NO3}} \cdot PP + \beta_N \cdot (1 - a_z) \cdot G_Z \cdot PP$ <p style="text-align: center;">植物プラによる摂取 動物プラの排洩</p>	
$+ R_{ON} \cdot \theta_{ON}^{T-20} \cdot (ON - \beta_N \cdot PP - \gamma_N \cdot ZP)$ <p style="text-align: center;">無機化</p>	
$- R_{N1} \cdot f_{N1} \cdot \exp(K_{N1} \cdot T) \cdot NH4 + R_{WN} \cdot \theta_{WN}^{T-20} \cdot \frac{AB}{V}$ <p style="text-align: center;">硝化 (亜硝酸) 底泥からの溶出</p>	
$S(NO2) = R_{N1} \cdot f_{N1} \cdot \exp(K_{N1} \cdot T) \cdot NH4 - R_{N2} \cdot f_{N2} \cdot \exp(K_{N2} \cdot T) \cdot NO2$ <p style="text-align: center;">硝化 (亜硝酸) 硝化 (硝酸)</p>	
$S(NO3) = -\beta_N \cdot G_P \cdot \frac{f_{NO3}}{f_{NH4} + f_{NO3}} \cdot PP + R_{N2} \cdot f_{N2} \cdot \exp(K_{N2} \cdot T) \cdot NO2$ <p style="text-align: center;">植物プラによる摂取 硝化 (硝酸)</p>	
$- R_{DN} \cdot f_{DN} \cdot \exp(K_{DN} \cdot T) \cdot NO3$ <p style="text-align: center;">脱窒 (底層のみ)</p>	
$S(ON) = \beta_N \cdot G_P \cdot PP - \beta_N \cdot (1 - a_z) \cdot G_Z \cdot PP$ <p style="text-align: center;">植物プラによる摂取 動物プラの排洩</p>	
$- R_{ON} \cdot \theta_{ON}^{T-20} \cdot (ON - \beta_N \cdot PP - \gamma_N \cdot ZP)$ <p style="text-align: center;">無機化</p>	

ここに、

PP : クロロフィル a 濃度	ZP : 炭素濃度
DO : 飽和溶存酸素濃度	NO2 : 亜硝酸態窒素濃度
ON : 有機態窒素濃度	PCOD : 粒子態 COD 濃度
I <sub>y</sub> : 標高 y における日射量 $I_y = I_o \exp\{-\eta(y_s - y)\}$	
I <sub>o</sub> : 水表面の日射量	
y <sub>s</sub> : 水表面標高	
f <sub>NH4</sub> : 植物プランクトンのアンモニウム態窒素吸収に関する影響関数	
f <sub>NO3</sub> : 植物プランクトンの硝酸態窒素吸収に関する影響関数	
f <sub>N1</sub> : 硝化 (亜硝酸への変換) に関する補正係数 (DO の関数)	
f <sub>N2</sub> : 硝化 (硝酸への変換) に関する補正係数 (DO の関数)	
f <sub>DN</sub> : 脱窒に関する補正係数 (DO の関数)	
f <sub>D</sub> : 溶存酸素及び硝酸態窒素の存在によるリンの溶出率減少を表す補正係数	η : 日射量減衰定数
IP : 無機態リン濃度	DO : 溶存酸素濃度
NH4 : アンモニウム態窒素濃度	NO3 : 硝酸態窒素濃度
OP : 有機態リン濃度	DCOD : 溶存態 COD 濃度
AB : 底泥面積	V : 容量

あり、PO<sub>4</sub>-Pの溶出も見られない。  
 (b) : DOが0mg/LかつNO<sub>3</sub>-Nが0.05mg/L以下であり、PO<sub>4</sub>-P濃度が上昇している。

\*流入増による濃度上昇である。  
 また既往モデルによる底層リン濃度の推定値は、図-6のとおり実測値の傾向を表現していない結果であった。

これより、リン溶出速度について、DO及びNO<sub>3</sub>-N濃度の設定を加えることとした。なお、PO<sub>4</sub>-Pの溶出についての検討は、水深5m、5.5m、6mのデータを用いて行った。

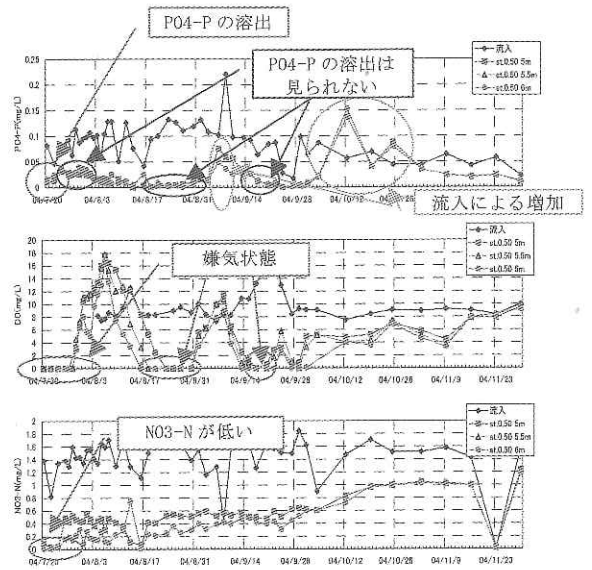


図-4 底層リン濃度等経時変化 (2004年A地点)

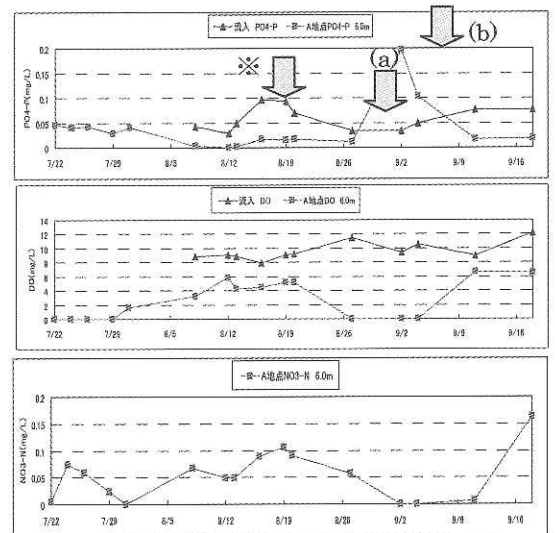


図-5 底層リン濃度等経時変化 (2002年A地点)

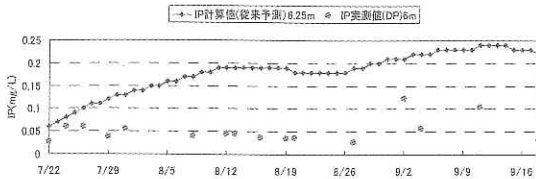


図-6 既往モデルによる底層リン濃度推定

リンの溶出についてのモデル化は、既往モデル<sup>3)</sup>では、以下の式で表されている。

リンの溶出に関する生産項

$$= R_{WP} \cdot f_D \cdot \theta_{WP}^{T-20} \cdot \frac{A_B}{V} \quad \text{底泥からの溶出}$$

また、補正係数 $f_D$ は、既往モデル<sup>3)</sup>では、DOの関数として表されている。本検討では、牛轡前貯水池の底層での現地水質調査結果を踏まえ、この係数にリン溶出の境界 $NO_3-N$ 濃度を以下のとおり設定する。

$$f_D = \frac{1}{4 \cdot DO + 1} \quad NO_3 \leq NO_{3DN} \text{ のとき}$$

$$f_D = 0 \quad NO_3 > NO_{3DN} \text{ のとき}$$

境界 $NO_3-N$ 濃度は、水質調査結果より、底層の $PO_4-P$ が増加しリンが溶出していると考えられる時期の $NO_3-N$ を踏まえて $0.05\text{mg/L}$ とした。底泥からの溶出速度は、底層(5m, 5.5m, 6m)の水質調査結果を用いて、底層の水質負荷量変化から算出した。検討前後の推定値と実測値を図-7に示す。8月末のリン溶出現象を、より表現できるようになった。

②窒素溶出速度の検討

底泥からの窒素の溶出機構は、リンの溶出と異なり底泥中での生物化学的作用によって決められるとされている<sup>8),9)</sup>。また、底泥間隙水中のアンモニア態窒素の増減は温度に依存すると言われている。

これより、リンと同様のモデル化は難しいことから、窒素の溶出速度を一定値として与えた。しかし、実測値と計算値を比較すると、乖離が見られ再現性が不十分な結果となった。(図-8)

そこで牛轡前ダムの底層における窒素の溶出について検討した。

牛轡前ダム貯水池水質調査結果について、底層

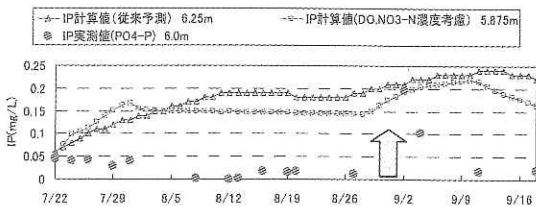


図-7 底層リン濃度の推定その1 (2002年A地点)

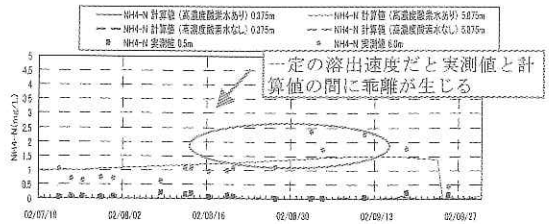


図-8  $NH_4-N$ 濃度の推定その1 (2002年A地点)

(水深5~6m)のI-N ( $NH_4-N \cdot NO_2-N \cdot NO_3-N$ の合計)、 $NH_4-N$ 、DO、水温について着目した。(図-9)

溶出によりI-N濃度が増加している時期としては、底層のDO濃度が低く嫌気状態にある傾向が見られる。そこで、嫌気状態については $NH_4-N$ について着目し、好気状態については、硝化により $NH_4-N$ が $NO_2-N$ に変化することからI-Nについて着目して窒素の溶出速度について検討を行い、好気状態と嫌気状態でパラメータを分けて設定することとした。

$$\text{溶出率 } R_{WN} = 0.01 (DO > 1)$$

$$= 0.05 (DO \leq 1)$$

これにより計算値は実測値に近づいた。(図-10)

③無機態リン濃度の検討

①での検討の結果、嫌気状態でかつ $NO_3-N$ 濃度が低い場合にI-Pが溶出する現象に対する再現性

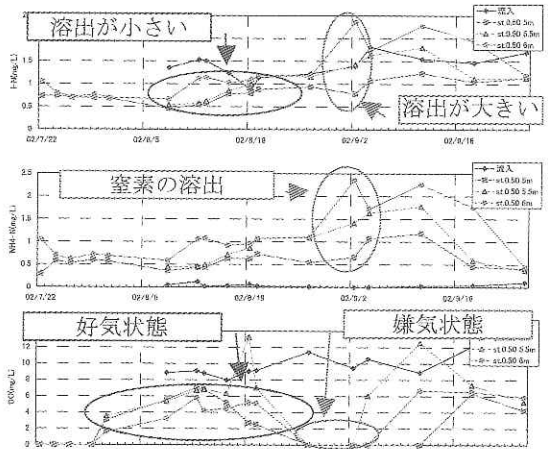


図-9 A地点窒素濃度変化 (2002年)



図-10  $NH_4-N$ 濃度の推定その2 (2002年A地点)

は向上したが、好気状態に転じた場合に実測値ではI-Pは減少する傾向がみられるのに対して推定値ではあまり減少しない傾向がみられ、実測値との乖離が見られた。

既往文献によれば底層では、嫌気条件下においてはPO<sub>4</sub>-Pなどの無機態リンが溶出するが、嫌気条件下でなくなると溶出したPO<sub>4</sub>-Pは鉄などの金属と結合するかあるいは浮遊物に吸着することが示されている<sup>8),10)</sup>。

そこで、以下に示すように、無機態リンに関する生産・消費項について、鉄との結合による消費の項を追加した。この項は、底層が好気状態(DO ≥ DO<sub>crit</sub>)になった場合に作用するものとした。

$$S(IP) = -\beta_P \cdot G_P \cdot PP + \beta_P \cdot (1 - \alpha_z) \cdot G_Z \cdot PP$$

植物ブラによる摂取                      動物ブラの排泄

$$+ R_{OP} \cdot \theta_{OP}^{T-20} \cdot (OP - \beta_P \cdot PP - \gamma_P \cdot ZP)$$

無機化

$$+ R_{WP} \cdot f_D \cdot \theta_{WP}^{T-20} \cdot \frac{AB}{V}$$

底泥からの溶出

$$- \frac{1}{\Delta y} V_{IP} \cdot IP$$

好気状態でのFeとの結合による沈降(底層)

ここに、V<sub>IP</sub>：沈降速度である。

これより、嫌気状態でNO<sub>3</sub>-Nが少なくなった場合にI-Pが溶出し、好気状態になると減少するという傾向を再現できており、計算値は実測値に近づく結果となった。(図-11)

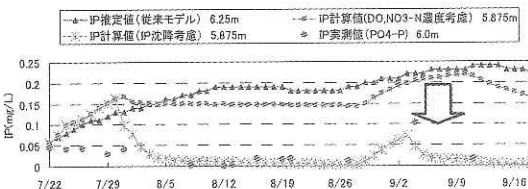


図-11 底層リン濃度の推定その2 (2002年A地点)

これらの検討結果としてのモデル式の一部<sup>11)</sup>を表-5に示す。

表-5 生物・化学的変化項のモデル式(検討後)

$$S(IP) = -\beta_P \cdot G_P \cdot PP + \beta_P \cdot (1 - \alpha_z) \cdot G_Z \cdot PP$$

植物ブラによる摂取                      動物ブラの排泄

$$+ R_{OP} \cdot \theta_{OP}^{T-20} \cdot (OP - \beta_P \cdot PP - \gamma_P \cdot ZP) + R_{WP} \cdot f_D \cdot \theta_{WP}^{T-20} \cdot \frac{AB}{V}$$

無機化    底泥からの溶出

$$- \frac{1}{\Delta y} V_{IP} \cdot IP$$

好気状態でのFeとの結合による沈降(底層)

### 3. まとめ

ダム貯水池における底層水のDO条件変化による水質変化を連続的にモニタリングするとともに、この水質データを用いてシミュレーションモデルによる推定方法の検証を行い、溶出速度推定に有効な指標を抽出し、溶出量推定のモデルを構築した。

### 参考文献

- 1) 佐々木 稔、田中宏明、李 建華、和田順之輔、中村圭吾、柴田省三、田中克知、福井真司：底層環境改善のためのモニタリング技術と活用、環境システム計測制御学会誌、第7巻、第2号、pp.237-240、2002
- 2) 津森ジュン、田中宏明、鈴木 稔、李 建華、和田順之輔、田中克知、福井真司：貯水池底層への高濃度酸素水供給による水質変化の連続観測、VoL.41 環境工学研究論文集、(社)土木学会環境工学委員会、pp.625-634、2004
- 3) 建設省土木研究所：貯水池の冷濁水ならびに富栄養化現象の数値解析モデル(その1)、昭和62年3月
- 4) 楠田哲也、巖 佐庸：生態系とシミュレーション、朝倉書房、pp.13-23、2002
- 5) 秋山 優、有賀祐勝、坂本 充、横浜康継：藻類の生態、内田老鶴圃、pp.180-185、1986
- 6) 藤田健一、李 寅鐵、楠田哲也：水-底質相互作用モデルによる博多湾のリン循環の数値予測、水環境学会誌、Vol.24, No.1, pp.48-57、2001
- 7) 中田喜三郎：生態系モデル-定式化と未知のパラメータの推定法-、海洋工学コンファレンス論文集、pp.99-138、1993
- 8) 河川および湖沼の底泥からの栄養塩類の溶出(土木研究所資料第1165号、昭和51年10月)
- 9) 湖沼水質調査法(講談社、1995)
- 10) ダム貯水池の水質(水資源開発公団試験研究所報告書 第99405号、平成12年3月)
- 11) 土木研究所成果報告書【平成17年度】(2分冊-1)、(独)土木研究所、pp.381-422、2006

中菌孝裕\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所水環境研究グループ  
水質チーム専門研究員  
Takahiro NAKAZONO

阿部千雅\*\*



国土交通省国土計画局大都市圏  
計画課(前 独立行政法人土木  
研究所つくば中央研究所水環境  
研究グループ水質チーム主任研  
究員)  
Chika ABE

鈴木 稔\*\*\*



独立行政法人土木研究所つくば  
中央研究所水環境研究グループ  
水質チーム上席研究員  
Yutaka SUZUKI