

ダム湖における鉛直一次元の水温・水質モデルを用いた 鉛直水温・水質分布の季節変動

Seasonal variation of vertical water temperature and water quality distribution in a dam reservoir using a one-dimensional vertical water temperature and water quality model.

北海道大学大学院工学院 ○学生員 青木一眞 (Kazuma Aoki)
北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. はじめに

ダムは治水だけではなく、水源確保の観点からも重要な役割を果たしており、水質の維持、保全に向けて知見を得ることは重要である。ダム湖における水質問題の代表的な事例として、富栄養化に伴うアオコの発生、冷水放流、洪水発生時における濁水の長期化、湖底の貧酸素化によるリンの溶出などがある。ダム湖の水質問題は、流入栄養塩濃度とともに水温構造などのダム湖の水理学的条件が大きな影響を及ぼす。たとえば夏期を中心に表層の湖水が継続的に温められることによって発生する水温成層はその一つとして挙げられる。水温成層の状況下では有光層中の湖水は長時間停滞するために植物プランクトンの光合成や増殖が促進され、ダム湖の下層においては、貧酸素化によるリン溶出などの問題が発生しうる。また、成層化した貯水池では深層の水温は低く、取水口の位置が水温躍層より低い場合には冷水放流現象が発生し、下流の稲作や、生態系に悪影響を及ぼす。

将来の気候変動や、流域内の人間活動の変化が、気象的な外力の変化や、ダム湖への流入栄養塩量の変化をもたらし、貯水池内の水温構造の変化や、水質問題の増加に繋がることが懸念される。ダム貯水池は日本全国に存在し、温暖化などの外力変化や、それに対する貯水池の応答は地域差や、貯水池の特徴に依存する。全国の多数のダムを対象とし研究を行うことは、流域ごと、貯水池ごとの将来における水資源リスクを相対比較、評価することが可能になり、今後も日本において持続的な水資源管理を行う上で重要な取り組みである。梅田ら¹⁾は全国の37ダムを対象とし、重回帰分析により作成した過去の表層水温とその勾配、クロロフィルa濃度の関係式により、将来では全国的に表層水温の上昇と富栄養化が進行する可能性を示した。ダム湖環境の将来変化は、表層水温の上昇だけでなく、貧酸素化によるリンの溶出や、表層のアオコの繁茂が日射を遮ることで、更なる表層の水温上昇が発生することが考えられる。一方で降雨量の増大により、ダムへの流入量が増大することで鉛直方向の循環が促進され、アオコリスクが低減される可能性も考えられる。このように将来の水温構造などの水理学的条件と、ダム湖における物質循環の動態の相互作用についてより詳細に考慮することが必要である。

これらを踏まえ、本研究は、観測データから栄養塩と植物プランクトン量、貯水池の水温構造の時空間分布を明らかにすること、また鉛直一次元の水温分布、水質モ

デルを用いた分析を用い、ダム湖の成層強度や季節的な循環、水質の将来変化を評価することが目標である。本稿ではその第一段階として定山溪ダムにおける鉛直1次元の水温、水質解析モデルを適用した結果を示す。

2. 研究方法

本研究では、貯水池内の水平方向の変動は小さく、特に水温成層など鉛直方向の水温構造がダム湖内の水質変動過程に影響を与えると考えるために鉛直1次元の解析を採用した。鉛直1次元の水温、水質解析モデルは貯水池数理の数値解析モデルと、植物プランクトンと有機態および無機態の窒素、リンの物質循環を考慮した低次生態系モデルで構成される。また、植物プランクトンの存在量の指標として、クロロフィルaを用いた。

2. 1. 貯水池水理の解析モデルの概要

貯水池数理の解析モデルは、解析対象とする水温、各水質濃度（クロロフィルa、有機態および無機態の窒素、リン）について、水面の熱量収支、流入と放流、鉛直方向の移流、拡散、対流、沈降の現象を考慮し、鉛直構造の時系列変化を計算するものである。以下にモデルの基礎方程式と、図-1に本モデルの概要図を示す。

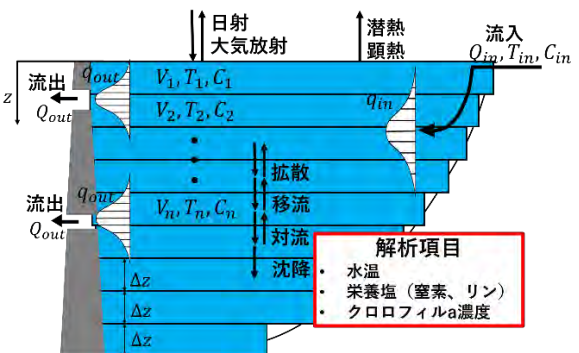


図-1 貯水池水理の解析モデルの概要図

鉛直一次元の水温、水質濃度分布についての基礎方程式は、水温の時間変化、水質濃度の時間変化および流量の連続条件を満たすものとして、安芸ら²⁾を参考に次式で示す。

$$A \frac{\partial T}{\partial t} = (q_{in} T_{in} - q_{out} T) - \frac{\partial}{\partial z} (vAT) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ A(K_m + K) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} - \frac{1}{Ac_w \rho_w} \frac{\partial AI}{\partial z} \quad (1)$$

$$A \frac{\partial C_i}{\partial t} = (q_{in}C_{ini} - q_{out}C_i) - \frac{\partial}{\partial z}(vAC_i) - \frac{\partial}{\partial z}(w_iAC_i) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left\{ A(K_m + K) \frac{\partial C_i}{\partial z} \right\} + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial Av}{\partial z} = q_{in} - q_{out} \quad (3)$$

ここに、 $A = A(z)$: 深さ z における貯水池面積[m²]、 $T = T(z, t)$: 水温[°C]、 $C_i = C_i(z, t)$: 各水質要素の濃度[mgm⁻³]、 t : 時間[s]、 $q_{in/out}$: 流入/放流量の鉛直分布[m²s⁻¹]、 T_{in} : 流入水温[°C]、 C_{ini} : 各水質要素の流入濃度[mgm⁻³]、 v : 鉛直方向の流速[ms⁻¹]、 w_i : 各水質要素の沈降速度[ms⁻¹]、 z : 深さ[m]、 c_w : 水の比熱[Jkg⁻¹K⁻¹]、 ρ_w : 水の密度[kgm⁻³]、 $K = K(z, t)$: 渦動拡散係数[m²s⁻¹]、 K_m : 分子拡散係数[m²s⁻¹]、 S_i : 各水質要素の生成項[mgm⁻³]である。渦動拡散係数 K はHenderson-Sellers³⁾を参考に、密度成層がない中立状態での渦動拡散係数 K_0 を評価し、次に(4)式に示すような温度成層時の乱れの抑制の効果を評価することで計算した。

$$K = K_0(1 + aRi^c)^{-b} \quad (4)$$

ここに、 Ri : リチャードソン数、 a 、 $-b$ 、 c はそれぞれパラメータである。本研究では、Munk and Anderson⁴⁾による代表的なモデルである、 $a = 10/3$ 、 $-b = 1$ 、 $c = 3/2$ の値を設定した。 $I = I(z, t)$ は日射による湖中の熱フラックス[Wm⁻²]であり、次式のように湖水中では指数関数的に減少する。

$$I(z, t) = (1 - \beta)(1 - ref)S \downarrow e^{-\eta z} \quad (5)$$

ここに、 β : 短波放射のうち水面近傍で吸収される割合、 ref : 湖面のアルベド、 $S \downarrow$: 湖面に到達する下向きの短波放射量[Wm⁻²]、 η : 消散係数[m⁻¹]である。

水温の鉛直分布の時系列変化を表す式(1)では、水面境界条件として熱収支式に基づく貯熱量 G を与え、湖底境界条件については、熱の交換をゼロとした。湖面での受熱量を推定する熱収支は次式で表される。

$$(1 - ref)S \downarrow - (\sigma T_s^4 - L \downarrow) = H + LE + G \quad (6)$$

ここに、 T_s : 湖面水温[°C]、 $L \downarrow$: 湖面に到達する大気の上向きの長波放射量[Wm⁻²]、 σT_s^4 : 湖面からの上向きの長波放射量[Wm⁻²]、 H : 顕熱輸送量[Wm⁻²]、 LE : 潜熱輸送量[Wm⁻²]、 G : 貯熱量[Wm⁻²]である。短波放射量、長波放射量の推定は近藤の推定式⁵⁾を用いた。また、式(1)の潜熱量 H 及び顕熱量 LE は次のバルク式により推定した。

$$H = \rho c C_H u (T_s - T_a) \quad (7)$$

$$LE = l \rho C_E u (q_s - q_a) \quad (8)$$

ここに、 c : 空気の比熱[Jkg⁻¹K⁻¹]、 l : 水の気化についての潜熱[Jkg⁻¹]、 ρ : 空気の密度[kgm⁻³]、 u : 風速[ms⁻¹]、 T_a : 気温[K]、 q_s : 湖面温度の飽和比湿[kgkg⁻¹]、 q_a : 大気の比湿[kgkg⁻¹]であり、 C_H と C_E はそれぞれ顕熱及び潜熱のバルク係数[-]である。本研究では、近藤の式⁶⁾を用い、大気の安定度を考慮して顕熱及び潜熱のバルク係数を計算した。

式(1)、(2)における流入量、放流量の鉛直分布は、式(9)に示すようにそれぞれ流入深度、放流深度 z_{in} 、 z_{out} を中心としたガウス分布で与える。

$$q_{in/out} = Q_{in/out} \cdot A \exp \left[-\frac{(z - z_{in/out})^2}{2\delta_{in/out}^2} \right] / \int_{bottom}^{surface} A \exp \left[-\frac{(z - z_{in/out})^2}{2\delta_{in/out}^2} \right] dz \quad (9)$$

ここに、 $\delta_{in/out}$: 流入、放流時の流動層厚であり、それぞれ式(10)、式(11)のように表される。

$$\delta_{in} = \frac{1}{3 \cdot 92} \left(\frac{q_{in}}{G\theta\sqrt{g\epsilon}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$\delta_{out} = \frac{1}{3 \cdot 92} \left(\frac{q_{out}}{F\sqrt{Ag\epsilon}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

ここで、 G : 無次元数であり、白砂⁶⁾の実験によれば、表、底層流出において0.324、中層流出では0.134の値をとる。 θ : 流出開口角、 g : 重力加速度、 ϵ : 水の密度勾配、 F : 内部フルード数である。

鉛直一次元の水温、水質濃度分布の計算において、下層よりも上層の密度が大きいような状態が発生した場合は、その範囲の水を混合させ、安定した密度分布を得るまでこれを繰り返す。

2. 2. 低次生態系モデルの概要

低次生態系の解析モデル⁷⁾⁸⁾⁹⁾は植物プランクトンと、有機態および無機態の窒素とリンに関する生態系の循環を数理的に表現している。図-2の低次生態モデルの概念図が示すように各分割層でそれぞれ計算した各水質要素の濃度変化量を、式(2)における生成項に代入することで各水質要素の鉛直分布の時系列変化を追うことが出来る。本研究では、その目的としてアオコの繁茂による富栄養化現象などに重点を置いていることから、動物プランクトンや魚類については考慮していない。また、植物プランクトンは、種類の違いによって増殖の条件が異なるため、藍藻類、珪藻類、緑藻類の3種のクロロフィル a 濃度を状態変数として考慮した。

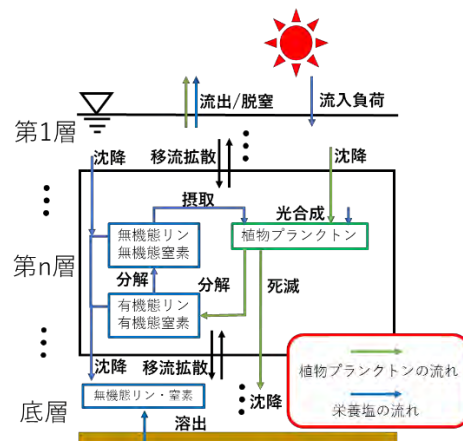


図-2 低次生態系モデルの概念図

以下にクロロフィル a 濃度 (藍藻類、珪藻類、緑藻類)、有機態窒素濃度、無機態窒素濃度、有機態リン濃度、無機態リン濃度の水質項目の生成項 S_i の式を示す。

各藻類のクロロフィル a 濃度の生成項と光合成量はそれぞれ式(12)、(13)で表される。

$$S_{Cp} = r_{Cp}(1 - \epsilon) - (K_r + K_d)C_p \quad (12)$$

$$r_{Cp} = \mu_p \cdot \frac{C_{IP}}{K_{mPp} + C_{IP}} \cdot \frac{C_{IN}}{K_{mN} + C_{IN}} \cdot \frac{I}{I_{op}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{op}}\right) \cdot \frac{T}{T_{op}} \exp\left(1 - \frac{T}{T_{op}}\right) \cdot C_p \quad (13)$$

ここに C_p ：各藻類のクロロフィル a 濃度[mgm⁻³]、 r_{Cp} ：各藻類の光合成量[mgm⁻³]、 ϵ ：植物プランクトンの分泌量/光合成量、 K_r ：呼吸速度[day⁻¹]、 K_d ：枯死速度[day⁻¹]、 μ_p ：各藻類の最大比増殖速度[day⁻¹]、 C_{IP} ：無機態リン濃度[mgm⁻³]、 K_{mPp} ：各藻類のリンの半飽和定数[mgm⁻³]、 C_{IN} ：無機態窒素濃度[mgm⁻³]、 K_{mN} ：窒素の半飽和定数[mgm⁻³]、 I ：日射量[MJ/m²day⁻¹]、 I_{op} ：各藻類の最適日射量[MJ/m²/day]、 T ：水温[°C]、 T_{op} ：各藻類の最適水温[°C]を示す。

非生物態有機態窒素の生成項と無機態窒素の生成項はそれぞれ式(14)、(15)で表される。

$$S_{CON} = \frac{\alpha_{COC}}{\alpha_{CON}}(K_d C + r_p \epsilon) - \gamma_{ON} \cdot C_{ON} \quad (14)$$

$$S_{CIN} = -\frac{\alpha_{COC}}{\alpha_{CON}} r_p + \frac{\alpha_{COC}}{\alpha_{CON}} K_r \cdot C + \gamma_{ON} \cdot C_{ON} - \gamma_{IN} \cdot C_{IN} + R_{IN} \cdot \frac{A}{V} \quad (15)$$

ここに、 C_{ON} ：非生物態有機態窒素濃度[mgm⁻³]、 α_{CON} ：植物プランクトン中のCOD/窒素比、 α_{COC} ：植物プランクトン中のCOD/クロロフィルa比、 C ：全クロロフィルa濃度[mgm⁻³]、 r_p ：全藻類の光合成量[mgm⁻³]、 γ_{ON} ：非生物態有機態窒素の分解速度[day⁻¹]、 γ_{IN} ：脱窒速度定数[day⁻¹]、 R_{IN} ：無機態窒素の溶出速度[mgm²day⁻¹]である。

非生物態有機態リンの生成項と無機態リンの生成項はそれぞれ式(16)、(17)で表される。

$$S_{COP} = \frac{\alpha_{COC}}{\alpha_{CON}} \frac{\alpha_{NP}}{\alpha_{CON}} (K_d C + r_p \epsilon) - \gamma_{OP} \cdot C_{OP} \quad (16)$$

$$S_{CIP} = -\frac{\alpha_{COC}}{\alpha_{CON}} r_p + \frac{\alpha_{COC}}{\alpha_{CON}} K_r \cdot C + \gamma_{OP} \cdot C_{OP} - \gamma_{IP} \cdot C_{IP} + R_{IP} \cdot \frac{A}{V} \quad (17)$$

ここで、 C_{OP} ：非生物態有機態リン濃度[mgm⁻³]、 α_{NP} ：植物プランクトン中の窒素/リン比、 γ_{OP} ：非生物態有機態リンの分解速度[day⁻¹]、 R_{IP} ：無機態リンの溶出速度[mgm²day⁻¹]である。

水温の上昇にともない、植物プランクトンの活性は高まる。そのため以下の7種類の速度 (K_r ：植物プランクトンの呼吸速度、 K_d ：植物プランクトンの枯死速度、 γ_{ON} ：非生物態有機態窒素の分解速度、 γ_{IN} ：脱窒速度定数、 R_{IN} ：無機態窒素の溶出速度、 γ_{OP} ：非生物態有機態リンの分解速度、 R_{IP} ：無機態リンの溶出速度) は以下の温度依存性を考慮した式を適用する。

$$K_t = K_{20} \exp(a(t - 20)) \quad (18)$$

ここに、 K_t ： T_w [°C]における速度[day]、 K_{20} ：20[°C]における速度[day]、 a ：温度依存係数を示す。

2. 対象ダムと解析の条件

対象ダムは北海道の石狩川流域の支川の小樽内川に位置する定山溪ダムである。気象条件は札幌気象台での観測値に気温について標高補正を行い、ダムへの流入量はダム諸量データベースから日観測データを用いた。流入水温は櫻井ら¹⁰⁾の関係式に従い、気温から推定した。流入栄養塩(総リン、総窒素)は、水文水質データベースの小樽内観測地点における、同時刻に観測された栄養塩濃度と流量データを用いて以下のLQ式における最適パラメータを最小二乗法により算出した。

$$C_{ini} = aQ^n \quad (19)$$

ここで、 C_{ini} は各栄養塩濃度[mgm⁻³]、 Q は流量[m³s⁻¹]、 a および n は定数であり、図-3、図-4に流入窒素濃度と流入リン濃度のLQ曲線を示す。

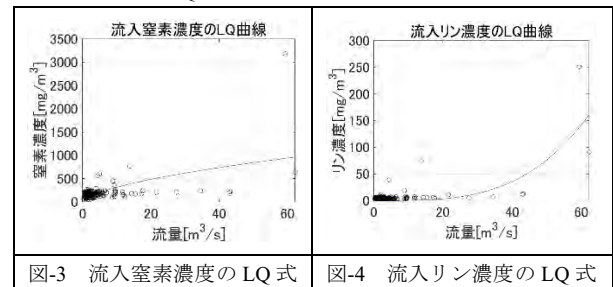


図-3 流入窒素濃度のLQ式

図-4 流入リン濃度のLQ式

低次生態モデルの各パラメータは、既往研究の文献⁷⁾を参考に設定した。数値計算に際して、鉛直方向の格子間隔は0.5m、計算時間ステップは3600秒とした。また、式(1)、(2)に表される移流拡散方程式は完全陰解法を用いて解いた。

3. 結果

貯水池内におけるクロロフィル a 濃度、窒素濃度、リン濃度の観測データが参照可能な期間のうち、近の2年間である2015年-2016年の計算結果を示す。

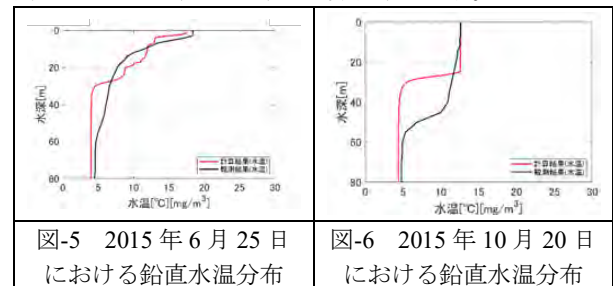


図-5 2015年6月25日における鉛直水温分布

図-6 2015年10月20日における鉛直水温分布

図-5、図-6はそれぞれ2015年6月25日、10月20日における鉛直水温分布であり、受熱期に徐々に成層強度が強化される段階と、放熱により徐々に成層が弱まる時期の水温分布が確認できる。

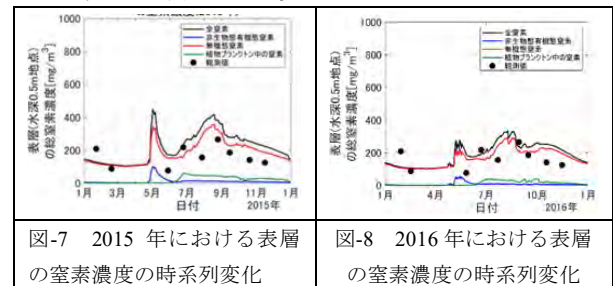


図-7 2015年における表層の窒素濃度の時系列変化

図-8 2016年における表層の窒素濃度の時系列変化

図-7、図-8はそれぞれ2015年、2016年における表層の窒素濃度の時系列変化である。2014年、2015年ともに年平均的な濃度については、黒点の観測値と黒線の推定

値はおおむね整合している。5月から6月にかけて推定値の濃度のピークが存在するのは、融雪出水により流入量が増大し、LQ式により栄養塩の流入量の推定値も増大しているためである。

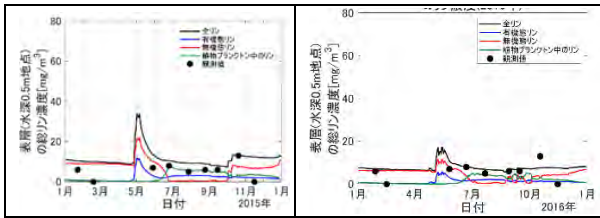


図-9 2015年における表層のリン濃度の時系列変化

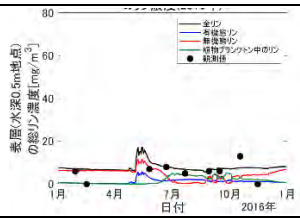


図-10 2016年における表層のリン濃度の時系列変化

図-9、図-10はそれぞれ2015年、2016年における表層のリン濃度の時系列変化である。表層のリン濃度の観測値は、表層の窒素濃度の観測値よりも年間の変動が小さいことがわかる。

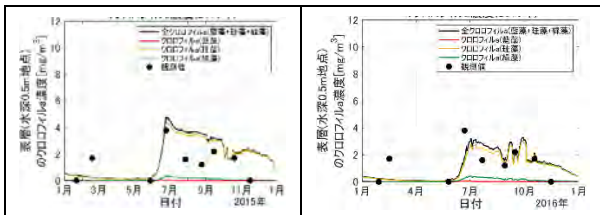


図-11 2015年における表層のクロロフィル a 濃度の時系列変化

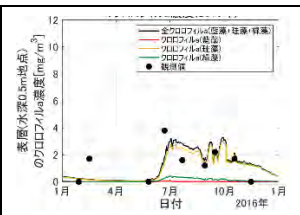


図-12 2016年における表層のクロロフィル a 濃度の時系列変化

図-11、図-12はそれぞれ2015年、2016年における表層のクロロフィル a 濃度の時系列変化である。観測値、推定値ともに冬期にかけてクロロフィル a 濃度が減少し、6月から7月にかけてクロロフィル a 濃度が増大するという季節的な変動の特徴がみられる。

4. まとめ

本稿では鉛直一次元の水温分布、水質モデルを定山溪ダムで適用した結果を示した。現在のモデルで考慮されていない点において、例えば植物プランクトンの繁茂による日射の遮断がどのように水温構造へフィードバックされるのか、成層の長期化によってもたらされるリンの溶出がどのようにアオコの発生に影響を与えるかなどの疑問は興味深い。今後はこれらのような水温構造と水質がどのように互いを影響しあうかという観点を念頭に、全国のダム湖に解析の範囲を広げる予定である。

5. 謝辞

本研究は JSPS KAKENHI Grant Number 22H01594、統合的気候モデル高度化研究プログラムの助成を受けた。ここに謝意を記します。

6. 謝辞

参考文献

- 1) 梅田信, 落合雄太: 気候変動による国内のダム湖水質への影響評価, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 68, No.5, I_127-I_135, 2012.
- 2) 安芸周一, 下田修, 白砂孝夫, 赤崎俊夫, 宮永洋一, 坂田昌弘: 貯水池水理の調査と解析, 電力研究所報告, No. 302, 1981.
- 3) Henderson-Sellers, B.: New formulation of eddy diffusion

thermocline models, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 9, Issue 6, pp. 441-446, 1985.

4) Munk, W. H. and Anderson, E, R: Notes on the Theory of the Thermocline, *J. Mar. Res.*, 7, pp. 276-295, 1948.

5) Kondo J.: Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary-layer meteorology*, Vol. 9, pp. 91-112, 1975.

6) 白砂孝夫, 安芸周一: 貯水池の濁水現象とその水理学的軽減対策, 発電水力, No. 126, pp. 3-25, 1973.

7) 柿沼 太貴: 閉鎖性水域における藻類増殖能力に内在する不確実性を考慮した押し出し効果によるアオコ浄化手法に関する研究, 中央大学博士論文, 2019.

8) 松尾直規, 岩佐義朗: 合流部を有する貯水池での富栄養化シミュレーション, 水理講演会論文集, 第25巻, pp. 251-258, 1980.

9) 岩佐義朗: 湖沼工学, 山海堂, 1990.

10) 櫻井俊之, 鎌田昌行, 杉谷圭一, 柏井条介: 流入水温を近似した貯水池放流水温制御の可能性と地域・貯水池特性, 水工学論文集, Vol. 49, pp. 1141-1146, 2005.