

令和元年5月8日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K15009

研究課題名（和文）水質汚濁水域の水環境修復に向けた水面冷却・冷水塊沈降を利用した水質改善技術の開発

研究課題名（英文）Development of aquatic environment restoration technique using the water surface cooling and cool water mass downwelling process in an organically polluted closed water body

研究代表者

平松 和昭（Hiramatsu, Kazuaki）

九州大学・農学研究院・教授

研究者番号：10199094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、水質汚濁水域を対象に、水面冷却と冷水塊沈降を利用した新しい水環境修復技術の有効性を水質実験と数値計算により検証した。まず、水質実験より、栄養塩の高濃度条件下でも低水温に起因する光合成の制限によって藻類増殖が抑制される点、水温成層の破壊によって水底での貧酸素化が抑制される点で、水面冷却の効果が認められた。つぎに、水面冷却対流の影響を考慮に入れた鉛直一次元型水質予測モデルを用いたシナリオ分析の結果、水面での藻類発生量の抑制効果と水底での無酸素化の早期解消という点で、実水域スケールでの本技術の効果を示した。以上から、本研究で提案の人為的な水面冷却による水環境修復技術の有効性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閉鎖性水域を対象とした従来の水質改善技術の課題・問題点を克服するために、水面冷却による藻類抑制と冷水沈降を利用した貧酸素制御に着眼した新しい水環境修復技術を提案し、その有効性を水質実験・数値計算を通じて示したこと、さらに水面冷却対流を考慮に入れた鉛直一次元型水理・水質予測モデルを構築したことは、水環境工学的な研究分野において意義の高い成果である。以上の点に、本研究の学術的意義を見出せる。また、本研究のアウトカムは、低コストかつ、大規模水域でも高い改善効果を期待できる水質改善技術の実用化であり、農業農村地域の持続的な流域水環境の創出に直接的に貢献できる点に、研究成果の社会的意義を見出せる。

研究成果の概要（英文）：This study focused on the aquatic environment restoration technique with the water surface cooling and cool water mass downwelling process in an organically polluted closed water body. Firstly, water quality experiments in water tank scale showed that algae growth was suppressed due to limited photosynthesis caused by low water temperature and that poor oxygenation was inhibited at the bottom of water due to the destruction of the thermal stratification even under the condition of high nutrients. Secondly, the effectiveness of this technique at the actual waterbody level was estimated by scenario analyses using the vertical one-dimensional diffusion model of water quality dynamics that considered the effects of the convection of water surface cooling, resulting in the suppressing effect on the volume of algae propagation at the water surface and the swift elimination of anoxia at the bottom of water. These findings showed the effectiveness of the artificial water surface cooling.

研究分野：農業農村工学

キーワード：閉鎖性水域 水面冷却熱対流 有機汚濁 富栄養化 無酸素化解消 藻類増殖抑制

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の農業農村地域では、有機汚濁・富栄養化による水域水環境の劣化が進み、湖沼・貯水池などの水域が有する多面的機能が失われている。このような水環境の劣化の影響は沿岸浅海域にまで及び、深刻な水環境問題を引き起こす。持続的な農業農村の発展の観点から、水域水環境の保全・修復技術の開発は重要な課題である。湖沼・貯水池などの水域で既に実用化されている水質改善技術は存在するものの、膨大な設備・運用経費、効果の持続性と局所性、高度な技術管理、水圏生態系への配慮などの課題・問題があり、水質改善技術の導入・普及の支障となっている。そのため、これらの課題をすべて克服し、とくに低コストで、大規模水域でも高い改善効果を期待できる新たな水質改善技術の開発が求められている。研究者グループは、環境水理学的手法に基づいた水域水環境の解析・予測に関する研究を通じて、閉鎖性水域の水質汚濁問題の原因・発生メカニズムについての知見を豊富に有する。これらの有益な知見を活かせるという点で、新たな水質改善技術の開発の実現性は高まる。本研究課題では、研究者グループがこれまで蓄積してきた環境水理学的研究に基づいた新たな発想のもと、閉鎖性水域の水環境保全・改善に貢献しうるための水環境修復技術を提案し、その可能性・有効性の検証を目指した。

### 2. 研究の目的

有機汚濁により成層化した閉鎖性水域では、深水層での無酸素化と表層での浮遊藻類の大量発生が深刻な問題となる。健全な水域水環境の創出のためには、深水層と表層で発生メカニズムの異なる水質汚濁現象に対応しうる水質改善対策が不可欠である。近年、水深の深いダム貯水池では多大な機械的エネルギーを投入した物理的手法による有機汚濁・富栄養化対策が一般的であるが、高額な初期・運用経費や局所的な改善効果が課題である。本研究では、これらの克服を目指した新たな物理的な水質改善技術を提案した。具体的には、水面積は小さいが、強固な水温二成層が長期化するような水深の深い貯水池を対象に、例えば水温躍層下の冷水を利用することで人為的に水面を冷却し、熱対流に伴う水塊の鉛直混合の促進による無酸素化の早期解消と底質からの内部負荷の低減、および表層の水温低下による藻類増殖の抑制を考える。このような水質改善に関する研究は皆無であるので、二つの視点からその基礎的知見を得ることを本研究の目的とした。まず、円筒水槽を用いた水質実験を通じて、冷水散水による水面冷却が水質動態に及ぼす影響を把握し、実験スケールで本手法による水環境改善効果の確認を試みた。次に、水理-水質モデルによる数値計算の観点から実水域スケールでの効果を検証するために、水面冷却対流による物質輸送の移流効果を考慮に入れた鉛直一次元モデルを構築した。同モデルによるシナリオ分析により、水面冷却による無酸素化の解消効果と藻類増殖の抑制効果を定量的に評価した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 冷水散水実験による水面冷却の影響把握

室温 30℃の恒温暗所室(以下、高温室)に設置した二つのアクリル製円筒水槽(高さ 120 cm, 内径 30 cm)内に、富栄養化が顕著な貯水池でサンプリングした環境水を水深約 110 cm で準備した。光合成に有効な青色・赤色光を含む水生植物用蛍光灯を用いて、水槽側部から表層部に約 70  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{ s})$ の光を照射し、各水槽内に上層が約 20 cmの有光層と下層が約 90 cmの無光層の2層構造を模擬した。点灯・消灯が各 12 時間の 24 時間周期の照射のもと、以下の冷水散水実験を 22 日間実施した。一つの水槽を冷却実験水槽とし、室温 15℃の冷温暗所室(以下、冷温室)で冷やされた環境水を、タイマー制御の水中ポンプを用いて高温室に送水し、園芸用灌水ノズルでミスト状に冷水を水面全体に供給した。水面冷却が水質に与える影響を明確に把握することを目的として、降雨強度 50 mm/h に相当する大きな強度で散水した。なお、散水は点灯開始から 1 時間のみとした。実験期間を通じて水位を一定で管理するために水面付近に排水口を設け、その余剰水を冷温室へ返送することで循環的に冷水が供給される実験システムを構築した。残りの水槽への冷水供給は行わず、これを対照実験水槽とした。実験期間中、表層と



Photo. 1 冷水散水実験装置  
(上段：散水ノズル，下段：実験水槽)

水底の DO と水温の連続測定と、表層水の Chl.a, DIP, DIN などの水質の定期測定を行った。

## (2) 水面冷却対流を考慮した数値解析

本研究では、水面冷却対流による移流効果を考慮に入れた水環境解析が不可欠であるため、鉛直一次元拡散型の一般的な水質モデルを改良した。冷水塊沈降による物質輸送をモデルに反映させるために、木村ら(1993)が提案した水面冷却によって生じる熱対流量の推算方法に着目した。水温分布  $\theta(z)$  の経時変化が既知の場合、水面冷却対流の一次元解析モデルに基づき、冷水塊の沈降速度の鉛直分布  $w(z)$  を次式より逆推定できる。

$$w(z) = a(\theta - \theta'), \quad \theta - \theta' = \sqrt{\frac{1}{a} \left\{ (z - z_m) \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + (\theta_m - \theta'_m) q'_m - \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_z + \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z_m} \right\}} \quad (1)$$

ここで、 $\theta'$  と  $q'$  はそれぞれ水面から沈降する冷水塊の水温と沈降量であり、水深  $z$  の関数である。また、 $a$  は比例定数、 $z_m$  は最大水温  $\theta_m$  をとる水深、 $\theta$  は区間  $[z_m, z]$  の平均水温、 $\lambda$  は温度伝達率である。式(1)の推定方法を導入するために、次式の水温の鉛直一次元移流・拡散方程式の有限差分法による数値解法として Operator Splitting 法を採用した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{1}{A_z} \frac{\partial (A_z w \theta)}{\partial z} = \frac{1}{A_z} \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z K_v \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho_w c_w} \frac{\partial Q_z}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 $A_z$  は水深  $z$  での水面積、 $K_v$  は水域に作用する風速から算定される鉛直乱流拡散係数、 $c_w$  は水の比熱、 $\rho_w$  は水の密度、 $Q_z$  は日射による水中の熱フラックスを表す。同手法では、一つの計算タイムステップで移流項と拡散項を分離して 2 段階的に数値解を求める。まず、境界条件となる気象データを用いて、移流項を除外した式(2)より  $\theta(z)$  を計算する。この結果を利用し、式(1)より  $w(z)$  を算定する。つぎに、式(2)の移流項に含まれる  $w(z)$  は既知となり、同式右辺の各項をゼロとした水温の移流方程式より  $\theta(z)$  の数値解を得る。水質予測モデルは、浮遊藻類、懸濁態・溶存態有機炭素、無機窒素・リン、DO などを状態変数とし、式(3)で表されるこれらの鉛直 1 次元移流・拡散方程式で構成される。

$$\frac{\partial C_x}{\partial t} + \frac{1}{A_z} \frac{\partial (A_z w C_x)}{\partial z} = \frac{1}{A_z} \frac{\partial}{\partial z} \left( A_z K_v \frac{\partial C_x}{\partial z} \right) + \left( \frac{\partial C_x}{\partial t} \right)_B \quad (2) \quad F_\theta = \left[ \frac{\theta}{\theta_{opt}} \exp \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_{opt}} \right) \right]^\xi \quad (3)$$

ここで、 $C_x$  は状態変数  $X$  の濃度を表す。また、右辺第 2 項は生態系モデルによって定式化される生物化学的反応項である。浮遊藻類の生物化学的反応項では、その最大増殖速度を制限する要因として光強度、栄養塩濃度、水温が考慮され、特に水温の影響は式(4)で表される。同式中の  $F_\theta$  は  $[0, 1]$  の値をとり、 $\theta_{opt}$  は浮遊藻類の最適水温、 $\xi$  は定数である。冷水散水実験の結果より、浮遊藻類の増殖に対して水温低下の抑制効果が顕著であったことから、式(4)を次のように修正した。すなわち、 $\theta < \theta_{opt}$  のとき低水温の強い制限を受けるものとして  $\xi = 7$ 、 $\theta > \theta_{opt}$  では高水温の影響が相対的に小さいものとして  $\xi = 3$  とした。これは高水温を強く好む藍藻類の生理特性を踏まえた修正である。

## 4. 研究成果

### (1) 水面冷却実験による成果

冷却実験水槽と対照実験水槽における水温、DO、Chl.a、DIP、DIN の測定結果を Figs. 1, 2 に示す。対照実験水槽では、水面水温は点灯時の蛍光灯からの発熱によって 24 時間周期で変動し、水底水温は 8 日目以降に室外からの冷気浸入の影響を受けて緩やかに低下したことから、水面と水底の水温差が  $2^\circ\text{C} \sim 4^\circ\text{C}$  の弱い成層を確認できた。水面 DO は点灯時に増加、消灯時に減少の周期変動を示し、その振幅は約  $4 \text{ mg/L}$  と大きい。これは、Chl.a が富栄養化レベルの高濃度を維持したこと、浮遊藻類の活発な摂取によって DIP と DIN が低濃度で推移したことを反映した結果である。一方、水底 DO は貧酸素レベルまで低下し、これは下層の無光状態と 8 日目以降の成層化に起因した。以上から、上層で高 Chl.a 濃度を維持し、下層では貧酸素化を生じた点で浅い富栄養化水域で確認される現象が再現された。

冷却実験水槽では、水面水温は点灯後 1 時間の冷水散水によって急激に低下し、約  $5^\circ\text{C}$  の冷却効果が確認された。この影響により対照水槽と異なる周期変動を示した。水底水温は冷水散水と同じタイミングで水面水温と同程度まで低下し、熱対流に伴う水塊の完全混合を確認でき

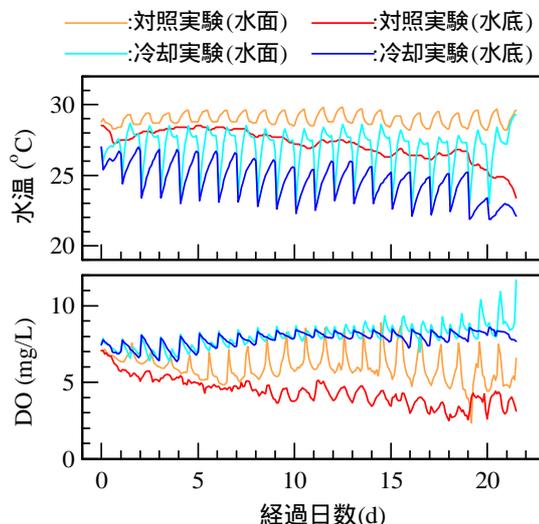


Fig. 1 冷水冷却実験結果 (水温, DO)

る。水面の Chl.a が低濃度で推移し、かつ DIP と DIN が高濃度を維持したことから、浮遊藻類の増殖は抑制されたと考えられる。また、対照実験の場合と比べて水面 DO の振幅が小さいことから、光合成に対する水温制限が認められた。水底 DO は初期値を維持し、水面 DO と類似の経時変化を示したことから、熱対流に伴う DO の水底への物理的供給が確認された。以上から、冷水散水によって、表層での浮遊藻類の増殖を抑制するとともに、下層での貧酸素化が回避されるなどの改善効果が示された。

## (2) 数値シミュレーションによる成果

本研究では、秋季以降の水面での強い熱放射に起因する水面冷却対流の影響を受ける水質動態の数値計算に上記のモデル（以下、移流・拡散モデル）を適用し、その有効性を検証した。対象池は有機汚濁化現象が顕著な九州大学伊都キャンパス内の 5 号調整池（水面積約 13 800 m<sup>2</sup>、貯水量約 75 000 m<sup>3</sup>、最大水深 8 m）であり、2016 年 4 月～12 月の水質の定期観測データをモデル検証に使用した。同年では、水底が 8 か月間を超えて長期的な無酸素状態にあり、また 10 月～11 月にアオコが観察された。移流・拡散モデルによる水質動態の再現結果を水質観測結果に加えて、従来の一次元拡散モデル（以下、拡散モデル）の計算結果と比較した。その一例として、Figs. 3～5 に水温、Chl.a、DO の結果を示す。図中のマークは観測結果を、実線は計算結果を表す。4 月～10 月中旬のこれらの計算結果は両モデルとも良好に再現されたが、10 月以降の計算結果にモデルによる再現性の違いがあった。移流・拡散モデルによる 10 月以降の水面水温の計算結果は、拡散モデルのそれとは異なり、大きな振幅の短周期振動を含まず、観測結果との乖離も小さい。水温躍層部に含まれる水深 4 m、6 m においても、移流・拡散モデルの計算結果は良好に再現された。また、表層部（水面～水深 2 m）の Chl.a に関して、11 月以降の急激な濃度低下を移流・拡散モデルでは再現した。これは、浮遊藻類の増殖に対する水温制限関数の修正が反映さ

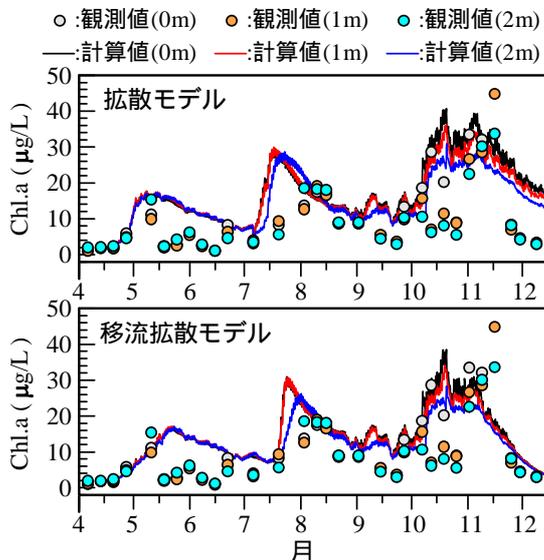


Fig. 4 表層の Chl.a の再現計算結果

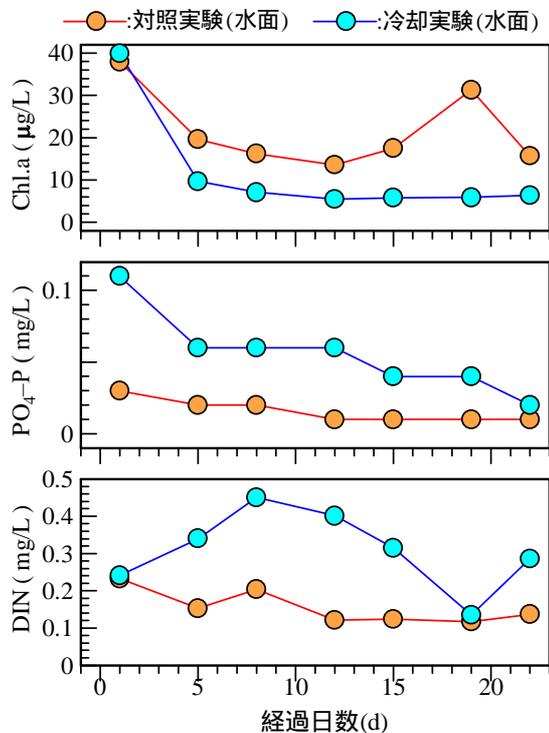


Fig. 2 水面冷却実験結果 (Chl.a, DIP, DIN)

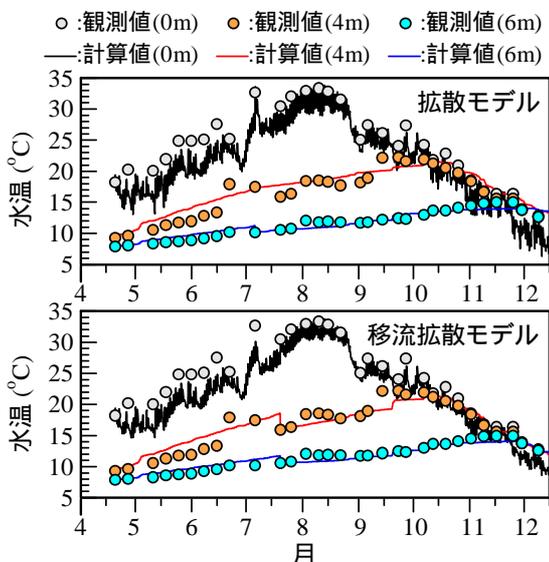


Fig. 3 水温の再現計算結果

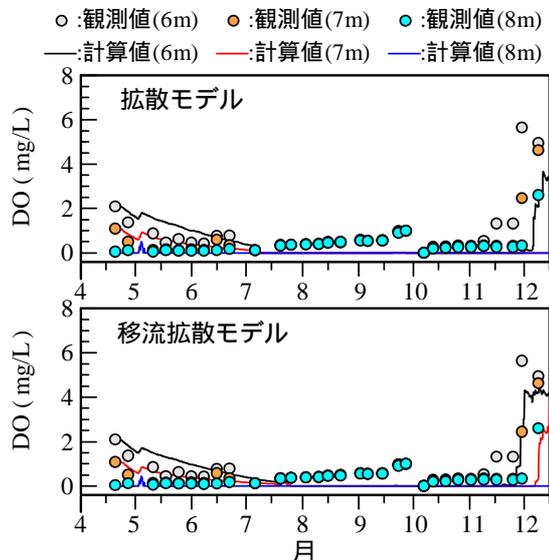


Fig. 5 深水層の DO の再現計算結果

れたものとする。DO の計算結果において、両モデルともに、深水層部（水深 6 m～水底）の無酸素化の解消時期に観測結果とのずれがあるが、移流・拡散モデルではその乖離が低減され、拡散モデルに比べて DO の再現性は向上したことを確認した。

つぎに、移流・拡散モデルを用いたシナリオ分析により、人為的な水面冷却による水環境の改善効果を評価した。2016 年の再現計算の初期条件と気象条件を共通シナリオとし、対象池水面の 25 %面積に対して、水域外から水底水温に相当する冷水を 50 mm/h で散水した場合の水質動態を計算した。散水 1 回あたり 1 時間行うものとして、1 日の散水回数がゼロ（Case 1, 供給量なし）、12 回（Case 2, 供給量 2 070 m<sup>3</sup>/d）24 回（Case 3, 供給量 4 140 m<sup>3</sup>/d）のシナリオを設定した。このシナリオ分析では、散水が水環境に与える影響は水温のみとし、式(2)において水表面への冷水供給に伴う水の流入・流出を考慮した。

水面と水底の水温差、および水面の Chl.a の計算結果を Fig. 6 に示す。また、Table 1 に DO の計算結果から算出した深水層における無酸素化の継続期間と水底でのその解消時期を示す。まず、Fig. 6 より、Case 1 では最大温度差が約 23 °C と大きく、また水温差が 10 °C を超える期間が 5 か月を超えるなど、強固な水温成層が長期的に形成された。Case 2, Case 3 では、最大水温差がそれぞれ 15 °C, 10 °C と低くなり、Case 1 のような成層化を防ぐことができた。同図より、散水回数が多いほど夏季の Chl.a が高濃度であったが、7 月までの藻類の増殖速度の上昇が緩められ、また 10 月中旬のピーク濃度も抑えられるとともに Chl.a は速やかに減少した。Table 1 より、冷水供給量に応じて 5 m 以深の無酸素化期間が顕著に短縮され、水面冷却対流による物質輸送を明確に確認できた。とくに、Case 3 の場合、水底の無酸素化解消が 3 週間ほど早められた結果となり、これは窒素・リンの溶出量や硫化物の発生量の抑制、さらに底質表層の好氣的状態への早期回復に繋がる。

### (3)まとめ

本研究では、冷水散水による藻類増殖と無酸素化の抑制効果について水槽実験レベルで確認するとともに、水面冷却対流による移流効果を考慮に入れた鉛直一次元水質モデルを通じて実水域レベルでその効果を評価した。本研究が提案する水環境改善技術の実現性に向けて、深水層の冷水を利用した水面冷却を想定したシナリオ分析などが求められる。

<引用文献> 木村ら(1993)：水面冷却によって生じる熱対流量の鉛直 1 次元モデルによる推算，農土論集，166，pp.9-14

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Thach, T. T., Harada, M., Hiramatsu, K. and Tabata, T.: The Influence of Bottom Sediment Redox State on Water Quality Dynamics under Long-term Anoxic Conditions in an Organically Polluted Reservoir, Journal of Rainwater Catchment Systems, 査読有, 24(1), pp.23-31, 2018

Thach, T. T., Harada, M., Hiramatsu, K. and Tabata, T.: Experimental Study on the Influence of Dissolved Organic Matter and Redox State of Bottom Sediment on Water Quality Dynamics under Anaerobic Conditions due to Organic Pollution, Paddy and Water Environment, 査読有, 16(4), pp.665-686, 2018

DOI 10.1007/s10333-018-0659-6

Thach, T. T., Harada, M., Oniki, A., Hiramatsu, K., and Tabata, T., Experimental Study on the Influence of Dissolved Organic Matter and Redox State of Bottom Sediment on Water Quality Dynamics under Anaerobic Conditions due to Organic Pollution, Paddy and Water Environment, 査読有, 15(4), pp.889-906, 2017

DOI 10.1007/s10333-017-0600-4

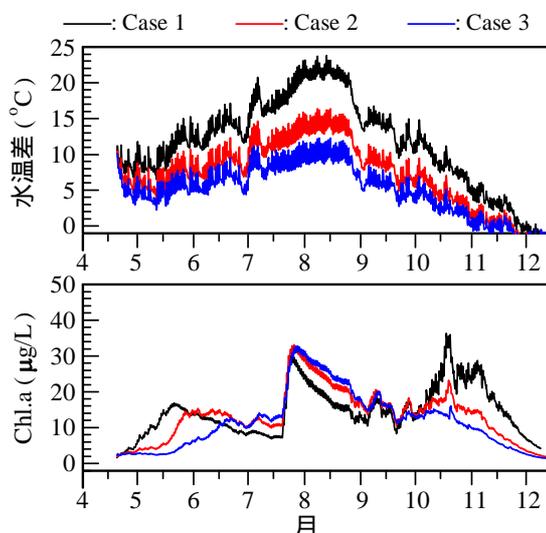


Fig. 6 水面と水底の水温差および表層 Chl.a に関するシナリオ分析結果

Table 1 深水層の無酸素化期間に関するシナリオ分析結果

Case	5m	6m	7m	8m	無酸素 解消日
1	52	129	156	242	12/21
2	0	36	105	224	12/5
3	0	0	0	212	11/29

鬼木彩香, 原田昌佳, 平松和昭, 田畑俊範: 硝酸態窒素に着目した無酸素化水域の底質近傍での水質動態特性に関する実験的研究, 雨水資源化システム学会誌, 査読有, 22(2), pp.31-39, 2017

西岡尊寿, 原田昌佳, 平松和昭, 田畑俊範: 有機汚濁化水域の嫌気的条件下での水質動態に関する実験的研究, 雨水資源化システム学会誌, 査読有, 21(2), pp.13-21, 2016

〔学会発表〕(計 6件)

Harada, M., Thach, T. T., Hiramatsu, K. and Tabata, T.: Biochemical Characteristics of Water Quality Dynamics near the Bottom Sediment under Anaerobic State in the Organically Polluted Reservoir, 21st Congress of IAHR-APD (Yogyakarta, Indonesia), 2018

小林拓磨, 原田昌佳, 平松和昭, 田畑俊範: 富栄養化水域の植物プランクトンの季節的变化に影響を与える環境要因の評価, 第99回農業農村工学会九州沖縄支部大会(熊本市), 2018

速水公佑, 原田昌佳, 平松和昭, 田畑俊範: 成層化水域における水面冷却対流を考慮した溶存酸素の鉛直一次元解析, 平成29年度農業農村工学会九州沖縄支部大会講演会(福岡市), 2017

Thach, T. T., Harada, M., Hiramatsu, K. and Tabata, T.: Improvement of vertical one-dimensional prediction model of water quality based on ecosystem model in an organically polluted reservoir, International Symposium on Agricultural, Food, Environmental and Life Sciences in Asia (Fukuoka, Japan), 2017

原田昌佳, 秋庭広大, 平松和昭, 田畑俊範: 溶存態有機物と底質の酸化状態が嫌気的条件下の水質動態に及ぼす影響, 平成28年度農業農村工学会大会講演会(仙台市), 2016

Duong, H. Q., Harada, M., Hiramatsu, K. and Tabata, T.: Water Quality Dynamic above the Bottom Sediment under an Anaerobic State in an Organic Polluted Reservoir, 平成28年度農業農村工学会大会講演会(仙台市), 2016

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 原田 昌佳

ローマ字氏名: HARADA, Masayoshi

所属研究機関名: 九州大学

部局名: 大学院農学研究院

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 80325000

(2)研究分担者

研究分担者氏名: 田畑 俊範

ローマ字氏名: TABATA, Toshionri

所属研究機関名: 九州大学

部局名: 大学院農学研究院

職名: 助教

研究者番号(8桁): 80764985

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。