

LED 照射による水質改善効果の予測モデルの開発

山口大学大学院	学生会員	○Yang Wenchao
山口大学大学院	正会員	朝位 孝二
佐賀大学	非会員	原口 智和
温州大学	正会員	井芹 寧
温州大学	非会員	郝 愛民

1. 目的

湖沼では夏期に成層効果のために鉛直混合が抑制されてしまう。その結果底層では溶存酸素がバクテリアによって消費され嫌気的状況になる。やがて底泥から重金属や栄養塩が溶出し、水質が悪化することは良く知られている。水質悪化を抑制するために湖沼の底層を発光ダイオード（LED）で光を照射する技術が検討されている。これは水中の植物プランクトンや藻類の光合成を活性させ酸素を生産させ、またプランクトン自身が繁殖するために栄養塩を利用することで栄養塩類物質を効果的に除去することを目的としている。

室内実験や屋外実験などの実験的な研究^{1) 2)}は多く行われているが、LED による水質改善モデルはまだ構築されていない。そこで本研究では LED 照射による水質改善効果を定量的に予測するモデルの開発を目的とする。

2. 解析モデル

本研究では、中国の温州大学で行われた実験室内シミュレーション実験²⁾を対象にモデルを開発した。その実験に概要図を図1に示す。容器の底に温州公園の池から採取した泥を敷き詰め、採水した水で満たした。容器をアルミフォイルで包んで外部から遮光している。完全無光状態の条件（コントロールグループ）、容器内に赤色 LED を設置し赤色を照射する条件（赤色グループ）、容器内に青色 LED を設置し青色を照射する条件（青色グループ）で実験を行っている。それぞれの条件で複数のサンプルで同時に実験を行い、その平均値を結果として採用している。各サンプルはインキュベータに入れ 25 度で常温に保たれている。

図1 実験の概要図²⁾

文献²⁾に記載されている実験室の条件に基づいて水質モデルを構築し、水中の化学反応、生態反応、物理反応などの影響因子を考慮して物質循環を定式化した。本モデルは 0 次元のボックスモデルである。井芹ら³⁾、平川ら⁴⁾のモデルを参考にモデルを構築した。

水質モデルに含まれる物質は植物プランクトン（PP）、懸濁態有機物（POC）、溶存対有機物（DOC）、リン酸態リン（DIP）、アンモニア態窒素（NH₄⁺-N）、硝酸態窒素（NO₂⁻-N）、亜硝酸態窒素（NO₃⁻-N）、溶存酸素（DO）であり合計 8 つの変数である。本研究のモデルの概念図を図2に、その数学モデルを表1に示す。

キーワード 水質浄化, LED, 光合成, 水質モデル, ボックスモデル

連絡先 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科

TEL: 0836-85-9319 E-mail: b034vev@yamaguchi-u.ac.jp

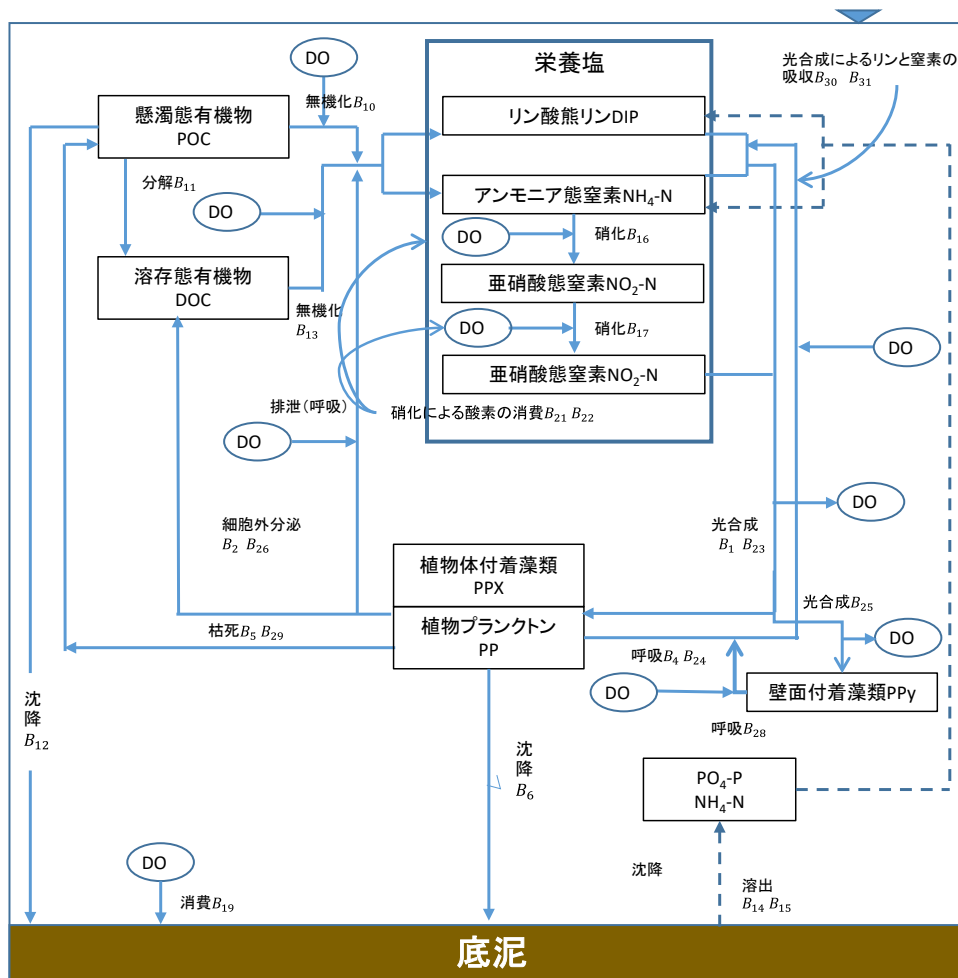


図2 水質モデルの概念図

表1 水質モデルの数学モデル

$$\frac{dC_{pp}}{dt} = B_1 - B_2 - B_4 - B_5 - B_6 \quad \frac{dC_{poc}}{dt} = B_5 - B_{10} - B_{11} - B_{12} - B_{29}$$

$$\frac{dC_{DOC}}{dt} = B_2 + B_{11} - B_{13} - B_{26} \quad \frac{dC_{NO2-N}}{dt} = B_{16} - B_{17}$$

$$\frac{dC_{DIP}}{dt} = -[P:C]_{pp}(B_1 + B_{23} + B_{25}) + [P:C]_{pp}(B_4 + B_{24} + B_{28}) + [P:C]_{poc}B_{10} + [P:C]_{DOC}B_{13} + B_{14} - B_{30}$$

$$\frac{dC_{NH4-N}}{dt} = -(1 - \gamma_1)([N:C]_{pp}(B_1 + B_{23} + B_{25}) + B_{31}) + [N:C]_{pp}(B_4 + B_{24} + B_{28}) + [N:C]_{poc}B_{10} + [N:C]_{DOC}B_{13} + B_{15} - B_{16}$$

$$\frac{dC_{NO3-N}}{dt} = -\gamma_1([N:C]_{pp}(B_1 + B_{23} + B_{25}) + B_{31}) + B_{17}$$

$$\frac{dC_{DO}}{dt} = [TOD:C]_{pp}(B_1 + B_{23} + B_{25}) - [TOD:C]_{pp}(B_4 + B_{24} + B_{28}) - [TOD:C]_{zp}B_8 - [TOD:C]_{poc}B_{10} - [TOD:C]_{DOC}B_{13} - B_{19} - B_{21} - B_{22}$$

[P:C]_{pp} 植物プランクトン中のP/C比、[P:C]_{zp} 動物プランクトン中のP/C比、[P:C]_{poc} 懸濁態有機物中のP/C比、[P:C]_{DOC} 溶存態有機物中のP/C比、[N:C]_{pp} 植物プランクトン中のN/C比、[N:C]_{zp} 動物プランクトン中のN/C比、[N:C]_{poc} 懸濁態有機物中のN/C比、[N:C]_{DOC} 溶存態有機物中のN/C比、[TOD:C]_{pp} 植物プランクトン中のTOD/C比、[TOD:C]_{zp} 動物プランクトン中のTOD/C比、[TOD:C]_{poc} 濁態有機物中のTOD/C比、[TOD:C]_{DOC} 溶存態有機物中のTOD/C比、 γ_1 植物プランクトンによる無機態窒素の吸収のうち、硝酸態窒素とアンモニア態窒素の配分比

水面は通常は再曝気が存在するがここでは遮光のため蓋がされている様態であるので、再曝気を削除している。また光の効果は光合成に関する項で考慮される。

表 1 に示す 8 元連立常微分方程式を 4 次の Runge-Kutta 法で解いた。時間間隔 dt は 1 日、水温は 25°C に、水深は 0.28 m とした。光度条件 $I_0=0\text{w/m}^2$ (完全無光条件), $I_0=6\text{w/m}^2$ (赤色グループ), $I_0=15\text{w/m}^2$ (青色グループ) での各物質の変化をそれぞれ計算した。初期条件を表 2 に示す。すべての条件で同一である。

表 2 実験用水の水質データ

水質項目	TP	TN	DO	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	COD
含有量(mg/L)	0.41	8.59	0.38	7.18	0.22	0.11	44

3. 計算結果と考察

図 3 に完全無光条件の結果を示す。紙面の都合上、アンモニア態窒素、溶存酸素、総リン、総窒素のみを示す。無光のため光合成作用がないため、溶存酸素は 0 に近い位置に維持され続け、総窒素は初期値の 8.59 mg/L から 16.15 mg/L 程度に上昇し、総リンは初期値の 0.41mg/L から 1.13mg/L 程度に上昇し続け、水質悪化が深刻であった。実測値と計算値の適合は、総リンが過少評価であるが、概ね良好である。

図 4 に青色 LED 照射条件の結果を示す。無光とは異なり、溶存酸素は急激に濃度が高くなり 3 日程度で 15mg/L まで上昇し、その後実験値も計算値も一定値となっている。実験値と計算値の整合性が極めて良好である。他の項目も概ね計算値と実測値の適合性は良い。酸素の上昇により水中の動物プランクトンおよび植物プランクトンの活性が増加し光合成が向上し、リン、窒素などの栄養塩類の濃度が低下している。

図 5 に赤色 LED 照射条件の結果を示す。基本的には青色 LED の場合と同様の効果が得られている。実験値と計算値の適合性も良いが、アンモニア態窒素では計算値の減少が早く生じている。総リンでは青色もそうであるが、振動が見られる。概ね良好なモデルが構築できたが、波長の違いの効果が取り入れることがまだできていない。今後の課題としたい。

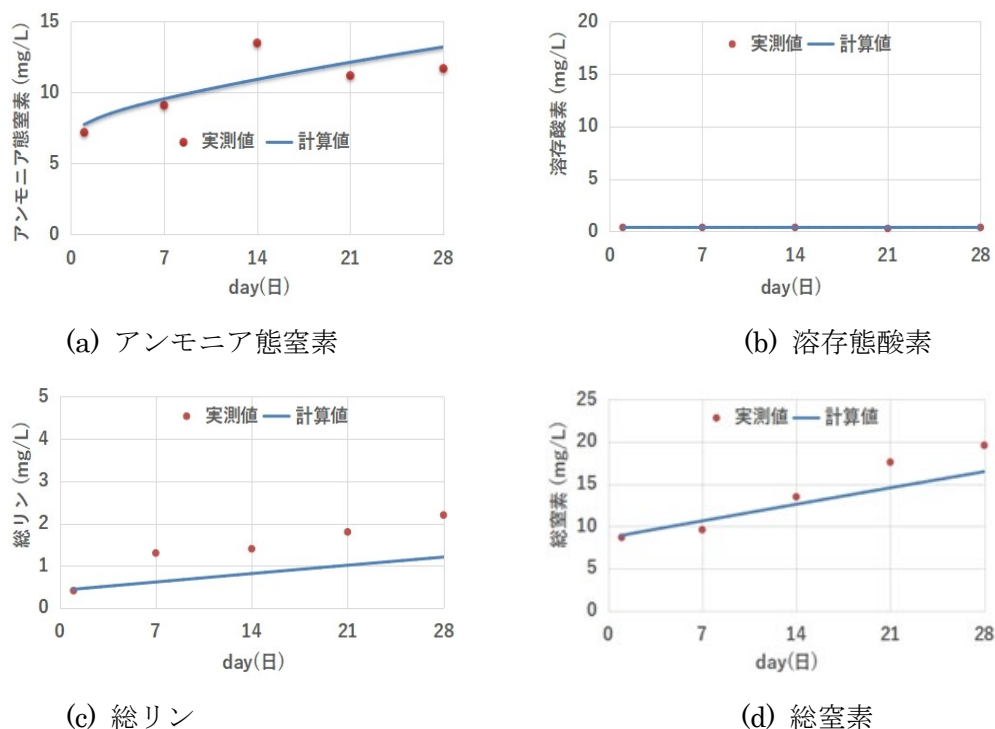


図 3 計算結果（完全無光条件）

参考文献

1) 朝位孝二, 井芹寧, 吉田貴博, 赤松洋介: 発光ダイオード照射による底泥直上水の栄養塩の低減効果に関する

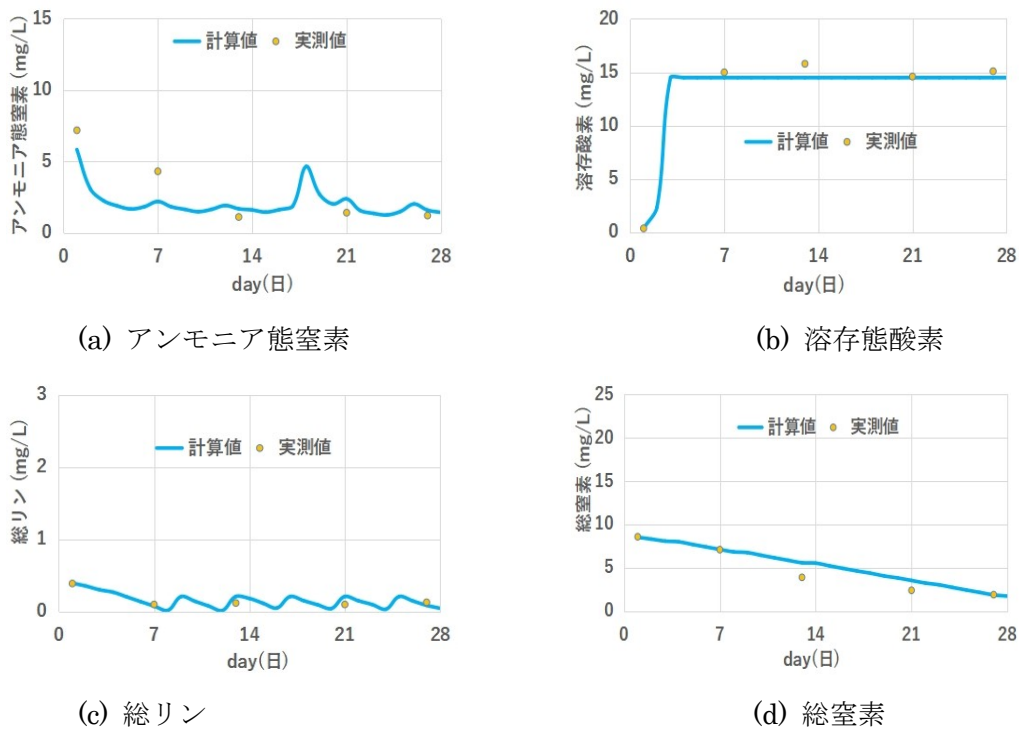


図4 計算結果（青色 LED 照射条件）

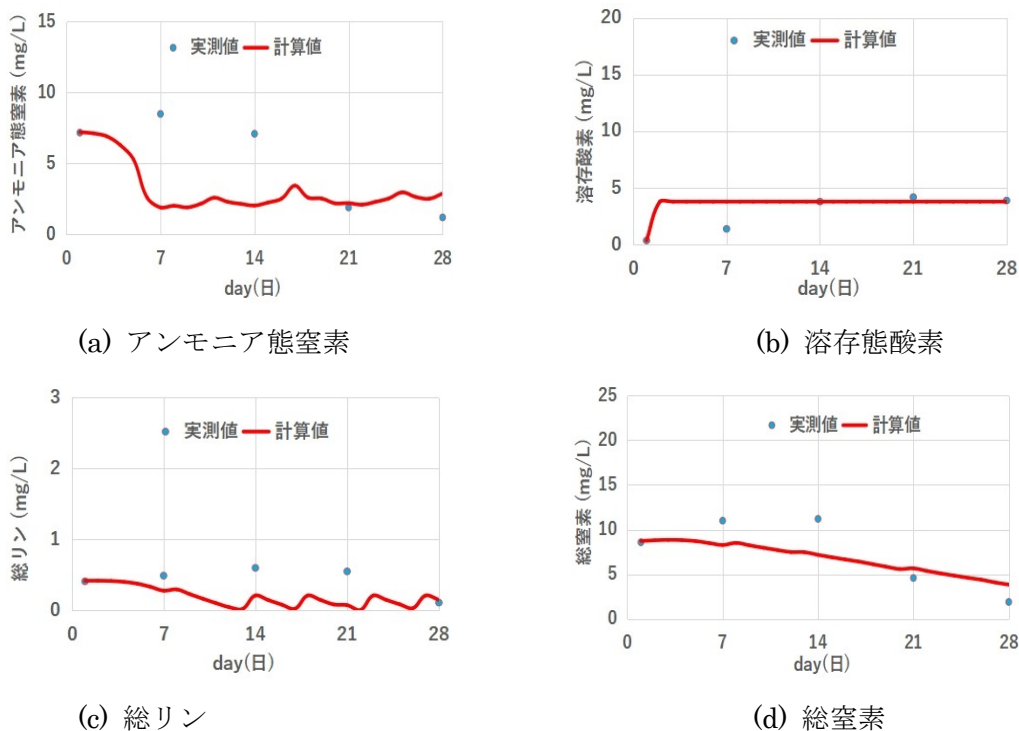


図5 計算結果（赤色 LED 照射条件）

基礎的研究，水工学論文集，第54巻，pp.1513-1518，2010.

- 2) 米琦：紅藍色 LED 結合纖維膜照射对富营养化水体改善效果研究 温州大学修士論文，2019.
- 3) 井芹晴香，原田昌佳，平松和昭：ワンボックス型低次生態系モデルを用いた富栄養貯水池の水環境評価，九州大学大学院農学研究院学芸雑誌，63巻2号，p. 147-160，2008.
- 4) 平川翔大，原口智和，ハオ愛民：生態系モデルを用いたクリーク底泥からの栄養塩溶出の定量評価，佐賀大学農学部集報第104号，2019.