

2018 年度（第 54 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 18-A-7

光技術を用いた水質生態系改善

山口大学・教授

朝位孝二

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2018 年 9 月

1. はじめに

Light Emitting Diode（発光ダイオード、以下 LED）は、化合物半導体の p-n 接合に順方向の電流を流すことにより、n 形領域の電子が p 形領域に移動し、p 形領域のホールと再結合する際に発生する光を利用する電気エネルギー・光エネルギー変換固体素子である。従来の光源である白熱電灯、蛍光灯など真空システムを基本としておらず以下のような利点が指摘されている¹⁾。

①エネルギー変換効率が高い。

②寿命が長い。+

③パルス発光が可能。

④特定波長を放出できる。

LED は上述の特徴を有してるため一般照明としての利用以外に応用範囲は広い。特に農林水産分野への応用例は豊富であり、農作物の栽培、集魚灯、害虫防除などがあり参考文献 1) に詳しく紹介されている。

一方、水工水理学や環境工学の分野においても光技術を用いた研究も試みられている。例えば古牧・佐々木が LED 照射による藻場造成のための基礎研究を行っている²⁾。S.J.OH らは二枚貝の餌となる珪藻類と有害な渦鞭毛藻類に対して特定波長による成長特性について研究を行っている³⁾。これは実海域において、LED を用いて特定藻類の増殖を制御しようとするものである。

著者の研究グループでは LED 照射による主に湖沼やダム湖など陸水の水質改善工法および生態系保全技術の確立を目指しており、そのための基礎的知見を得ることを目的として研究を実施している⁴⁾。本稿ではこれまでの著者らの研究を中心に LED を用いた光技術の水工水理学分野への応用を紹介する。以下、2 章では湖沼などの閉鎖性水域における低層直上水の水質改善を対象とした実験結果について述べる。3 章ではアオコ枯死に起因する貧酸素水塊発生に対して LED 照射による水質改善効果について述べる。4 章では LED 照射による沈水植物であるシャジクモの発芽実験について述べる。5 章に今後の展望を述べて本稿のまとめとする。

2. 底泥直上水の栄養塩低減効果

2-1 はじめに

内湾や湖沼などの閉鎖性水域は流動が小さくなると底層で貧酸素化が進行し嫌氣的な状態となり、水質が悪化することは良く知られている。水質の悪化を防ぐ方法として海域では底泥からの栄養塩溶出を防ぐ浚渫や覆砂⁵⁾、湖沼では曝気⁶⁾などがあげられる。これらの方法は、広大な水域や、水深が深い所での適用が難しいことや、水域に生息する生物に悪影響を与えるおそれがあり、適用が困難なことや高コストが問題として挙げられる。汚濁化の進行した底層水は底生藻類の増殖に必要な栄養塩が十分に存在しており、そこに底生藻類の増殖を制限している光を供給すれば周囲の栄養塩を利用し底生藻類の増殖が促進され、水質浄化作用が発現することが期待できる。

深見らは 2002 年に高知県須崎市浦ノ内湾で、集光装置を取り付けた鉄塔を設置し、光ファイバーで太陽光を海底に送りヘドロを浄化する実験を行った^{7),8)}。彼らは低照度の光でも内湾底層の貧酸素化を改善できる可能性を示唆した。しかしながら、光ファイバーのコストが高いことが指摘されている。また、太陽光は天候に依存するため光の安定供給に問題を残している。

水質改善に関する研究としては 1 章で述べた古牧・佐々木や S.J.OH らの研究がある。これは実海域において、

LED を用いて特定藻類の増殖を制御しようとするものである。しかしながら、これらは直接的には藻類の増殖特性を調べたものであり、水質の変化は調べられていない。そこで著者らは湖沼など陸水の水質改善を目的として LED 光照射によって底泥面上の藻類を増殖させ、その結果として底泥面直上水の水質の改善効果を実験的に検討した。

2-2 実験方法

クロロフィル a は 430nm および 663nm 付近に特徴的な鋭い吸収帯を有する。それらはそれぞれ青色光（400～500nm）と赤色光（600～700nm）の波長帯に属する。また緑色光（500～600nm）の吸収率は低い。そこで藻類増殖に有利と思われる青色 LED、赤色 LED を用いた。比較として白色光の LED も用いた。ここで用いた白色 LED は青色と黄色を用いて視覚的に白色となっているものである。表-1 に用いた LED の仕様を示す。全ての LED で輝度も同じ値に設定することが望ましいが、既製品の LED ランプを用いており輝度を揃えることは難しいため、既製品の仕様のままで実験を行った。

表-1 LED の仕様

	輝度(mcd)	電流(mA)	主波長(nm)
青	10000	20	470
赤	8000	20	630
白	8400	20	

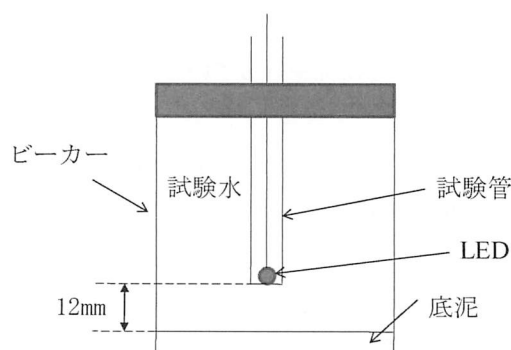


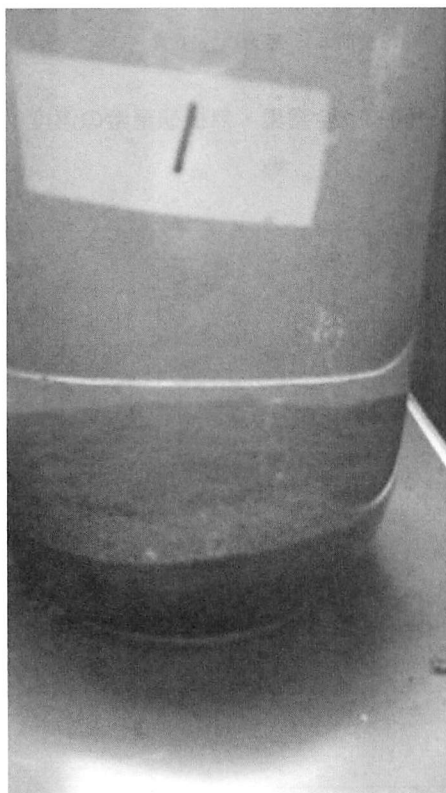
図-1 実験装置（培養ビーカー）

図-1 に示すように実験には 900ml ビーカーを用いた。ビーカーの上部から差し込んだ試験管内部に LED を底泥から 12cm の位置にセットし連続照射を行った。各ビーカーにはアルミホイルを巻き LED 以外の光が入り込まないようにした（写真-1 参照）。山口県宇部市にある常盤公園の常盤湖から採取してきた底泥と湖水を培養ビーカーに投入した。試験水はビーカーの口まで一杯にいれ、プラスチックの蓋で閉めて完全密閉とした。無光、青色、赤色、白色の 4 系統に対してそれぞれ 3 つの培養ビーカーを用いて実験を行った。インキュベーター内で 20℃の温度条件で培養した。2008 年 11 月 26 日より 40 日間培養実験を行った。

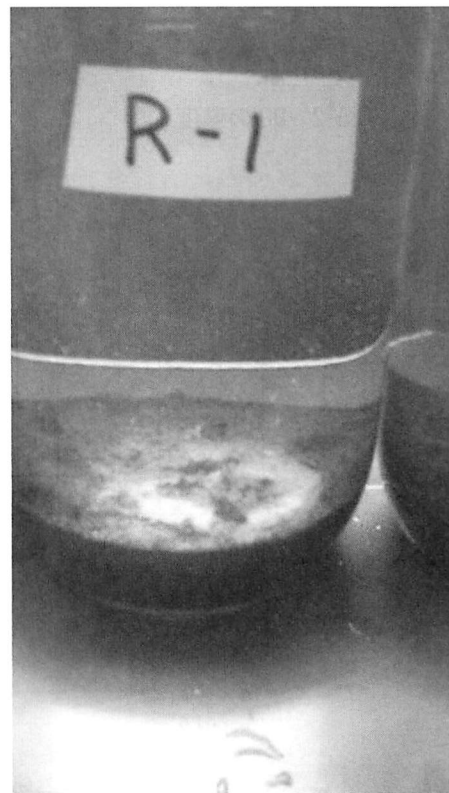
培養前後のビーカー内の DO 値を測定すると共に、培養後のビーカー内の水質の分析を行った。水質検査項目は、全窒素、無機態窒素、全リン、リン酸態リン、有機態炭素である。この後に示す実験結果は 3 個のサンプルの平均値である。データのばらつきを示すために標準偏差を誤差範囲としてバーで図中に示している。また、培養前のデータも比較のため図示している。ただし、培養前のデータは一検体で測定したため、誤差範囲は示していない。



写真-1 インキュベーター内のサンプル



(1) 無光



(2) 赤色 LED 照射系

写真-2 培養後の底泥表面の状況

2-3 実験結果

写真-2 に培養後の底泥表面の状況を示す。無光では表面には藻類は発生していないが、赤色 LED 照射系では藻類の発生が確認された。青色 LED 照射系においても藻類の発生は認められたが目視観測ではバイオマス量は赤色 LED 系が多かった。

図-2 に DO 濃度の結果を示す。培養前は 5.3mg/l (飽和度 58%) ～6.3mg/l (飽和度 68%) の範囲であったが、培

養後は 0.29mg/l（飽和度 3.1%）～0.42mg/l（飽和度 4.5%）となった。いずれも溶存酸素が消費され貧酸素状態に移行している。

図-3 に各系の全窒素濃度と無機態窒素濃度（三態窒素の合計）を示す。平均値として全窒素、無機態窒素とも無光条件の場合と比較してLED 照射系の値は小さい。分散分析したところ、全窒素、無機態窒素とも無光条件の場合と比較して青色は 5%有意で差が認められた。一方、無光と青以外の色では有意な差は認められなかった。また青、赤、白の間でも有意な差は認められなかった。図-4～6 はそれぞれアンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素の濃度を示している。どの系においてもアンモニア態窒素の占める割合が高く、8 割～9 割を占めている。アンモニア態窒素は平均値としては青が最も小さいが、分散分析したところ青色と無光は 1%有意、赤色と無光は 5%有意で差が認められた。一方、無光と白は有意な差が認められなかった。また青色と赤色でも有意な差はなか

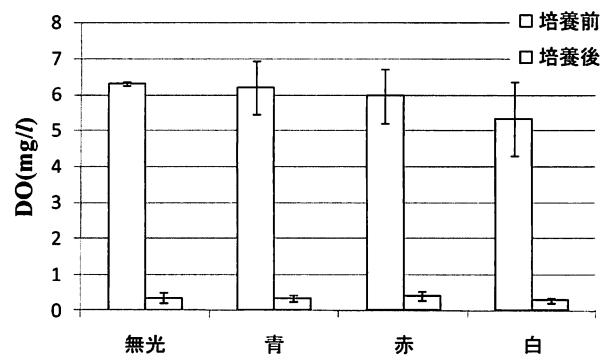


図-2 DO の濃度

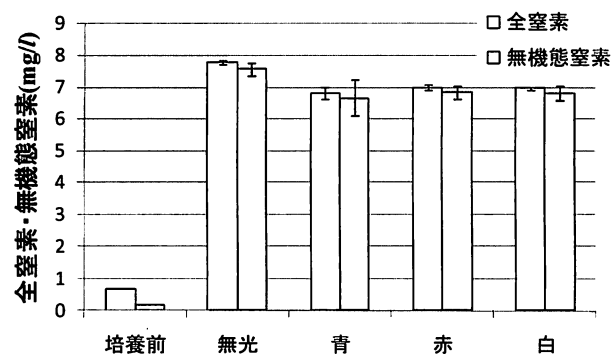


図-3 全窒素・無機態窒素の濃度

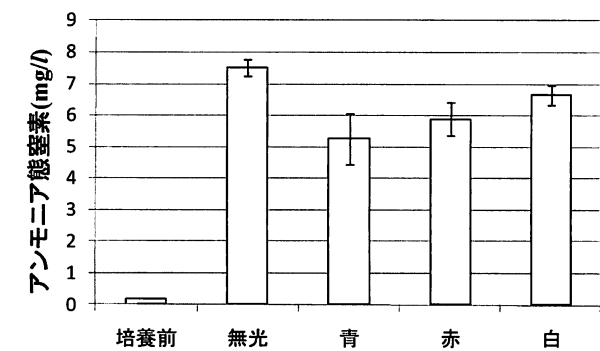


図-4 アンモニア態窒素の濃度

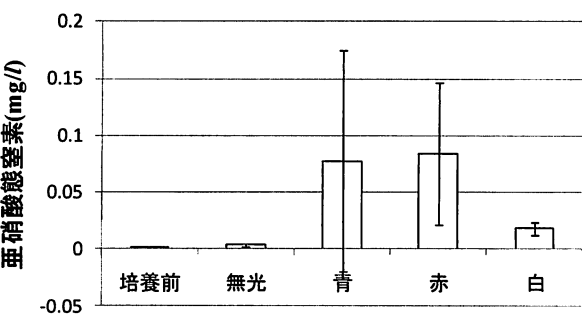


図-5 亜硝酸態窒素の濃度

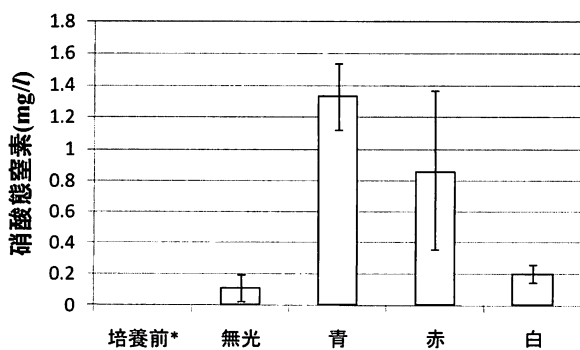


図-6 硝酸態窒素の濃度

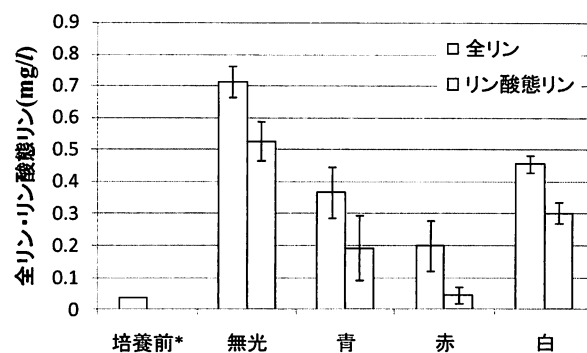


図-7 全リン・リン酸態リンの濃度

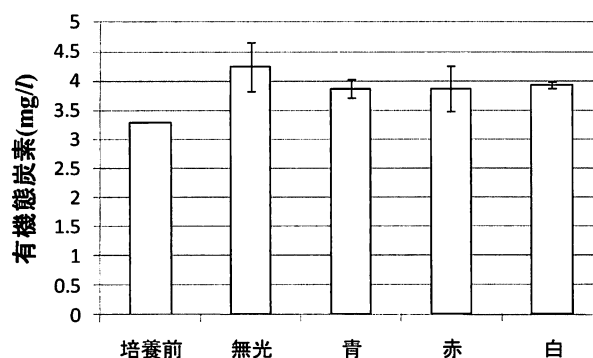


図-8 有機態炭素の濃度

った。亜硝酸態窒素濃度については平均値的には青色と赤色が 0.08mg/l 程度の値を示している。しかし分散分析ではすべての光条件で有意な差はなかった。硝酸態窒素濃度の平均値では、青色は 1.3mg/l で無光の 0.11mg/l の10倍以上の値を示した。分散分析においても青色と無光では5%有意の差があった。しかしながら赤色と無光および青色と赤色では有意差はなかった。以上より、青色は赤色と比較して安定的に硝化が進行しているものと考えられる。

図-7 に全リンとリン酸態リンの結果を示す。全リンの平均値は無光が 0.71mg/l に対し、LED 系は 0.20mg/l ～ 0.46mg/l の範囲となり、LED 照射による大幅なリン成分減少効果がみられた。特に赤色の減少効果が大きく無光の3分の1以下の値となっており、次いで青色、白色という結果が得られた。分散分析においても無光とLED照射系は1%有意の差が認められ、また青色と赤色は5%有意の差が認められた。一方、リン酸態リンの平均値は無光が 0.53mg/l に対し、LED 系は 0.05mg/l ～ 0.30mg/l となっており、LED 照射による減少が大きく、特に赤色においては無光の10分の1となっている。青色においても半分以下の値になるなど、LED 照射による大幅な浄化効果がみられた。分散分析では無光と青色と赤色では1%有意で差が認められたが、青色と赤色では有意差はなかった。図-8 に有機体炭素の結果を示す。これは水中の酸化されうる有機物の全量を炭素の量で示したものである。無光が 4.23mg/l に対し、LED 照射系は 3.87mg/l ～ 3.93mg/l となっており、平均値的にはLED 照射による減少がみられるが、分散分析では有意差はなかった。

2-4 考察

この章で述べた実験系は湖沼の底泥を用いた強い貧酸素状態での実験と位置づけられる。LED 照射系では培養後底泥表面に藻類が観察された。貧酸素の状態のため底泥からアンモニア性窒素とリンが溶出されるが、藻類の光合成で発生した酸素により硝化が行われているものと思われる。また、青色では全窒素濃度が無光より低いことから、同化や脱窒の作用があるものと思われる。リンについても同化が考えられる。

2-5 おわりに

LED 光の波長の違いによる底泥直上水の栄養塩の低減効果の相違を検討するための実験を行った。本実験において LED 照射による栄養塩濃度の低減効果が認められた。酸素が存在する実験では照射の効果は顕著であった。湖沼底泥で強い貧酸素条件下での全窒素濃度、無機態窒素濃度ともに青色が無光と比較して、統計的に有意な差が認められた。一方、全リン、リン酸態リンでは照射系は無光と比較して統計的に有意な差が認められた。特に全リン濃度では赤色が統計的にも、最も低い値を示した。

3. 底泥直上水の栄養塩低減効果

3-1 はじめに

湖沼や河川に対する過度な栄養塩の負荷や地球温暖化が要因となって、Cyanobacteria に分類される *Mycrocystis* などの異常増殖によるアオコの発生が社会問題化している^{9), 10)}。本属のアオコの一部の種は直接的に急性、慢性毒物を産生し¹¹⁾、間接的に塩素殺菌時におけるトリハロメタンの生成の原因¹²⁾となるなど、利水障害を引き起こし、水の価値を低下させる。また、腐敗時には紫色、白色に変色し景観に影響し、悪臭を発するなど親水性の悪化を引き起こす。

アオコの増殖は閉鎖性水界におけるリン窒素等の無機物を有機物に変換（同化）する内部生産機構であり、生産層（有光層）の有機物量の増大に直結する。特に *Mycrocystis* などの群体形成性のアオコは細胞構成物の有機物質だけではなく、群体の基質となる細胞外のシースも易分解性有機物（多糖類が主成分）となっている。アオコは増殖、安定期では光合成による酸素生産が活発で、生産層への酸素供給の一役を担っているが、枯死時には沈降し底層（分解層）から底質へ移行する。特に、衰退期には短期間で大量の有機汚濁負荷として沈積する。有機汚濁物は微生物酸化分解作用の過程で、酸素を消費し、大気からの酸素供給が及ばない深水層では貧酸素水塊の形成に至る。貧酸素水塊の増大は酸欠による魚のへい死、鉄やマンガンの溶出酸化による赤・黒色水の発生、硫化水素、重金属等の有害物質の発生など各種の富栄養化障害の原因となっている^{10), 13)}。貧酸素による還元的環境はアオコの増殖に不可欠なリンや鉄をイオン化し、さらにアオコの増殖を助長することになる。

本研究で実用化を目指している LED 光照射法は、光の供給により生物作用としての光合成作用を活性化させ、その過程で生産される酸素を利用し貧酸素化を防止し、栄養塩の吸収作用により水質浄化を目指すものである。LED 光供給による研究は、海底土の光合成微生物を活性化させ、その酸素生産と栄養塩吸収により貧酸素化した底層の環境改善をはかる実験が我が国初の技術として報告されている^{14), 15)}。その後、著者による陸水、海水域底層改善実験⁴⁾、湊らによる沿岸域底層 DO 供給実験¹⁶⁾が行われているが、アオコに関連した研究はない。著者らのグループは陸水域におけるアオコの発生に起因した貧酸素水塊の形成機構に着目し、枯死アオコの分解過程における LED 光供給による水質浄化効果の検討を実施した¹⁷⁾。この章ではその結果を紹介する。

3-2 実験方法

アオコ分解実験用原水については、佐賀県打上ダム湖において、アオコ衰退期にあたる 2014 年 11 月に湖表層で採取したアオコを基に、凍結処理により殺菌を試みた。しかしながら、解凍後、増殖能力を要する細胞が観察されたため、さらに、同試料について低温殺菌（70℃以上、30 分）を行い完全に死滅させたものをアオコ分解実験用原水とした。

室内培養実験ケースを図-9 に示す。0.5l ガラス蓋付きビーカーに十分攪拌し均一化したアオコ分解用原水 0.45l を入れ、分解微生物などの植種を目的に、解凍アオコを 0.05 l 添加した。解凍アオコには凍結処理で生き残った動物・植物プランクトンを含んでいる。また形態を確認できるアオコ細胞として、アオコ分解用原水には 1.09×10^{10} 細胞、解凍アオコには 1.21×10^{10} 細胞を含んでいる。

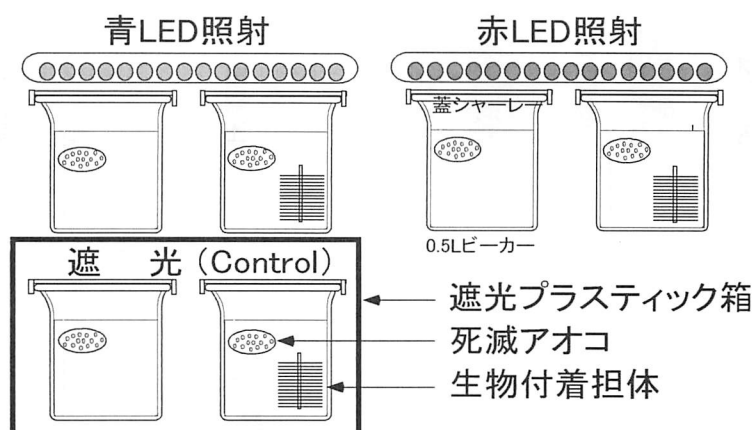


図-7 培養実験の組み合わせ

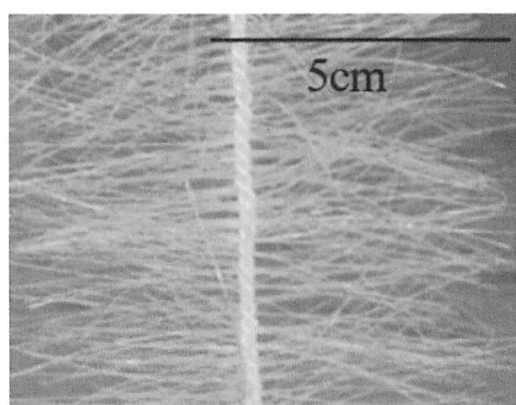


図-8 生物付着担体

ビーカーをインキュベーター内に設置し、25℃の条件で22日間バッチ培養を行った。処理ケースとして、前章と同じく青色LED、赤色LEDを光源として選択した。照射条件は水面から約20cmの距離にLED（消費電力5W）が位置するように設置し、連続照射とした。同インキュベーターの中にプラスチック箱で遮光した無光条件の培養系を設けた。さらに、各培養系に付着浄化生物の増殖促進効果を想定して写真-3に示す人工根状の付着担体を投入した系を加えた。なお、各培養系は3連で実施した。

実験期間中、培養開始時、11日目、22日目に、ガラス電極、交流二極法pH/COND METER（堀場 D-54）及び蛍光式溶存酸素計（HACH 東亜 DKK HQ30d）を用いて、直接ビーカー表層水の水素イオン濃度（pH）、導電率（EC）、溶存酸素量（DO）の計測を行った後、ガラス棒でビーカー内の培養液を緩やかに攪拌し、沈殿物が十分に巻き上がり均一化したところで注射筒を用いて100mlを採取し、そのうち50mlを直ちに0.45μm孔径メンブランフィルターで濾過した。それぞれの未濾過、濾過試料は凍結保存し、培養実験終了後にまとめてBL TEC Continuous Flow Analysis Auto Analyzerを用いて、窒素・リン栄養塩類の分析を実施した。濾過試料を用いて、アンモニア態窒素（NH₄-N）、亜硝酸態窒素（NO₂-N）、硝酸態窒素+亜硝酸態窒素（NO₃-N+NO₂-N）、リン酸態リン（PO₄-P）の分析を、未濾過試料を用いて、全窒素（T-N）、全リン（T-P）の分析を実施した。

3-3 実験結果

pHの計測結果を図-10に示す。図中のcは無光、crは無光+担体、rは赤、rrは赤+担体、bは青、brは青+担体を示す。無光は培養期間中の3連の平均値で（以降、数値は3連平均値で記す）初期の9.2から22日目には6.7に低下した。それに対し青は同様な値で推移し、赤はさらに上昇し、特に赤+担体で最高値の10.7に達した。

DOの計測結果を図-11に示す。無光は初期の9.7mg/lから11日目に1.7mg/lに急減したのち、4.2mg/lまでわず

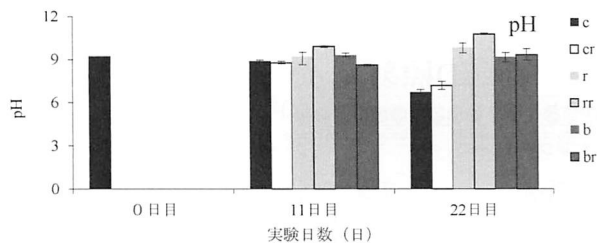


図-10 pH の濃度

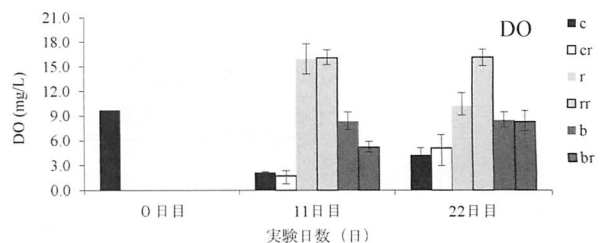


図-11 DO の濃度

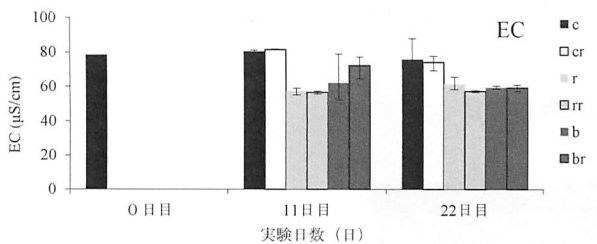


図-12 EC の結果

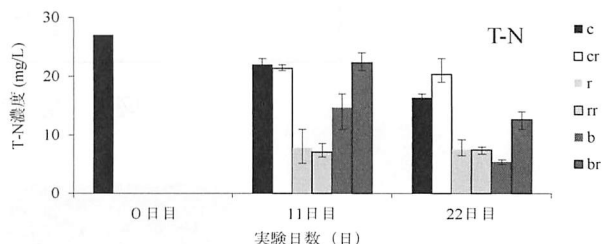


図-13 T-N の濃度

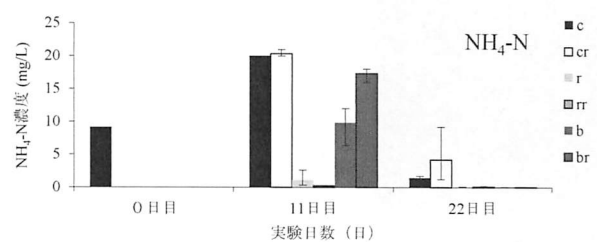


図-14 NH₄-N の濃度

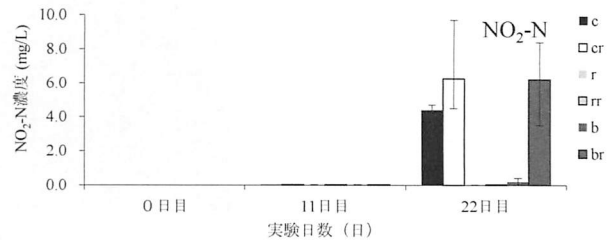


図-15 NO₂-N の濃度

かに回復した. 今回の実験では完全に密閉されていない状態であり, ある程度大気中からの酸素の供給があるため, 無酸素状態には至っていない. それに対し, LED 照射系では無光のような減少傾向は認められなかった. 赤では大幅な増加を示し, 16.1 mg/l までに達した.

EC の計測結果を図-12 に示す. 無光は初期の 78.2μS/cm から 11 日目に 81.2μS/cm にわずかに上昇し, 22 日目には 74.0μS/cm に低下したが, 比較的変動は小さかった. それに対し, LED 照射系はいずれも明確な低下傾向が認められた. 特に赤は 11 日目まで 57μS/cm へ大幅な低下を示した.

全窒素 T-N の結果を図-13 に示す. 無光は初期の 27.0mg/l から 22 日目には 16.3mg/l へと減少したが, LED 照射系は浄化促進効果が認められ, 最終的にそれぞれ 7.5mg/l, 5.4mg/l と大きく減少した. 青と比較して赤が早期に浄化効果が発現した.

NH₄-N の結果を図-14 に示す. 無光は初期の 9.1mg/l が 11 日目には 20.0mg/l へと一旦倍増したが, 22 日目には 1.2~1.7mg/l に減少した. LED 照射系は良好な浄化効果が示され 22 日目には 0.03~0.07mg/l に減少した. 赤は青より早期に浄化効果が発現した.

NO₂-N の結果および NO₃-N の結果それぞれ図-15, 図-16 に示す. NO₂-N ではいずれも 11 日目までは不検出~0.02mg/l の値であったが, 22 日目には無光と青+担体で 4.4~6.2mg/l に増加した. NO₃-N も NO₂-N と同様な傾向であり, 22 日目に無光が 6.35~8.87mg/l に増加した. 青+担体は無光と比較すると増加量が少なく, 0.93mg/l となった.

全リン T-P の結果を図-17 に示す. T-P は無光が 3.5mg/l で大きな変化がないのに対し, LED 照射系は減少傾向

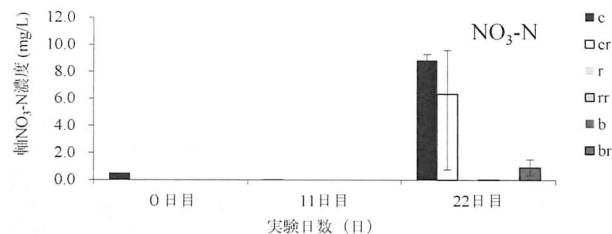


図-16 NO₃-N の濃度

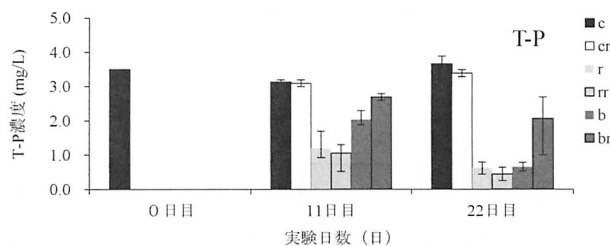


図-17 T-P の濃度

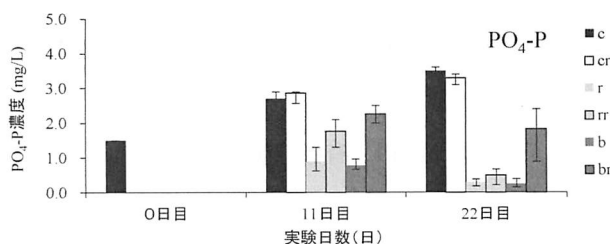


図-18 PO₄-P の濃度

が認められ、22日目には、赤、赤+担体、青が1mg/l未満に減少した。無光は3.5mg/l前後で安定しているのに対し、LED照射系は浄化効果が認められ、22日目には赤は0.4~0.6mg/l、青は0.7~2.1mg/lへと減少した。

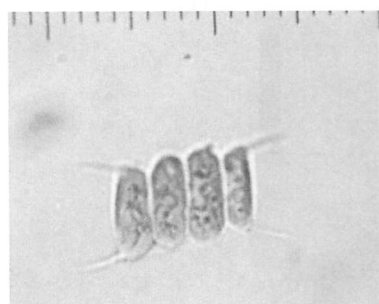
PO₄-Pの結果を図-18に示す。無光は初期の1.5mg/lが22日目には3.3~3.5mg/lとなり増加傾向が示されている。また赤、青では0.24~0.29mg/lと大きく減少し浄化効果が認められた。担体設置系については0.5~1.83mg/lと浄化能力が弱い。

無光条件では、光合成に基づく一次生産活動は無く、酸素供給が行われなかったことから酸素呼吸作用で活動する動物プランクトン、原生動物および藻類の増殖は認められなかった。写真-3に示すとおり、青は目視で緑色の藻類、赤は茶色の藻類の発生が観察された。検鏡の結果、青は*Scenedesmus* sp.などの緑藻を主体としたプランクトン相、赤は*Phormidium* sp.等のシアノバクテリアを主体としたプランクトン相であった。*Scenedesmus* sp.は、22日目のbにおいて最多の1.83×10⁴ cells/mlに達し、*Phormidium* sp.は22日目のrrにおいて最多の1.98×10⁵ filaments/mlに達した。

3-4 考察

(1) 水質浄化効果

無光では11日目までDOが急激に減少したECが上昇を示す。微生物による有機物酸化分解によるDOの低下と同時に、異化作用により栄養塩などのイオン類の溶出があったものと考えられる。特に有機物の直接的分解産物となるNH₄-Nの増加が顕著で活発な異化作用が生じていると考えられる。一方、LED照射系においては、DO



Scenedesmus sp.



Phormidium sp.

写真-3 出現した主要植物プランクトン

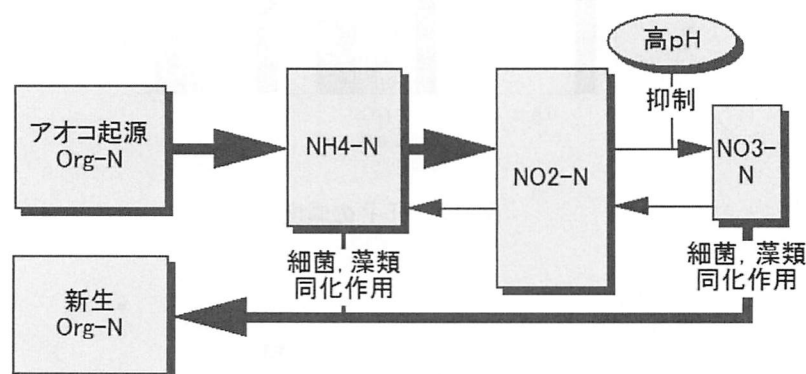


図-19 有機態炭素の濃度

に関しては、有機物酸化分解作用の進行の中でも、青では大きな変化はなく、赤では増加を示しており、光合成による酸素供給の効果が認められた。特に赤では DO が 1.6 倍程度まで増加し 200% 近くの過飽和状態になるなど、その効果が大きいことが示された。一方、EC は無光が大きな変化がないのに対し、LED 照射系ではいずれも低下し、光供給により活性化した一次生産微生物群によるイオン類吸収の効果が認められた。

窒素・リン栄養塩類に関しては、無光がアオコ分解の過程でほとんどの濃度が増加傾向にあるのに対し、LED 照射系では、濃度が減少し浄化効果が認められた、特に青と比較して赤が浄化能力が高く、早期に効果も発現する傾向が認められた。

無光と青+担体において $\text{NO}_2\text{-N}$ の増加が示されたが、 $\text{NO}_2\text{-N}$ を電子供与態に $\text{NO}_3\text{-N}$ を生産する硝酸菌の変換速度は、一般的に $\text{NH}_4\text{-N}$ を電子供与態に $\text{NO}_2\text{-N}$ を生産する亜硝酸菌の変換速度より遅いこと、亜硝酸菌に対する増殖最適 pH がややアルカリ側であるのに対し、硝酸菌は中性付近であることから今回の培養時の高 pH 条件により硝酸菌の活動が抑制されたことが影響しているものと考えられる。この過程を図-19 に示している。

(2) 生物付着担体の効果

LED 照射のみの系と比較して、生物付着担体設置による水質浄化効果の促進は認められなかった。特に青を中心に、溶存態の栄養塩の浄化効果の低下が認められた。担体に付着した原生動物などの捕食作用などによる栄養塩回帰の影響が推察される。また、付着生物の多くが浮遊付着担体状となったアオコ群体にも付着したこと、水質浄化作用が浮遊微生物群を中心に行われたことなどが影響している可能性も考えられる。

(3) アオコ分解における微生物群の働き

無光の無光条件では、光合成に基づく一次生産活動は無く、酸素供給が行われなかったことから、酸素呼吸作用で活動する動物プランクトン、原生動物および藻類の増殖が抑制されたものと考えられる。生物的作用としてはバクテリアなどによる有機物分解と無機物同化作用が同時にバランスよく行われ、その結果、大きな溶存栄養塩の変

動が生じなかったものと考えられる。アオコの群体構造も実験終了時まで分解されずに残存する群体が多く観察された。一方、LED 照射系においては、アオコの群体のほとんどが消失した。この要因としては、LED 照射系では動・植物プランクトンが大量に増殖しており、繊毛虫、鞭毛虫など藻類捕食性を有する種類、付着藻類及び植物プランクトンのうち付着性を有する種類がアオコ群体に付着、侵入し、それらの一部が群体内で増殖している状況が観察された。これらの微生物群の生物・物理的な作用が、アオコ群体構造の破壊に影響しているものと考えられる。

(4) LED の波長（色）の効果

22 日目には赤・青ともほぼ同様なレベルで EC、リン・窒素成分の浄化効果が認められた。11 日目で見ると赤色 LED 照射系が EC や栄養塩濃度低減効果が大きく、初期浄化能力は優れていると評価された。DO の改善効果も赤色の方が優れていた。青は緑藻、赤はシアノバクテリア主体の植物プランクトン相であり、これらの生産者の酸素供給、栄養塩吸収特性が、水質改善効果の差異を反映したものと考えられる。

3-4 おわりに

アオコの分解を想定した室内実験において、LED 照射により DO の回復、リン・窒素栄養塩類の浄化効果が確認できた。特に、LED 照射により増殖した動物プランクトン、付着藻類がアオコ群体の構造破壊を促進し、効率的なアオコ分解に貢献していることが明らかとなった。富栄養化水域の嫌気化改善対策における従来法は、大規模な曝気施設、酸素導入施設等を設置運用する必要性があり、経済性等の問題から対策実施に至っていないのが現状である。外部から新たな化学物質や生物群を導入せず、光という環境要素のみを操作し、対象水域における潜在的生物生態的浄化機構を活性化させる LED 光供給法は、アオコ発生水域の水環境改善対策として、環境に優しい経済的な水環境改善対策のひとつとして期待できる。

4. LED 光照射による沈水植物の発芽実験

4-1 はじめに

湖沼は閉鎖性が強いいため水交換能力が低く、富栄養化しやすい水域である。このため水質汚濁が進行しやすく湖沼の水環境保全は容易ではない。このため湖沼の水質浄化工法が種々提案されているが、近年湖沼が本来有していた生態系を回復することで水質環境の保全を行う試みが進められている。その一つに沈水植物の再生による方法がある¹⁸⁾。沈水植物による湖水の栄養塩や濁度の低下。それにとまう植物および動物プランクトンの発生など豊かな生態系を育むことが期待される。

沈水植物の再生は全国的に行われているが、主流の方法は湖水の水位を低下させ、太陽光によって底泥に含まれている種子を発芽させる方法である。図-20 は印旛沼で実施された沈水植物再生方法の模式図である¹⁹⁾。しかしながら、この方法では大掛かりな工事が必要であり、コストが掛かることが問題点である。水位を低下させることなく発芽を促す新しい手法として LED 光を湖底近傍で照射することが考えられる。その模式図を図-21 に示す。著

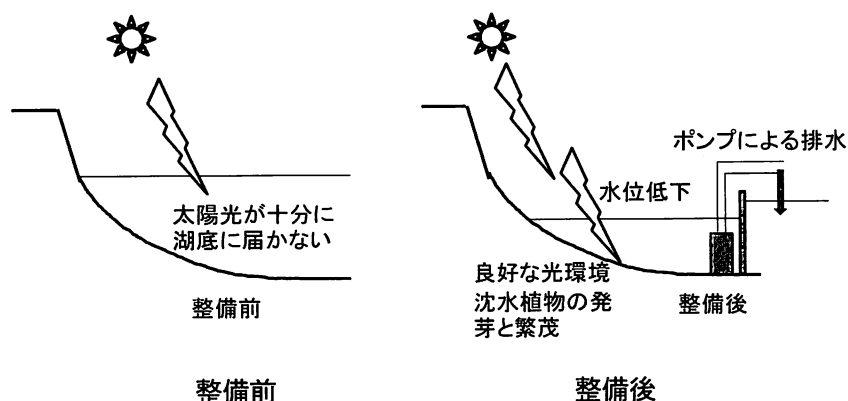


図-20 沈水植物の再生方法（印旛沼の例）

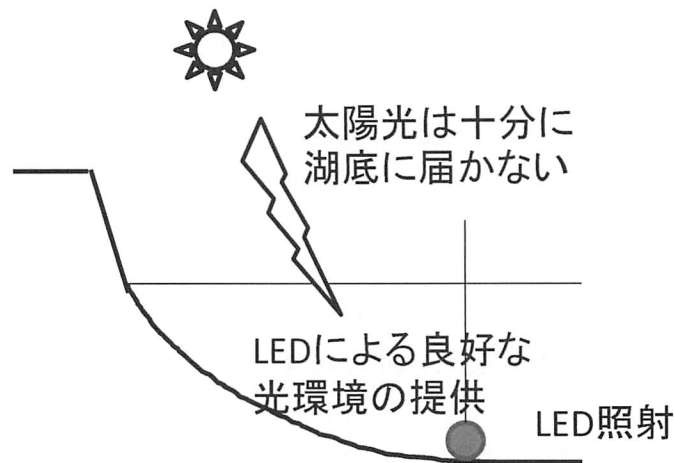


図-21 LED 照射を用いた手法

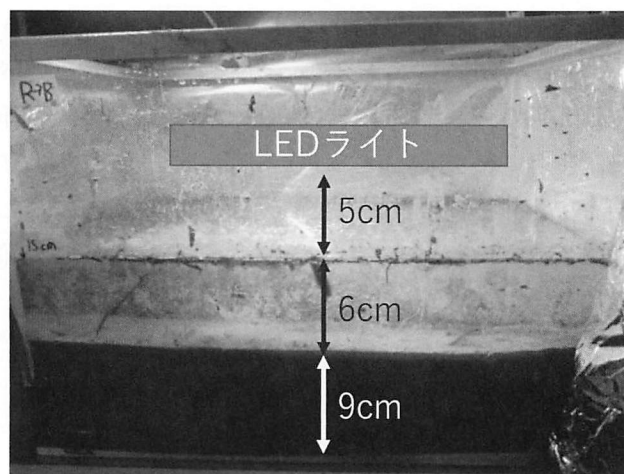


写真-4 培養実験用水槽

者らはこの新しい方法の第一歩として LED 光による沈水植物（ここではシャジクモを対象とする）の発芽実験を行った。

4-2 実験方法

写真-4 に示すように、水槽に休耕田（福岡県太宰府市内山）から採取した土を厚さ 9cm に敷き詰め、浄水を 6cm の水深となるように注いだ。水面から 5cm（底泥から 11cm）の高さに LED 灯を設置して照射を行った。LED 光を連続照射（24 時間明条件）した。青色照射の水槽、赤色照射の水槽および無光条件の水槽をインキュベーターに入れ 20℃の一定温度条件で培養した。インキュベーター内には LED 光以外の光が入らないようにした。またそれぞれに水槽の周りにアルミホイルを巻いて遮光を施した。インキュベーターで 35 日間培養した。その間適宜、底泥からの発芽状態の観察を行った。また 35 日後の水槽内の水の水質分析を行った。

4-2 実験方法

図-22 に培養前後の底泥の状況を示す。照射系ではいずれも植物が発芽・成長していることが分かる。表-2 に出現した種を示す。○が出現した種を表す。種の種類としては赤色の場合が多い。シャジクモは赤色、青色ともに出現しているが、出現株数としては青色の場合の方が多かった。

図-23 に培養後の DO の結果を示す。培養前のデータは計測していないが、飽和に近い状況であったと思われる。無光条件では 0.17mg/l（飽和度 2.0%）であるが、赤色 LED 光では 5.76 mg/l（飽和度 65.5%）、青色 LED 光では

2.55 mg/l (飽和度 30.9%) であった。無光では植物が発芽していないため、貧酸素状態になったままである。一方、植物が存在している照射系では光合成作用により酸素が発生し貧酸素状態になっていない。個体数が多かった赤色照射系の方が青色照射系よりも DO が高い。

図-24 に電気伝導度 (EC) の結果を示す。無光条件では EC は 90.1μS/cm となっている。図-23 に示しているように無光条件では酸素消費が進み貧酸素状態となっている。このため底泥に含まれている重金属類が溶出し高い EC 値を示したものと考えられる。一方、赤色 LED は 61.6μS/cm、青色 LED は 61.4μS/cm でほぼ同じ値であった。LED 照射系では植生によりある程度 DO が存在しているため底泥からの重金属の溶出が抑制されていたものと考えられる。

図-25 および図-26 に全窒素と全リンの結果をそれぞれ示す。照射条件毎に二本のバーがあるが、いずれも左側 (黒色) が培養前で右側 (白色) が培養後である。全窒素、全リンともにすべての照射条件において培養後の濃度が培養前よりも小さくなっている。無光系においても微生物の作用で脱窒、脱リンが発生しているようである。照射

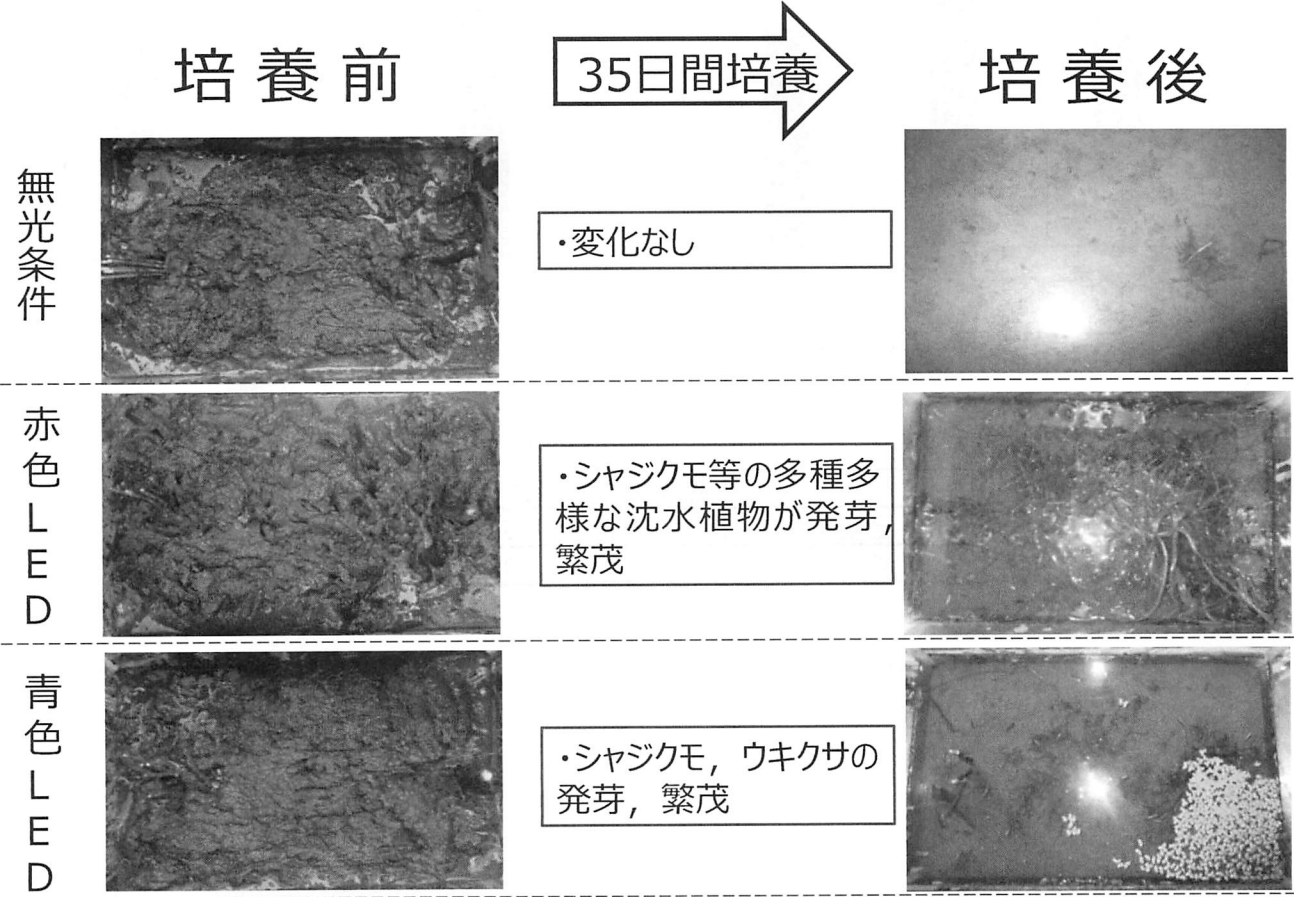


図-22 培養前後の底泥の状況

表-2 培養後の出現種

出現種	無光条件	青色LED	赤色LED
コナギ			○
ウキクサ		○	○
アオウキクサ			○
イヌホタルイ			○
マツバイ			○
シャジクモ類		○	○

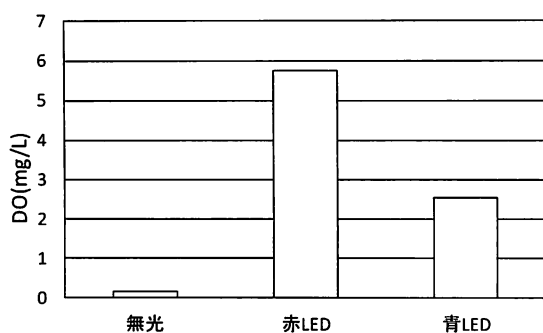


図-23 DOの濃度

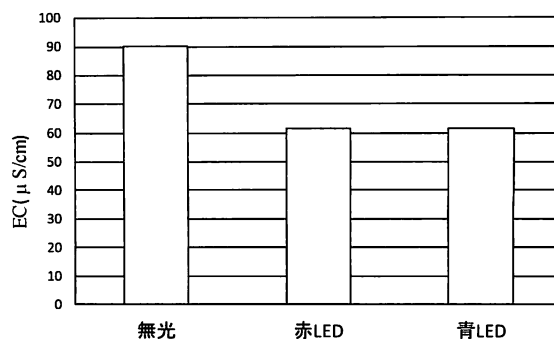


図-24 ECの結果

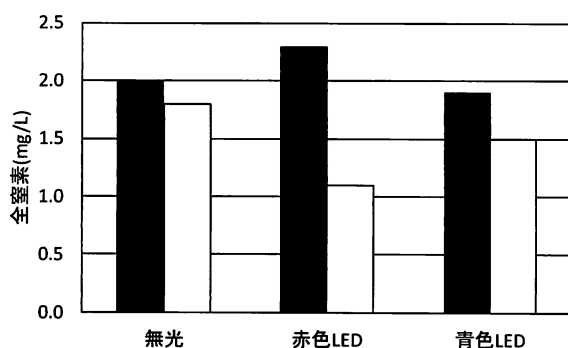


図-25 全窒素の濃度

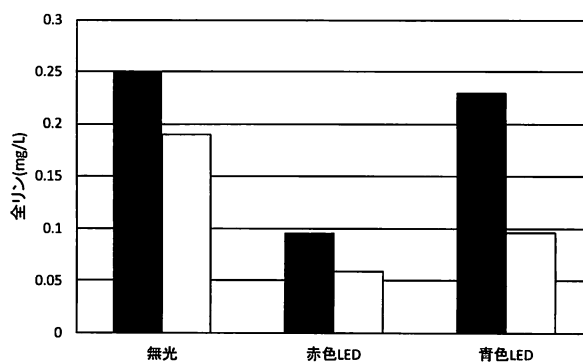


図-26 全リンの濃度

表-3 栄養塩の低減割合

	無光条件	赤色LED	青色LED
全窒素	-10.0%	-52.2%	-21.1%
全リン	-24.0%	-38.5%	-57.8%

系では、栄養塩が植生や微生物に使用され窒素やリンの大きな低減効果が見られた。培養前の値が照射条件で異なっているため、低減率で低減効果を評価する。低減率の計算式は以下の通りである。

$$\text{低減率 (\%)} = (\text{培養後の濃度} - \text{培養前の濃度}) / \text{培養前の濃度} \times 100$$

その結果を表-3に示す。低減割合の定義より濃度が減少している場合は負値となる。全窒素では赤色LEDが最も低減率が大きく52.2%であり、全リンに対しては青色LEDが最も低減率が大きく57.8%である。これは2章の結果とは逆となった。実験系内に存在している植生、藻類、微生物などの種によるものと推測されるが、現段階ではその理由は明確にできない。

5. 今後の展望と課題

ここで紹介した技術はLED光によって自然界が持つ自然浄化能力を刺激して利用するところに特徴を持つ。光供給により活性化されたシアノバクテリア、光合成バクテリア、藻類などの生産者による栄養塩の直接利用、これらの光合成生物群が放出した酸素により形成される酸化的環境において二次的に活性化した好気性バクテリア、原生動物、動物プランクトンなどの分解・捕食者による生物・生態的システムと、鉄イオンとリン酸イオンの凝集沈殿などの化学的システムによる総合的浄化作用を利用するものである。さらに、持続的な酸化環境が確保できれば、

底生動物や魚類による高次の食物連鎖による浄化も加わり浄化能力の向上につながる。現地での対策実施においては、嫌気的環境の中で静的・スポット的に酸化的環境を出現させることになり、周辺の嫌気環境と創出された酸化環境の間での浄化作用も期待できる。このような環境で生じる浄化作用として脱窒があり、今後の定量的評価が必要な事項である。LED の特性を生かし、ON, OFF を一定間隔で繰り返すなどして、酸化還元環境制御を行い、脱窒反応を促進する方法等も考えられる。本法の汎用性を確認するためには、異なる水域の深層水、底質中の微生物群でも、同様な分解効率化が生じるか確認する実験の実施及びデータの蓄積が不可欠である。

LED は低消費電力の光源ではあるが、広域を照射するとなると、電力供給方法も考える必要がある。風力発電やダム管理用放水路を利用した水力発電、ダム湖流入河川に設置する小水力発電など可能な限り再生可能な電力源を使用することが望まれる。

謝辞

ここで紹介した研究はすべて温州大学生命・環境科学学院（中華人民共和国）特聘教授 井芹寧博士との共同研究です。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 稲田博史, 内田浩二, 江村薫, 川村軍蔵, 河本康太郎, 後藤英司, 田澤信二, 平間淳司, 本多二郎, 室谷裕志, 渡邊博之: 時代を先取りする先端技術 LED の農林水産分野への応用, (社) 農業電化協会, 2006.
- 2) 古牧大樹, 佐々木淳: LED 光による光合成促進を活用した藻場再生に関する基礎的検討, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.393-398, 2007.
- 3) Seok Jin OH, Dae-Il KIM, Takao SAJIMA, Yohei SHIMASAKI, Yukihiro MATSUYAMA, Yuji OSHIMA, Tsuneo HONJO AND Han-Soeb YANG : Effects of irradiance of various wavelengths from light-emitting diodes on the growth of the harmful dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* and the diatom *Skeletonema costatum*, FISHERIES SCIENCE, 74 , pp.137-145, 2008.
- 4) 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アオコの底泥直上水の栄養塩の低減効果に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1513-1518, 2010.
- 5) 例えば, 社団法人日本埋立浚渫協会ホームページ, <http://www.umeshunkyo.or.jp/211/266/data.html>
- 6) 道奥康治, 神田徹, 大成博文, 西川孝晴, 松尾克美, 木戸崇博: マイクロバブル・エアレータによる貯水池の水質浄化実験, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.1119-1124, 2000.
- 7) 四国新聞社ホームページ: http://www.shikoku-np.co.jp/national/life_topic/article.aspx?id=20020713000489
- 8) Uscharee RUANGDEJ and Kimio FUKAMI : Stimulation of photosynthesis and consequent oxygen production in anoxic bottom water by supply of low-intensity light through an optical fiber, FISHERIES SCIENCE, 70 , pp.421-429, 2004.
- 9) 渡辺真利代, 原田健一, 藤木博太編: アオコ, 東海大学出版会, 1994.
- 10) 農林水産省: 農業用貯水施設におけるアオコ対応参考図書, 2012.
- 11) 仮谷邦光: 有毒シアノバクテリア, 裳華房, pp.33-49, 2001.
- 12) 丹保憲仁: 水道とトリハロメタン, 技報堂出版, 1983.
- 13) 速水祐一, 藤原建紀: 琵琶湖深層水の温暖化, 海の研究, pp.197-202, 1999.
- 14) 日刊工業新聞全国版: LED で海底浄化, p.1, 2005.11.7.
- 15) 井芹寧, 前田広人, 宮原旦元: 水底の浄化装置, 特許 2011 第 4734166 号, 2006 出願.
- 16) 湊太郎, 横山由香, 大石友彦, 佐藤義夫: LED を用いた光照射による底層の無酸素状態の改善に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.68, pp.54-59, 2012.
- 17) 井芹寧, 朝位孝二, ハオ愛民, 原口智和, 久場隆広: 発光ダイオード照射による枯死アオコの分解時における水質浄化効果, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.72, No.4, I_631-I_636, 2016.

- 18) 国土交通省河川局河川環境課：自然の浄化力を活用した新たな水質改善手法に関する資料集（案），
http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kankyo/suishitukaizen/shiryousyuu.pdf
- 19) 千葉県県土整備部河川環境課：印旛沼における水草再生の取り組み紹介資料，
<http://www.pref.chiba.lg.jp/kasei/kawazukuri/teganuma/documents/nekona-sankou3.pdf>