

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基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON REDUCTION EFFECT OF NUTRIENTS
IN WATER NEAR BED MUD BY LED IRRADIATION

朝位孝二¹・井芹寧²・吉田貴博³・赤松洋介⁴
Koji ASAI, Yasushi ISERI, Takahiro YOSHIDA and Yosuke AKAMATSU

¹正会員 博士(工) 山口大学准教授 大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 博士(工) 西日本技術開発株式会社 環境部(〒810-0004 福岡市中央区渡辺通1-1-1)

³非会員 修士(工) 大津市役所(〒520-8575 滋賀県大津市御陵町3-1)

⁴学生会員 山口大学大学院理工学研究科博士前期課程(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

We have been developing a water purification technology utilizing Light Emitting Diode (LED). The objective of this technology is to activate the photosynthesis algae in the lower layer where sunlight does not reach by irradiation from LED. As the first step of the development of this technology, we conducted laboratory experiments to investigate the effects of wavelengths from LED on water quality purification.

Two types of the experimental conditions, sea bed mud under the weak poor dissolved oxygen condition and lake bed mud under the strong poor dissolved oxygen condition, are investigated. It is found that blue light is effective for reducing nitrogen and red light is effective for phosphorus under the latter condition.

Key Words : Light Emitting Diode (LED), wavelength, nutrients, water purification, bed mud

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¹⁾、湖沼では曝気²⁾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。

光源としては白熱電灯や蛍光灯あるいは太陽光を光ファイバーで底層に送ることも考えられる。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^{3),4)}。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。

近年注目されている光源として発光ダイオード(以下LED)が挙げられる。LEDは従来の白熱電球や蛍光灯といった真空システムを基本としておらず、固体素子を用いた光源であり次のような特徴を有する。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は電力を必要とするものの、消費電力は小さいので低エネルギー型の水域環境改善システムを構築することが可能と考えられる。したがって本研究では光源としてLEDを用いる。

LEDは一般照明としての利用以外に応用範囲は広い。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⁵⁾に詳しく紹介されている。

水質改善に関する研究としては、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⁶⁾。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

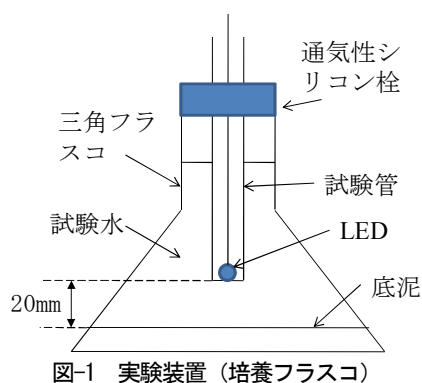


図-1 実験装置（培養フラスコ）

表-1 LEDの仕様

	輝度(mcd)	電流(mA)	主波長(nm)
青	5000	20	470
赤	3000	20	635
黄	1100	20	590

いる⁷⁾。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。また湖沼など陸水の水質改善を対象とした研究は見あたらない。

本研究は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の確立を目指すものであり、そのための基礎的知見を得ることを目的としている。本論文では特に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について議論する。本研究ではLED光の効果の確認と実験方法に関する知見を得るための予備的実験を最初に行った。これは後述の海域を想定した2章の実験に当たる。次いで、本研究の主目的である湖沼を想定した実験を行った。

2. 海域の底層を想定した実験

(1) 実験方法

図-1に示すように、100ml容量の三角フラスコに通気性シリコン栓で口を閉じた。さらに栓中央部をくり抜き、試験管を挿入し、その中にLEDを設置した。フラスコ内には鹿児島湾の海底から採取した泥60g、試験水として人工海水70mlを投入した。人工海水はニッソー社が市販している人工海水の素を使用した。

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

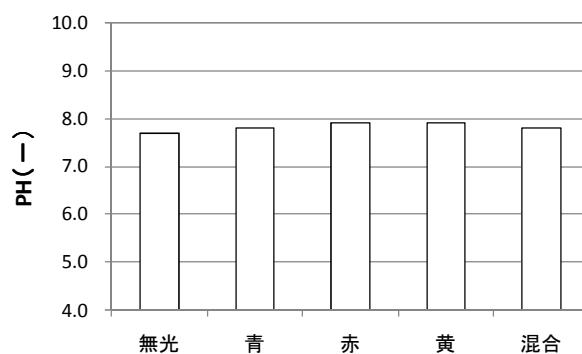


図-2 pHの測定結果

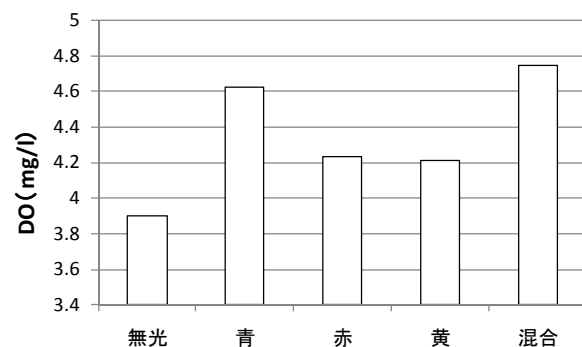


図-3 DOの濃度

較として黄色LEDおよび混合色（青、赤、黄を同時に用いたもの）も用いた。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。これは3章で述べる実験についても同様である。培養フラスコにLEDを1個だけ挿入するが、混合色のみ3個挿入することになる。無光、青色、赤色、黄色、混合色の5系統に対してそれぞれ3つの培養フラスコを用いて実験を行った。途中で培養に失敗した試料が存在したことや、試料の量が少なかったため、3個もしくは2個の試料を混合して分析を行った。LEDは底泥表面から20mmの位置に設置し、12時間明暗条件で照射を行った。培養フラスコはインキュベーター内で底泥採取時の水温である18℃に設定し、2004年9月より目視で底泥表面に藻類の発生が認められた時点まで培養を実施した。この期間は58日であった。培養後の試験水の各種栄養塩濃度、pH、溶存酸素（DO）、底泥表面0～5mm層のクロロフィル成分量の分析を行った。実験装置の培養容量は多くないため、培養期間途中の成分分析は行えなかった。

(2) 実験結果

a) pH, DO

培養後の試験水のpH、DOの結果をそれぞれ図-2、3に示す。培養後のpHは7.7～7.9の範囲にあり、各系間で顕著な相違は見受けられなかった。

DO濃度は無光条件では4.0mg/l（飽和度46.5%）に対し

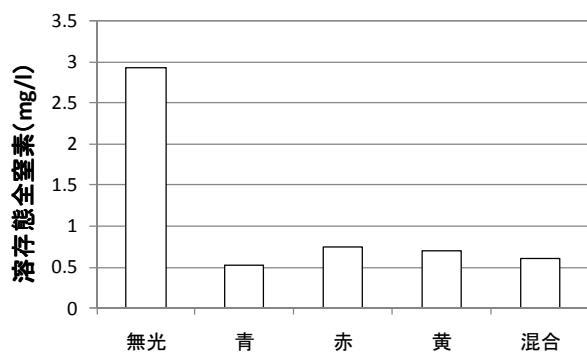


図-4 溶存態全窒素の濃度

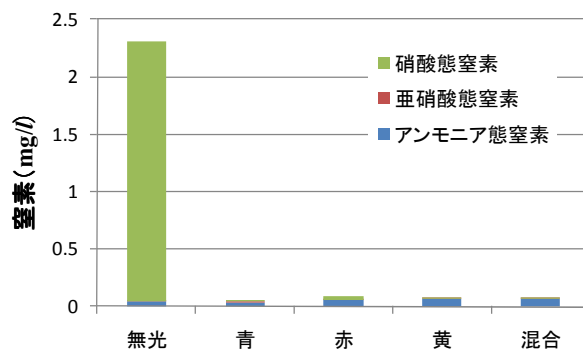


図-5 無機態窒素の濃度

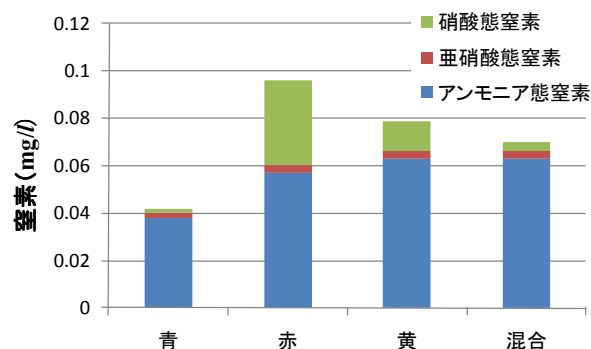


図-6 無機態窒素の濃度 (無光条件を除く)

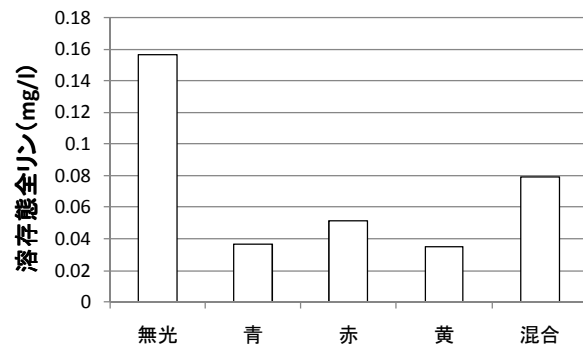


図-7 溶存態全リンの濃度

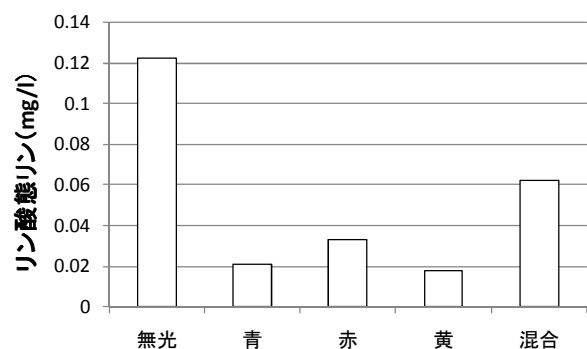


図-8 リン酸態リンの濃度

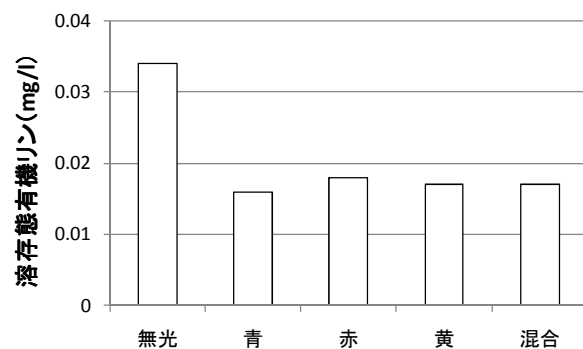


図-9 溶存態有機リンの濃度

て、LED照射系では4.2 mg/l (飽和度48.3%) ~4.7 mg/l (飽和度54.6%) の範囲で、わずかながらLED照射系のDO濃度は無光条件よりも高い。混合色が最も値が大きく、次いで青色、赤色、黄色の順となった。

b) 栄養塩

培養後の溶存態窒素を図-4に示す。溶存態全窒素において無光条件では2.9 mg/lであるが、LED照射系では窒素濃度が大きく減少している。最も窒素濃度が低いのは青色であり、次いで混合色、黄色、赤色となっている。

試験水中の無機態窒素 (アンモニア態窒素、亜硝酸態窒素、硝酸態窒素) 量を示したものが図-5である。また無光条件を除いた無機態窒素の濃度を図-6に示している。無光条件で溶存態の窒素濃度が非常に高濃度であり、その各態の窒素の割合は硝酸態窒素が多くを占める。海水実験系では通気性の培養容器を使用したため酸素の供給があり、底泥から溶出したアンモニア態窒素が亜硝酸

菌、硝酸菌の作用により速やかに硝酸態窒素になったものと考えられる。一方LED照射系では溶存性窒素が付着性、底生性の藻類の増殖に吸収利用され、低濃度化したものと考えられる。

溶存態全リン、リン酸態リンの結果をそれぞれ図-7、8に示す。窒素と同様、LED照射系では無光条件の場合よりも濃度が減少しており、脱リンが進んでいることが示されている。特に青色、黄色の濃度がいずれも最も小さい。溶存態有機リン (溶存態全リンからリン酸態リンを減じたものによる推定値) を図-9に示す。LED照射系では無光条件の場合と比較して半分の濃度値である。藻類が溶存態有機リンを増殖に利用するなど何らかの生化学的な作用が関与している可能性が示唆される。

c) 光合成色素

LED照射系における培養後の底泥表面には白～茶色の生物膜の形成が認められた。顕微鏡観察により生物膜中

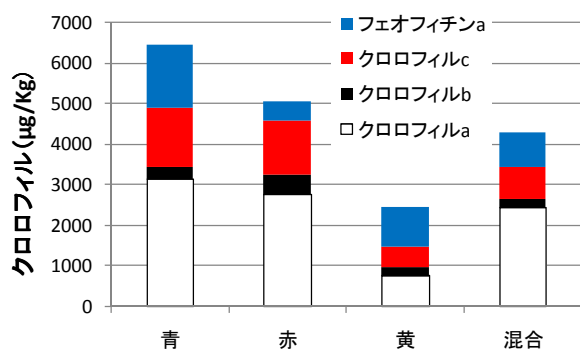


図-10 光合成色素の分析結果

には珪藻類の繁茂が確認された。また、直上水は無色透明であった。底泥に多くの藻類が存在しているものと判断し、底泥の光合成色素（クロロフィルa, b, cおよびフェオフィチンaの4種類）について分析を行った。その結果を図-10に示す。なお、無光条件ではいずれの光合成色素も定量限界値未満であったため図から削除している。

色素毎に細かくみるとクロロフィルb以外はすべて青色が多い。また、フェオフィチンaはクロロフィルaの分解産物と理解できるので、青色光の下では生物生産や死滅が活発に行われているものと推測できる。

(3) 考察

この章で議論している実験系は汚濁海域の底泥を用いた弱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おける藻類の増殖が観察され、無光系と比較して直上水における栄養塩類の減少など環境改善効果が認められた。発生藻類は珪藻が主体でその増殖促進効果は青色、赤色、混合色、黄の順であった。藻類生産量が最も多い青色が最も高い窒素、リンの浄化効果が示された。このことから、藻類の栄養塩吸収作用が水質浄化に反映された結果と考えられる。

窒素成分に関してはLED照射系において、亜硝酸態窒素とアンモニア態窒素と比較して硝酸態窒素の減少が極めて大きくなっている。微生物や藻類による同化・脱窒作用などにより硝酸態窒素が減少したものと考えられる。リン成分に関しては、リン酸態リンに加え、溶存態の有機リンが減少していることが特徴的である。

3. 湖沼の底層を想定した実験

(1) 実験方法

本研究の主目的である湖沼底層を想定した実験について述べる。前章の実験で浄化効果の高かった青、赤、混合について、3連で試験を実施した。また、リンの浄化効果が期待されることから、還元的環境における底泥からのリンの溶出供給の影響も含めて浄化効果を評価する

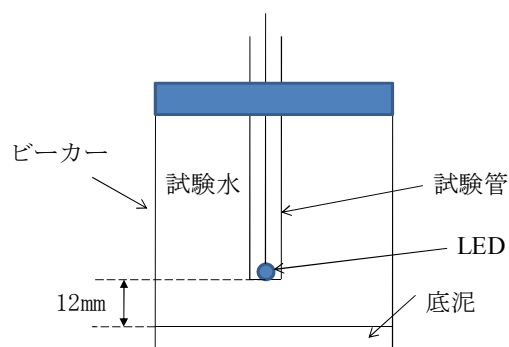


図-11 実験装置（培養ビーカー）

表-2 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	

ことが重要と考え、空気に触れない密栓条件の試験とした。用いたLEDの条件は表-2に示すとおりである。混合色は白色に対応するので、ここでは白色LEDを用いた。なお、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。

培養装置は前章と同様であるが、図-11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。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。初期状態から窒素曝気などで貧酸素化にしておくことも考えられるが、照射と無光との結果の相違が明らかになれば良いことと、初期濃度を揃えることが困難なことなどから、貧酸素化は行っていない。

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。紙面の都合上有機体炭素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。なお、実験設備の都合

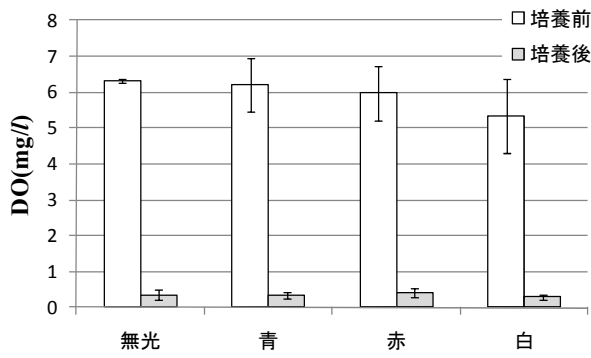


図-12 DOの濃度

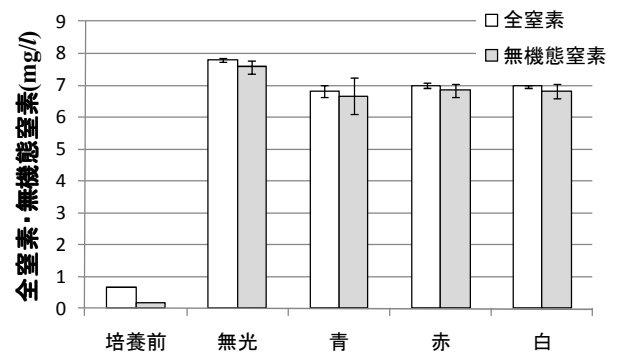


図-13 全窒素・無機態窒素の濃度

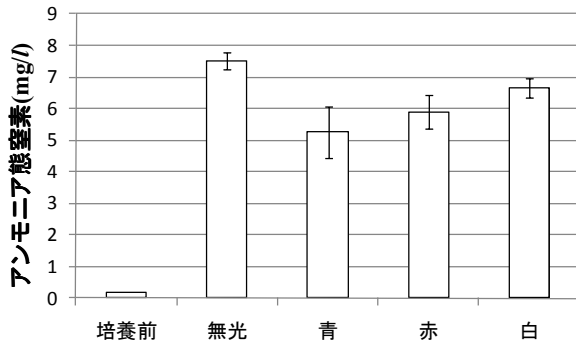


図-14 アンモニア態窒素の濃度

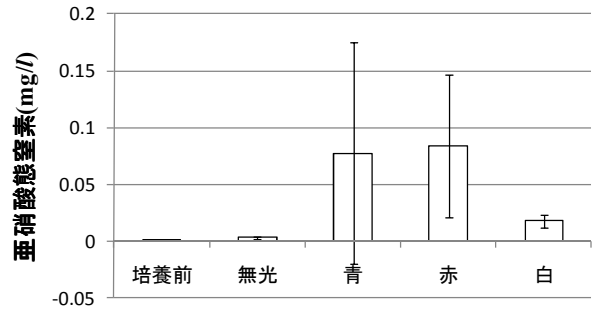


図-15 亜硝酸態窒素の濃度

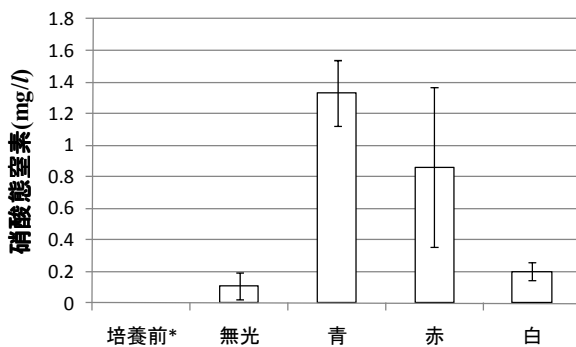


図-16 硝酸態窒素の濃度
(*培養前の濃度は定量下限値未満)

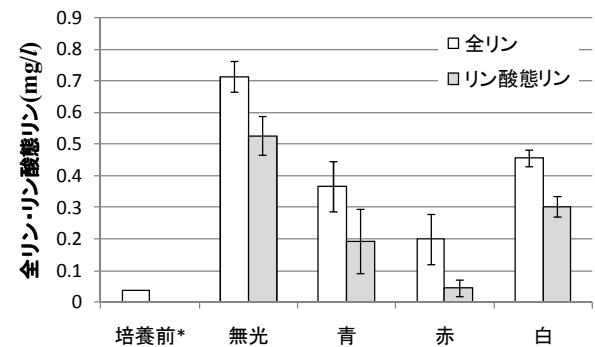


図-17 全リン・リン酸態リンの濃度
(*培養前のリン酸態リンの濃度は定量下限値未満)

上, pH, 光合成色素, 藻類の種の同定は行えなかった。

(2) 実験結果

a) DO

図-12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。

b) 栄養塩および有機体炭素

図-13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-14～16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-17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、特に赤においては無光の10分の1数値となっている。青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-18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。

(3) 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。この実験系においても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、2章と同じく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。本章の結果は前章の結果とは若干異なる。その理由は現段階では明らかではないが、藻類の種類の相違、酸化・還元状態の相違などが原因と考えられる。

4. おわりに

本研究は、貧酸素化が進行しやすい底泥近傍の無光層にLED照射することで水質環境を改善する工法の確立を目的に行ったものである。その第一段階として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

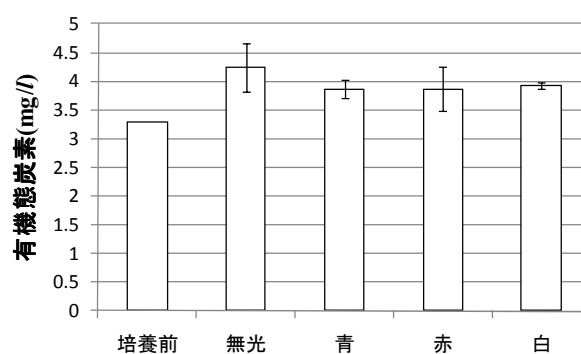


図-18 有機炭素の濃度

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。

今後の課題として、光量の影響、培養途中の水質の変化の把握、詳細な栄養塩低減効果のメカニズムの解明とモデルの構築が挙げられる。これら課題と合わせて、現場実験による実水域での効果の確認を行う予定である。

参考文献

- 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>
- 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.
- 四国新聞社ホームページ: http://www.shikoku-np.co.jp/national/life_topic/article.aspx?id=20020713000489
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

(2009. 9. 30受付)