

# LEDを用いた光照射による底層における酸素発生に関する研究

## Oxygen Evolution on Bottom Water Layer by Supplying Light with Light Emitting Diode

湊 太郎\*・佐藤義夫\*\*・横山由香\*\*\*・大石友彦\*\*\*  
Taro MINATO, Yoshio SATO, Yuka YOKOYAMA and Tomohiko OISHI

**要旨**：底層水の溶存酸素量を増加させる手法として、堆積物の表面に光を照射し付着性藻類に光合成を行わせる方法に着目した。ここでは、光照射による酸素発生を調べるため、人工光源としてLEDを採用し自然堆積物を用いて室内実験を行った。その結果、硫化水素が発生する環境においても、50~180  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の光量子束密度の範囲で光を照射することによって溶存酸素量が増大し無酸素状態を脱することが確認された。しかし、栄養塩類が供給されない環境下では、長期にわたり $\text{O}_2$ の発生を維持することが難しいことが判明した。

**キーワード**：無酸素水塊, LED, 光照射,  $\text{D}_0$

### 1. まえがき

わが国の主要な閉鎖的内湾では、夏季の成層期に底層の溶存酸素量が低下し、毎年のように貧酸素あるいは無酸素水塊が形成されている。このような底層の溶存酸素量の低下は、それ自体が底生生物の生息に大きく影響すると共に、有害な硫化水素を発生させて底生生物の大量斃死を引き起こす<sup>1)</sup>。このような硫化水素を含む底層の水塊が沿岸域の表層に湧昇すると、いわゆる青潮(苦潮)が発生し、溶存酸素量が低下しないような浅場や表層付近に生息する生物にも多大な影響を及ぼす。さらに、底層の溶存酸素量の低下に伴い、底泥からの栄養塩類の溶出が促進され、斃死した生物の分解に伴う更なる酸素消費と相まって、海域の環

境悪化をより一層促進する。このほか、底層の貧酸素・無酸素水塊の形成に伴い、二酸化炭素分圧( $\text{pCO}_2$ )が増大し、温室効果ガスである $\text{CO}_2$ が大気に放出されていることが確認されている<sup>2)</sup>。

これまで、貧酸素あるいは無酸素水塊の発生を抑制するため、様々な試みが行われてきた<sup>3)</sup>。その中で、本研究では、堆積物の表面に光を照射して付着性藻類に光合成を行わせることにより、底層水の溶存酸素量を増加させる方法に着目した。この方法は、装置の設置がより容易であり、船舶の航行を阻害せず既設構造物を有効に利用できると考えられる。これまで、実際の海域における実験を含めて、光照射による貧酸素化抑制の効果が

\* 正会員 青木マリーン(株), \*\* 会員 東海大学海洋学部, \*\*\* 非会員 東海大学海洋学部

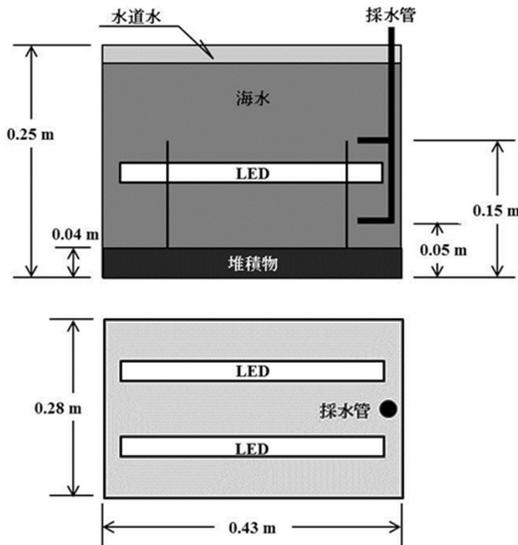


図1 実験装置の概要

報告されている<sup>4)~8)</sup>。また、室内実験の結果として、光照射により溶存酸素量が増加し無酸素状態を脱することも確認されている<sup>9)</sup>。しかしながら、これまでの実験では、光量子束密度が異なる場合のDO変化や、成層が形成される期間中の持続性などが明らかにされていない。また、還元状態から酸化状態に移行する過程も調べられていない。そこで、これらについて検討するため、光源に長寿命なLEDを採用し、実際の海底から採取した堆積物を用いて室内実験を行った。ここでは、それらの結果について報告する。

## 2. 実験方法および試料

### 2.1 実験装置

実験装置は、図1に示す縦0.43 m×横0.28 m×高さ0.27 mのコンテナ水槽を1つ用いた。この水槽に、底面から0.04 mの高さまで静岡県の折戸湾の湾奥で採取した堆積物を充填した。堆積物は、東海大学臨海実験場の棧橋より、エクマンバージ採泥器を用いて採取した。実験に必要な量として、約10 kgの堆積物を採取した。この堆積物

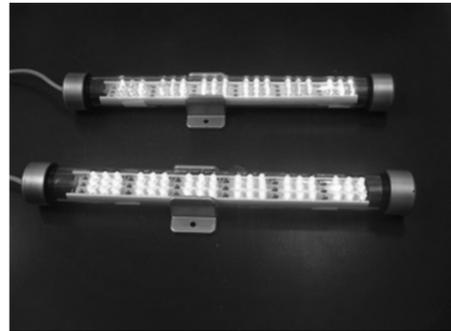


写真1 防水型LED照明装置

は、実験開始時の強熱減量が11.2~13.4%、含水比が66.8%、酸揮発性硫化物態硫化物(AVS-S)が2.9 mg/kg、酸化還元電位が-297 mVであった。黒色を呈し、硫化水素臭を発していた。この堆積物を乱した湿潤状態で充填した。使用した堆積物は、実験を行った2011年6月に水深2~3 mの海底から採取した。それから、網目0.10 mmのプランクトンネットを用いてろ過した海水を水槽の底面から0.24 mの高さまで注水した。海水は、折戸湾で2011年6月に採水したものを使用し、その塩分は28.0 psuであった。

より実際の成層期の海域に近い状態を再現するため、水槽内の海水中に密度躍層を形成させることにした。これにより、表層から底層への酸素の供給が抑えられ、底層では有機物の分解に伴って酸素が消費され無酸素状態になると考えた。堆積物と海水の充填が完了した後、密度躍層を形成するため、海水上部に水道水を静かに注水した。水面下0.10 mの水層では水温が約24.7℃、塩分が20 psuで密度は $\alpha=12.15$ であった。堆積物の直上0.01 mの水層では水温が約25.2℃、塩分が28 psuで密度は $\alpha=17.91$ であった。水温および塩分は、水槽底面から0.05 m、0.15 mに設けた採水管(シリコンチューブ)からそれぞれ採水し、直ぐに温度計(CHINO MC-3000)と塩分計(シナール塩分濃度計NS-3P)を用いて測定した。採

水後、同量の海水を表層側から緩やかに追加した。

防水型の LED 照明装置を設置した後、外部光の影響を防ぐため、水槽全体を厚み 0.45 mm の黒色のビニール袋で二重に覆って遮光し光量が極めて小さく無光に近い状態を再現した。ビニール袋の可視光透過率は、1枚当たり 0.72%であった。

遮光した後、水槽内が無酸素状態になるよう静置した。その際、水槽底面から 0.05 m の位置に設けた採水管より試水を毎日採取し、水槽内が無酸素状態となり硫化物も発生することを確認した。水槽内の無酸素状態を確実にするため、さらに 5～7日経過した時、LEDによる光の照射を開始した。ここでは、水槽内が無酸素状態となった時点を実験開始時(0日目)とした。

## 2.2 人工光源

人工光源として防水型の LED 照明装置(株式会社ケイ・エイ・エヌ製, UL-6)を採用した。LEDは、単色光を発生し、赤外線の放射を極めて低く抑えるうえ、コンパクトで耐久性が高い等、光源として他に比べて優れた性質を持つ<sup>10)</sup>。植物工場においても、人工光源として利用され、植物の生長と光の波長や強度に関する知見が集積されている。今回の実験では、全長が 0.30 m で 54 個の LED が付けられた防水性の青色(波長 460 nm)および赤色(波長 660 nm)の LED 照明装置(使用電力 4.3 W)を用いた。今回は、照明装置の防水性の試験も兼ねているため、それぞれ 1 本ずつ用いた。

附着性藻類に関する既往の研究によれば、それらが最大比増殖速度を示す光量子束密度は、50～180  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の範囲である<sup>11)~15)</sup>。 *Nitzschia* sp. では、50  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  で既に強光阻害が発現するが、 *Pleurosigma* sp. および *Bacillaria paxillifera* では、50  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  以上の光量子束密度でも強光阻害を生じない<sup>11)</sup>。特に、 *Bacillaria paxillifera* は、浮

遊珪藻である *Skeletonema costatum* に迫る最大比増殖速度を示すことが確認されている<sup>11),12)</sup>。このほかの種では、アワビなどの有用水産動物の好適餌料である *Cocconeis* sp. は、100  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  程度が適しているようである<sup>13),14)</sup>。また、附着性藻類の *Navicula britannica* は、180  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  で光飽和に達し 360  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  では著しい強光阻害を示すことが確認されている<sup>15)</sup>。 *Cylindrotheca closterium* も 180  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  で光飽和に達し 360  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  では若干の強光阻害を示す<sup>15)</sup>。これらのことから、光量子束密度を 50～180  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の範囲内になるように設定した。光量子束密度の値は、堆積物の表面から LED 照明装置の設置高さ(3～11 cm)を変えることによって変化させた。光量子束密度は、検定済みのシリコンフォトダイオード(S2281 シリーズ: 浜松ホトニクス株式会社)とテスターを用いて行った。使用した Si フォトダイオードは、感度波長が 190～1100 nm (最大 960 nm) であり、受光感度は 0.12 A/W (200 nm) であった。水面直下に下方に向けて設置したシリコンフォトダイオードに対して、それぞれの水深の LED 照明装置から上向きに光を照射し、それぞれの光量子束密度を計測した。

## 2.3 測定項目および測定方法

測定に使用した海水は、水槽底面から 0.05 m の位置に設けた採水管(シリコンチューブ)から採取した。このとき、50 mL のシリンジを使用した。採水管の位置は、堆積物の直上 0.01 m の位置になる。チューブ内の海水(25 mL)を捨てた後、50 mL のシリンジ 2 本分を採水した。栄養塩類の分析用の海水は、シリンジの先端にグラスファイバーフィルターを設置して採取した。採水は、堆積物の巻き上がりが起きないように緩やかに注意深く行った。採水した海水は、直ちに測定および分析に供した。採水したら直ぐに、同量の海水

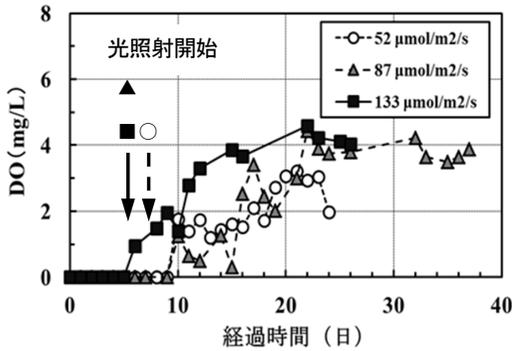


図2 DOの経時変化

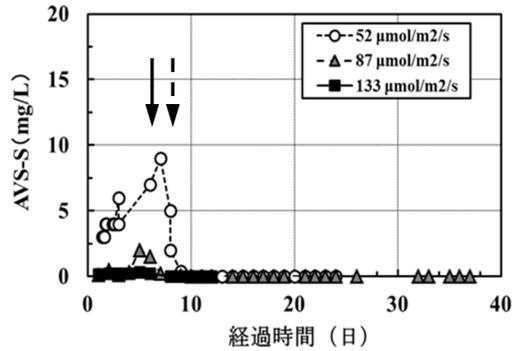


図4 AVS-Sの経時変化

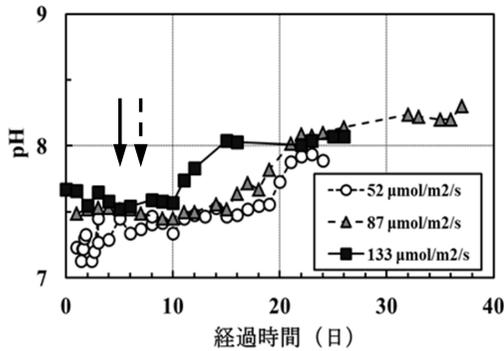


図3 pHの経時変化

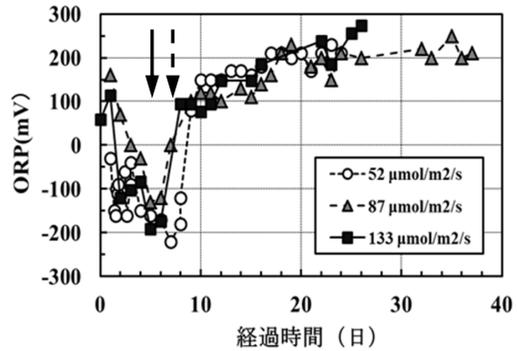


図5 ORPの経時変化

を表面側から緩やかに追加した。

測定項目は、pH、酸化還元電位 (ORP)、溶存酸素 (DO)、酸揮発性硫化物態硫化物 (AVS-S)、リン酸塩濃度 (P)、ケイ酸塩濃度 (Si)、アンモニウム塩濃度 ( $\text{NH}_4^+$ )、である。また、一部については、亜硝酸塩濃度 ( $\text{NO}_2^-$ ) や硝酸塩濃度 ( $\text{NO}_3^-$ ) も測定した。測定および分析方法は、海洋観測指針<sup>16)</sup>に準じて行った。pHはpHメーター (HORIBA F-51)、ORPはORPメーター (TAKEMURA OM-68) を使用して測定した。DOは、ウィンクラー法によって分析した。AVS-Sは、検知管式気体測定器 (ヘドロテック-S) を使用して測定した。リン酸塩とケイ酸塩濃度は、それぞれモリブデンブルー法とモリブデンイエロー法によって分析した。アンモニウム塩は、インド

フェノール法により分析した。亜硝酸塩と硝酸塩濃度は、比色法と銅・カドミウム還元カラム法により分析した。

### 3. 実験結果

図2～8に、それぞれ分析結果を示す。図中には、複雑になるが光を照射した時期を矢印で明示した。光量子束密度が  $52 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の場合 (7日目) を点線の矢印、 $87 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  と  $133 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の場合 (5日目) を実線の矢印で示してある。

図2から明らかなように、何れの光量子束密度の場合も、光照射を開始した後にDOが増加し始め、実験開始後20日目以降に最大値に達している。DOの最大値は、 $52 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の時に  $3.0 \text{ mg}/\text{L}$  であり、 $87 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  および  $133 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の時

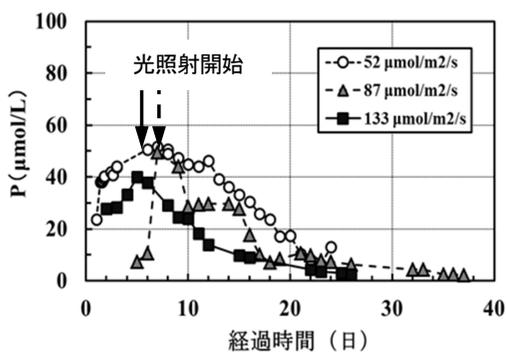


図6 P濃度の経時変化

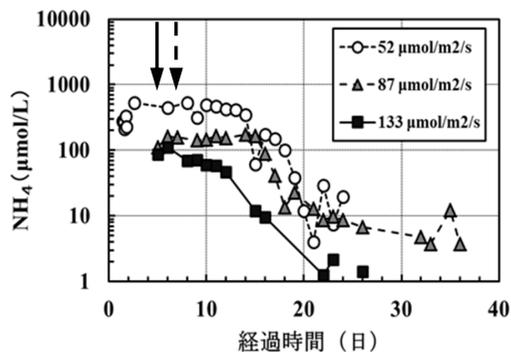


図8 NH<sub>4</sub>濃度の経時変化

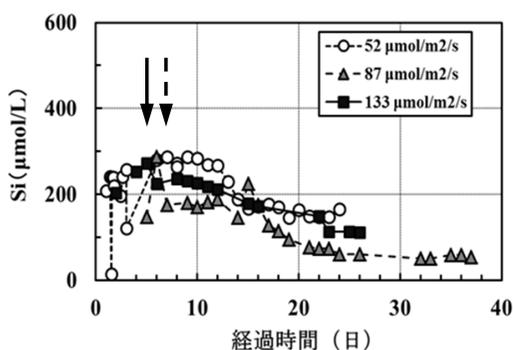


図7 Si濃度の経時変化

は 4.0 mg/L であった。その後は、ほぼ同じ値で推移している。水温と塩分から Weiss の式を用いて飽和酸素量を求めると、7.0 mg/L であった。

図3を見ると、pHの値は、無酸素時には7～7.7の範囲で推移したが、光照射を開始すると次第に増加し始め、実験開始後20日目以降は8前後の値となっている。このようなpH値の増加は、付着性藻類による光合成の結果であると判断される。

図4より、AVS-Sの値は、光照射を開始すると減少に転じ、DO濃度が0 mg/L以上の値を示す頃には検出されていないことがわかる。AVS-Sとして測定される硫化物は、HS<sup>-</sup>、H<sub>2</sub>S、FeS、Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>などである。AVS-Sの最大値は、52 μmol/m<sup>2</sup>/sの時に9 mg/L、87 μmol/m<sup>2</sup>/sの時は2 mg/Lであり、133 μmol/m<sup>2</sup>/sの時は0.35 mg/Lであった。

本実験は、同じ堆積物を使用し52 μmol/m<sup>2</sup>/sから133 μmol/m<sup>2</sup>/sまで光量子束密度を増加させる順序で行ったため、それに伴い還元物質の量が減少していたと考えられる。何れにせよ図4より、無酸素状態の時に発生したH<sub>2</sub>Sのような還元性物質が、発生したO<sub>2</sub>によって直ちに酸化されていることが示唆される。

図5に示す酸化還元電位(ORP)の値は、実験開始後に減少し、光照射開始時には-200 mVまで低下した。光照射を開始すると増加に転じ、実験開始後10日目には100 mVまで増大し、20日目には200 mVに達している。概ねAVS-Sの値が0 mg/Lを示す頃には、0 mVになっている。これらのことから、H<sub>2</sub>Sが発生する還元環境であっても、光を照射することによってDOが増加し無酸素状態を脱することが確認された。ただし、DOは飽和酸素量に達していなかった。

図6～8より明らかなように、栄養塩類の濃度は、何れも光照射を開始すると減少し始める。特に、DOが増加する期間中には、栄養塩類の濃度が急激に減少し、DOが一定値に収束する頃には栄養塩類の濃度の変化も小さくなる。これらは、栄養塩類が付着性藻類の有機合成に利用された結果であると考えられる。

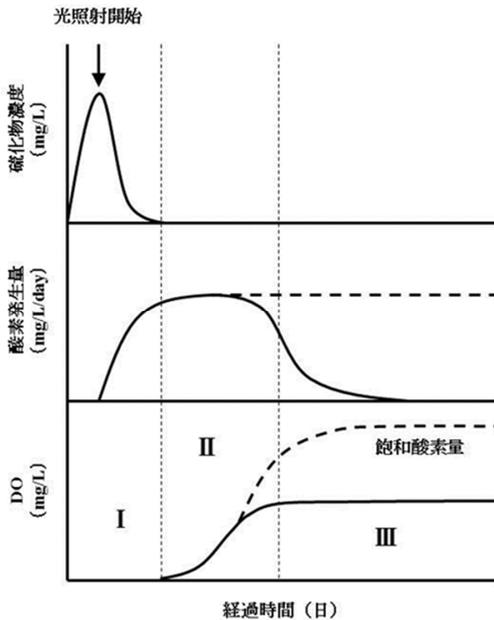


図9 H<sub>2</sub>S と O<sub>2</sub> 発生量および DO の経時変化の模式図

## 4. 考察

### 4.1 酸素の発生と消費

DO として現れる水中の O<sub>2</sub> は、O<sub>2</sub> の発生と消費の関係によって決まる。O<sub>2</sub> の発生と消費の関係は、次式の様に表される。底層で O<sub>2</sub> を消費している過程は、非常に複雑な関係にあり詳細は明確でないが、化学的酸素消費と生物学的酸素消費に大別される<sup>16)~19)</sup>。化学的酸素消費は、還元性物質の酸化などによるものである。生物学的酸素消費は、有機物の好氣的微生物分解などによって生じる。

$$DO = C_{pro} - C_{con} \quad (1)$$

$$C_{con} = C_{che} + C_{bio} \quad (2)$$

ここに、DO は溶存酸素量 (mg-O<sub>2</sub>) であり、C<sub>pro</sub> は O<sub>2</sub> 発生量 (mg-O<sub>2</sub>)、C<sub>con</sub> は O<sub>2</sub> 消費量 (mg-O<sub>2</sub>) である。さらに、C<sub>che</sub> は化学的 O<sub>2</sub> 消費量 (mg-O<sub>2</sub>) であり、C<sub>bio</sub> は生物学的 O<sub>2</sub> 消費量 (mg-O<sub>2</sub>) である。水中の DO が増加するには、次の条件が満足

されなければならない。

$$C_{pro} \geq C_{con} \quad (3)$$

すなわち、O<sub>2</sub> の発生が消費を上回ると、その余剰分が水中に留まり DO として現れるということである。したがって、今回の実験の後半で DO が一定な値で推移するのは、その時に O<sub>2</sub> 発生と消費が平衡状態に達しているためであると推測される。また、今回の実験結果では、この時に飽和酸素量に達していないことから、O<sub>2</sub> 発生も消費も共に小さい状態で推移していたと考えられる。

ここで図9に硫化物濃度と O<sub>2</sub> 発生量および DO の経時変化の模式図を示す。光照射の直後は、附着性藻類の光合成の結果として発生する O<sub>2</sub> の大部分が H<sub>2</sub>S や FeS などの還元性物質の酸化によって消費されている。このとき、O<sub>2</sub> の消費は O<sub>2</sub> の発生を大きく上回っており、発生した O<sub>2</sub> の余剰分は無く DO の値は 0 mg/L となる (図中 I)。それから、還元性物質による酸化がほぼ終了すると、O<sub>2</sub> の消費は有機物の酸化分解によるものとなる。この有機物の酸化分解は、その初期の段階で活発に行われ、発生した栄養塩類は、一部が微生物による有機合成などに利用され、残りは酸化物に吸着されるなどしていると推測される。このとき、O<sub>2</sub> の消費は O<sub>2</sub> の発生を下回っており、発生した O<sub>2</sub> の余剰分が DO として現れてくると考えられる (図中 II)。さらに時間が経過すると、O<sub>2</sub> の消費と発生ともに低下し、ある程度の平衡状態を呈するようになると思われる。このとき、DO の値は変化しなくなる (図中 III)。

以上のことから、今回の実験において DO が飽和酸素量に達することなく一定な値で推移したのは、実験の後半部分で O<sub>2</sub> の消費が減少したものの、O<sub>2</sub> の発生も同時に減衰したためであると考えられる。

## 4.2 酸素発生に対する栄養塩類の影響

今回の実験において、後半部分で  $O_2$  の発生が減少した原因として、図 6~8 に示したような栄養塩類の濃度の減少が挙げられる。珪藻類が利用する必須元素は、リン (P)、珪素 (Si)、窒素 (N) である。P は、藻類の物質代謝に関係する物質として重要である。細胞内に取り込まれた P は、RNA など細胞の構成成分の一部となるほか、ADP および ATP として細胞内のエネルギー代謝過程で絶えず繰り返し利用される。また、珪藻類は、他の植物プランクトンと異なり Si を利用し、精巧な模様をついた水酸化ケイ素の殻を形成する。このような細胞壁合成だけでなく、核分裂や細胞膜の伸長、特に DNA の複製にも Si は大きく関与している<sup>20)</sup>。N は、原形質構成成分であるアミノ酸、タンパク質、補酵素類、クロロフィルなどの色素類に含有される重要な物質である<sup>21)</sup>。乾燥質量当たり、植物体は N を 1~5 % しか含まないが、原形質の構成成分であるタンパク質や核酸などでは N 含有量は 12~19 % に達する<sup>21)</sup>。したがって、N が供給されなければ植物は成長できない。

このように、珪藻類にとって P と Si は重要な物質であり、細胞内の P 含有量がある値以下になると細胞分裂ができなくなる。しかし、珪藻類は P の必要量の少なくとも 30 倍量を過剰のリン酸として蓄積し、外部環境に P が不足すると、この貯蔵リン酸を分割使用して細胞分裂を続ける<sup>22)</sup>。

Si も P と同様に、栄養塩類が豊富な場合は細胞内の貯蔵プールにケイ酸として蓄積することが知られている<sup>13),23)</sup>。珪藻類の培養試験の結果<sup>24)-26)</sup>によれば、培養液の人工海水から P や Si を除いた場合、対照の半分程度に増殖が抑制されたが、N を除いた場合には、増殖が対照の 1/10 近くまで極端に低下し、ほとんど増殖しない種も存在した。*Navicula ramosissima* を用いた培養試験では、N を取り除いた場合、原形質が委縮した細胞が数

多く観察されている<sup>25)</sup>。ここで、図 6 と図 8 より N:P 比を求めてみると、平均して 1.79~5.21 の範囲であり、Redfield 比の 16 を大きく下回る値であった。52  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の場合の最大値でも 13.54 であった。これは、装置内における藻類の増殖は、N によって制限されることを示す。

堆積物の表面に生息する付着性藻類は、堆積物の直上水に加えて間隙水中の栄養塩類も生産に利用している<sup>27)-29)</sup>と考えられるが、本研究では堆積物の間隙水中における栄養塩類の変化を把握していない。そのため、間隙水中の栄養塩類については言及できないが、少なくとも、図 6~8 に示す結果は、直上水中の栄養塩類が、付着性藻類の生産に利用されていることを示唆する。付着性藻類が間隙水中の栄養塩類を利用する場合、藻類の増殖生理、堆積物の酸化還元状態、競合する細菌群などにより影響を受けることが考えられる。しかしながら、付着性藻類の増殖生理に関する研究は稀であり、栄養塩類を利用する細菌群と付着性藻類の競合関係は明らかにされていない。堆積物の表面と数 mm の深さに付着している場合には、光応答や間隙水中の栄養塩類の利用条件が異なるだろう。したがって、光照射による  $O_2$  発生の持続性を詳細に検討するためには、付着性藻類の増殖生理を含め間隙水中の栄養塩類の利用について調べなければならない。

以上のことから、実験開始後 15~20 日目以降において  $O_2$  の発生が減少したのは、栄養塩類の欠乏、特に N の欠乏による影響を大きく受けた結果であると考えられる。したがって、長期にわたり  $O_2$  の発生が維持されるためには、必要量の栄養塩類が継続的に供給される環境が維持されていなければならない。しかしながら、本実験は、閉鎖系であるため栄養塩類の著しい減少が生じたが、開放系である実際の海域では、隣接する貧酸素水塊から栄養塩類が供給されるなどして、このよう

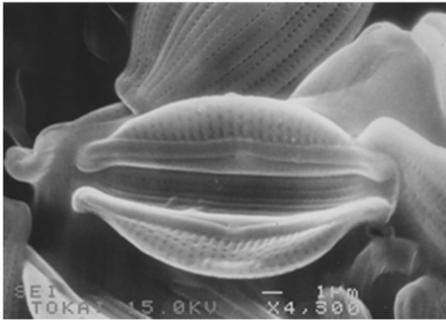


写真2 堆積物表面で確認された藻類  
(*Amphora* sp.)

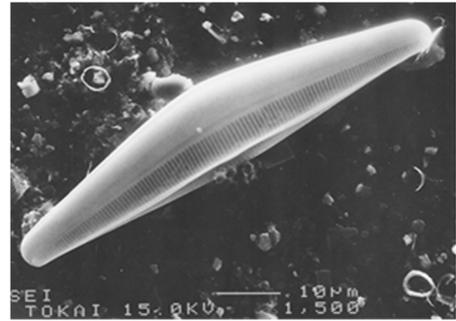


写真3 堆積物表面で確認された藻類  
(*Trachyneis* sp.)

な栄養塩類の著しい減少は生じ難いと考えられる。そのため、実際の海域では、光照射による  $O_2$  発生は、長期にわたり維持されるものと思われる。

#### 4.3 酸素発生に対する光量子束密度の影響

$O_2$  の発生が抑制される原因として、栄養塩類の他に光量子束密度の大きさによる光障害が挙げられる。本実験では、付着性藻類に関する既往の研究結果を参考にして、LED 照明装置の光量子束密度を  $50\sim 180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の範囲内になるように設定した。なお、実験終了時に堆積物の表層について電子顕微鏡による観察を行ったところ、付着性藻類として *Amphora* sp. や *Trachyneis* sp. などが確認されている (写真2 および写真3)。

図2に示した  $DO$  の経時変化を見ると、本実験の  $DO$  の最大値は、光量子束密度が  $133 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の場合と  $87 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  場合がほぼ同じで大きく、それらに比べて  $52 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の場合が小さかった。また、図6~8に示した栄養塩類の経時変化を見ると、Siを除き、光量子束密度の値が大きいほど、栄養塩類の減少の程度が大きいことが認められる。光量子束密度が  $133 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の場合には、 $52 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の場合に比べて、15日目以降のP濃度が1/2以下、 $NH_4$ 濃度が1/10以下まで減少していた。

これらのことから、光量子束密度の値は、既往の研究結果を参考にした  $50\sim 180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の範囲で光障害が生じることは無く問題ないと判断される。しかしながら、Maddux and Jones<sup>30)</sup>によれば、NとP濃度が低い場合、最大成長のための最適光量子束密度が小さくなることが確認されている。また、より大きな光量子束密度で長い時間照射した場合、光照射の後半において成長速度の減少が認められた。このことから、栄養塩類の濃度減少が、光障害を引き起こす光量子束密度の低下をもたらす可能性もある。この点については、今後検討する必要があると思われる。

以上のことから、今回の実験の後半で  $DO$  が一定な値で推移し、飽和酸素量に達しなかったのは、 $O_2$  の消費が減少すると共に、 $O_2$  の発生が減少したためであり、それは光障害ではなく、Nなど栄養塩類が必要量を著しく下回るまで減少したことによって生じたことがわかった。ただし、このような栄養塩類の著しい減少は、今回の実験が閉鎖系で行われたために生じたものである。したがって、長期にわたり  $O_2$  の発生を維持するためには、光量子束密度の値が、弱光環境に適応した付着性藻類に光障害を生じさせない  $50\sim 180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の範囲にあり、栄養塩類が枯渇しない環境であることが望ましい。

## 5. 結論

本研究では、光照射による酸素発生を調べるため、LEDを人工光源として採用し、実際の海底から採取した堆積物を用いて室内実験を行った。その結果、硫化水素が発生する環境においても、堆積物の表面に光量子束密度  $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の光を照射することによって底層水のDOが増大し無酸素状態を脱することが明らかにされた。また、光を照射すると直ぐに  $\text{O}_2$  が発生し始め還元性物質が酸化されることが確認された。 $\text{O}_2$  の発生を長期的にわたり維持するためには、付着性藻類の光阻害を考慮して  $50\sim 180 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  の範囲に光量子束密度の値を設定することが望ましいこともわかった。しかしながら、今回の実験で得られた結果は、あくまで室内の閉鎖系におけるものである。そのため、開放系である実際の現場海域に適用するには、それぞれの海域における海況などの条件に対応することが求められる。今後、実際の現場海域に近い条件において実験を行い、光照射による効果の有無や程度を確認しなければならない。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、東海大学海洋学部の海洋科学科に在籍される方々には、多くのご協力またはご支援をいただいた。ここに謝意を表します。

## 引用・参考文献

- 1) 閉鎖性海域中長期ビジョン策定に係る懇談会：閉鎖性海域中長期ビジョン，2010.
- 2) 藤井智康，駒井幸雄，藤原建紀，横井貴範：港湾域などの強閉鎖性海域の貧酸素水塊の発生機構と動態，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.26，pp.141-145，2010.
- 3) 柳 哲雄：貧酸素水塊の生成・維持・変動・消滅機構と化学・生物的影響，海の研究，Vol.13，pp.451-460，2004.
- 4) 深見公雄：光ファイバーによる底質の貧酸素化防止，海の環境微生物学 (石田祐三郎，杉田治男 編)，恒星社厚生閣，pp.209-214，2005.
- 5) 宮岡修二，辻 博和，小島富二男，宇佐美諭，堀越弘毅：光照射による底質環境の改善に関する室内実験，土木学会第54回年次学術講演会，講演概要集，pp.58-59，1999.
- 6) 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.
- 7) 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, Vol.70, pp.421-429, 2004.
- 8) 深見公雄：光ファイバーおよびLEDを利用した太陽光エネルギーによる養殖漁場環境の浄化，環境報告書，高知大学，pp.26-27，2005.
- 9) 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, No.1, pp.54-59, 2012.
- 10) 渡辺博之：LEDの植物工場への応用，レーザー研究，Vol.25, No.12, pp.836-840, 1997.
- 11) 谷口 旭 監修：海洋プランクトン生態学，pp.308-310，2008.
- 12) 山本民次：沿岸海域生態系における底生微細藻の役割，沿岸海洋研究，Vol.47, No.1, pp.3-10，2009.
- 13) 大貝政治，松井俊夫，高木博之：付着珪藻 *Cocconeis* sp.の増殖に及ぼす環境諸要因の影響，水産増殖，Vol.40, No.2, pp.241-246，1992.

- 14) 河村知彦, 岡村和麿, 高見秀輝 : アワビの好適餌料珪藻 *Cocconeis scutellum* var. *parva* の増殖特性, 水産増殖, Vol.46, No.4, pp.509-516, 1998.
- 15) 百瀬陽介, 伊藤絹子, 吾妻行雄, 谷口和也 : 褐藻ヒジキの光強度, 水温, 塩分濃度に対する光合成特性~付着珪藻の着生との関係~, 水産増殖, Vol.54, No.3, pp.383-390, 2006.
- 20) 巖佐耕三 : 珪藻の生物学, 東京大学出版会, 1976.
- 21) 増田芳雄 : 植物生理学, 培風館, 2001.
- 22) 岩崎英雄 : 微細藻類の栄養要求, 日本水産学会誌, Vol.33, No.11, pp.1072-1083, 1967.
- 23) E. Paasche : The physiological ecology of phytoplankton (I. Morris ed.), Blackwell Scientific, Oxford, pp.259-284, 1980.
- 24) 林 光則, 葉山八千代, 秋山広子, 永井史郎 : 海洋プランクトンの栄養要求と藻類培養試験による海水の富栄養評価に関する研究, 水質汚濁研究, Vol.1, No.3, pp.199-202, 1978.
- 25) 北村 等 : 付着珪藻 *Navicula ramosissima* の増殖に及ぼす照度, 塩素量および栄養の影響, 長崎大学水産学部研究報告, Vol.71, pp.159-162, 1992.
- 26) 大貝政治 : のり葉体及びのり網に着生する珪藻の生態に関する研究, 水産大学校研究報告, Vol.34, pp.37-89, 1986.
- 27) 山口一岩 : 温帯沿岸域における底生微細藻類の生物量と生産量, 日本ベントス学会誌, Vol.66, pp.1-21, 2011.
- 28) Reay W. G. et al. : Sediment-water column oxygen and nutrient fluxes in nearshore environments of the lower Delmarva Peninsula, USA, Marine Ecology Progress Series, Vol.118, pp.215-227, 1995.
- 29) Rysgaard et al. : Seasonal variation in nitrification and denitrification in estuarine sediment colonized by benthic microalgae and bioturbating infauna, Marine Ecology Progress Series, Vol.126, pp.111-121, 1995.
- 30) William S. Maddux and Raymond F. Jones : Some interactions of temperature, light intensity and nutrient concentration during the continuous culture of *Nitzschia closterium* and *Tetraselmis* sp., Limnology and Oceanography, Vol.9, No.1, pp.79-86, 1964.

## 著者紹介

### 湊 太郎 (正会員)

青木マリーン株式会社 建設事業本部 工事部 課長 (兵庫県神戸市東灘区魚崎西町 3-4-3), 昭和 47 年生まれ, 平成 14 年 3 月東海大学大学院博士課程修了, 博士 (工学: 東海大学), 技術士 (建設部門), 日本沿岸域学会ほか会員, e-mail : [minato@aokimarine.co.jp](mailto:minato@aokimarine.co.jp)

### 佐藤 義夫 (正会員)

東海大学海洋学部海洋科学科 (静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1), 昭和 22 年生まれ, 昭和 45 年東海大学海洋学部海洋資源学科卒業, 現在同大学非常勤講師, 理学博士 (東海大学), 日本海洋学会, 日本海水学会, 日本地球化学会ほか会員, e-mail : [ysato@scc.u-tokai.ac.jp](mailto:ysato@scc.u-tokai.ac.jp)

### 横山由香 (非会員)

東海大学海洋学部ポストマスター (静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1), 昭和 60 年生まれ, 平成 21 年 3 月東海大学大学院修士課程修了, 理学修士 (東海大学), 日本海洋学会, 日本沿岸海洋研究会ほか会員,

### 大石 友彦 (非会員)

東海大学海洋学部清水教養教育センター (静岡県静岡市清水区折戸 3-20-1), 昭和 30 年生まれ, 昭和 52 年東海大学海洋学部海洋科学科卒業, 昭和 61 年 Copenhagen 大学大学院 Ph. D. コース修了, 現在同大学教授, Ph. D., 日本海洋学会会員, e-mail : [tomo@scc.u-tokai.ac.jp](mailto:tomo@scc.u-tokai.ac.jp)

## Oxygen Evolution on Bottom Water Layer by Supplying Light with Light Emitting Diode

Taro MINATO, Yoshio SATO, Yuka YOKOYAMA and Tomohiko OISHI

**ABSTRACT** : In this study, the change in dissolved oxygen concentration and oxygen evolution in water by supplying light with Light Emitting Diode (LED) was investigated on the column experiments. Watertight LEDs were used in this experiment. In this study, the range of photon flux density was 52~133  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . From the column experiment results, it was found that the dissolved oxygen concentration would be increased through the photosynthesis of benthic diatom by supplying light with LED in the presence of  $\text{H}_2\text{S}$ . It was also suggested that the favorable photon flux density would be the range of 50~180  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  in order to generate oxygen over a long period of time. Therefore, it should be possible to improve the condition of anoxic bottom water and reductive sediment surface by supplying light with LED.

**KEYWORDS** : *anoxic water body, LED, supply of light, dissolved oxygen concentration*