

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

EXPERIMENTAL STUDY ON ENHANCEMENT OF SEA GRASS PHOTOSYNTHESIS USING LED LIGHTS

古牧 大樹¹・佐々木 淳²
Daiki FURUMAKI and Jun SASAKI

¹正会員 五洋建設株式会社 九州支店 (〒810-8580 福岡県中央区警固1-12-11)

²正会員 博 (工) 横浜国立大学准教授 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

Restoration of sea grass beds and seaweeds is becoming important for civil engineers as for the conservation of marine environments. In particular, in canals surrounded by large cities and connected to coastal waters, it seems to be rather difficult to develop sea grasses and seaweeds because of the shortage of lights. In the present study, we consider the possibility of the development of sea grass beds in these waters using artificial lights. For this purpose we performed indoor experiments to analyze the efficiency of their photosynthesis using LED lights that have been rapidly improved in recent years. We proposed an efficient methodology to apply LED lights to this objective. Currently, the method still seems not to be feasible because of the high cost, the combination with other purposes and technology evolution would lead to the application of the present method.

Key Words : LED, Aschers photosynthesis, underwater plant bed, R/B, pulse, phytoplankton

1. はじめに

最近, 沿岸生態系の保全という観点から, 藻場の重要性が認識されるようになり, 海岸・港湾事業でもその保全に取り組んでいる。アマモ場をはじめとする藻場は, 水質汚濁や沿岸開発により失われてしまうことが多く, ここ13年間で約4%が消失している¹⁾。この原因の一つに, 富栄養化により植物プランクトンが増殖することで海水の透明度が低下したために, 光量が不足して死滅してしまうことが挙げられている。アマモ場造成に適した水深の下限域は平均光量が $3\text{E}/\text{m}^2/\text{day}$ 以上と推定されており, 6~8月に $100\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{sec}$ 以上の光が一日に6~8時間必要とされている^{2,3)}。しかし, 5~7月はアマモ自身が光を吸収, またはプランクトンの増殖等でアマモ場全体に光が届かないため⁴⁾, 藻場の造成が困難となっている。

このような光不足を補うことを目的として, これまでに光ファイバーを用いて植物プランクトンへの照射実験を行った研究はあるが⁵⁾, 直接藻場へ人工的に光を照射して光を補助し, 藻場造成を行う研究はほとんどなされていない。

一方近年, 発光ダイオード (Light Emitting

Diode, 以下LEDと記す)の発展が目覚ましい。特に2000年以降, 青色のLEDが市販されてからは多種多様なLEDが出回るようになり, 欠点とされていた初期費用も少なくなってきた。植物栽培分野でも, 植物工場等でLEDが用いられ, 高辻を初めとして効率のよい植物生産を目的とした研究がなされてきている^{6,7,8)}。LEDは, 波長を容易に選択でき, 光合成に必要な波長の光を集中的にかつバランスよく照射することが可能で, 応答速度が速く様々な制御ができる, 省エネルギー性と経済性, および長寿命という観点からも, 他の光源よりも効率のよい光源とされている。植物栽培に有効なLEDを用いて藻場に照射することにより, 新たな藻場の造成や, 既存の藻場の保全ができる可能性がある。特に用地が余っている運河域等でアメニティ向上のためのライトアップ効果を兼ねて, LEDを用いた藻場造成を実施することは, 環境再生や藻場の存在をアピールする観点からも有効と考えられる。

そこで本研究ではLEDを用いた藻場再生に関する基礎的検討として, 海中植物の光合成速度を求めるための室内実験方法を確立し, 得られた結果から最適な光照射方法を提案すること, および光条件が不足している場における藻場造成の可能性について検討することを目的とする。

2. 光合成とLED

植物工場等で光合成について研究している高辻の実験結果を図-1に示す。図-1aはクロロフィルの波長別吸収スペクトルである。植物は基本的に可視光線で光合成を行っているが、光の色（波長）によって植物の成長に与える効果が異なってくる。植物は光エネルギーを吸収するためにクロロフィルという色素を利用して光合成を行っている。ここでクロロフィルは440nm付近の波長である青色、670nm付近の波長である赤色を主に吸収している。図-1bはLED・蛍光灯の発光スペクトルである。図-1aとbを比べるとクロロフィルのピークが赤色・青色LEDのピークと重なっており、LEDを用いれば光合成に必要な640～690nmの赤色光と420～470nmの青色光だけを効率的に照射することができる。

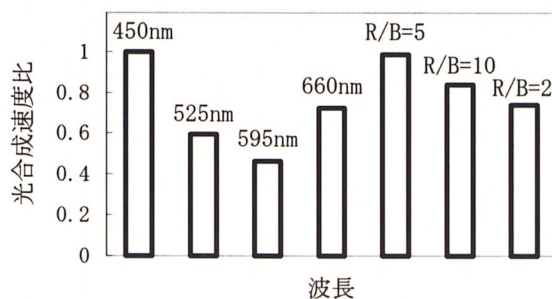
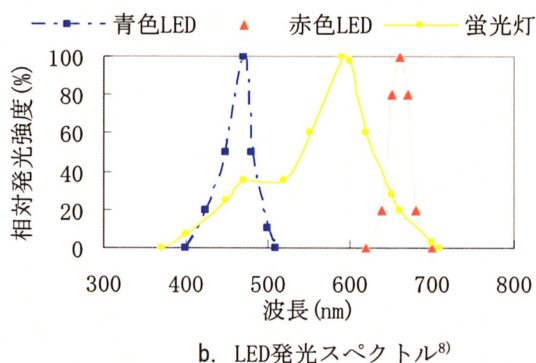
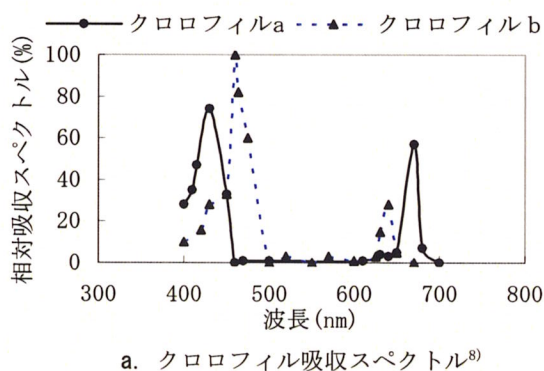


図-1 光合成と波長の関係

高辻はリーフレタスの光合成速度を上昇させるため、赤色LEDと青色LEDの最適な光合成有効光量子密度の比率(R/B)を求めた。その結果、青色LED単体ではコストが高いため図-1cに示すようにR/B比が5のときに最適であることを示した。2007年現在、赤色LEDと青色LEDの価格を比較したところ、青は赤の1.3倍であり、消費電力も青は赤の1.7倍程度であるため、赤色LEDのほうが青色LEDよりもコストが低く抑えられる。

また、周期400 μ s (パルス幅200 μ s) のパルス照射をすれば、連続光に比べて光合成速度、成長率(1日に重量として成長する割合)とも20～25 %増大することを見だし、さらにDT比を1:2にすると30 %近く増大することを明らかにした。ここでパルス照射とは、図-2のように極わずかな時間に一定の周期で光の点灯・消灯が繰り返される照射方法である。一回の点灯時間と一回の点灯・消灯時間の比をデューティー比(以下DT比)という。連続照射よりもパルス照射の方がランプ寿命を延ばし、消費電力も抑えられるため効率がよい。

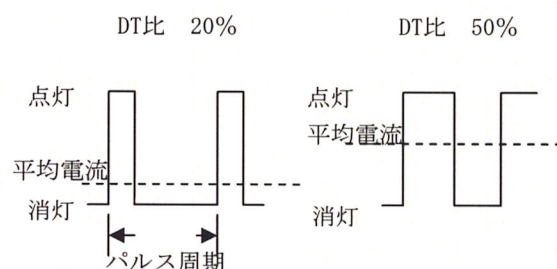


図-2 パルス点灯

3. 実験方法

既存の実験結果より、本研究においても藻場造成のための効率のよい光照射方法を導くため、さまざまな状況下での光合成速度を計測し、比較した。

(1) 光強度変化実験

LEDで光合成が行われるか、また光の強度に応じて光合成速度が変化するかを確認するため、LED赤基盤4枚(LED 480個)と、LED赤基盤6枚(LED 720個)を照射した際の光合成速度を求め比較した。

(2) R/B比変化実験

R/B比を変化させて実験をし、光合成速度を比較することで最適なR/B比を求めた。既往の研究ではR/Bは赤と青の光量子密度の比だが、光量子密度を揃えることは困難であるため、LEDの個数をR/Bとした。実験は赤色LED4基盤(赤色LED480個)と赤色・青色LED4基盤(赤LED320個、青LED80個)を用いて行った。R/B比は4である。実験条件として消費電力を揃えて

の実験と、個数を揃えての実験を行った。

(3) パルス光実験

連続光とパルス光での光合成速度の比較を行いパルス光の効率性を求めた。LED基盤にパルスを発生させる装置として写真-1のパルス発生装置を回路に組み込んだ。これはDT比が最も有効であるとされている33%に固定したままパルス周期が可変である装置である。周期は有効とされているパルス周期である $400\mu s$ と、比較のために $100\mu s$ の2種類の実験を行った。DT比33%のパルス照射と消費電力を揃えるために、連続照射する際にはパルス光の最大電流の1/3倍の電流を流した。

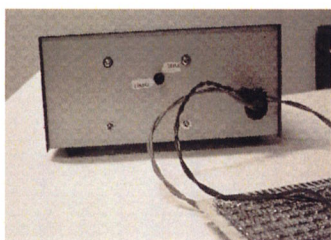


写真-1 パルス発生装置

(4) 植物プランクトン照射実験

LEDで藻場を照射する際に藻場に光が照射されることで、植物プランクトンが増殖することを防ぐため、植物プランクトンが増殖しない光の照射方法を実験により求めた。1Lの三角フラスコを用いて赤色LED1基盤と赤色・青色LED1基盤との光合成速度の比較実験を行った。他の実験同様、流動パラフィンで表面を覆い、攪拌を行った。実験結果は1L当りの光合成速度として整理した。

(5) 太陽光実験

太陽光での光合成速度を計測し、LED照射による光合成速度と比較することで、LEDを用いた藻場造成の可能性を探った。実験は曇天時、強日射時、夕日の場合の光合成速度を求め、LED6基盤との比較をした。

本実験では、藻場の中でも水深の浅い区域に生息しているコアマモを用いて光合成実験を行い、さまざまなケースの光合成速度を求めた。

本実験装置の全体像は図-3、写真-2である。実験装置は、伊豫田らの装置⁹⁾を参考に製作した。円柱形のアクリルチューブにゴム栓をし、底質土、コアマモ、海水を入れ、DO計(東亜DK製)で溶存酸素濃度(以下DO)を計測した。この際水中モータで攪拌し、海水の密度を一定にしながら実験を行った。また空気中から酸素が溶け込むのを防ぐために流動パラフィンで表面を覆った。比較実験を行う際は同じコアマモを使用した。赤色LED一基盤は120個の赤色LEDで、4.8Wとした。次に赤色・青色LED一基盤は赤

色LED80個、青色LED20個で、赤色LED基盤と消費電力を揃えた。

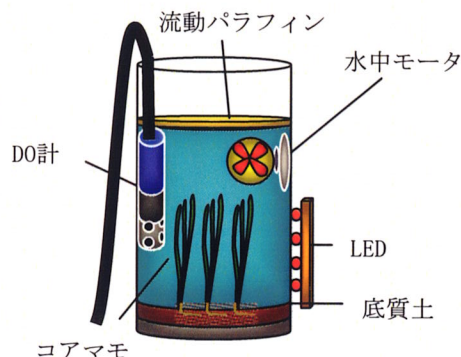


図-3 実験装置全体像

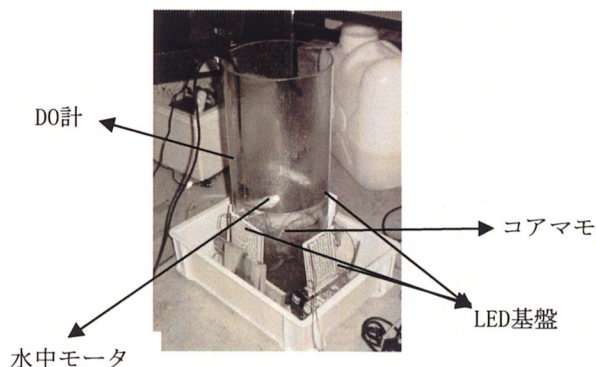


写真-2 実験装置全体像



写真-3 LED赤・青基盤

実験は、光を当てた状態と暗闇の状態のDOを計測し、光合成速度は実験結果から得られたDOから次の式(1a), (1b)を用いて算出した。

$$\text{単位時間当たりDO変化 (mg/L/分)} \times 60 \times \text{海水量 (L)} = \text{酸素生産(消費)速度 (mg/h)} \quad (1a)$$

$$(\text{明条件の酸素生産速度} + \text{暗条件の酸素消費速度}) \div \text{コアマモの質量 (g)} = \text{光合成速度 (mg/g/h)} \quad (1b)$$

4. 結果と考察

(1) 光強度変化実験

海水6L, 底質土1kg, コアマモ52gで実験を行った。実験は2回ずつ行い, 酸素生産(消費)速度の平均値を用いた。赤色LED基盤4枚を照射した際のDOの変化を図-4に, 赤色LED基盤6枚を照射した際のDOの変化を図-5に, 暗条件での結果を図-6に示す。

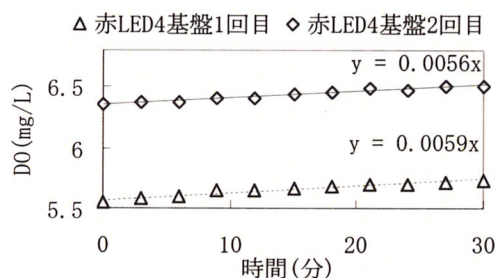


図-4 赤LED4基盤実験

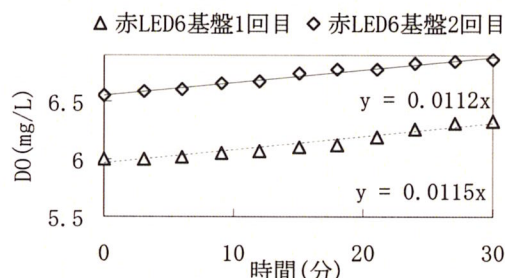


図-5 赤LED6基盤実験

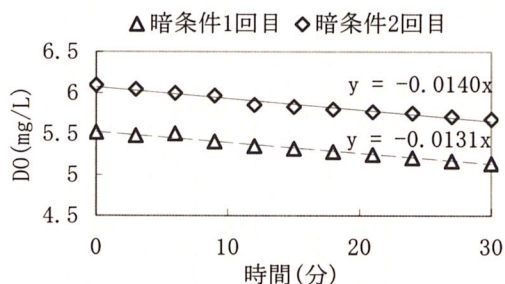


図-6 暗条件実験

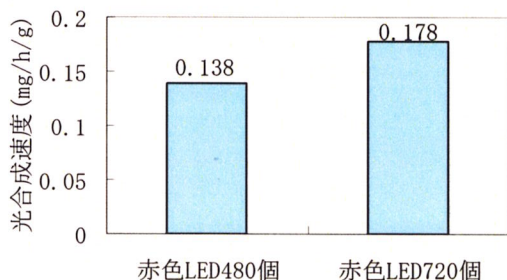


図-7 光強度変化実験

図-4～6の結果から図-7の光合成速度が導かれた。図-7で赤色LED4基盤と赤色LED6基盤の光合成速度を比較すると, LED6基盤はLED4基盤の1.29倍になった。エネルギー量がLED4基盤に比べLED6基盤の方が1.5倍になっているのに, 光合成速度が1.29倍にしかならなかったのは, LEDを増加させた分, 光が葉に照射されず透過する分が増えたためと考えられる。この実験より, LEDでコアマモの光合成が可能であるということ, および照射エネルギーを増加させると光合成速度が増加することを確認できた。

(2) R/B比変化実験

図-8は消費電力を揃えて実験したときの光合成速度で, 図-9は個数を揃えて実験した場合の光合成速度である。LEDの個数を揃えた赤色LED400個と赤色・青色LED400個の光合成速度を比較すると, 光合成速度はほぼ等しくなった。また, 電力量を揃えた赤色LED480個と赤色・青色LED400個の光合成速度を比較すると, 赤色LED480個が赤色・青色LED400個の光合成速度の約1.4倍になった。この結果から, 赤・青比は重要でなく, エネルギー的に見ると青色LEDを用いるとエネルギー効率が悪いことが分かった。

また青色は水中での減衰が少ないため, アマモ場を造成するような場では, 青色は太陽光に含まれるもので十分で, 赤色だけを照射すればよい場合が多いものと推察される。

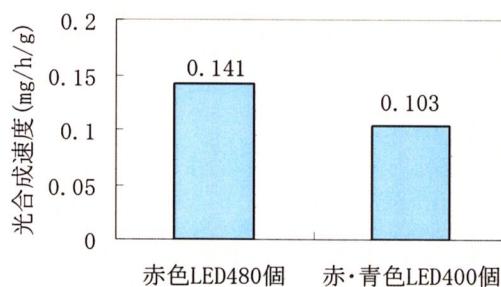


図-8 R/B比変化実験(消費電力一定)

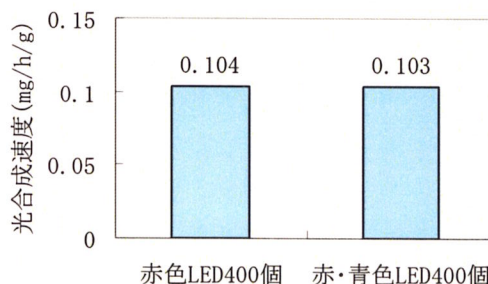


図-9 R/B比変化実験(LED個数一定)

(3) パルス光実験

図-10は連続照射、パルス周期400 μ s、およびパルス周期100 μ sのときの光合成速度である。この図より、連続照射とパルス照射を比べると光合成速度は連続照射において高い値を示し、パルス照射によって飛躍的に光合成速度が上昇することは観察されなかった。この結果から藻場を照射する際にパルス光を用いても光合成速度は上昇させることはできず、パルス照射を用いる利点としてはLEDの寿命が延びるという点だけであると考えられた。

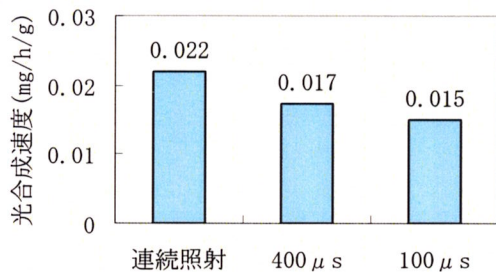


図-10 パルス光実験

(4) 植物プランクトン照射実験

事前に多項目水質計（アレック電子，AAQ1186）によって、クロロフィル濃度を計測したところ約49 μ g/Lであった。図-11は赤色LED120個、赤色・青色LED100個で植物プランクトンに照射した際の光合成速度であり、両者はほぼ等しい値となった。事前にコアマモに同条件で照射した場合は、赤単色で照射した方が同じエネルギーである赤色・青色を照射するよりも光合成速度が1.4倍増加した。ここで植物プランクトンでは光合成速度が等しくなったのは、藻類においては青色光から黄色光を吸収しやすい補助色素（クロロフィルb，c，カロチノイド等）を有しているため、少量の青色でも光合成が活発化されたためであると考えられる。また青色は赤色に比べて水中で散乱し、広範囲に照射することで光合成が活発になったと考えられる。藻場造成にあたって青色はエネルギー効率が悪いだけでなく、植物プランクトンの光合成速度を上げて植物プランクトンの増殖を促進するため、使用しないほうがよいものと推察される。

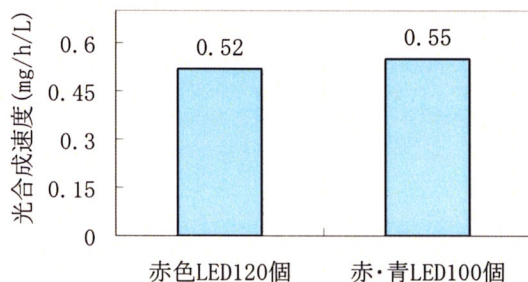


図-11 植物プランクトン照射実験

(5) 太陽光実験

測定日は2005年10月24日で、気温は27.1℃であった。結果は図-12のように、曇天・夕日時の光合成速度はLED6基盤とほぼ等しく、強日射時の光合成速度はLED6基盤の2倍以上の値であった。

日光が強い時の光合成速度をLEDで再現したい場合にはLED6基盤の消費電力が28.8Wなので、単純に消費電力に2を掛けると、約57W必要ということになる。現在の水槽が直径200mmの円形であるから、面積は約0.03 m^2 であり、1 m^2 当りに換算すると1.9kWになる。太陽電池でこれを賄おうとすれば、設置費用が1kWあたり50万以上かかるため、1 m^2 あたり100万円になる。よって暗闇においてLEDだけを用いて太陽と同程度の光で藻場を照射し、造成することはエネルギー消費とコストの面から難しいと考えられる。しかし2010年には最高で2003年のランプ効率の5倍近くとなり、また価格も5-10分の一に下がる可能性があるため、将来的に見れば運河のような太陽光が直接当たらない場所で補助的光源として利用できる可能性は残されていると考えられる。

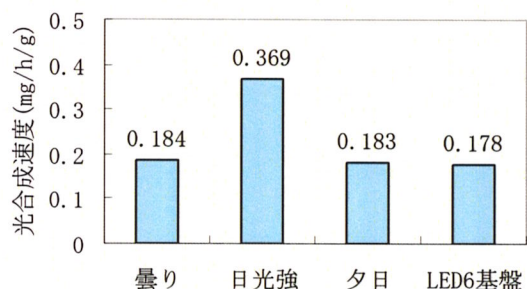


図-12 太陽光実験

5. 結論

本研究ではLEDを用いてコアマモに照射し、光合成速度を算出するという基礎実験を行った。実験から次の結果が得られた。

- (1) コアマモへのLED照射実験方法を確立した。
- (2) LEDの将来性を考慮すると、運河などの太陽光が不足する場において補助的光源として用いることは可能性があると考えられる。しかし現段階ではLED照射で太陽光並みの光合成速度を再現するには消費電力やコストの観点から困難であり、LEDのみで藻場の光をすべて補うことは難しい。
- (3) LEDを用いて藻場を照射する際には赤色だけを用いるのが効率的で、青色はエネルギーコスト、植物プランクトン増殖を誘発する面から効率的でない。また、青色は水中を透過しやすいため、

藻場を造成するような場所では太陽光だけで十分であるものと期待される。

- (4) 照射方法はパルス照射を用いる必要性はなく連続照射がよい。パルス照射の利点はLEDの寿命が延びるという点だけであると考えられる。

本研究は基礎実験であるために、定量的な値を求めることまではできなかった。今後は定量的な検討を行い、コスト面も踏まえた上でLEDを用いた藻場造成の可能性について検討し、現地実証試験を行うことが期待される。

謝辞：本研究の一部は（財）横浜工業会の平成17年度研究助成の補助によるものである。

参考文献

- 1) 環境庁：改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物レッドデータブック 植物 I（維管束植物），660pp.，2000.
- 2) 川崎保夫・石川雄介・丸山康樹：アマモ場造成の適地選定法，沿岸海洋研究ノート27(2)，pp. 136-145，1990.
- 3) 川端豊喜・長谷川恒孝・富田伸明：柳井湾におけるアマモの成長様式とアマモ場造成試験，沿岸海洋研究ノート，27(2) pp. 146-156，1990.
- 4) 今村正裕・松梨史郎・本多正樹・川崎保夫：アマモ生育水域の物質循環に関わる環境因子の特性，海岸工学論文集第50巻，pp. 1101-1105，2003.
- 5) 深見公雄・中嶋亮太・西島敏隆・A. B. バテル：光ファイバーおよび好冷細菌を用いた内湾底層の環境修復，第4回エメックス会議発表要旨集，1999.
- 6) 高辻正基：植物工場ハンドブック，東海大学出版，pp. 3-51，1997.
- 7) 高辻正基：植物工場の基礎と実際，裳華房出版，pp. 78-100，1996.
- 8) 高辻正基，植物工場研究所，<http://www.sasrc.jp/pfl.htm>，（2007年3月30日確認）
- 9) 伊豫田紀子・佐々木淳・磯部雅彦：アマモ場における酸素に着目した物質循環過程の定量化，海岸工学論文集第49巻，pp. 1166-1170，2000.