

光質が異なるLED照射下でのワカメ配偶体の生長と成熟

村瀬 昇^{*†}, 阿部真比古^{*}, 野田幹雄^{*}

Growth and Maturation of Gametophyte in *Undaria pinnatifida* under Different Light Quality from Light Emitting Diodes (LEDs)

Noboru Murase^{*†}, Mahiko Abe^{*} and Mikio Noda^{*}

Abstract : The effects of light quality on growth and maturation of gametophyte in *Undaria pinnatifida* were examined in an indoor culture at 20°C, 12 h light - 12 h dark cycle and 50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ using four different light emitting diodes (LEDs) and a fluorescent light. The relative growth rates of the male and female gametophytes under green LEDs showed high values, but that under red LEDs showed low values. The female gametophyte matured quickly under blue LEDs and a fluorescent light. On the other hand, they matured more slowly under white and green LEDs. Under red LEDs condition, the maturation of female gametophyte was not observed at all.

Key words : *Undaria pinnatifida*, gametophyte, Growth, LEDs, Maturation

緒 言

褐藻のワカメ *Undaria pinnatifida* は我々にとって馴染みの深い食用海藻で、水産上重要な養殖対象種である。国内でのワカメ養殖による生産量は、2006～2010年が約5.2～6.1万tであったのが、2011年には東日本大震災時に伴う三陸産ワカメの甚大な被害により約1.9万tに激減した¹⁾。2012～2016年には約4.5～5.1万tまで回復したが、先の震災前より約1万t程度減少したままである¹⁾。天然ワカメは2012年に収穫量が約2500tであり、養殖と合わせたワカメ生産量の約5%程度を占める²⁾。一方、ワカメは中国や韓国から大量に輸入され、その割合は国内需要量の約80%に相当する³⁾。

国内では、中国産ワカメの輸入量の増大により原藻価格の低迷や販売の伸び悩んだ時期もあったが、消費者の「安全・安心」志向により国内産ワカメの需要が高まっている²⁾。しかし、ワカメの養殖現場では、漁業者の高齢化や後継者不足、高水温化による養殖期間の短縮により生産量が減少傾向にある⁴⁾。また、養殖海域の栄養塩濃度の低下による

養殖ワカメの色落ちなどの品質低下が懸念されている⁵⁾。このような状況を改善するためには、養殖環境の変化に適応した優良種苗の開発と種苗生産の安定と省力化が求められている⁶⁻⁸⁾。

ワカメなどの養殖対象種の種苗生産や育苗は屋外や室内の水槽で行われる。生育の源となる光は、屋外では光源に太陽光を屋根から透過させて取り入れ、光量調節に遮光ネットなどを用いて管理する。また、屋内では人工光源として白色蛍光灯が使用されることが多い。しかし、いずれの場合でも、光量調節には長年の経験に基づいており、蛍光灯では発熱を伴うことから、種苗生産現場で再現性のある光条件を設定、維持することが困難である。

人工光源のひとつであるLight Emitting Diode (LED, 発光ダイオード) は、消費電力が低く、寿命が長い特徴を持つことから、多様な分野の光源として利用されてきた。近年は、従来の蛍光灯器具に取り付け可能な電球型や蛍光灯型のLEDの登場により、一般の照明光源として益々普及が加速している。また、波長特性が異なる様々な色に発光するLEDも販売され、その発光スペクトルの幅は狭い

* 水産大学校生物生産学科 (Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University)

† 別刷り請求先 (Corresponding author: murasen@fish-u.ac.jp)

という特徴を持つ。さらに、LEDの低発熱という特徴から近接照射ができるため、農林水産分野では植物工場の栽培光源として利用され赤色や青色LED照射による作物の生長促進や機能性成分に関する研究が行われている^{9,11)}。

水産分野では、二枚貝や無脊椎動物の餌料用微細藻の培養^{12,13)}、アジ類、イカ類およびイワシ類などの集魚灯の光源としてLEDが利用されている^{14,17)}。海藻類の増養殖においては、室内での種苗や葉状体の培養にLED光源の利用が高まりつつある。これまで大型海藻に対しては、白色LED照射による緑藻アアナオサ*Ulva pertusa*の不稔性変異株の生長¹⁸⁾、光質が異なるLED照射による緑藻スジアオリ*Ulva prolifera*¹⁹⁾および紅藻トサカノリ*Meristotheca papulose*²⁰⁾の生長と光合成、褐藻アラメ*Eisenia bicyclis*の配偶体の生長と成熟²¹⁾について報告されている。褐藻ワカメの配偶体では、LED照射の光質の違いが生長と成熟に影響すると報告されたが²²⁾、白色LEDが用いられておらず、生長量や成熟率のような数値データが示されていないため、培養期間中の生長や成熟の変化などの詳細な情報が述べられていない。

そこで本研究では、ワカメ配偶体の養殖現場における種苗生産や管理、長期保存などにLED照明を活用する際の基礎知見を集積することを目的として、青色、緑色、赤色および白色の光質が異なるLED照射が雄性および雌性配偶体の生長と雌性配偶体の卵形成に及ぼす影響と効果について、室内培養下で精査して明らかにした。

材料と方法

材 料

材料には、褐藻のワカメの成熟藻体から遊走子を放出させ、それらから発芽させた配偶体を用いた。2009年5月8日に山口県下関市吉母沿岸の水深約1mから胞子葉を形成したワカメ藻体を採集した。採集した藻体から胞子葉を切り出し、海水で胞子葉表面の付着生物を取り除き、蒸留水で洗浄した後、室内で約1時間乾燥させた。乾燥させた胞子葉を滅菌海水に浸漬し遊走子を放出させた。遊走子は、容量50mlの格子入りの細胞培養フラスコ (Greiner 690170) 内に散布し、濃度が約30~80細胞 ml⁻¹になるように滅菌海水30mlを入れた。これらを各照射条件下で5個ずつ用意し、光質別生長実験と成熟観察に使用した。

予備培養

光質別培養実験を開始する前に、温度20℃、光源に3波長形昼白色蛍光灯 (National FL40SS・EX-N/37) を用い、光量を50μmol m⁻² s⁻¹、明期12時間：暗期12時間の条件下で2日間静置して予備培養を行った。

光質別照明装置

光質別生長および成熟実験に用いた照明装置は、村瀬ら (2014)²¹⁾のアラメ配偶体で用いた装置と同一のものである。光源には砲弾型の青色LED (日亜化学工業 NSPB500S)、緑色LED (日亜化学工業 NSPG500S)、赤色LED (MagicTeck LS501RS) および白色LED (日亜化学工業 NSPW500CS) を用いた。対照区には予備培養と同じ3波長形昼白色蛍光灯を用いた。各光源の発光スペクトルをFig. 1に示す。発光スペクトルは、光ファイバ (Ocean Optics P400) を接続した分光器 (Ocean Optics USB4000) とパーソナルコンピュータ上のソフトウェア (Ocean Optics Spectra suite) を用いて測定した。培養フラスコを置く5mm厚の亚克力板を透過した光の発光ピーク波長は、青色LEDが465 nm、緑色LEDが523nm、赤色LEDが635nm、白色LEDが第1ピーク466nmと第2ピーク566nmであった。また、蛍光灯では第1ピークが546nmと第2ピークが611nmおよび第3ピークが436nmであった。発光波長範囲は青色LEDが約440~490nm、緑色LEDが約490~560nm、赤色LEDが約610~660nm、白色LEDが約440~720nmおよび蛍光灯が約400~720nmであった。

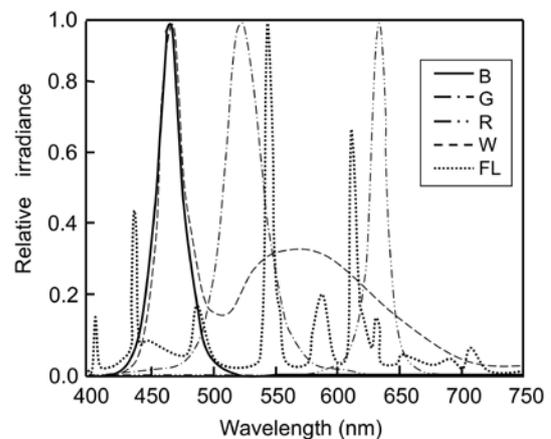


Fig. 1 Spectral distributions of four different LEDs and a fluorescent light. B, blue LEDs; G, green LEDs; R, red LEDs; W, white LEDs; FL, a fluorescent light.

光質別生長実験

光質別生長実験では、予備培養後の遊走子から発芽した1~3細胞期の配偶体を用い、各光質下での光条件を光量 $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明期12時間：暗期12時間、温度 20°C とした。本実験の開始時には、滅菌海水1000mlに対して10mlのPESI²³⁾と0.5mgの GeO_2 を添加した培養液を作成し、予備培養の滅菌海水と交換した。細胞培養フラスコは、格子が記された底面が照射されるように設置した。

生長測定

ワカメの配偶体の生長測定については培養開始から2日ないし3日間隔で行った。各照射下で雌雄性が判別できる配偶体を10個体ずつ追跡して倒立顕微鏡 (OLYMPUS IX71) で観察した。追跡観察は、細胞培養フラスコの格子上的配偶体の位置を用紙に記録することで個体識別を行った。また、倒立顕微鏡に接続したデジタルカメラ (OLYMPUS DP70) で追跡した配偶体を撮影し、その画像をパーソナルコンピュータに取り込み、画像処理ソフト (Adobe Photoshop) と画像解析ソフト (LIA for Win32) により配偶体の面積を求めた。培養7日目の相対生長率は次式より求めた。

相対生長率 (% day^{-1}) = $[\ln(\text{培養7日目の配偶体の面積}) - \ln(\text{培養開始時の配偶体の面積})] / \text{培養日数} \times 100$

各光質間の相対生長率については、データ解析ソフト (カイエンス KyPlot 5.0) を用いて、一元配置分散分析 (one-way ANOVA) を行った後に、Tukey-Kramer法により多重比較検定した。

成熟観察

光質別の配偶体の成熟の観察は、雌性配偶体を対象に行った。雌性配偶体に卵が形成された時点で成熟とみなした。雌性配偶体は、培養開始時には各光質下でランダムに360個体、その後培養28日目まで2日ないし3日間隔で105~575個体を倒立顕微鏡下で観察した。

成熟しなかった照射条件のワカメ配偶体については、前の実験結果に基づいて成熟率の高かった照射条件に細胞培養フラスコごと移設して成熟観察を行った。これら成熟観察での温度、光量および明暗周期は、光質別生長実験と同じ条件とした。

吸収スペクトル

ワカメの遊走子をディスプレイの滅菌シャーレ

(NIPRO 34-153) に散布し、蛍光灯下で光量 $20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明期12時間：暗期12時間、温度 20°C で静置培養した。培養液には光質別培養実験と同じものを用い、約5ヶ月培養した。この間、週に1回程度培養液の交換を行った。培養した配偶体をカミソリの刃で5~6細胞の大きさに細断し、滅菌海水を加えて懸濁液を作成した。次に、この懸濁液をセルに入れ、滅菌海水を満したセルを対照区として、吸収スペクトルを測定した。吸収スペクトルは、ヘッドオンフォトマル装置 (日立 130-6031) が付属した分光光度計 (日立 U-3000) を用いて、400~750nmの波長範囲の吸光度を測定した。

結 果

ワカメ配偶体の生長

ワカメ雄性配偶体の各照射下での培養7日目の相対生長率をFig. 2に示す。追跡を開始した各照射下10個体のうち、培養フラスコの格子底面から配偶体が剥がれた個体数は、赤色LED照射下で1個体、白色LED照射下および蛍光灯照射下で2個体、青色LED照射下で4個体、緑色照射下で5個体であった。相対生長率は、緑色LED照射下で $54.2 \pm 1.0 \%$ day^{-1} ($n=5$) (平均値 \pm 標準偏差、以下同様に表す) と高い値を示した。次いで蛍光灯下、青色および白色LED照射下でそれぞれ $49.5 \pm 5.5 \%$ day^{-1} ($n=8$)、 $46.8 \pm 9.2 \%$ day^{-1} ($n=6$) および $40.0 \pm 9.7 \%$ day^{-1} ($n=8$) であった。赤色LED照射下では $36.5 \pm 4.5 \%$ day^{-1} ($n=9$) と低い値を

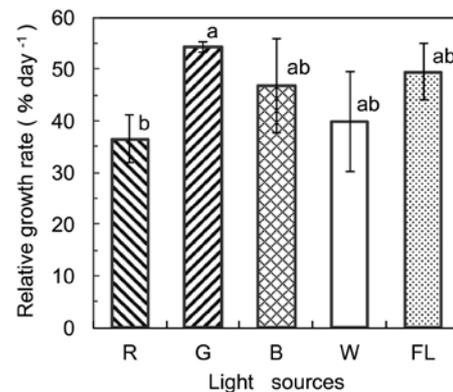


Fig. 2 Relative growth rates of male gametophytes in *Undaria pinnatifida* of 7th days in culture using four different LEDs and a fluorescent light. Each value is the mean of five to nine samples (mean \pm S.D.). Different letters on bars represent significantly different among light sources by Tukey-Kramer's multiple comparison test ($P < 0.05$). B, blue LEDs; G, green LEDs; R, red LEDs; W, white LEDs; FL, a fluorescent light.

示した。相対生長率は、緑色LED照射下と赤色照射下との間で有意な差が認められた ($P < 0.05$)。

ワカメ雌性配偶体の各照射下での培養7日目の相対生長率をFig. 3に示す。追跡を開始した各照射下10個体のうち、蛍光灯照射下では培養フラスコの格子底面から配偶体が剥がれなかったが、白色LED照射下で1個体、赤色、緑色および青色LED照射下ではいずれも3個体の配偶体が剥がれた。相対生長率は、緑色LED照射下で $45.0 \pm 3.4 \text{ \% day}^{-1}$ ($n=7$)と高い値を示した。次いで蛍光灯下、白色および青色LED照射下でそれぞれ $38.2 \pm 7.6 \text{ \% day}^{-1}$ ($n=10$), $37.6 \pm 11.5 \text{ \% day}^{-1}$ ($n=9$) および $37.2 \pm 9.4 \text{ \% day}^{-1}$ ($n=7$)であった。赤色LED照射下では $31.7 \pm 5.9 \text{ \% day}^{-1}$ ($n=7$)と低い値を示した。相対生長率は、緑色LED照射下と赤色照射下との間で有意な差が認められた ($P < 0.05$)。

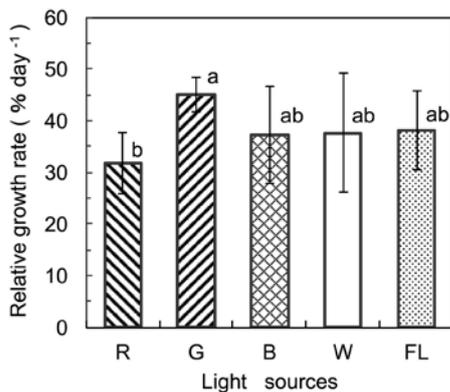


Fig. 3 Relative growth rates of female gametophytes in *Undaria pinnatifida* of 7th days in culture using four different LEDs and a fluorescent light. Each value is the mean of seven to ten samples (mean \pm S.D.). Different letters on bars represent significantly different among light sources by Tukey - Kramer's multiple comparison test ($P < 0.05$). B, blue LEDs; G, green LEDs; R, red LEDs; W, white LEDs; FL, a fluorescent light.

ワカメ雌性配偶体の成熟

ワカメ雌性配偶体の28日間の成熟率の変化をFig. 4に示す。ワカメ雌性配偶体の成熟は、培養12日目に青色LED照射下で最初に確認された。培養14日目には蛍光灯下および緑色LED照射下で、培養16日目には白色LED照射下でも成熟が確認された。青色LED照射下の成熟率は、培養19日目までは白色および緑色LED照射下より顕著に高く、蛍光灯下よりはわずかに高い値を示した。その後、培養23日目にかけて白色および緑色LED照射下で成熟率が増加した。培養28日目の成熟率は、白色LED照射下が82.8% (n

=435), 青色LED照射下が76.3% ($n=325$) および蛍光灯下が71.1% ($n=575$)で高い値を示し、緑色LED照射下が62.9% ($n=105$)であった。赤色LED照射下では成熟率が0% ($n=432$)で、全ての雌性配偶体で卵の形成が認められなかった。

赤色LED照射下では光質別生長実験の開始時から培養70日目でも雌性配偶体には成熟が認められなかった。そこで、赤色LED照射下の細胞培養フラスコ5個のうち3個を青色LED照射下に移設し、残りの2個を移設せず赤色LED照射下に置いて成熟観察を継続した。この観察を開始した日を培養0日目として赤色から青色LED照射下に移設した場合と赤色LED照射下に置いたままの場合の成熟率の変化をFig. 5に示す。青色LED照射下に移設した雌性配偶体

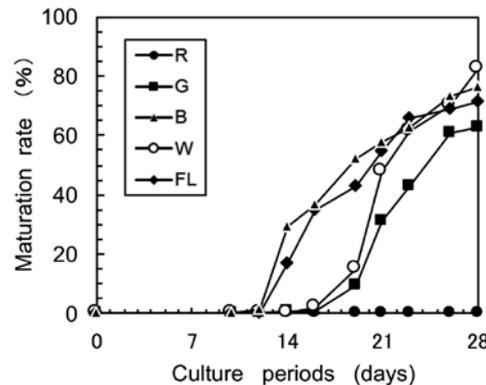


Fig. 4 Changes in maturation rates of female gametophytes in *Undaria pinnatifida* using four different LEDs and a fluorescent light. B, blue LEDs; G, green LEDs; R, red LEDs; W, white LEDs; FL, a fluorescent light.

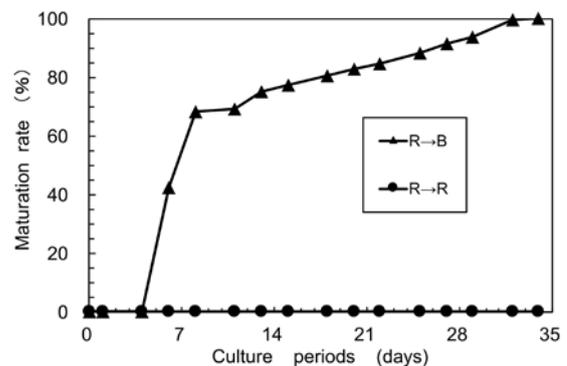


Fig. 5 Changes in maturation rates of female gametophytes in *Undaria pinnatifida* using blue LEDs (\blacktriangle) and red LEDs (\bullet). Three culture vessels were moved to the condition under blue LEDs from the condition under red LEDs (R \rightarrow B), and two vessels were continued to culture under red LEDs (R \rightarrow R).

は、培養6日目に成熟が認められ、培養8日目にかけて急激に増加した。その後、緩やかに増加し、培養34日目には成熟率が100% (n=428) で、全ての雌性配偶体に卵の形成が認められた。一方、移設しなかった赤色LED照射下では成熟率が0% (n=109) で、全ての雌性配偶体で卵の形成が認められなかった。

吸収スペクトル

蛍光灯下で約5ヶ月培養したワカメ配偶体の吸収スペクトルをFig. 6に示す。相対吸光度は、波長約450nm付近で吸収ピークが認められた。波長450~600nmにかけて減少するが、波長500~560nmには膨らみが認められた。波長600nm付近で低下し、波長635nm付近ではわずかな吸収帯がみられるが、波長650nm付近にかけて再び低下した。波長約650nm以上では高い値を示し、波長約680nmで吸収ピークが認められた。

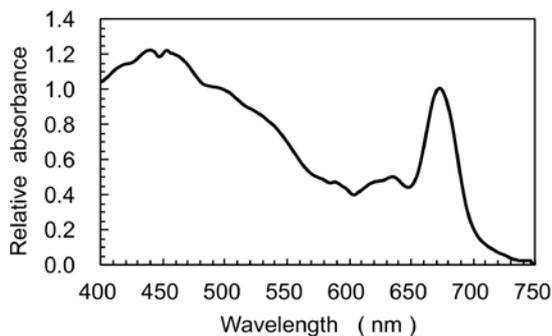


Fig. 6 Relative absorption spectra normalized at 680 nm of living gametophytes in *Undaria pinnatifida* cultured for about 5 months using a fluorescent light. Data show the mean of seven samples.

考 察

本研究では、光質が異なるLED照射によるワカメの雄性および雌性配偶体の生長と雌性配偶体の成熟に与える影響と効果について検討した。

本研究での配偶体の生長については、遊走子から発芽した配偶体を用い、雌性配偶体の卵形成が培養12日目に始まったことから (Fig. 4)、それ以前の培養7日目における雄性および雌性配偶体の面積を測定して光質別に比較した。その結果、雄性および雌性配偶体の生長は、緑色LED照射下で良好、赤色LED下で低調であることが明らかとなった (Figs. 2, 3)。ワカメのフリー配偶体を用いた

光質が異なるLED照射による培養実験では、生長は緑色光で良好で、赤色光では不調であったと報告され²²⁾、本研究のようにフラスコ底面で着生した配偶体でも同様な結果が得られた。

ワカメなどの褐藻に含まれるカロテノイド系光合成色素のフコキサンチンは、生体の葉緑体内では波長540nm付近に吸収帯があることが知られている^{24, 25)}。本研究でのワカメ配偶体の吸収スペクトルには波長540nm付近の光を吸収する膨らみが存在し (Fig. 5)、緑色LED照射による発光波長範囲 (約490~560nm, Fig. 1) と一致することが確認できる。このため、配偶体は、緑色LED照射光を効率良く吸収でき、光合成活性を高めて生長が良好であったと考えられる。一方、赤色LED照射では、発光スペクトルの範囲 (波長610~650nm, Fig. 1) がワカメ配偶体の吸光度の低い波長範囲 (Fig. 5) にあるため、その範囲の光エネルギーを十分に光合成に利用することができず、生長が抑制されたと考えられる。このように、光源の発光波長範囲と吸収スペクトルとの関係から光質による生長の違いについて推察することができた。今後は、配偶体の各光質下での光合成活性の測定および光合成色素定量とともに、吸収スペクトルが光合成の作用スペクトルと必ずしも一致しないことから²⁶⁾、作用スペクトルに関して解析を進める必要がある。

本研究でのワカメ雌性配偶体の成熟については、青色LED照射下および蛍光灯下で卵の形成が早期に認められ、白色LED照射下では卵形成がやや遅れたが、培養4週間後にはこれら3つの照射下で成熟率がほぼ同様に高かった。次いで、成熟率は緑色LED照射下で高い値を示した。しかし、赤色LED照射下では全く卵形成が認められなかった。松井ら (1992) によると²⁷⁾、ワカメ雌性配偶体の成熟については、光質が異なるカラー蛍光灯を用いた培養実験では、青色光で良好で、次いで緑色光と白色光であり、赤色光が最も劣っていた。また、團 (2005) は²²⁾、白色蛍光灯および青色LED照射下ではワカメ配偶体の受精と胞子体への発芽が認められ、赤色および青色LEDの割合を変えて照射した実験では青色LED照射光が少しでも混ざると受精と発芽が促進されることを報告した。さらに、青色光によるコンブ目の雌性配偶体の成熟の促進については、*Laminaria saccharina*²⁸⁾、アラメ^{21, 27)}、カジメ*Ecklonia cava*²⁷⁾ およびクロメ*E. kurome*²⁷⁾ で知られている。これらの報告と同様の結果が本研究でも認められた。

一方、赤色LED照射下を用いた場合には、本研究のよ

うにワカメの遊走子から発芽した雌性配偶体もフリーの雌性配偶体²²⁾同様に卵が形成されないことが明らかになった。*Laminaria saccharina*では雌性配偶体の卵形成に関する作用スペクトルが調べられ、波長400~480nmで高く誘導されるが、波長520nm以上では誘導されなかったと報告されている²⁸⁾。すなわち、本研究で用いた白色LEDおよび蛍光灯は波長約440~490nmの青色域の青色LEDの発光波長範囲 (Fig. 1) を含んでいるため成熟が促進され、赤色LEDは発光波長範囲 (波長610~650nm, Fig. 1) が狭く、青色域を含んでいないため卵が形成されなかったと推察される。

本研究では、赤色LED照射下で2ヶ月以上成熟を抑制させた雌性配偶体を青色LED照射下に移すと、移動後1週間程度で卵が形成し始め、成熟率も高い値を得ることができ (Fig. 5)、成熟を一斉に促進させ同調できることを示唆した。一方、赤色LED照射下に置いたままの雌性配偶体は卵の形成が全く認められなかった (Fig. 5)。以上のことから、光質が異なるLED照射光を組み合わせて利用することは、ワカメ配偶体の生長の促進と抑制、雌性配偶体の卵形成の促進や同調あるいは抑制が可能となり、ワカメ養殖現場での種苗生産と育苗管理だけでなく、優良株の作出および長期保存において効果的な手法として期待できる。

文 献

- 1) 水産庁:海面漁業生産統計調査, 確報, 平成28年漁業・養殖業生産統計. http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/ (閲覧日2018年7月31日) (2018)
- 2) 佐藤純一:改訂3版わかめ入門. 日本食糧新聞社, 東京 (2015)
- 3) 大房剛:日本での最近の食用海藻業界の動向と問題点. *Algal Resources*, **4**, 15-21 (2011)
- 4) 棚田教生:小松島和田島地区のワカメ生産地強化に向けた生産技術の開発 市場に広がる「とくしまブランド」を育成する技術開発事業. 平成27年度徳島水研事業報告, 76-77 (2016)
- 5) 遠藤光, 高橋大介, 佐藤陽一, 奥村裕, 永田俊, 吾妻行雄:ワカメ養殖業では問題が山積み~原因解明と対策技術開発に関する研究. *日水誌*, **82**, 152 (2016)
- 6) 棚田教生, 團昭紀, 日下啓作, 岡直宏, 浜野龍夫:1遊走子起源のフリー配偶体を用いたワカメの大規模種苗生産法および養殖への実用化の実証. *Algal Resources*, **8**, 23-36 (2015)
- 7) 棚田教生, 團昭紀, 加藤慎治, 岡直宏, 浜野龍夫:鹿児島県産天然ワカメと鳴門産養殖品種の雌雄フリー配偶体正逆交雑による品種改良の効果. *Algal Resources*, **8**, 103-112 (2015)
- 8) 福西暢尚, 佐藤陽一, 市田裕之, 阿部知子, 平野智也:三陸における特産海藻類の品種改良技術開発と新品種育成に関する拠点形成. *日水誌*, **82**, 160 (2016)
- 9) 渡邊博之:人工光完全制御型植物工場の現状と将来性. *農林水産技術研究ジャーナル*, **29**, 39-43 (2006)
- 10) 近藤謙介, 中田昇, 西原英治:異なる光質条件下で栽培したコマツナの生育と品質に及ぼす紅色非硫黄細菌 (*Rhodobacter sphaeroides*) 施用の影響. *生物環境調節*, **42**, 247-253 (2004)
- 11) 庄子和博, 後藤英司, 橋田慎之介, 後藤文之, 吉原利一:赤色光と青色光がレッドリーフレタスのアントシアニン蓄積と生合成遺伝子の発現に及ぼす影響. *植物環境工学*, **22**, 107-113 (2010)
- 12) 上野淳一:発光ダイオード (LED) を用いた微細藻類の培養. *アクアネット*, **6**, 48-52 (2003)
- 13) 石川卓, 磯和潔:白色発光ダイオード (LED) を用いた餌料用微細藻類の培養. *水産技術*, **4**, 51-55 (2012)
- 14) 川村軍蔵:水産分野におけるLEDの応用. 農業電化協会 (編), 時代を先取りする先端技術-LEDの農林水産分野への応用. 農業電化協会, 東京, 51-62 (2006)
- 15) 本多二郎, 稲田博史:高出力LED水中集魚灯の開発. 農業電化協会 (編), 時代を先取りする先端技術-LEDの農林水産分野への応用. 農業電化協会, 東京, 89-99 (2006)
- 16) 岡本研正:漁業におけるLEDの利用と展望. *農林水産技術研究ジャーナル*, **32**, 32-37 (2009)
- 17) 梶川和武, 西翔太郎, 中村武史, 毛利雅彦, 川崎潤二, 濱野明, 渡邊俊輝, 吉村和正:いわし棒受網漁業における水中集魚灯に蝟集する魚群の好適照度域の推定. *日水誌*, **83**, 68-70 (2017)
- 18) 村瀬昇, 銭志亮, 水口昭弘, 水口千津雄:白色LED照射によるアマモ, ウミヒルモおよび不稔性アナオサの生長. *海苔と海藻*, **74**, 19-33 (2008)
- 19) 高田順司, 村瀬昇, 阿部真比古, 野田幹雄, 須田有輔:光質が異なるLED照射下での緑藻スジアオノリの生長と光合成. *水産増殖*, **59**, 101-107 (2011)

- 20) 村瀬昇, 高田順司, 阿部真比古, 野田幹雄, 須田有輔:
光質が異なるLED照射下での紅藻トサカノリの生長
と光合成. *Algal Resources*, **5**, 61-69 (2012)
- 21) 村瀬昇, 阿部真比古, 野田幹雄, 須田有輔: 光質が異
なるLED照射下でのアラメの配偶体の生長と成熟.
水産大学校研究報告, **62**, 147-152 (2014)
- 22) 團昭紀: 発光ダイオードを使った藻類の培養. 平成15
年度徳島水研事業報告, 77-78 (2005)
- 23) Tatewaki M.: Formation of a crustaceous sporophyte
with unilocular sporangia in *Scytosiphon lomentaria*.
Phycologia, **6**, 62-66 (1966)
- 24) 有賀祐勝, 横浜康継: 環境要因の測定 - 光. 西澤一俊,
千原光男 (編), 藻類研究法. 共立出版, 東京, 436-
446 (1979)
- 25) John T. O. Kirk: The photosynthetic apparatus of
aquatic plants. Light and photosynthesis in aquatic
ecosystems, second edition. Cambridge University
Press, 217-251 (1994)
- 26) Lüning K., Dring M. J.: Action spectra and spectral
quantum yield of photosynthesis in marine
macroalgae with thin and thick thalli. *Marine Biology*,
87, 119-129 (1985)
- 27) 松井敏夫, 大貝政治, 大島芳明, 古原和明: コンブ目
植物数種の配偶体の成長・成熟および胞子体 (幼葉)
の成長に及ぼす光質・光量の影響. 日水誌, **58**,
1257-1265 (1992)
- 28) Lüning K., Dring M. J.: Reproduction, growth and
photosynthesis of gametophytes of *Laminaria*
saccharina grown in blue and red light. *Marine*
Biology, **29**, 195-200 (1975)