

ノリ養殖に使用するカキ殻糸状体の恒温室培養技術の開発

加藤 将太・安河内 雄介^a・藤井 直幹
(有明海研究所)

本県のノリ養殖の採苗に利用されるカキ殻糸状体は、各漁家で培養されているが、近年、光環境や夏季と秋季の高気温が原因と考えられる胞子のうの障害が認められている。採苗を安定して行うためには、カキ殻糸状体の健全な育成が重要であり、適正な培養条件の把握と気候に左右されない培養環境の検討が必要である。そこで本研究では恒温室とLED光源を用いて、カキ殻糸状体の適正な培養条件として、糸状体伸長期は日長周期(10L14D, 12L12D, 14L10D)と光源(昼白色, 電球色), 水温(20℃, 25℃)を、胞子のう形成期は日長周期と光源について検討した。その結果、糸状体伸長期は水温20℃, 日長周期12L12Dで伸長が良く、胞子のう形成期は昼白色光源と日長周期10L14Dにおいて胞子のうの形成量が多かった。また恒温室を利用し、適切な培養環境を設定することで、従来の培養方法と比較して最大7か月間培養期間を短縮できると推察された。カキ殻糸状体の培養期間の短縮化は、労力削減, 光熱費等のコスト削減等の漁業者の負担軽減や病気のリスク削減につながり、安定した採苗と漁家経営につながると考えられる。

キーワード：福岡県有明海, ノリ養殖, スサビノリ, 糸状体, LED

本県海域で行われるノリ養殖の採苗は、野外採苗であり、海に広げたノリ網にカキ殻を基質としてノリ糸状体を穿孔させたカキ殻(以下、カキ殻糸状体)を吊り下げ、殻胞子を放出させてノリ網に付着させている。殻胞子付着数や付着時期によって、その後の管理や生産に影響が出る場合も考えられることから、採苗は漁期を通して重要な作業の1つである。したがって採苗に使用するカキ殻糸状体についても、健全なものを準備する必要がある。

福岡県のノリ養殖漁家の多くは、カキ殻糸状体を1月から10月まで自宅で培養している。1月から4月に並べたカキ殻にフリーリング糸状体(以下、フリー糸状体)を散布し、その後、10月の採苗に向けた熟度の調整まで、適正な水温や光量等の培養環境に注意しながら培養を行っている。

大牟田市のアメダスのデータ¹⁾より、直近10年間の2014年~2023年と1977年~2013年の7月~10月の平均気温を比較した(図1)。いずれの月においても直近10年間の方が平均気温が高くなっており、近年の気象が変化していることが考えられる。また、漁家ごとに培養環境が異なっており、一部では、日照不足等の光環境や高気温等の影響によりカ

キ殻糸状体が障害を起こす場合も認められている(図2)。したがって、採苗を安定して行うために

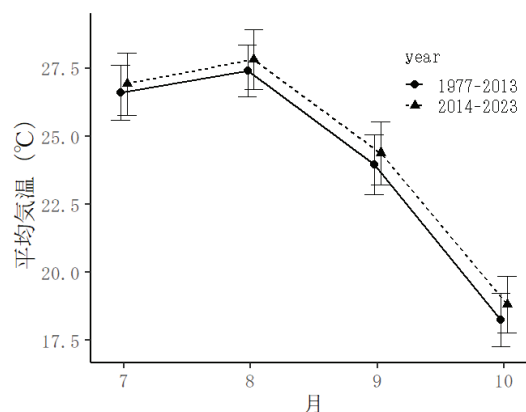


図1 大牟田市における月別(7月~10月)の平均気温(エラーバーはSD)

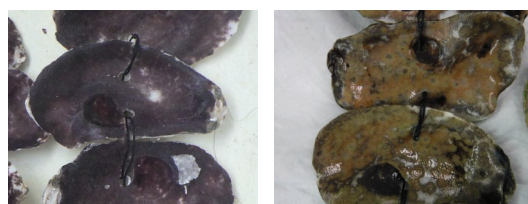


図2 カキ殻糸状体(左: 正常なカキ殻糸状体, 右: 高水温により黒色から黄褐色に変色したカキ殻糸状体)

^a現所属：水産振興課

は、カキ殻糸状体の安定した培養方法、培養技術の開発が非常に重要である。

ノリ糸状体の生育についての研究は、黒木、秋山²⁾や右田³⁾、黒木、佐藤⁴⁾で行われているが、現場への導入を目的とした実用的な研究の報告は少ない。したがって本研究は、生産現場へ導入が容易で、気象の影響を受けない培養手法を開発し、採苗の安定化を図ることを目的として、恒温室を使用したカキ殻糸状体の培養技術の開発を行った。

本試験において、気象の影響を受けない培養方法の開発のため、恒温室を利用し、光源には発光ダイオード（以下、LED）を使用した。LEDは低コスト、低エネルギーであることから、近年、陸上植物の栽培へ利用されている⁵⁾。また集魚灯⁶⁾や微細藻類の培養への応用⁷⁾など、水産業においても利用が進んでいる。

LEDを培養光源に用いることで、植物の生長に有効な波長の光だけを集中して照射することができ、植物に必要な波長の光を集中的かつバランスよく照射することが可能である⁵⁾。水産分野でも、ホシガレイへの緑色光照射による成長促進が確認されており⁸⁾、藻類ではスジアオノリ (*Ulva prolifera*)⁹⁾ やトサカノリ (*Meristotheca papulosa*)¹⁰⁾ において光質による生長の違いが報告されている。

カキ殻糸状体においても、適当なLED光源を利用することで、より効率的な培養につながり、現在よりも短期間の培養を可能にすることが考えられる。カキ殻糸状体の培養期間の短縮化は、漁業者の労力削減、光熱費等のコスト削減、病気のリスク削減につながると考えられる。

したがって、本試験ではカキ殻糸状体の効率的で安定した培養条件を検討するため、恒温室とLED光源を用いて、カキ殻糸状体の生育に影響すると考えられる、光条件（日長周期、光源）と水温について糸状体伸長期と胞子のう形成期の2つの期間について特性を把握し、カキ殻糸状体の最適な培養方法、培養スケジュールを検討した。

定が可能な恒温室を使用した。

培養にはスサビノリ (*Neopyropia yezoensis*) を使用した。糸状体を穿孔させる基質は、有明海のノリ漁業者において一般的に使用されるカキ殻を用いた。

光源にはLED光源 (LDL40S・N, パナソニックホールディングス) を使用し、光強度は光源と水槽からの高さを調整し、糸状体の伸長に適性とされている¹¹⁾ 500Luxに設定した。

培養海水は、塩分の変化が少ない安定した時期に有明海沖で採水した海水（塩分30±1）を用いた。

カキ殻の洗浄は試験開始から約1か月後に行い、付着珪藻によるカキ殻表面上の汚れ除去を目的として、スポンジで殻表面をこすり、水替えを行った。また、試験開始時および水替え時に市販のカキ殻糸状体培養用の栄養剤（株式会社ダイイチ、ノリシード）を適量添加した。

光源と水温、日長周期の試験条件について、表1に示した。LED光源は昼白色光源と電球色光源を使用した。それぞれの光源について、水面近くをライトアナライザー (LA-105, 日本医化器械製作所) で測定し、同様に測定した晴れの日の太陽光と光波長の分布を比較した (図3)。水温は20℃と25℃、明暗条件は10L14D (L:明期の時間, D:暗期の時間)、12L12D, 14L10Dを設定した。

光源と水温、日長周期を組み合わせた合計12試験区を設定し試験を行った。恒温室は2部屋あり、LED光源を部屋それぞれに設置し、部屋内に2つ水槽を設置した。部屋の空調機能と水槽用ヒーター (チタンヒーター100V/1KW, 東立電機) を用いて20℃と25℃試験区を設定した。日長周期は、自動で光源の0n/0ffが切り替わるように設定し、試験は日長周期ごとに3回に分けて試験を行った。

試験は糸状体伸長期、胞子のう形成期どちらにおいても、カキ殻を水槽内に平面に並べて培養した。試験に際して、フリー糸状体を約20秒間、概ね5mmになるようミキサーで細断し、カキ殻1cm²あたり、

表1 試験区分と培養条件

試験項目	試験区分		
光源	昼白色	電球色	
水温	20℃	25℃	
日長周期	10L14D	12L12D	14L10D

方 法

1. 糸状体伸長期の評価

試験場所は上述のとおり、16℃～31℃まで温度設

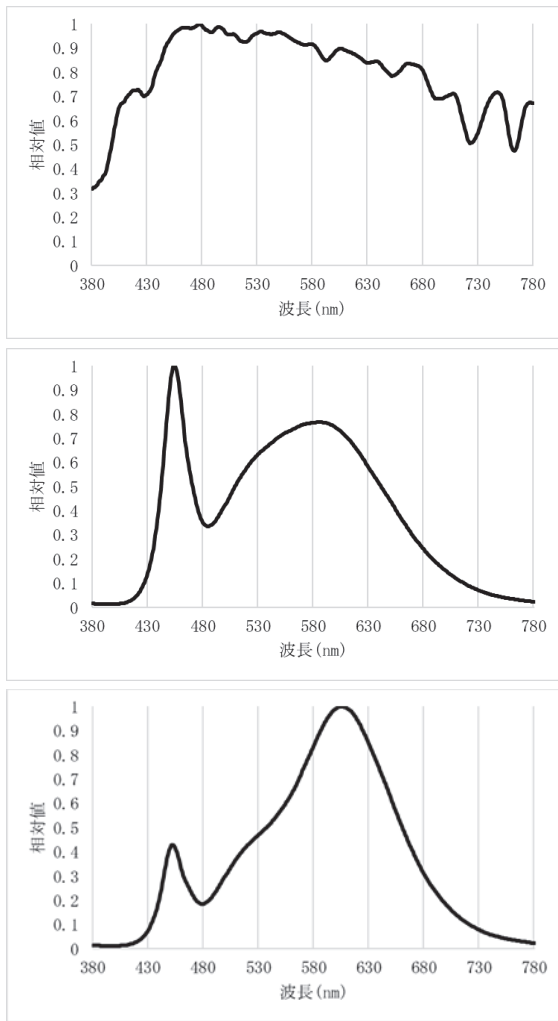


図3 試験に用いたLED光源の相対分光分布図（上が太陽光[2023/9/25]，中が昼白色光源，下が電球色光源）

20 個の密度になるように調整し、水槽内に並べたカキ殻上に散布した。

フリー糸状体はカキ殻上に着底すると、2 週間前後でカキ殻内部に穿孔し、枝のように胞子のう枝を広げる。この頃にはカキ殻上に黒い斑点として肉眼視が可能になる（図 4）。そこで糸状体の穿孔、伸長期の最適条件の評価の指標として、穿孔後約 30 日間の伸長を評価するため、散布 42 日後の斑点の直径を各試験区無作為に抽出した 50 個を計測した。

2. 胞子のう形成期の評価

胞子のう形成期の評価に用いるカキ殻糸状体は伸長期の評価に用いたものをそのまま利用し、培養条件は水温条件の一部以外変更せずに伸長期の評価試



図4 伸長し斑点として肉眼視可能になったカキ殻糸状体と拡大図（拡大図内の○は測定した斑点の例を示す。）

験から連続して行った。

殻胞子の放出の適水温は 15℃～20℃と知られており¹²⁾、水温 20℃試験区は、殻胞子放出の恐れがあることから、フリー糸状体散布 42 日後の伸長期の評価後、20℃試験区の水温を 25℃に変更し、試験を行った。

カキ殻糸状体内の胞子のう形成の評価は、フリー糸状体散布 77～79 日後に脱灰し、胞子のう数を計数し、比較した。顕微鏡 (ECLIPSE50i, 株式会社ニコン) と顕微鏡カメラ (FLOYD, WRAYMER) を用いて、各試験区 20 枚撮影し（図 5）、画像解析ソフト (WinROOF2018 Ver4.5.3, 三谷商事株式会社) を用いて、胞子のう数を計数し、計数した面積を測定後、1 μm^2 あたりの胞子のう数を試験区ごとに比較した。

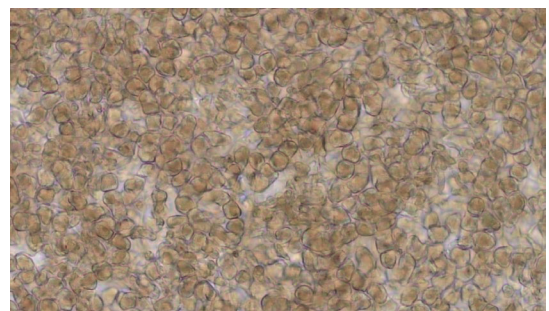


図5 計数に用いた脱灰後のカキ殻糸状体の画像（面積は818 μm^2 ）

3. 統計処理

統計処理には統計ソフト R (version4.0.5) を用

い、試験区ごとの比較解析は Tukey-HSD 法にて多重比較を行った。

結 果

1. 糸状体伸長期の評価

試験区ごとの穿孔糸状体の斑点の直径の平均値と標準偏差を表 2 に示し、最適な水温と光源について検討するため、日長周期の試験区ごとに比較した (図 6)。まず水温について、10L14D の昼白色と電球色試験区、12L12D の電球色試験区において、20°C 試験区の方が 25°C 試験区より有意に大きく ($p < 0.05$)、20°C が適していることが示唆された。光源について、10L14D 試験区は昼白色試験区が電球色試験区より有意に大きかったが ($p < 0.05$)、12L12D の 20°C 試験区と 14L10D の 25°C 試験区においては電球色試験区が有意に大きく ($p < 0.05$)、最適な光源を判断するには難しい結果となった。

続いて、最適な日長周期の検討のため、光源と水温の組み合わせごとに比較した (図 7)。日長周期について着目すると、12L12D がすべての光源と水温の組み合わせで有意に大きかった ($p < 0.05$)。10L14D と 14L10D を比較すると、昼白色・20°C の試

験区以外は 14L10D の方が有意に大きかった ($p < 0.05$)。

2. 胞子のう形成期の評価

12L12D・昼白色・20°C 試験区についてはハンドリングミスによりデータが取得できなかった。

試験区ごとの胞子のう数の平均値と標準偏差を表 3 に示し、最適な光源について検討するため、日長周期の試験区ごとに比較した (図 8)。いずれの試験区においても昼白色試験区の方が電球色試験区より有意に多いことが確認された ($p < 0.05$)。

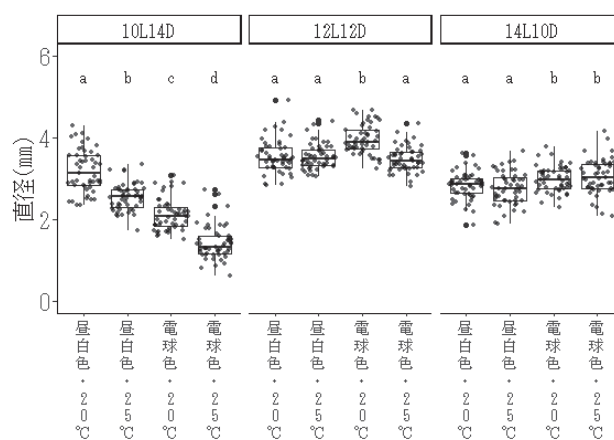


図6 日長周期ごとに比較した糸状体の斑点直径の箱ひげ図とプロット図. 日長周期の試験区ごとの異なるアルファベットはTukey-HSD法による多重比較において有意差 ($p < 0.05$) があることを示す。

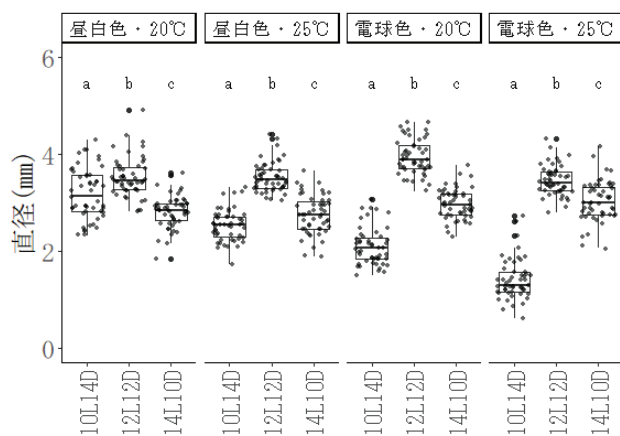


図7 光源・水温ごとに比較した糸状体の斑点直径の箱ひげ図とプロット図. 光源・水温の試験区ごとの異なるアルファベットはTukey-HSD法による多重比較において有意差 ($p < 0.05$) があることを示す。

表2 カキ殻糸状体の斑点の直径の平均値と標準偏差[mm]

日長周期	光源	水温	糸状体直径の平均値[mm] (±SD)
10L14D	昼白色	20°C	3.18 (±0.52)
10L14D	昼白色	25°C	2.54 (±0.33)
10L14D	電球色	20°C	2.10 (±0.39)
10L14D	電球色	25°C	1.42 (±0.42)
12L12D	昼白色	20°C	3.53 (±0.41)
12L12D	昼白色	25°C	3.53 (±0.31)
12L12D	電球色	20°C	3.94 (±0.36)
12L12D	電球色	25°C	3.46 (±0.31)
14L10D	昼白色	20°C	2.82 (±0.34)
14L10D	昼白色	25°C	2.75 (±0.40)
14L10D	電球色	20°C	2.98 (±0.31)
14L10D	電球色	25°C	3.04 (±0.42)

続いて、最適な日長周期の検討のため、光源と水温の組み合わせごとに比較した（図 9）。光源に着目すると、昼白色光源、電球色光源いずれにおいても、10L14D 試験区が有意に多いことが確認された（ $p < 0.05$ ）。

考 察

1. 糸状体伸長期の評価

糸状体の伸長期の最適な水温については、20℃試験区で伸長が良く、黒木らのアマノリによる報告²⁾を支持する結果であった。スサビノリの葉状体が成熟する適水温は 10℃～20℃であることが知られており¹³⁾、天然環境ではその後、カキ殻等に穿孔し、伸長する。そのため、本研究において 20℃試験区の方が伸長が良かったのは、より従来の自然環境の水温に近かったためと考えられる。

最適な光源については、昼白色、電球色の違いが判断出来ない結果となった。今回の試験では局所的に異なる波長をもたない家庭で利用される LED 光源を用いたが、この場合、波長の違いは糸状体の伸長には大きく影響しないと推察される。

しかしながら、スサビノリと同じ紅藻であるトサカノリでは、LED の緑色光や白色光の照射で生長がよく、赤色光において低調であったこと¹⁰⁾、褐藻のワカメ (*Undaria pinnatifida*) 胞子体が赤色光により生長が抑制されることが報告されており¹⁴⁾、スサビノリにおいても、光質により生長の違いが起こることが考えられる。過去の報告によると、ノリ糸状体は葉状体と同じ光合成色素と吸収極大を持つこ

表3 胞子のうの平均個数と標準偏差

日長周期	光源	水温	胞子のうの平均個数[個] (±SD)
10L14D	昼白色	20℃	418.00 (±43.49)
10L14D	昼白色	25℃	439.00 (±72.88)
10L14D	電球色	20℃	366.25 (±52.96)
10L14D	電球色	25℃	300.45 (±68.07)
12L12D	昼白色	20℃	データなし
12L12D	昼白色	25℃	332.80 (±55.26)
12L12D	電球色	20℃	287.10 (±34.10)
12L12D	電球色	25℃	290.30 (±48.08)
14L10D	昼白色	20℃	331.20 (±44.92)
14L10D	昼白色	25℃	277.75 (±46.25)
14L10D	電球色	20℃	291.70 (±39.82)
14L10D	電球色	25℃	260.60 (±39.50)

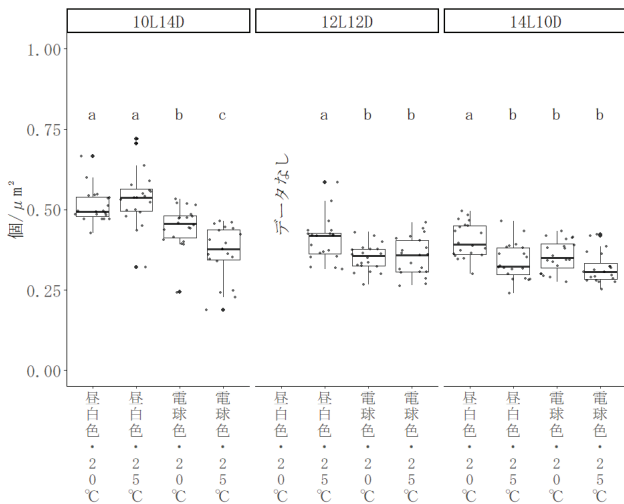


図8 日長周期ごとに比較した胞子のう数の箱ひげ図とプロット図. 日長周期の試験区ごとの異なるアルファベットはTukey-HSD法による多重比較において有意差 ($p < 0.05$)があることを示す.

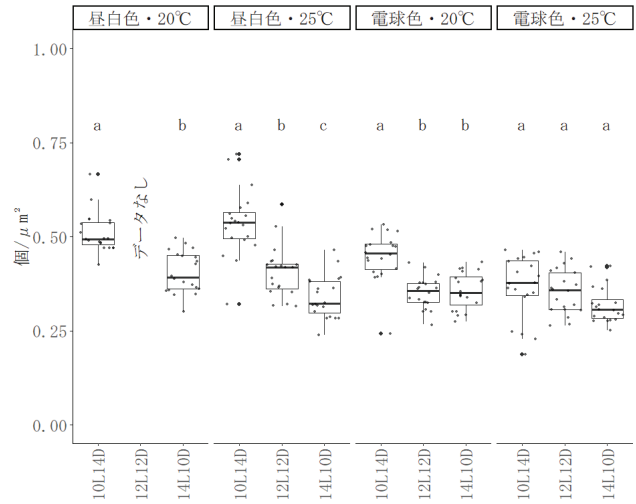


図9 光源・水温ごとに比較した胞子のう数の箱ひげ図とプロット図. 光源・水温の試験区ごとの異なるアルファベットはTukey-HSD法による多重比較において有意差 ($p < 0.05$)があることを示す.

とが知られている¹⁵⁾。今後さらに効率的にカキ殻糸状体を培養していくためには、緑、白、赤色光など局所的に異なる波長を用いて試験を実施し、糸状体伸長期の適正な光源についてさらに検討していく必要がある。

日長周期については、いずれの光源と水温の組み合わせにおいても12L12Dが最も生長がよかった。黒木、佐藤¹⁶⁾は、サンプル数が少なかったこともあり、暗期9時間以上ではスサビノリの糸状体の伸長に差異を見出すことができなかったが、本研究において、水温や光強度によって多少差異はあると思われる、スサビノリ糸状体の伸長においては暗期12時間が適正であることが示唆された。また、電球色光源の試験区において10L14Dよりも14L10Dの生長が良かったことから、スサビノリの糸状体は短日よりも長日条件において生長がよいと考えられる。

2. 胞子のう形成期の評価

光源については、いずれの試験区においても昼白色光源が電球色光源より胞子のうの形成に有効であることが分かった。

本試験で用いた、昼白色光源と電球色光源を比較すると、昼白色光源は430nm～480nmの低波長の範囲が広く、電球色光源は580nm～680nmの高波長の範囲が広がっている(図3)。他藻類では、褐藻のモズク(*Namacystus decipiens*)の単子のう¹⁷⁾とアラメ(*Eisenia bicyclis*)の配偶体¹⁸⁾において低波長の青色光による成熟促進が報告されている。また、團¹⁴⁾はワカメ配偶体の成熟が高波長の赤色光において阻害され、青色光が少しでも混ざると成熟が進むことを報告している。したがってこれらの報告のようにスサビノリにおいても、低波長の青色光の範囲が広く、高波長の赤色光の範囲が狭い昼白色光源が胞子のうの形成を促進したと考えられる。

続いて、日長周期についてはいずれの試験区においても、10L14D試験区の胞子のう形成数が多かった。黒木、佐藤¹⁶⁾はスサビノリ糸状体の胞子のう形成に適した暗期は16時間、14時間と同じかもしくはこれよりやや短い時間と報告しており、本研究の結果でも同様の傾向を示した。

3. 最適なカキ殻糸状体の培養スケジュール

本研究の結果をもとに効率のよいカキ殻糸状体の培養条件と培養スケジュールを作成した(図10)。

光源について、糸状体伸長期は電球色光源の伸長が良い試験区もあったが、昼白色試験区においても問題なく伸長し、また、胞子のう形成期は昼白色光源が有効であった。スサビノリの胞子のうの成熟について、川村ら¹⁹⁾は赤色光が成熟を能動的に抑制していることを報告しており、胞子のう形成後に採苗に向けて熟度を調整する場合は、電球色光源に比べて赤色光の波長範囲が狭い昼白色光源が適していると推察される。したがって光源の取り換えの手間と費用を考慮すると、光源は昼白色光源を用いることが有効と判断された。

一般的に漁業者はフリー糸状体の散布を12月～4月に行い、10月の採苗まで最大約10か月間をかけて、水温と光条件の管理、カキ殻表面の汚れの除去等の管理を行いながらカキ殻糸状体を培養する。本研究では、フリー糸状体散布から約3か月後にはカキ殻上を糸状体が全体を覆い、殻全体が黒くなるのを確認した。熟度の調整を考慮しても、フリー糸状体散布後から概ね100日前後で採苗に利用することができ、一般的な培養方法と比較すると、最大7か月短縮して培養可能である。

培養期間の短縮は、漁業者の作業量の削減のみならず、栄養剤や光熱費等の経費削減に伴う漁家経営への後押しや、病気の感染期間の減少に伴うリスク低減によって安定採苗へとつながられる。また、短縮化した糸状体の管理の時間を養殖資材の準備等に充てることが出来、作業の効率化にもつながる。

カキ殻糸状体の培養期間の短縮に伴う、フリー糸状体の準備期間のずれについて、カキ殻糸状体を自家培養する場合、カキ殻糸状体に散布するフリー糸状体は自家で培養するか、業者から購入する必要があるが、フリー糸状体は散布前に熟度の調整等が必要ないため、散布の期間がずれても問題はなく、本研究の現場への導入に伴う問題点は少ないと考えられる。

	状態	光源	水温	日長周期	期間
①	フリー糸状体散布 ～糸状体伸長期	昼白色	20℃	12L12D	42日間培養
②	胞子のう形成期	昼白色	25℃	10L14D	35日間培養
③	採苗に向け熟度促進	昼白色	20℃	10L14D	14日
④	採苗				

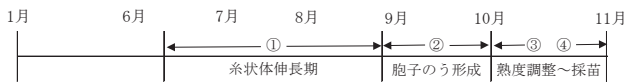


図10 本試験の結果を考慮した最適なカキ殻糸状体の培養条件と培養スケジュールの目安

文 献

- 1) 気象庁. 過去の気象データダウンロード.
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>, 2024年10月31日閲覧
- 2) 黒木宗尚, 秋山和夫. 数種のアマノリの糸状体の生長・成熟と水温. 東北区水産研究報告 1966 ; 26, 77-89.
- 3) 右田清治. ノリ糸状体の生長に及ぼす環境条件と培養液のpH変化について. 長崎大学水産学部研究報告 1959 ; 8, 207-215.
- 4) 黒木宗尚, 佐藤誠一. アマノリ類の糸状体の生長・成熟と光条件 II アサクサノリの糸状体の生長・成熟と日長. 東北海区水産研究所研究報告 1962 ; 20, 127-137.
- 5) 渡邊博之. LEDの植物栽培利用. 応用物理 2008 ; 77 (11) , 1298-1302.
- 6) 岡本 保, 高橋邦夫, 大枝真一, 大澤 寛, 小林 智, 岡部憲幸, 吉屋重和, 原田 誠, 石井弘允. 高効率LED集魚灯の技術開発 2014. 照明学会誌, 98 (12) , 622-625.
- 7) 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 2012. 水産技術 ; 4 (2) , 51-55.
- 8) 高橋明義, 清水大輔, 都留久美子, 木藪仁和, 水澤寛太. 緑色光照射によるホンガレイとヒラメの成長促進. アクアネット (別刷) 2019 ; 22 (4) , 44-49.
- 9) 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 2011 ; 59 (1) , 101-107.
- 10) 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 Resource 2012 ; 5 (2) , 61-69.
- 11) 川村嘉応. 種のかくり方. 新・海苔ブック基礎編 のり産業情報センター出版, 福岡. 2017 ; 80-93.
- 12) 安部 昇. ノリの育種及び育種管理に関する研究. 福岡県有明水産試験場臨時研究報告 1986 ; 18-28.
- 13) 二羽恭介. ノリの生育・生長・成熟と環境条件. ノリの科学 朝倉書店出版, 東京. 2020 ; 64-68.
- 14) 團昭紀. 発光ダイオードを使った藻類の培養. 平成 15 年度徳島県立農林水産総合技術センター水産研究所事業報告書 2005 ; 77-78.
- 15) 佐野 孝. ノリ糸状体の色素並びに酸素放出について. 東北海区水産研究所研究報告 1960 ; 17, 38-44.
- 16) 黒木宗尚, 佐藤誠一. アマノリ類の糸状体の生長・成熟と光条件 III種による日長作用の差異. 東北海区水産研究所研究報告 1962 ; 20, 138-156.
- 17) 山岸 大. モズク胞子体 (成体) の生長および光合成に及ぼすLED光照射の影響. 石川県水産総合センター研究報告 2019 ; 6, 23-27.
- 18) 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 2014 ; 62 (4) , 147-152.
- 19) 川村嘉応, 木村圭, 折田亮, 水谷雪乃, 小林元太. 光質が異なる LED 照射下におけるスサビノリ殻胞子嚢の成熟と殻胞子放出. 水産増殖 2022 ; 70 (1) , 47-54.