

海洋深層水によるスサビノリ (*Neopyropia yezoensis*) 陸上養殖の優位性

Possibility of land-based aquaculture of seaweed Nori (*Neopyropia yezoensis*) using Deep Sea Water

秋田もなみ・阿部祐子*・竹田匠輝*・堀田敏弘
岡本佳乃・河野敏夫・伊吹哲・山本浩
(*高知県工業技術センター)

要旨

海苔の生産量減少と「色落ち」問題に対処するため、クロノリ養殖現場で最も多く用いられているスサビノリ (*Neopyropia yezoensis*) を用いて、一般的な海水 (表層水) に対する海洋深層水 (深層水) を用いた陸上養殖の優位性について検証した。深層水を用いた培養によって、温度統一下であっても表層水培養の物と比較して生長率が高く、藻体色が濃くなった。また深層水培養によって藻体中のクロロフィルおよび遊離アミノ酸含量が顕著に増加した。さらに「色落ち」したノリを一定期間深層水で畜養することによって、色調が回復することを確認した。これらの結果は、深層水の利用が本種の陸上養殖に有用であり、加えて「色落ち」ノリの色調回復によって単価上昇や廃棄ノリ減少に繋がる可能性を示唆している。

1. はじめに

我が国の海苔 (クロノリ) の生産量は 2000 年代以降急激な減少が続く、近年では約 70 億枚/年にまで減少し、これに伴い生産額もピーク時の半分以下の約 700 億円にまで減少している (水産庁, 2023) (図 1)。また海面養殖の現場において海苔の「色落ち」と呼ばれる問題が毎年のように発生しており、単価を下げる原因となっている (和西, 2010; 原田ら, 2015; 村山ら, 2015)。

これら二つの課題の主な要因として、温暖化に伴う海水温の上昇 (杉野ら, 2007; 清水ら, 2019、清水ら, 2021)、鳥や魚による食害 (草加, 2007; ノリ養殖通報, 2023; 水産庁, 2023) および海水の栄養塩濃度の低下 (伊藤, 2012; 亀井ら, 2013; 高木ら, 2020) が考えられている。通年で低温、かつ表層水の 5~20 倍濃度の栄養塩類を含む (隅田ら, 2001) 海洋深層水 (以下、深層水) を用いた陸上養殖は、これらの問題の解決の一助となるのみでなく、従来は海水温の関係から冬期を中心に養殖されていたクロノリの通年養殖を可能とし、生産

量拡大につなげることが期待できる。

一方過去の研究より、一部の大型藻類において深層水培養による色調の回復や濃色効果が示唆されている (阿部, 2007; 小林ら, 2013)。これをクロノリにも応用し、海面養殖で毎年多量に発生する「色落ち」が発生したノリを、一定期間深層水で畜養することで色調を回復させる効果が期待できる。

本研究では、現在国内でもっとも多く養殖に用いられているクロノリの品種であるスサビノリ (*Neopyropia yezoensis*) を対象種として用いた。これまでに深層水を用いた本種の培養研究を行った例は数例 (須藤ら, 2002; 渡辺ら, 2004; 阿部ら, 2007; 伊藤, 2015) であり、表層水培養との比較についても基本的な生長量の差を *in vitro* で確認するのみに留まっている (渡辺ら, 2004)。本研究では深層水を用いた本種の陸上養殖に関する基礎的知見を得るため、本種の生長、組織形態およびアミノ酸組成のそれぞれにおよぼす深層水の効果を表層水との比較によって把握すると同時に、本

種「色落ち」ノリの深層水への畜養による色調回復効果を検証することを目的とした。

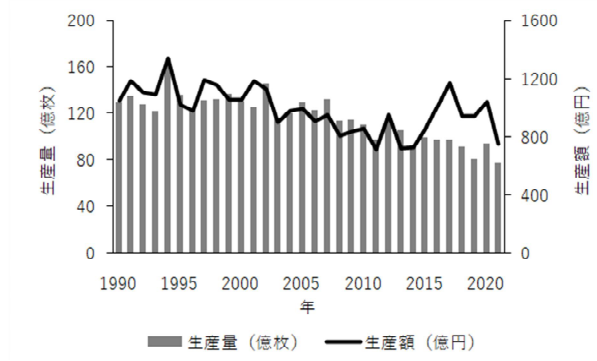


図1 国内のクロノリ生産量および生産額の推移 *農林水産省「漁業・養殖業生産統計」より 著者作成

2. 方法

2.1 スサビノリの培養条件

2020年に兵庫県漁業協同組合連合会より本種の冷凍網を購入し、試験に用いた。冷凍網は深層水をかけ流して解凍および予備培養を行った。幼芽が3cm以上に生長した時点でそぎ取って試験藻体とし、100Lアルテミア水槽に収容した。海水は熱交換プレートM3-FG(アルファ・ラバル(株))によって温度を合わせた表層水および深層水を使用し、換水率を1日10回転(0.7L/min.)に設定した。水槽には球形のエアーストーンを投入し、常時通気を行うことで藻体を攪拌した。藻体重量は脱水機により1分間脱水した後計量し、また計量は1週間毎に行った。各試験水槽にはロガーを設置し、水温を測定した。試験期間は2022年11月22日~2022年12月12日までの21日間であり、培養期間終了後、以降の各試験に供した。に一部を採取し、組織形態観察および色調回復効果の検証に用い、残りを凍結乾燥し、粉碎した後クロロフィルおよび遊離アミノ酸の分析まで-80°Cで保管した。

2.2 組織形態の観察

培養終了後に一部を採取し、正立顕微鏡ECLIPSE Ni((株)ニコン)を用いて各試験区の生ノリ藻体の組織形態を観察した。

2.3 クロロフィル量の測定

粉末サンプルと蒸留水を混合し、軽くボルテックス後、超音波抽出した。その後アセトンを加え、よくボルテックスし、再度超音波抽出した。3000rpm, 室温で5minで遠心し、タンパク質を沈殿させた後、可視分光光度計Ultrospec 2100 pro(Biochrom Ltd.)を用いて、上清の吸光度を663および645nmの二つの波長で測定した。Arnon(1949)に従い、各波長での測定値を下記の式に当てはめ、クロロフィルa(Chl a)、b(Chl b)および総クロロフィル量(Chl a + b)を算出した。

$$\text{Chl a} = 12.7 * A_{663} - 2.69 * A_{645}$$

$$\text{Chl b} = 22.9 * A_{645} - 4.68 * A_{663}$$

$$\text{Chls a + b} = 20.2 * A_{645} + 8.02 * A_{663}$$

2.4 遊離アミノ酸の分析

川村ら(1998)の方法に従い、凍結乾燥および板ノリ作成後に粉碎したスサビノリを0.2Mクエン酸緩衝液でホモジナイズした後、超音波処理によって遊離アミノ酸を抽出した。ろ過後、上澄みをコスモスピンフィルターG(ナカライテスク(株))でフィルタリングし、高速アミノ酸分析計LA8080((株)日立ハイテクサイエンス)で分析した。

2.5 深層水畜養による色調回復効果の検証

外観から「色落ち」が確認された本種藻体を深層水中に1週間畜養し、外観の観察によって色調の回復効果を確認した。

3. 結果

3.1 表層水および深層水培養の比較

3.1.1 期間中の重量変化

期間中の平均水温は表層水区および深層水区で、各々16.6±1.0および16.5±1.3°Cであった。またこの間の藻体の日間生長率は、各々8.7および9.5%であった(図2)。

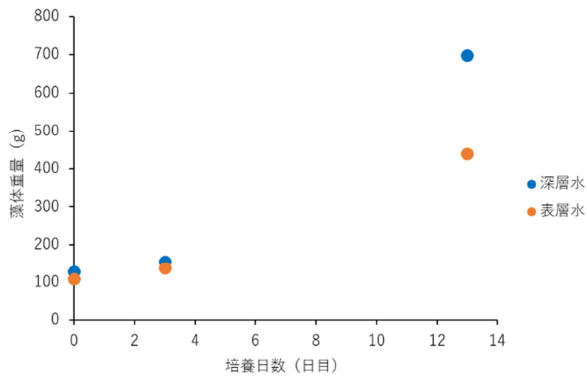


図2 培養期間中における藻体重量の経時変化。青丸および赤丸は、各々深層水および表層水培養を示す。

3.1.2 組織形態

図3は各試験区のノリで作成した板ノリの外観である。表層水区と比較して明らかに深層水区で色が濃いことが分かる(図3)。また顕微鏡による生ノリの組織観察では細胞内・細胞間の間隙が深層水区で小さく、細胞同士が密であった(図4)。

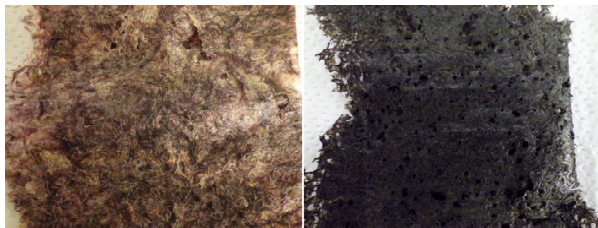


図3 表層水(左)および深層水(右)培養した本種で作成した板海苔の外観。

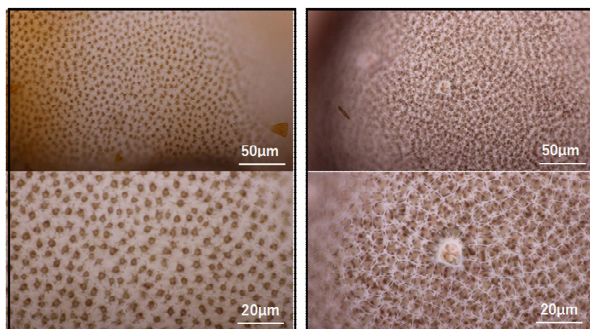


図4 表層水(左)および深層水(右)培養した本種の顕微鏡写真。

3.1.3 クロロフィル含量

深層水区のクロロフィル量は、クロロフィルの種類に関わらず、表層水区よりも2倍以上多く含まれていた(図5)。

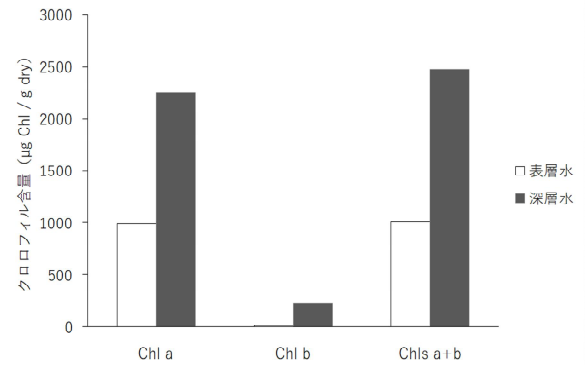


図5 表層水(白)および深層水(黒)培養した本種のクロロフィル a、b および総クロロフィル含量。

3.1.4 遊離アミノ酸組成および含量

表1に各試験区の生ノリおよび板ノリの遊離アミノ酸組成を示した。アミノ酸種によって差があるものの、深層水培養のノリは生ノリおよび板ノリの形態に関わらず、遊離アミノ酸量が平均して2~5倍多かった。また総アミノ酸量は表層水および深層水区で、生ノリでは各々699および3379 mg/100g dry、板ノリでは各々831および3649 mg/100g dryであった。

表1 表層水および深層水培養した本種の遊離アミノ酸含量 (mg/ 100g dry)

	表層水生ノリ	深層水生ノリ	表層水板ノリ	深層水板ノリ
P-Ser	0	21	22	66
Tau	303	1662	274	1433
PFA	0	26	12	43
Asp	52	144	37	223
Thr	0	25	20	45
Ser	0	19	24	35
AspNH2	0	22	40	48
Glu	193	667	157	700
GluNH2	0	0	32	134
Gly	7	22	18	38
Ala	101	565	162	513
Cit	0	101	0	82
Val	0	20	13	48
Ile	0	10	0	25
Leu	0	19	10	47
Tyr	0	0	0	17
Phe	0	0	0	30
b-Ala	0	14	0	12
g-ABA	0	13	10	23
NH3	43	0	35	0
Orn	0	10	0	12
Lys	0	12	7	30
Arg	0	7	7	45

3.2 深層水畜養による色調回復効果

図6は表層水培養によって色落ちした本種藻体を深層水培養に移して色の経時変化を見た写真である。深層水で畜養して5日目には、元から深層水培養の物と比較して目視でほとんど差が分からないほど、色調が回復していた。

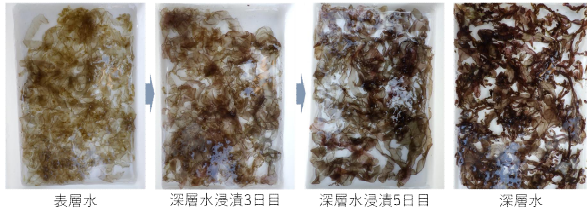


図6 「色落ち」ノリの深層水浸漬による経時変化。

4. 考察

温度統一下の培養では、深層水区でより高い日間生長率を示し、最終収量も多かった。これは渡辺ら（2004）が報告した結果に沿うものである。また二村ら（2006）は褐藻カジメ幼体でも表層水との比較培養において深層水区でより早い生長速度を報告している。その一方で田島ら（2002）は緑藻アナオサおよび褐藻フシスジモクでは深層水培養による生長率の増加が見られたものの、褐藻のウスキウチワおよび紅藻のマクサでは同様の効果が見られなかったと報告しており、深層水による生長促進効果は海藻種によって異なることが予想される。

本試験ではノリの外観は深層水区でより色調が濃くなり、またクロロフィルの含有量も高かった。さらに同区では遊離アミノ酸の含量も高く、総遊離アミノ酸量は深層水区では表層水区と比較して、生ノリでは4.8倍、板ノリでは4.4倍の含有量を示した。佐多ら（2011）は紅藻イソノハナを深層水培養することで、表層水培養の物よりリンや亜鉛、タンパク質等が増加することを明らかにしている。同様に田島（1998）は褐藻マコンプおよびカジメでは深層水培養によってタンパク質含量が増加することを報告した。両者ともにその要因として深層水中の豊富な栄養塩濃度を挙げているが、本試験においても同じ理由で深層水区では藻体内でのアミノ酸の合成（窒素同化）が促進されたことが示唆された。

深層水が海藻の生長率や各種成分の変化に与える影響の種間差は今後さらなる研究が待たれるが、少なくとも本種においては深層水を用いた陸上養殖を行うことで色調が濃い色で安定し、また豊富なアミノ酸を含むノリを生産可能であることが示

唆された。加えて同区では生長率も高かったことから、生産量の増加にも繋がる可能性があり、クロノリ養殖における深層水利用の優位性が示される結果となった。

現在広く行われている表層水や地下海水（平均20℃前後（Sato et. al, 1984；江端ら、2006））を用いた陸上養殖は、本種の生育適温（8～15℃（松村ら、2003））から考えると高く、栽培期間が限定される、冷却コストが高額になるといった課題がある。また河川から供給される無機栄養塩類の減少によって、これらの水源を用いる場合は施肥が必要となる可能性も高い。他方、低水温・豊富な無機栄養塩という特性を有する深層水を用いた本種の養殖は、高品質なノリを多量に生産できるというだけで無く、特にコスト的なメリットも大きいと考えられる。

加えて本研究では、海面養殖におけるノリの「色落ち」問題の解決の一助となるべく、深層水の持つ海藻の色調回復効果についても検証した。ノリは図7 a)に示したサイクルを回すことで色調を保持しながら生長している。このサイクルは一度止まってしまっても（図7 b)ノリが枯死するまでは、再度動き出すことが可能である（張ら、2009）。本研究の結果から、無機栄養塩が豊富な海洋深層水に一定期間浸漬したことで窒素同化が再び進み、一度色落ちしたノリも色調が回復したと考えられる（図7 c)。本手法は「海藻のタラソセラピー」と呼べ、また本種に対しては一定の効果があることも示された。

本研究の結果をまとめると、深層水は本種の「陸上養殖」に有益であるだけでなく、海面養殖で色落ちしたノリの「色調回復」にも活用可能であることが示唆され、この両軸から我が国の海苔生産量の拡大と品質の向上に寄与しうると考えられる。本研究で得られたデータを基に、今後は室戸市内の企業と共同でフィールド試験を行っていく。さらに生産現場で効率の良い深層水の換水率や継代方法の検討など、B/Cを意識した試験についても随時実施していく。

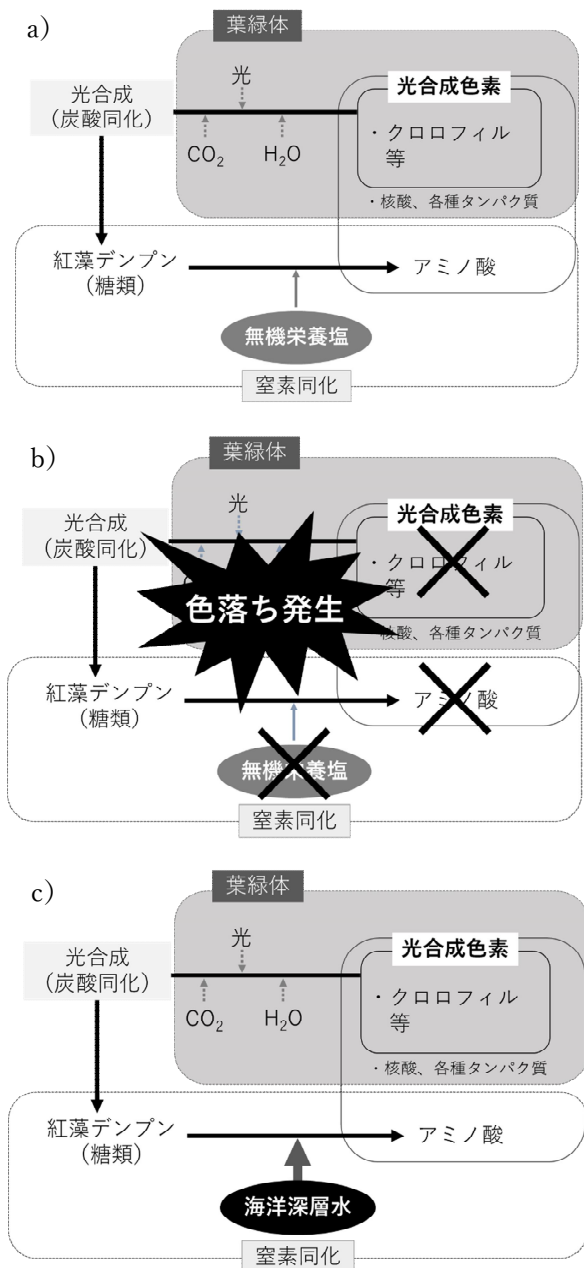


図7 a) 無機栄養塩を使って光合成色素が作られるサイクル、b) 無機栄養塩の欠乏によって「色落ち」が発生するメカニズムおよびc) 海洋深層水への浸漬によって色調が復活した原理の模式図。

5. 引用文献

- ・阿部祐子・渡辺貢 (2009) 地域特産海藻の培養とその利活用に関する研究. 高知県海洋深層水研究所報, 8, 25-29.
- ・伊藤寛治 (2015) 海洋深層水を利用したアサクサノリの周年陸上養殖実用化試験-XI?アサクサ

ノリとスサビノリの生長性比較-. 沖縄県海洋深層水研究所研究業務報告, 第16号, pp

- ・伊藤龍星 (2012) 鉄鋼スラグを利用した養殖ノリへの施肥の試み. Bull. Oita Pref. Agri. Forest. Fish. Res. Cent. (Fish. Div.), No.2, 7-12.

- ・江端弘樹・佐藤義夫・福江正治・畠田智・榎田和彦 (2006) 地下海水を陸上養殖に利用する可能性と問題点ならびに対応策 Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 60, 110-118

- ・亀井良則・古村振一 (2013) 平成25年度ノリ養殖概況, 岡山県農林水産総合センター水産研究所資料, pp

- ・川村嘉広・鷺尾真佐人 (1998) ノリに含まれる遊離アミノ酸の簡易抽出法. 佐水研報, 18, 1-5.

- ・草加耕司 (2007) クロダイによる養殖ノリの摂餌試験. 岡山水試報, 22, 15-17.

- ・小林美樹・小川晃弘・熊谷敬之・藤田大介 (2013) 富山湾深層水を用いた紅藻ミリン *Solieria pacifica* の成長と体色改善. Deep Ocean Water Research, 14(1), 27-33.

- ・佐多忠夫・稲荷陽子 (2011) 海洋深層水を利用したイソノハナの陸上養殖に関する研究?深層海水と表層海水の培養による成分比較-. 沖縄深層水研報, 9号, pp

- ・Sato, Y., H. Matsumoto, S. Okabe and N. Takematsu (1984) The oxidation rate constant and the residence time of manganese in seawater pumped from underground. La mer, 22, 241-247.

- ・清水泰子・草加耕司 (2021) 岡山県の浮き流し養殖漁場における養殖ノリの高水温適応育種素材の特性 (2020年度). 岡山水研報告, 36, 75-81.

- ・隅田隆・田村愛理・川北浩久. Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn, 55, 158-165.

- ・須藤祐介・新城綾子・玉城英信 (2002) 海洋深層水を利用した海藻類の陸上養殖研究-I -クビレオゴノリ・スサビノリに対する栽培効果の検討 -. 沖縄県海洋深層水研究所研究業務報告, 第3号,

- ・杉野博之・清水泰子・野坂元道 (2007) 平成18年度ノリ養殖概況. 岡山水試報, 22, 159-161.

- ・清水泰子・草加耕司 (2019) 岡山県の浮き流し養殖漁場における養殖ノリの高水温適応育種素材

の特性. 岡山水研報告, 34, 12-17.

- ・高木秀蔵・濱崎正明・山下泰司・片山貴之・阿保勝之(2020) 児島湾周辺海域における底泥間隙水中の栄養塩濃度と海底耕耘による栄養塩供給量の評価. 岡山水研報告, 35, 1-9.
- ・田島健司(1998) 海洋深層水による大型海藻類の培養技術開発. 高知県海洋深層水研究所報, 3号, 18-28.
- ・田島迪夫・永田房雄・杉本洋(2002) 数種海藻の海洋深層水での培養. Bull. Ishikawa Pref. Fish. Res. Center, 3, 33-37.
- ・Daniel I. Arnon (1949) COPPER ENZYMES IN ISOLATED CHLOROPLASTS. POLYPHENOLOXIDASE IN BETA VULGARIS. Plant Physiol, 24 (1), 1-15.
- ・張経華・佐藤友規・丸山亮馬・高尾雄二・畝中佑・藤田雄二・山崎素直(2009) 有明海のノリの色落ちと微量元素欠乏－特に鉄欠乏について. Bull. Soc. Sea Water Sci., Jpn., 63, 158 -166.
- ・二村和視・岡本一利・高瀬進(2006) 駿河湾深層水中で培養したカジメ *Ecklonia cava* (Phaeophyceae) 幼体の生長 表層海水との比較および光量・水温の影響. Deep Ocean Water Research, 7(1), 9-15.
- ・原田和弘・宮原一隆・近藤敬三(2015) 下水処理施設の栄養塩管理運転に伴う周辺水域の溶存態無機窒素(DIN)濃度の動態. Bull. Hyogo Pref. Tech. Cent. Agr. Forest. Fish. (Fish. Sec.), 44, 29-33.
- ・松村眞作・藤澤邦康・篠原基之・杉野博之(2003) 岡山県における水温とノリの秋芽網生産量の関係. 岡山県水産試験場報告, 18, 16-23.
- ・村山史康・清水泰子・高木秀蔵(2015) 岡山県ノリ漁場における栄養塩濃度とノリの色調および乾海苔単価との関係. Nippon Suisan Gakkaishi, 81(1), 107-114.
- ・和西昭仁・小柳隆文・畑間俊弘(2010) 周防灘における栄養塩の減少とノリ養殖の衰退. Bull. Yamaguchi Pref. Fish. Res. Ctr, 8, 67.
- ・渡辺裕一・羽土真・村瀬昇・水上譲(2004) アマノリ養殖種の生長に及ぼす海洋深層水の効果.

Journal of National Fisheries University, 52 (4), 165-170.