

資源増殖・水産工学シリーズ

北海道産アオサ属海藻の陸上養殖の現状と展望

キーワード：道産海藻、アオサ属、青海苔、陸上養殖、環境変動

はじめに

近年、北海道における漁業生産量はサンマ、スルメイカなどの主要な魚種の減産によって低い水準で推移しています¹⁾。コンブ類については、海洋環境の変化に起因すると考えられる群落の衰退が見られ、特に道南海域では深刻な状況が続いています。このため、今後、天然資源に依存しない養殖業への関心は一層高まることが予想されます。ただし、道内の漁業就業者数は減少傾向にあるうえ²⁾、高齢化も進んでおり、大規模な海面養殖を展開することは困難と考えられます。そこで、将来を見据え、労力をかけずに安定した収入が得られる可能性のある海藻の陸上養殖に注目しました。

稚内水産試験場では海藻の陸上養殖事業化に向け、様々な海藻の培養実験を行い、陸上養殖に適した種を選定してきました³⁾。現在はその中で高単価かつ生産効率の良いアオサ属海藻のほか、数種の有用海藻の陸上養殖技術を開発するため、培養実験や陸上養殖試験を行っています。本稿では現行の北海道産アオサ属海藻に関する試験研究の進捗状況を紹介します。

アオサ属海藻について

緑藻アオサ属の海藻には、海岸でよく見かけるアナアオサをはじめ、産業的に利用されるスジアオノリなどが含まれます⁴⁾。

アオサ属海藻は、単相の配偶体と複相の孢子体があります。両世代は同じ形をしているため、こ

のような生活環は一般に同形世代交代と呼ばれます(図1)。配偶体には雌性体と雄性体が存在しますが、これらも同じ形をしており、同様に外見からは区別できません。孢子体は成熟すると4本の鞭毛を有する微小な遊走子を放出します。それらは発芽して配偶体となります。雌雄の配偶体からは、それぞれ2本の鞭毛を有する微小な配偶子が放出されます。それらが接合し、発生したものが孢子体です。ただし、配偶子のなかには接合せずに個々に発生して再び配偶体になる(単為発生)こともあります。アオサ属海藻は同型世代交代を基本としていますが、単為発生が見られるなど、その生活環は少し複雑です。

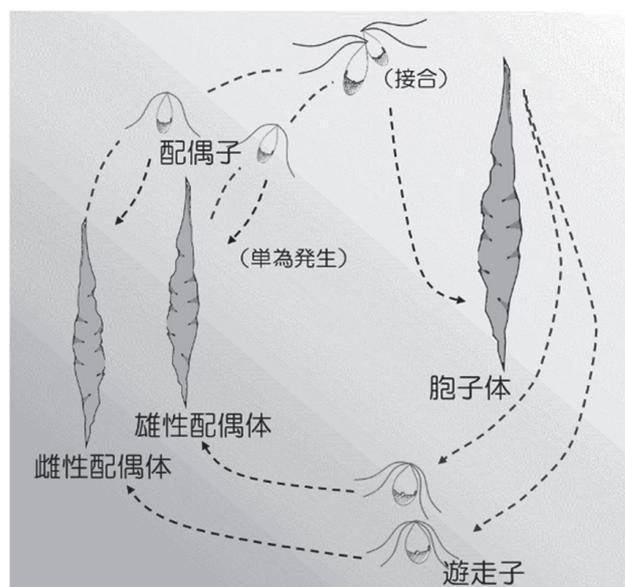


図1 アオサ属海藻の生活環の一例

北海道におけるアオサ属海藻の利用状況

アオサ属海藻の一部は「青海苔」や「あおさ」、「あおさ海苔」として製品化され、それらの粉末は焼きそばやお好み焼き、スナック菓子などに振りかけて使用されます。北海道においても、かつてはアナアオサやウスバアオノリなどが食用に採集されていたことがあったようですが⁵⁻⁷⁾、今はほとんど利用されていません。道外では養殖が行われており、スジアオノリについては既に大規模な施設を利用した陸上養殖も取り組まれています。近年は、道内でも企業や市町村が陸上養殖事業に関心を示しており、稚内水産試験場は連携して養殖事業化を目指しています(写真1)。

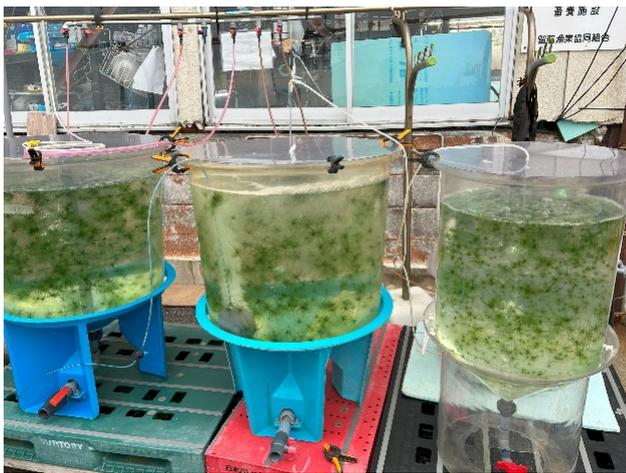


写真1 留萌市で行われているアオノリの陸上養殖試験。地場のアオノリを使用している

道産アオサ属海藻の収集と保存

培養実験や陸上養殖試験で使用するため、北海道内の25地点から31株のアオサ属海藻を採集しました。それらの形態を観察した結果、未同定種を含む8種が認められました(表1)。

採集した藻体は、夾雑物を取り除くために水道水と1 μ m孔径のカートリッジフィルターで濾過した海水(以下、濾過海水)でよく洗浄しました。次に藻体から5mm角程度の葉片を3枚切り出し、それらの葉片を滅菌した濾過海水で洗浄すると

もに、ペーパータオルを用いて表面の付着物を取り除きました。洗浄後、それらの葉片は水温15 $^{\circ}$ C、照度4000~5000 lux、光周期12時間明期(L):12時間暗期(D)(以下、12L:12D)の条件下、1mlの酸化ゲルマニウム溶液(2mg/l)を添加した1lの栄養強化海水(以下、PES培地⁸⁾)中で、エアレーションによる攪拌を行いながら培養(以下、通気培養)しました。このように培養した葉片から遊走子または配偶子を採取し、培養株を確立しました。

北海道沿岸には収集したほかにも、いくつかの種が報告されています⁹⁾。今回、形態的な特徴から種が判別できなかったものについては、遺伝子解析の結果から種を同定する予定です。

表1 採集したアオサ属海藻のリスト

種名	学名	採集地点	株数
アナアオサ	<i>Ulva australis</i>	紋別市海洋公園、紋別市コムケ湖、稚内市声間、稚内市弁天島、留萌市三泊ほか	13
ヒラアオノリ	<i>Ulva compressa</i>	留萌市三泊	1
ボウアオノリ	<i>Ulva intestinalis</i>	網走市美岬、稚内市声間、留萌市三泊、奥尻町奥尻、襟裳町東洋	6
ウスバアオノリ	<i>Ulva linza</i>	網走市二ツ岩、稚内市弁天島、礼文町差閉、留萌市三泊、神恵内村神恵内漁港ほか	7
スジアオノリ	<i>Ulva prolifera</i>	稚内市宗谷岬	1
アオサ属の一種	<i>Ulva</i> spp.	佐呂間町浪速、函館市湯ノ浜、釧路町昆布森	3

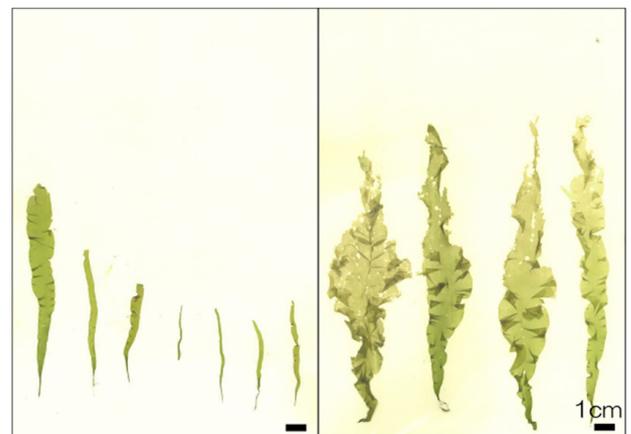


写真2 2022年11月29日に神恵内村神恵内漁港で採集されたボウアオノリ(左)と2022年6月10日に礼文町差閉沖で採集されたウスバアオノリ(右)

培養実験

今回は3種4株（神恵内村産のボウアオノリ、礼文町産と知内町産のウスバアオノリ、稚内市産のスジアオノリ）の試験結果を紹介します。ボウアオノリやウスバアオノリは産業的にあまり使われない種です。これらはスジアオノリと同様に日本各地に分布する種で、北海道沿岸にも生育しています。前者は細長い管状の藻体で（写真2左）、後者は薄く、幅広の膜状の藻体です（写真2右）。

実験には培養株から生産した葉長1cm前後の個体を用い、水温5.0～27.5℃まで2.5℃ずつ変化させた10試験区を設定し、照度約4000 lux、光周期12L:12Dの条件下、市販されている栄養剤のKW21（第一製網株式会社）を0.125 ml添加した0.5 lの滅菌濾過海水中に6個体を収容して通気培養しました。試験期間は2週間とし、1週間毎に湿重量を測定して、その期間中の日間生長率を算出しました。なお、各試験区につき3回の試験を行い、それぞれの試験で得られた日間生長率の平均値（以下、平均の日間生長率）を各試験区の値として採用しました。

①神恵内村産のボウアオノリは5.0～12.5℃では、培養1週目の方が日間生長率は高かったですが、15.0～27.5℃では培養2週目の方が高くなりました（図2左上）。平均の日間生長率は、5.0～12.5℃では水温が上昇するにつれて増加しましたが、それ以上では一転して低下する傾向が見られました。遊走子の放出（成熟）は5.0℃を除くすべての条件で観察されました。

②礼文町産のウスバアオノリは、10.0～25.0℃では培養2週目に日間生長率が急激に低下しました（図2左下）。平均の日間生長率は、5.0～15.0℃では水温が上昇するにつれて増加する傾向が見ら

れました。また、15.0～25.0℃でも日間生長率は30.0%/day以上を維持しており、高水温下でも比較的よく生長することが確認されました。5.0℃～7.5℃、27.5℃では遊走子の放出量が少ない、あるいは成熟しませんでした。このことから、10.0～25.0℃で観察された日間生長率の急激な低下は、成熟に起因するものと考えられます。

③知内町産のウスバアオノリは、培養1週目と2週目で日間生長率に大きな変化は認められませんでした（図2右下）。平均の日間生長率は、5.0～22.5℃では水温が上昇するにつれて増加しましたが、それ以上では低下する傾向が見られました。なお、培養期間中にいずれの条件下でも成熟は認められなかったため、培養期間中に日間生長率が大きく変化することはありませんでした。

④稚内市産のスジアオノリの日間生長率は、5.0～15.0℃では培養2週目、17.5～27.5℃では培養1週目の方が高くなりました（図2右上）。平均の日間生長率は、5.0～20.0℃では水温が上昇するにつれて増加する傾向が見られました。15.0～22.5℃では日間生長率約30.0%/dayと比較的良く生長しましたが、5.0～7.5℃や25.0～27.5℃では著しく生長率が低下しました。なお、培養期間中にいずれの条件下でも成熟は認められませんでした。

以上、3種4株についての培養試験の結果を紹介しました。それぞれの株で最も生長した水温は、平均の日間生長率で比較すると、神恵内村産のボウアオノリは12.5℃、礼文町産のウスバアオノリは15.0℃、知内町産のウスバアオノリは22.5℃、稚内市産のスジアオノリは20.0℃であり、種間で生育に適した水温が異なることが示されました。

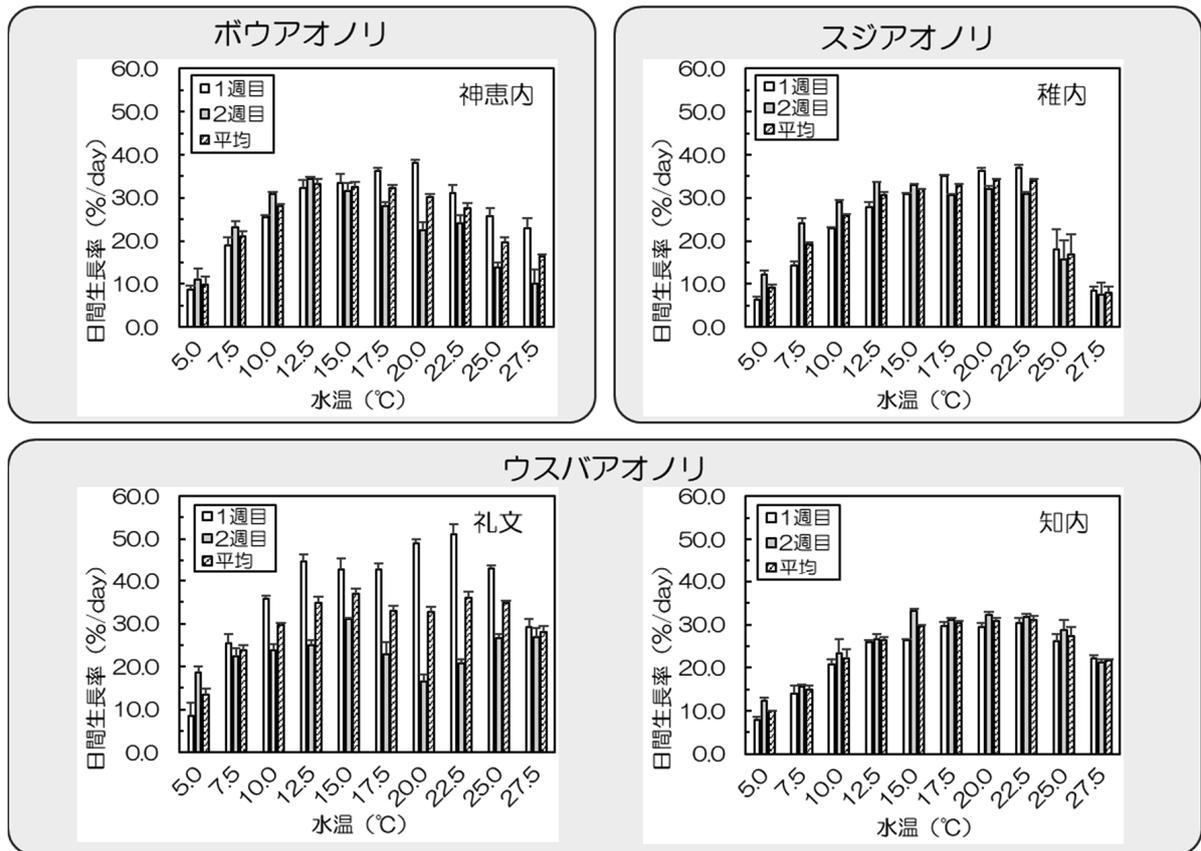


図2 アオサ属海藻3種4株の生長に及ぼす水温の影響. エラーバーは標準誤差を示している

ウスバアオノリについては株間で生長速度や成熟状況が異なり、水温に対する応答性に違いがあることが明らかとなりました。また、ウスバアオノリの天然個体は幅広であり（写真2右）、ボウアオノリやスジアオノリなどとは形態的に大きく異なりましたが（写真2左）、培養個体は他種に近い形になりました。（写真3）。なお、礼文町産の株は他の3株に比べて広い水温帯でよく生長するうえ、短期間の培養であれば日間生長率が50.0%/dayを上回ることから、成熟を抑制できさえすれば、陸上養殖の対象種として有望な株と言えます。

アオサ属の海藻のアオサやスジアオノリは細胞間に成熟を阻害する物質を持ち、それが藻体外に流出し、その濃度が低下すると成熟することが知られています¹⁰⁻¹¹⁾。また、スジアオノリでは培養液10ℓに10gより多くの藻体片を入れると、

水槽中の成熟阻害物質の濃度が上昇し、胞子形成阻害が生じると考えられています¹²⁾。これらのことから、密度を調整することで、ウスバアオノリやボウアオノリについても、成熟を制御できると推察されます。ただし、これまでに行った密度別の培養実験の結果では、密度を高めると日間生長率が低下し、収量が減少することが確かめられています。そのため、種または株ごとに収量を考慮した最適な密度の検討が必要であると考えます。陸上養殖では水温の調整に要する費用は、生産費用の大部分を占めます。種や株ごとの性質の違いを把握し、養殖時の気温または水温に合わせて、いくつかの株を使い分けることで、その費用を大幅に低減できると考えられます。この点を改善できると、陸上養殖事業化の実現に大きく近づきます。地道な作業が続きますが、引き続き同様の培養実験を行い、データの集積を図るつもりです。

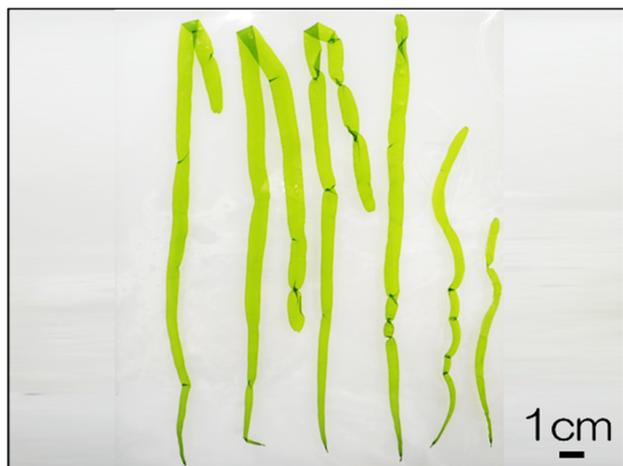


写真3 礼文町産ウスバアオノリの培養個体

陸上養殖試験

ここでは、培養試験で紹介した3種4株について、規模を大きくした陸上養殖試験の結果を紹介します。試験には培養株から生産した葉長数cm程度の種苗を使用しました。それらを100 lの円形水槽に約25.0 g入れ、水温15.0℃、照度8000 lux (水面付近)、光周期12L:12Dの条件下、紫外線で殺菌したうえ、25 mlのKW21と2 mlの酸化ゲルマニウム(2 mg/l)を添加した100 lの濾過海水中で1週間通気培養しました。試験は4回行い、各試験で得られた日間生長率や収量を比較しました。

その結果、神恵内産のボウアオノリの日間生長率は30.7%/day、礼文産と知内産のウスバアオノリは、それぞれ33.0%/dayと34.9%/day、宗谷産スジアオノリは31.5%/dayでした(表2)。養殖1週間で、重量は開始時9~10倍程度にまで増加しました。

スジアオノリでは海洋深層水や地下海水を連続的に給水した水槽で養殖試験が行われており、前者では日間生長率は最大60%/day¹³⁾ 後者では最大47%/day¹⁴⁾と報告されています。まずはこれらの数値を目標に、引き続き技術的な改良を進めたいと考えています。

表2 養殖個体の日間生長率と収量

株名	日間生長率(%/day)	収穫時の湿重量(g)
神恵内村ボウアオノリ	30.7±0.9	217.2±14.9
礼文町産ウスバアオノリ	33.0±1.0	252.3±16.2
知内産ウスバアオノリ	34.9±0.6	288.0±10.9
稚内市産スジアオノリ	31.6±0.4	228.8± 5.8

食味試験

ここでは、ボウアオノリとウスバアオノリ、スジアオノリについての試験結果を紹介します。

前述した養殖試験によって得られた収穫物(写真4-1)は、ザルに移して水道水でよく洗浄するとともに、枯死部や退色部、形態的異常が生じた個体を取り除きました。次にハサミでよく細断し、それらを海苔^すの上にひろげ、送風式乾燥器を用いて60℃で一晩乾燥しました(写真4-2)。乾燥した試作品は、14~21人を対象に食味試験とアンケート調査を実施しました。調査は点数制による評価方法を採用し、香りの有無のほか、風味や苦み(えぐみ)、塩味、食感について評価に応じた5段階の点数を与えました。回答は項目ごとに平均値を算出するとともに、全項目の合計点数(最高30点)を比較しました。

製造した試作品はやや厚みがあり、やや硬くはありましたが、一般に海苔(原料:アマノリ)と言われるものに類似したものができました(写真4-3)。養殖個体の形状が糸状または線状の場合は、きれいな板海苔に仕上がりましたが、葉幅の広い個体を使用した場合は、細断が不十分であると乾燥した際に板海苔の表面が粗く見えたり、穴があいたりすることがわかりました。

アンケート調査の結果、ボウアオノリは強い風味がある点は高評価でしたが、その他の項目については他種に比べてやや低い評価となりました(図3)。特に苦みを強く感じるとの回答が目立ち、各項目の合計点数は17.9点でした。ウスバアオノ



写真4 試作品の製造工程. 1:収穫した養殖個体, 2:乾燥工程, 3:乾燥品した試作品

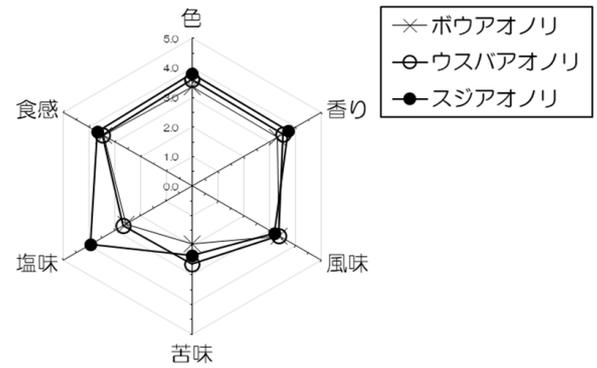


図3 アオサ属海藻3種についての食味総合評価

りは色や香り、風味、食感は、同様に養殖したスジアオノリに遜色ない評価が得られました。苦みが弱い点は良かったですが、スジアオノリに比べて塩味を強く感じる点が評価を落とすこととなり、各項目の合計点数は19.3点でした。スジアオノリは色や香り、食感が良いとの回答が得られました。やや苦味を強く感じる点以外は全体として評価が高く、各項目の合計点数は20.7点でした。

試作品は同じ方法で生産しているのので、各試作品の味の差は、種または株の違いに起因するものと考えられます。塩味の差は養殖個体の形態の違い、例えば、管状の藻体と膜状の藻体、部分的に管状をなす藻体とでは、藻体内の空間の大きさに差があり、藻体内の海水の抜け方に違いが生じたためと考えられます。塩味は水道水にさらす時間を長くすることで低減できましたが、同時に風味が損なわれてしまうため、頭を悩ませています。

アンケート調査の自由記述の回答では、「市販の青海苔に比べたら、いずれの試作品も味は良いし、香りも強い」という意見がありました。一方で、「市販品よりも苦味またはえぐみを強く感じる」との意見も目立ちました。ただし、料理に使用した場合は「苦味がアクセントとなって良い」や「お好み焼きなどに振りかけて使用すると苦味は気にならない」との意見もあったことから、ある程度の苦味は必要であることがわかりました。

あるいは用途に応じて、株を使い分けることも検討した方が良いかもしれません。今回は紹介できませんでしたが、既に道産のアオサ属の海藻13株についての食味試験を実施しています。程度の差はあるものの、いずれも苦味があることがわかっており、苦味は本属海藻の共通した特徴であると考えられます。今後、培養条件を改良するか、海外の知見なども参考にして加工方法を見直すなどして、苦味のみを低減できるか検証するつもりです¹⁵⁾。また、単体で食味を味わうか、あるいは料理の素材として使用するか、様々な用途も検討したいと考えています。

おわりに

今回、海藻の陸上養殖事業化に向けた道産アオサ属海藻の養殖試験の進捗状況を紹介しました。培養実験を通じて、種ごとに異なる温度特性を持っていることが明らかとなってきました。また、ウスバアオノリについては、同種でありながら株間でそのような違いが見られたことは興味深いことです。食味試験では、株ごとに苦みや風味の強さが異なることが示されました。今後は株ごとの温度特性や生産効率、味などを総合的に評価して陸上養殖に適した株を選定し、効率的な養殖技術の開発へと繋げたいです。

北海道沿岸には多数の有用海藻が生育していま

すが^{5, 7)}、コンブ類や一部の海藻を除いて、ほとんど未利用な状況です。本研究が北海道産の海藻を活用した新たな産業創出につながり、水産業の振興に貢献できるよう引き続き研究を進めていきます。

謝辞

試料の収集には栽培水産試験場栽培技術部、紋別市産業部水産課、網走市農林水産部、留萌市農林水産課、宗谷地区水産技術普及指導所礼文支所、胆振地区水産技術普及指導所、並びに檜山地区水産技術普及指導所奥尻支所の方々にご支援いただきました。食味試験やアンケート調査においては多数の方々からご支援と貴重な意見を賜りました。以上、関係者の方々に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 北海道水産林務部総務課 (2022)2022北海道水産業・漁村のすがた 北海道水産白書. 北海道, 札幌
- 2) 北海道水産林務部総務課 (2023)2023北海道水産業・漁村のすがた 北海道水産白書. 北海道, 札幌
- 3) 前田高志 (2023)海藻の陸上養殖事業化に向けて. 北水試だより,106号:5-9
- 4) 吉田忠生, 鈴木雅大, 吉永一男 (2015)日本産海藻目録 (2015年改訂版). 藻類, 63:129-189
- 5) 名畑進一 (2001)北海道有用海藻とその生産状況, 根室水産海洋研究年報第4号
- 6) 名畑進一 (2005)海藻アオサ類の分類と利用. 北水試だより, 69号:1-5
- 7) 木下虎一郎 (1947)未利用海藻の食用化. 北方出版社, 札幌.
- 8) Andersen RA (2005) Algal culturing techniques. Elsevier
- 9) 畷田 智, 横山奈央子, 増田道夫 (2007)北海道沿岸にアオサ属藻類. 植物研究史, 82:205-216
- 10) Dan A, Hiraoka M, Ohno M, Notoya M (2004) Activity of sporulation inhibitor in the green alga, *Enteromorpha prolifera*. Jpn. J. Phycol., 52:79-82

- 11) Hiraoka M, Enomoto S. The induction reproductive cell formation of *Ulva pertusa* Kjellman (Ulvales, Ulvophyceae). Phycol. Res., 1998; 46:199-203
- 12) 團昭紀 (2008)スジアオノリの生理生態学的研究とその養殖技術への応用. 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究所研究報告, 6:1-78
- 13) 江端弘樹, 平岡雅規 (2006)アオサ類の大量養殖. 日本船舶海洋工学会 講演会論文集第2K号, 101-104
- 14) 江端弘樹, 佐藤義夫, 畷田智, 四ツ倉典滋, 平岡政規 (2007)地下海水を用いた緑藻スジアオノリ陸上養殖の可能性. 水産増殖, 55:103-108
- 15) Jayakody MM, Vanniarachchy MPG, Wijsekara WLI (2021) Development and characterization of a seaweed snack using *Ulva fasciata*. J. Food Sci. Technol., 58:1617-1622

(前田高志 稚内水試調査研究部

報文番号B2484)