

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

二酸化炭素吸収量向上に向けた海藻養殖手法に関する研究

メタデータ	言語: ja 出版者: 公開日: 2024-05-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 西條, 恭平 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2000168.2

修士学位論文

二酸化炭素吸収量向上に向けた海藻養殖手法に関する研究

2023 年度
(2024 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋生命資源科学専攻

西條 恭平

修士学位論文

二酸化炭素吸収量向上に向けた海藻養殖手法に関する研究

2023 年度
(2024 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋生命資源科学専攻

西條 恭平

目次

序論.....	1
温室効果ガス吸収源としての海洋生態系	1
海洋における CO ₂ 吸収源としての海藻養殖の利点	2
ワカメとコンブの養殖.....	3
現在の海藻養殖と温室効果ガス吸収を目的とした海藻養殖.....	3
材料と方法.....	5
試験地域の状況.....	5
ワカメとコンブの種苗の準備.....	6
複層養殖の展開.....	7
環境条件(水温, 光度, 加速度, 塩分濃度)の測定	8
ワカメ種系の密度操作.....	8
ワカメの養殖期間延長.....	9
ワカメの部分切除.....	9
サンプル測定	10
CO ₂ 貯留量の算出.....	12
統計分析.....	13
結果.....	14
バイオマス量と環境条件の推移.....	14
ワカメの密度操作の効果.....	21
ワカメの養殖期間延長と部分切除の効果	25
ワカメの各部位の割合の変化.....	27
CO ₂ 貯留量の算定.....	30
考察.....	32
バイオマス量と環境条件の妥当性	32
複層養殖におけるワカメの密度操作の効果.....	33
ワカメの養殖期間延長と部分切除の効果	36

気候変動対策と水産業との両立	37
謝辞.....	39
参考文献	39

序論

温室効果ガス吸収源としての海洋生態系

2014年の気候変動に関する政府間パネル(IPCC)レポートによれば、人間活動由来の二酸化炭素に代表される温室効果ガス(GHG)は急激に増加し、地球規模の気温上昇、氷河の融解、海水位上昇などの気候変動の主要な要因とみなされている¹⁾。このような背景から、2015年のパリ協定では気温上昇を防ぐためにGHG排出量の削減が定められ²⁾、IPCCの報告書に基づき、多くの国が2050年までにカーボンニュートラルを達成する目標を掲げている。GHG削減を達成するためには、排出量を削減することが第一となる。再生可能エネルギーの利用³⁾、製造プロセスの高エネルギー効率化⁴⁾など、様々な手法が取り組まれており、大気中の温室効果ガス削減量の大部分は排出削減によるものと予想されている。しかしながら、排出量を完全に無くすことは難しいため、カーボンニュートラルにするためには吸収源の活用が必要であり、海洋分野においては、ブルーカーボン生態系の保全・再生が効果的な吸収源構築として期待されている。

陸上の植物によって吸収される大気中二酸化炭素(CO₂)由来の炭素のことを「グリーンカーボン」と呼ぶ。一方で、海洋生物によって大気中CO₂から、海洋生態系内に取り込まれた炭素のことは「ブルーカーボン」と呼ばれ、2009年の国連環境計画(UNEP)の報告書⁵⁾で初めて使用された。海洋に取り込まれた炭素のうち、その一部は、数千年程度の長期間にわたって大気から隔離され、海洋内に留まる。吸収された炭素が長期間にわたって隔離されることを貯留といい、海洋生態系の内、マングローブ、塩性湿地、海草藻場は特にこの貯留機能が高く、「ブルーカーボン生態系」と呼ばれる。陸上植物が主に植物体内に炭素を貯蔵するのに対し、ブルーカーボン生態系においては、海底堆積物や深海が主な炭素貯留場所となっている。ブルーカーボン生態系は元来、生物多様性の高い場所であり、その生態系機能により自立的、持続的に生態系が成立する。その保全・再生による気候変動対策への活用は自然ベースのソリューション(NbS)と呼ばれる。他の人為的な工学・化学手法と比較した場合のNbSの利点は、低コスト、メンテナンスの負担が少ないこと、および他の生態系サービスの提供などのコベネフィットがあることである⁶⁾。

海洋国家の首脳で構成される「持続可能な海洋経済の構築に向けたハイレベル・パネル」が2019年9月に公開した報告書「気候変動の解決策としての海洋(The Ocean as a Solution to Climate Change)」においては、地球温暖化を1.5°C以下に抑えるために2050年までに削減すべき温室効果ガスのうち、21%を海洋での気候変動対策で達成できると報告した⁷⁾。この報告書では、海洋分野における具体策として、①海洋の再生可能エネルギーの導入拡大、②海上輸送での脱炭素化の推進、③ブルーカーボン生態系を中心とした沿岸海洋生態系の保全と再生、④漁業・養殖の振興によるCO₂負荷の高い陸上のタンパク源から負荷の小さい海洋のタンパク源への食糧シフト、⑤技術革新による海底への人工的な炭素貯留の5つのアクションが挙げられていた。中でも2030年までの試算では、他の手法と比べて技術開発や実装に要する時間が少ない③、④が効果的であると試算されている。

このような背景から、多種多様な気候変動の緩和策の一つとしてブルーカーボン生態系の維持・拡大が、重要であると言える。

海洋における CO₂ 吸収源としての海藻養殖の利点

大気-海洋間の CO₂ ガス交換では、大気中の CO₂ 分圧と海中の CO₂ 分圧に差が生じたときに、分圧の高い方から低い方へ、CO₂ は移動する。ブルーカーボン生態系のうち、海草藻場は光合成によって海中の CO₂ 分圧を低下させ、大気から CO₂ を引き込むことで、CO₂ 吸収源として機能している。近年の研究では、海藻藻場と海藻養殖も海草と同様のプロセスで炭素を隔離し貯留できることを示す証拠が多々報告され、たとえば、CO₂ に由来する藻体が浅海域の海底泥に堆積すること、深海へ沈降すること、あるいは、藻体表面から成長に伴い放出される難分解性有機物が海中に保存されることで、CO₂ が貯留されることが明らかにされている。^{8,9)}

このような背景から、日本では 2023 年に国連気候変動枠組み条約締約国会議 (UNFCCC) に提出された GHG インベントリにブルーカーボン生態系からマングローブが初めて登録された後¹⁰⁾、2024 年の海藻も含めた藻場生態系の登録に向け、藻場による CO₂ 貯留量の算出手法の開発が進められている¹¹⁾。海草や海藻による年間 CO₂ 貯留量は、UNFCCC に報告する際の算定基準とする IPCC ガイドラインに基づき、「海藻や海草によって有機炭素化された CO₂ 量」、「有機炭素化された CO₂ の内、分解されずに海中に長期間貯留される割合(残存率)」、「活動量(面積)」の 3 つのパラメーターによって求められる。第一項の「海藻や海草によって有機炭素化された CO₂ 量」は海草・海藻の純一次生産量に相当するため、その量は各種の純一次生産量と最大現存量(バイオマス)の比例関係から求められる。さらに一次生産量はバイオマス量に比例する。また、第一項と第二項の積は、単位面積当たりの貯留量を意味する「CO₂ 吸収係数」と呼ばれており、CO₂ 吸収係数と活動量(面積)の積によって対象とする活動面積の CO₂ 貯留量は算出される¹²⁾。つまり、CO₂ 貯留量を高めるためには、単位面積あたりのバイオマス量を増加させ CO₂ 吸収係数を大きくすることや、活動面積を大きくする必要がある。

海藻の陸上植物や海洋植物プランクトンより相対的に高い純一次生産力を利用し¹³⁾、世界の海藻養殖生産量は 2020 年で 3,510 万トンに達しており¹⁴⁾、その拡大のためにさまざまな技術開発が長年行われてきた。すでに世界各地で養殖技術が確立されている海藻類では、直ちにその養殖面積を拡大することが可能である。人工基質にも付着して生育できる海藻類では、養殖技術によってさまざまな海域に活動面積を拡大できる可能性がある。一方で、一般にブルーカーボン生態系は天然海域では生息可能な気候や地形要因が制限される。例えば、マングローブは主に熱帯および亜熱帯地域に分布し、塩性湿地は浅海域の平坦な潮間帯が必要であり、海草は主に浅海の砂泥土壌に生息する⁵⁾。それらと比較して、海藻は種数も豊富で、種によって生育できる環境も多岐にわたっているため、人工基質と適切な種を選定することで、さまざまな海域で海藻を生育させることが可能である。

このような観点から、海藻の養殖は二酸化炭素貯留の高い潜在能力を持つと考えられる。

ワカメとコンブの養殖

現行の海藻養殖のうち、藻場を作る海藻を対象とした主要な養殖では、亜寒帯コンブ類とワカメを対象とした養殖技術が確立されている。コンブ類とは、コンブ目に属する褐藻類に属する大型藻類のことを指す。伝統的に主に東アジアで食品、工業原料、医療材料などの目的で栽培されてきたが、近年ではアメリカやヨーロッパでも栽培されている¹⁵⁾。

ワカメ(*Undaria pinnatifida*)はコンブ類の一種で、東アジア原産であり、コンブ類の特徴である巨視的な孢子体段階と微視的な配偶体段階という2つの生活環を持つ一年生海藻である¹⁶⁾。藻体は葉状部、中肋、孢子葉、付着器に分かれており、中肋と孢子葉の間の移行部に生長帯がある。日本では1950年代に東北地方での研究により商業的養殖法が確立された¹⁷⁾。東北地方のうち、特に三陸地域(岩手県、宮城県)で、日本におけるワカメ生産量の77.1%が占められている¹⁸⁾。

ホソメコンブ(*Saccharina japonica var. religiosa*)もコンブ類の一種であり、日本沿岸含む北西太平洋が原産である¹⁹⁾。ワカメと同様に、巨視的な孢子体段階と微視的な配偶体段階の2つの生活環がある。四倉ら(2008)によれば、ホソメコンブはマコンブの変種とされ²⁰⁾、マコンブと比べて葉幅が狭い特徴がある。藻体は葉状部、茎状部、付着器に分かれており、葉状部、茎状部の間の移行部に生長帯がある。本論文では、以下コンブとして記す。日本では、1960年代に北海道でこの海藻の養殖が確立された¹⁷⁾。1960年代後半には培地を改良し、2年かけて育てた昆布と同等の品質の昆布を短期間で生産する技術が開発された¹⁷⁾。この技術はその後、北海道から日本各地に広がった。

現在の国内における養殖研究は、食用価値を高める研究が主流となっている。例えば、藻体の部分切除、病気や障害の原因究明、施肥、種苗の改良などが挙げられる。藻体の部分切除の目的は、生育や外観の悪い藻類を除去することで生産量を増やし、食品としての品質を一定に保つことである²¹⁾。病気や障害の原因究明は外観の悪化等の食用価値の低下を防ぐことを目的としている。そのため、現在の養殖技術は、加工のしやすさや市場の評価などを考慮しつつ、食料としての増産を目指して開発されてきた経緯がある。

現在の海藻養殖と温室効果ガス吸収を目的とした海藻養殖

現行の養殖技術ではCO₂吸収量の向上は考慮されていないため、CO₂吸収量を拡大するために、現行の養殖手法を使うことが必ずしも最善とは限らない。今後、カーボンニュートラルの達成に向けて、コベネフィットを含めたブルーカーボンへの期待が高まるなか、現行の海藻養殖を効果的な吸収源として機能させるためには、食料生産の機能を残しつつ、CO₂吸収も目的とした養殖技術へと発展させることが重要である。現行の養殖技術を応用し、食料生産の機能を残しつつ、単位面積当たりの年間CO₂吸収量であるCO₂吸収係数を高めることが可能か検証することで、現行の生産現場が吸収源構築の即戦力となり得るか明らかにできる。

そこで本研究では、養殖生産者がワカメとコンブを食用出荷のために養殖している施設を用い、まず現行の養殖によるCO₂吸収量を算定した。これをベースラインとし、単位面積当たりのCO₂吸収量をベースライン以上に向上させようか、いくつかの操作を実施し、操作による

CO₂吸収量の変化を調査した。その操作として、本調査地の生産者が実施しているワカメ(上層)とコンブ(下層)の複層養殖施設において、第一に上層のワカメの密度操作を実施した。それによりワカメの生産量と食用としての質、さらには下層のコンブの生産量と質の変化を検証した。また、もう一方の操作として、ワカメの養殖期間の延長と養殖の初期段階における部分的切除を実施し、同様にワカメ・コンブの生産量と質の変化について検証した。なお、本研究で取り扱った複層養殖は、本調査地でのみ約40年続けられてきた養殖技術である。これは、科学的知識を補完する一種の Local and Indigenous Knowledge Systems (LINKS) とみなすことができる²²⁾。地球規模の社会問題である気候変動への対策として、地域で成立した技術が貢献するかどうか検討することも意味している。

材料と方法

試験地域の状況

本研究は、東北地方太平洋側の宮城県石巻市十三浜地区沖合の水域で行った (Fig. 1)。その地域は日本の典型的なリアス海岸である三陸海岸の南部に位置する。実験水域は太平洋に面した追波湾内に設けた。湾には日本で4番目に長い河川である北上川が注ぎこみ、陸域から供給される栄養塩が豊富である。ホタテ、ホヤ、ワカメやコンブなどの無給餌型養殖業が盛んな地域である。

ワカメとコンブの養殖業はこの地域の主要な水産業であり、それら海藻はこの地域の天然海岸でも自然に生育している。宮城県におけるワカメの商業規模での養殖は1960年代に始まり¹⁷⁾、コンブにおいては、1970年代に始まったと記録されている¹⁷⁾。現在は、ワカメの養殖施設は約1400基、コンブの養殖施設は約200基ある。現地の養殖生産者のグループは、2022年に海藻養殖によるASC認証を日本で初めて取得している²³⁾。

本海域における海藻養殖手法は本来、海藻種苗をつけた1本1本のロープを個別に設置するロングライン方式の養殖技術が採用されており、現在も続いている。しかしながら、一部の養殖生産者においては1970年代に養殖に適した水域が不足し、ワカメとコンブの2本のロングラインを上下に組み合わせた「複層養殖」が始まったとされている。「複層養殖」においては、ワカメロープを上層、コンブロープを下層に設置し、垂直方向のロープでそれらを平行につないでいる (Fig. 2)。この方法を通じて、ワカメとコンブの両方の生産量を1つの海面から得ることができるようになった。複層養殖を実施している養殖生産者によれば、ワカメとコンブの上下の位置を入れ替えた場合、どちらの海藻もサイズが縮小したり、色が変化したりするなど、食品としての価値が低下することが知られている。さらに、この位置関係においては、先に収穫されるワカメがコンブの上方にあるため、ワカメの収穫作業において、コンブを傷つける心配がない。本研究では、養殖生産者の海域から複層養殖の施設を2セット、そのうち各15mの範囲を試験区間として間借りした。

現在の海藻養殖では、筏式、はえ縄式、ケージ式など様々な手法がある²⁴⁾。調査を行った地域の複層養殖は約40年近い歴史を持っている手法ではあるが、技術は地域限定的で、経験知によって発展してきた技術であり、その生産量について科学的に数値化された例はない。宮城県¹⁷⁾、岩手県北部地域²⁵⁾の一部海域で行われている事実が記録されているのみである。また、アメリカ海洋大気庁の海洋漁業局のウェブサイトには、立体的に海を使った養殖手法について言及されているが、具体的事例は紹介されていない²⁶⁾。このような Local and Indigenous Knowledge Systems (LINKS)を科学的手法で評価し、養殖技術として普及できれば、単位面積当たりの一次生産量で算定される二酸化炭素吸収に大きく貢献することができる。

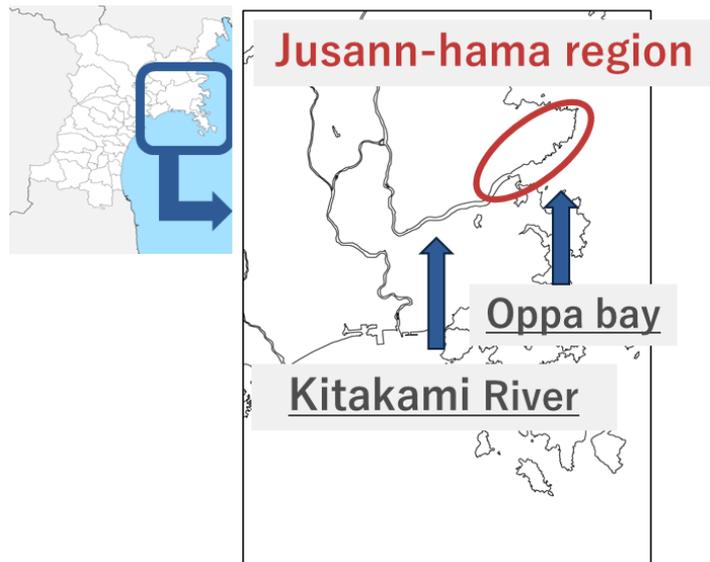


Fig. 1 Enlarged map of Ishinomaki City, Miyagi prefecture

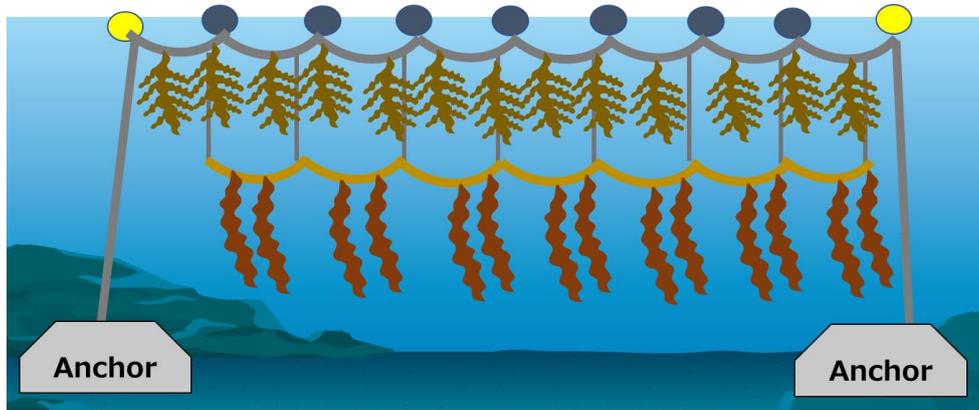


Fig. 2 Schematic of "Multi-Layer Cultivation" system (Upper: wakame, Lower: kombu)

ワカメとコンブの種苗の準備

試験区において養殖生産者の協力で得たワカメ・コンブ種苗を用い、以下のように実験用の種苗の準備を行った。

最初に、試験区の提供を受けた養殖生産者から十三浜地区の生産者が一括購入するワカメとコンブの種苗の一部を入手した。ワカメ種苗は、2022年の夏に麻糸を約1m四方の枠に巻いた種糸方式により、成熟した胞子葉から放出される遊走子から採苗されていた。その後、ワカメ種糸は未熟な配偶体を成長させるために海面に移して育苗されている。コンブ種苗は、2022年の夏から秋にかけて、クレモナ糸を1m四方の枠に巻きつけた種糸方式により、子嚢斑を持つ葉状部から放出された遊走子から採苗されていた。その後、未熟な配偶体を成長させるために、種糸は陸上水槽で育苗された。胞子体が数cmの大きさになった時期である、11/10にワカメ、11/21にコンブの種糸が試験地域に運び込まれた。それらの種糸を水深1~2mの海中に入れて2週間ほどの中間育成を行い、養殖海域の水温、栄養塩などの養殖環境条件への馴致を行った。

複層養殖の展開

次に実験用の複層養殖の準備を行った。まず、11/28 から上層でワカメの養殖を開始した。ワカメの種苗糸を海から陸揚げした後、ワカメ種糸を約 5cm に切断し、用意した 2 本のワカメ親綱（全長 130 m, 直径 30 mm）の長さ 15 m の試験区間に挿入した。ワカメ種糸の親綱に挿入する直前の状態を以下の Fig. 3-a に示す（スケールバーは 5 cm）。ワカメの種糸にはワカメの他に、緑藻類の付着も見られた。試験区間は 3m 間隔で 5 分割し、本調査地で一般的に行われている種糸の設置間隔（1m あたりの種糸密度）の区画を対照区とし、種糸の設置間隔、ワカメの部分切除処理の有無などの条件を変えた区画を操作区とした (Table 1)。各親綱は水深約 30~40 m の海域に、約 20 m の間隔で隣り合って設置し、深さを水面から 0.5~1 m に調整した。

次に 12/5 には下層でコンブの養殖を開始した。コンブの種苗糸を陸揚げし、コンブの孢子体が着いた種糸を約 3 cm に切断し、2 本のワカメ親綱試験区間の下層に設置したコンブ親綱（全長 120 m, 直径 16 mm）の各 15 m の試験区間に 50 cm 間隔で挿入した。コンブ種糸の親綱に挿入する直前の状態を以下の Fig. 3-a に示す（スケールバーは 5 cm）。コンブの種糸上にはワカメ種糸とは異なり、他の海藻類の付着はなかった。コンブ親綱はワカメ親綱に対し、約 10 m ほどの間隔で 2~3 m の垂直方向のロープで結ばれ、コンブ親綱の深さが水面から約 2.5~4 m になるように調整した。さらに、ワカメ親綱とコンブ親綱が絡まないよう、コンブ親綱の垂直方向のロープの中間の位置に、約 3~5 kg の重りが垂下されている。

この実験期間は、十三浜地区の生産期間に準じており、ワカメは 11 月下旬、コンブは 12 月上旬ごろに種苗糸を挟み込んだ養殖ロープが沖合に展開され、ワカメで 3 月から 4 月、コンブで 5 月から 6 月にかけて収穫が行われる。(Fig. 3-b)



Fig. 3-a Seedlings before inserting to cultivation ropes (left: *Undaria pinnatifida*, right: *Saccharina japonica* var. *religiosa*)

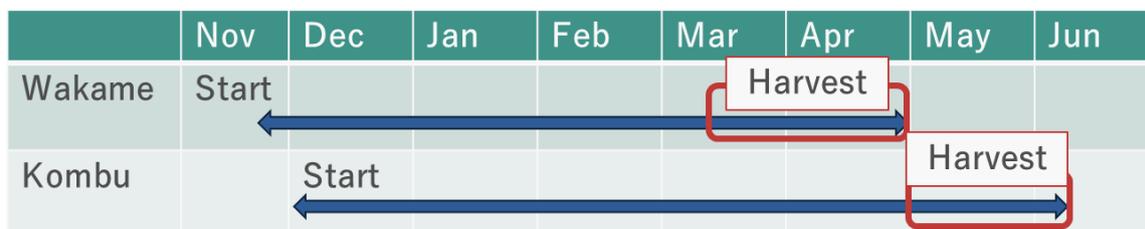


Fig. 3-b General cultivation schedule in study site

環境条件(水温, 光度, 加速度, 塩分濃度)の測定

海上に設置された2本の養殖ロープに対し、ロープ間で水温や光環境など生息環境に明瞭な違いがないことを確認するため、水温と光度を同時に測定するロガー(HOBO Pendant Temp/Light, 64K, Onset, USA)を設置した。11/28にはワカメ養殖ロープの1C, 2C区画の中央の合計2個、12/5にはコンブ養殖ロープの各区画の中央の合計10個設置した。測定間隔は10分に1回とした。

同様に、ロープ間での海水の流れに差がないことを確認するため、加速度ロガー(HOBO Pendant G Logger, Onset, USA)を設置した。11/28にはワカメ養殖ロープの1C, 2C区画の中央の合計2個、12/5にはコンブ養殖ロープの1C, 2C区画の中央に合計2個設置した。測定間隔は15分に1回とした。

加えて、塩分のロープ間での差を確認するために電気伝導率ロガー(HOBO Salt Water Conductivity/Salinity Data Logger, Onset, USA)を設置した。養殖開始後の12/20にはワカメ養殖ロープの1C, 2C区画の中央の合計2個、2/27にはコンブ養殖ロープの1C, 2C区画の中央の合計2個を設置した。測定間隔は15分に1回とした。

どの測定項目においても、500回の観測データの移動平均値を用いて、グラフ化した。

ワカメ種系の密度操作

ワカメ種系の設置間隔(単位ロープ長あたりの種苗密度)に関する先行研究では、鳴門地域では望ましい種系間隔は30~50cmであり、藻体本数では50~100本/m²⁷⁾、岩手県では商業的利益が最大となる藻体本数は120本/m²⁸⁾、また宮城県での実験では45-75本/mで、種系間隔は40cmで行っていた²⁹⁾。このように地域や用いる種系の状態や長さによってバラつきがあり、最適な密度や種系間隔についての基準は存在しない。

現状のワカメの種苗の密度は食用利用に適した生産物の収穫を前提として、過度な高密度・低密度のどちらにも偏りすぎない、最適な密度が設定されていると考えられる。しかしながら、食用目的で最適化されたワカメの密度とCO₂吸収目的で最適となるワカメの密度は異なる可能性が大きい。また複層養殖では、上層のロープで養殖するワカメのバイオマス量に依存して、下層ロープで養殖するコンブの光環境が変化し、コンブの成長に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、単位ロープ長当たりのワカメ種系密度を操作し、ワカメ密度がワカメ自身の成長量、およびコンブ成長量へ及ぼす影響を明らかにする試験を実施した。試験では、ワカメ及びコンブの成長量を目的変数としてその数値を最大化するワカメ種系密度、およびワカメとコンブを合算した総成長量を目的変数としてその数値を最大化させるワカメ種系密度を求めた。

ワカメ種系密度操作に関する各親綱の操作区間(3m×5区画)はTable 1に示すように設定した。1A, 2A区画を対照区として、高密度の実験区として1B, 2B区画, 低密度の実験区として1C, 2C区画を用意した。下層のコンブは密度操作を行わず、いずれの区画も同じ条件とした。海藻養殖においては使用した種系の状態によって種苗の成長・生残が著しく悪くなる場合もあるため、1D, 2D, 1E, 2E区画は対照区の予備として使用し、また一部は以下の部分切除操作区に使用した。

Table 1 Detail conditions of experimental area

	Rope 1					Rope 2				
	1A	1B	1C	1D	1E	2A	2B	2C	2D*1	2E
<i>U. pinnatifida</i>										
Distance between threads [cm]	20	10	40	20	20	20	10	40	20	20
Threads number [/m]	5	10	2.5	5	5	5	10	2.5	5	5
Excision	-	-	-	○	-	-	-	-	-	△*2
<i>S. japonica</i>										
Distance between threads [cm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Threads number [/m]	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

*1 All 2D seaweed had fallen off on January 29th.

*2 Only a part of clumps was thinned.

ワカメの養殖期間延長

Fig. 3-b に示すように、本調査地のワカメの食用利用目的での収穫は3月から4月にかけて行われる。養殖の終盤に差し掛かると、ワカメの色が暗褐色から黄褐色に薄くなる、葉が厚くなる、葉の表面が滑らかだったのが細かな凹凸ができるなど、食品としての品質が劣化する(現地の養殖生産者への聞き取り)。そのため、食用としての収穫適期からさらに養殖期間を延長してワカメのバイオマス量の変化を追跡した事例は存在しない。そこで一部の操作区画で養殖期間をコンブと同日に収穫できる6/1まで延長し、ワカメのバイオマス量の変化を計測した。1A, 2A, 1Dと予備として用意した1Eの各区画において、3本ずつの種系由来のワカメ株(1本の種系に由来する、ひとかたまりの付着器から生える複数の藻体の集合体のことを以下「株」と呼ぶこととする)を6/1まで成長させた。

ワカメの部分切除

ワカメの養殖期間延長による効果を調査するにあたって、何もせずに6月まで成長させ続けた区画と、養殖の初期段階にワカメ藻体の一部を切除する区画を用意した。ワカメの藻体はFig. 4-aのように、葉状部(Blade)、中肋(Stipe)、孢子葉(Sporophyll)に大まかに分けることができる。中でも葉状部は、最も食用として価値のある部位であり、従来の食用目的の養殖においては最も重視される。また、生長帯は中肋の内の孢子葉に近い位置にあり、そこで細胞分裂が行われて伸長している。ワカメ養殖においては、ワカメの食用部位の生産量を増加させる手法として部分切除が実施されるケースがあることが報告されている¹⁷⁾。上層のワカメに対する部分切除はワカメのバイオマス量を変化させることから、種系密度と同じく、下層のコンブのバイオマス量の増減を考えるうえで重要な要素となる。食用部位の増大を目的とした部分切除では、成長帯上方を切除する、ときには藻体全部を間引きして1株あたりの本数を低減することでさらなる成長を促す方法が実施されているが^{21, 29, 30)}、CO₂吸収量(バイオマス)には非食用部位のバイオマス量も含まれるため、非食用部位も含めた成長促進が起こるか、その知見はまだ存在しない。そこで、Gaoら(2013)の方法³⁰⁾を参考として、ワカメの部分切除がワカメ・コンブの成長量に及ぼす影

響について試験を実施した。

Table 1 に示すように、1D 区画に対して部分切除を行った。先行研究においては、10月に養殖を開始し、約3か月後の2月に生長帯から上部30cmの箇所の部分切除を行っていた³⁰⁾。本研究では、約養殖開始3か月後、全長1m以上の藻体が多くなっていた2023年2月27日に、1D区画内の全ての海藻の葉状部の部分切除を行った。ただし、生長帯の上部30cmではなく、それよりも切除部分が多くなるよう、葉状部の約50~70%を、Fig. 4-bのように切除した(右図：スケールバーは1m)。部分切除区(1D)において、切除した部位は、乾燥する前に全体の湿重量も計測した。部分切除したワカメ3株は6/1まで成長させた。

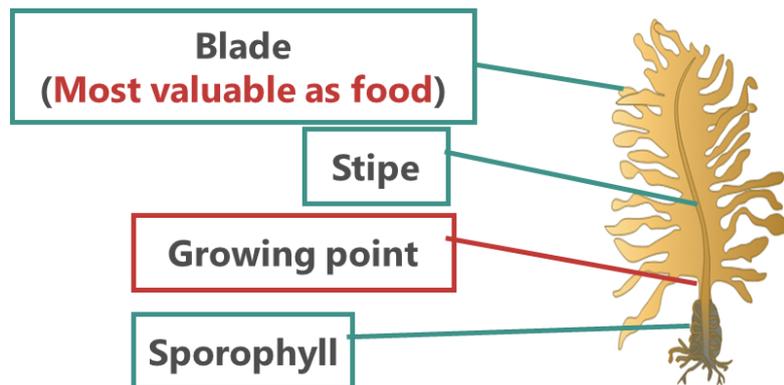


Fig. 4-a Each part of wakame and its growing point



Fig. 4-b *U. pinnatifida* after partial excision (left), before partial excision (center) and excised position (right)

サンプル測定

まず、ワカメとコンブそれぞれの本数を求めた。ワカメについては、本調査地の一般的なワカメの収穫時期である4/13に、各操作区画から株別に付着器ごと全てのワカメ藻体を採取した。各株に存在する藻体本数をカウントし、収穫した合計本数 N_{Harv} を算出し、さらに、試験途中で各時期のバイオマス量算出のためにサンプリングした本数 N_{Samp} を各株の本数に加えることで、サンプリングしなかった場合に各区画に本来存在していたワカメの株あたり総本数を算出した。

コンブの場合も同様にして、本調査地の一般的なコンブの収穫時期である6/1に、各操作区画

から全ての株を採取した。葉状部の一部が着いた状態の付着器を採取し(Fig. 5), 株別に本数を数え, 収穫した合計本数 N_{Harv} を算出し, サンプルングした本数 N_{Samp} を加えることで, 藻体のサンプルングをしなかった場合に各区画に本来存在していたコンブの総本数を算出した。



Fig. 5 Rhizoid of *S. japonica var. religiosa*

また, 各時期の湿重量(バイオマス量)を算出するために, 1/29, 2/27, 4/13, 6/1 の計 4 回, 各操作区画でサンプルングを実施した。各サンプルング日には, 各区画において, ワカメでは 2 株選択し, 各株から 2 本の藻体を回収した(計 4 本の藻体)。藻体本数の多い株を選択する理由は, 藻体のサンプルングが各株の成長に及ぼす影響を最大限小さくする配慮としてである。残念ながら 2D 区画では, ほぼすべてのワカメが 1/29 時点で親綱から落ちていることを確認したため, 試験から除外した。6/1 のサンプルングにおけるワカメ藻体の回収では, 期間延長の対照区(1A, 2A)と部分切除区(1D)に残置した 3 株のうちの 2 株から, 2 本ずつ藻体を採取した。コンブ藻体の回収では, 各時期に各区画の 1 株から 3 本ずつの藻体を採取した。

これらのサンプルは劣化しないように密封袋に入れて冷凍庫に一時保管し, 冷凍のまま実験室に移した。サンプルは密封袋内に入れて, 室温で解凍した。解凍後, ワカメは葉状部, 中肋, 胞子葉に分離してから湿重量を計測し, 各部位の割合も求めた。コンブはそのまま湿重量を測定し, ワカメ 1 藻体あたりの湿重量平均値, コンブ 1 藻体あたりの湿重量平均値を実験区画別に算出した。

操作区画では付着器をサンプルングすると株の脱落など試験に大きな影響が出てしまうため, 付着器を回収できていない。そのため, 各区画の 1 m あたりのワカメとコンブの各時期のバイオマス量は, 付着器のバイオマス量を除いて, 以下のように算出した。本調査でのバイオマス量は, 実際のバイオマス量よりも付着器のバイオマス量の分が除かれた, 過小評価された値となっている。

$$B = \frac{WW \times (N_{Harv} + N_{Samp})}{3}$$

B: 1m あたりのバイオマス量[kg/m]

WW: 各時期の藻体 1 本の平均湿重量[kg]

N_{Harv} : 収穫時の本数[/3 m]

N_{Samp} : サンプルングした本数[/3 m]

CO₂貯留量の算出

最後に、計測したバイオマス量を用いて、各操作による二酸化炭素吸収量の変化について算定を行った。

ワカメとコンブのCO₂貯留量の算出にあたっては、水産研究教育機構が作成した海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブックを参照した³⁾。CO₂貯留量は、吸収ポテンシャル、生態系変換係数、1mあたりのバイオマスの乾燥重量の積で求めることができる。

$$\text{CO}_2 \text{貯留量} = \text{吸収ポテンシャル} \times \text{生態系変換係数} \times \text{1mあたりの乾燥重量}$$

吸収ポテンシャルに関しては、海草・海藻藻場のCO₂貯留量算定ガイドブック中の東北太平洋地区のワカメ養殖0.051、コンブ養殖0.049の値を用いた。

生態系変換係数に関しては、ワカメの養殖ロープが小型緑藻、小型褐藻、小型紅藻で覆われていたものの、ワカメのバイオマスに比べると少ない量であったため、1とした。コンブの養殖ロープに関しては、ほとんどその他の付着海藻が存在していなかったため、生態系変換係数は1とした(Table 2)。ロープへの他の海藻の付着状況は以下のFig. 6に示す通りであった。



Fig. 6 Attachment status of other seaweeds (left: *U. pinnatifida*, right: *S. japonica*)

Table 2 Absorption potential and ecosystem conversion coefficient

要素	ワカメ	コンブ
吸収ポテンシャル	0.051	0.049
生態系変換係数	1	1

ワカメ、コンブの1mあたりの乾燥重量を算出するために、バイオマスの乾燥重量/湿重量比率を算出した。サンプリングした藻体の湿重量を測った後、乾燥させ乾燥前後の重量変化によって比率を求めた。1/29, 2/27, 4/13, 6/1にサンプリングしたワカメの内、各回から無作為にそれぞれ3つの藻体を選んだ。それら合計12本の藻体を部位別に分割し、60°Cの乾燥器にて、1/29のサンプルは60h、2/27, 4/13, 6/1のサンプルは120h乾燥させた後に、速やかに重量を測定した。コンブについても同様の操作を行った。ワカメに関しては、各時期における葉状部、中肋、孢子葉の各部位、コンブに関しては葉状部の各時期の乾燥重量/湿重量比率を算出した。各期間の乾燥重量/湿重量比率の平均値を求めて、その値を計算に用いた。

なお、CO₂貯留量を算出する上で用いたワカメ、コンブのバイオマス湿重量 B に付着器の湿重量は含まれていないため、CO₂貯留量もバイオマス同様に付着器の分を含まない、過小評価された値となっている。

【ワカメ】

- 葉状部, 中肋, 胞子葉の乾燥重量[kg/m]
= B × [各部位の割合] × [各部位の平均乾燥重量/湿重量比率]

【コンブ】

- 葉状部の乾燥重量[kg/m] = B × [葉状部の平均乾燥重量/湿重量比率]

また、付着器に関してはワカメ、コンブのいずれも回収作業が不十分であったため、CO₂貯留量の算出には用いなかったが、付着器の乾燥重量/湿重量比率, 全体のバイオマス量に占める付着器の割合も考察のために算出した。

ワカメの付着器の乾燥重量/湿重量比率に関しては、4月に回収した2株、6月に回収した1株の付着器を60°Cの乾燥器で120h乾燥させて比率を算出した。コンブに関しては、6月に回収した1株の付着器を60°Cの乾燥器で120h乾燥させて比率を算出した。

ワカメの付着器割合に関しては、4/13のサンプリングでは調査しきれなかったため、収穫の最終期である5/13に実施した。養殖ロープの試験区間外（対照区と同じ条件）から38株のワカメをランダムに採取した。株全体の重量を計測した後、付着器から各藻体を分離し、付着器の重量を計測して、株全体の重量の内の付着器とその他の部位の割合を算出した。

コンブの付着器割合に関しては、6/1にサンプリングした付着器を用いて調査した。まず、前述した1mあたりのコンブのバイオマス量 B を求める式で、対照区(1A, 2A)のバイオマス量を算出した。算出した値に、6/1に回収・計測した対照区の付着器の湿重量を加えて全体のバイオマス量を算出し、全体に占める付着器の重量の割合を算出した。

統計分析

本研究では商用流通している種糸を使用したため、種糸上の幼胞子体の状態や本数が揃っておらず、得られたデータのばらつきは大きかった。正規分布と等分散性は仮定できなかったため、そこでノンパラメトリックな分析手法を行った。対照区、高密度区、低密度区の3群間の比較では、Kruskal-Wallis 検定とその後 Steel-Dwass 検定を行って有意差の有無を調べた。また、対照区と部分切除区の2群間の比較では、Mann-Whitney の U 検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ の場合に、有意差があるとみなした。

結果

バイオマス量と環境条件の推移

2本のロープの対照区2区画(1A, 2A)における単位ロープ長あたりのワカメバイオマス量(付着器除く)、コンブバイオマス量(付着器除く)、ワカメとコンブを合わせた複層養殖(付着器除く)としての合計バイオマス量の推移を Fig. 7 に示す。

ワカメのバイオマス量は、1月後半に 0.774 ± 1.04 kg/m, 2月後半に 3.53 ± 1.78 kg/m, 4月半ばには 10.5 ± 7.86 kg/m に達した。収穫時の1mあたりの藻体の本数が1Aで6.67本, 2Aで23.3本と大きなバラつきがあったため、結果的にバイオマス量でも大きな標準偏差となった。平均藻体本数は15本/mであり、1藻体あたりの付着器を除いたバイオマス量は4月前半で629gとなった。

コンブのバイオマス量は、1月後半に 1.18 ± 0.62 kg/m, 2月後半に 3.68 ± 2.08 kg/m, 4月半ばには 23.2 ± 11.0 kg/m, 6月前半に 45.5 ± 24.1 kg/m に達した。ワカメ同様に、収穫時の1mあたりの藻体本数が1Aで28.7本, 2Aで53.3本であり大きなバラつきがあったため、結果的にバイオマス量でも大きな標準偏差が得られた。平均藻体本数は41本/mであり、1藻体あたりの付着器を除いたバイオマス量は6月前半で1033gとなった。

複層養殖のバイオマス量は、1月後半に 1.96 ± 1.24 kg/m, 2月後半に 7.21 ± 1.33 kg/m, 4月半ばには 33.7 ± 8.54 kg/m, 6月前半には、コンブのバイオマス量のみで 45.5 ± 24.1 kg/m に達した。2月後半までは、ワカメとコンブ間でほぼ変わらない値であったのに対して、4月半ばにかけて、ワカメよりもコンブの方がより大きな上昇を示し、コンブの値はさらに6月前半にかけて増加した。

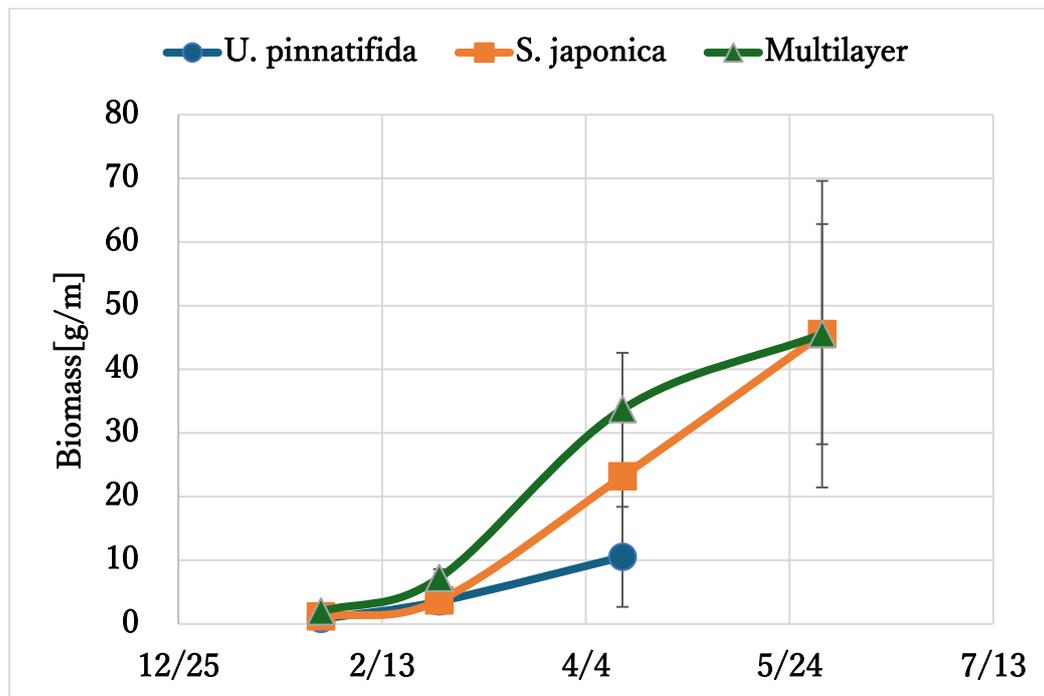


Fig. 7 Seasonal changes of biomass of *U. pinnatifida*, *S. japonica* var. *religiosa* and Multilayer (Total of them) in control group (1A, 2A)

ワカメ試験区間の中心付近(低密度操作区 1C, 2C)に設置した水温の推移を Fig. 8-a に示す。いずれの区画においても、養殖の開始当初が最も高く約 15°Cであり、3 月前半に最も低い約 8°Cまで低下した。その後、5 月後半にかけて約 14°Cまで再度上昇した。2 月後半以降は、それ以前と比べて、短期間で海水温値の上下変動が増加した傾向が見られた。2 つの区画を比べると、全期間通じてほぼ同じように推移したことから、ワカメのどの区画においても似たような水温環境であり、ロープ 1 とロープ 2 で水温環境に違いはなかったことが示唆されている。

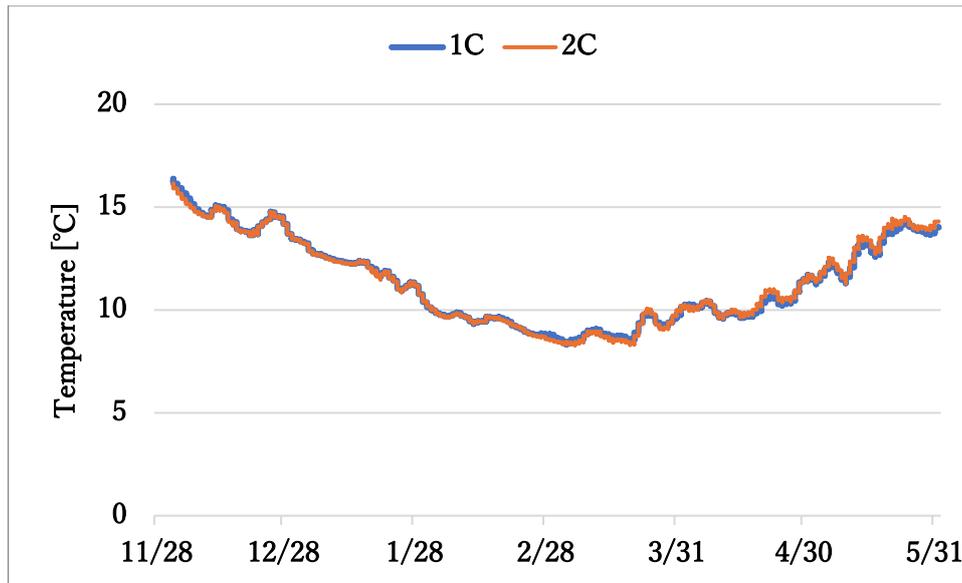


Fig. 8-a Seasonal changes of water temperature of *U. pinnatifida*

ワカメの低密度操作区 1C, 2C に設置した照度の推移を Fig. 8-b に示す。ロガーの設置位置, 例えばロープの影や成長したワカメの影などでそれぞれのロガーの値はばらつくことが予想されるが, どちらの区画においても, 1月後半までは, 値の差はありながらも類似した傾向を示した。2月前半以降は, 似たような増減の傾向を示さなかったが, 5,000 lux 以下の比較的近い値で推移した。ロープ 1, ロープ 2 ともに遮蔽物のない沖合の海面に設置されていることも考慮すれば, ワカメの区画間の光環境についてロープ 1 およびロープ 2 間で明確な違いはなかったと考えている。

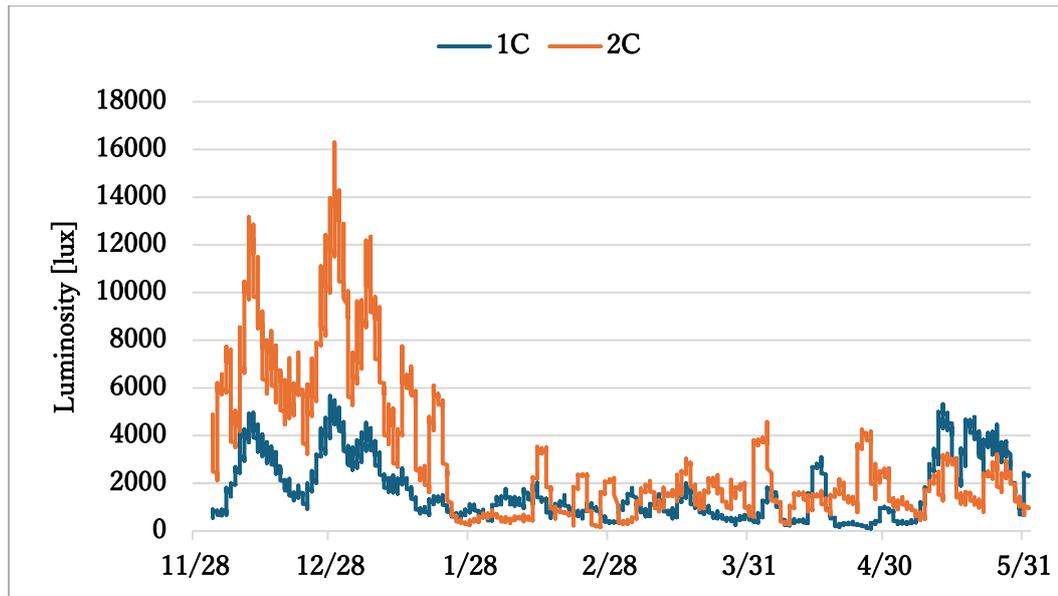


Fig. 8-b Seasonal changes of luminosity at the depth cultivated *U. pinnatifida*

ワカメロープの合成加速度の推移の結果を Fig. 8-c に示す。全期間を通じて 1.5 前後で推移した。1 月後半以降の時期は特に同じような傾向を示した。これにより、2つのロープが受けた水流の強さは、ワカメの成長速度が増加し始める 1 月以降からロープ 1 およびロープ 2 で類似していたと考えられる。

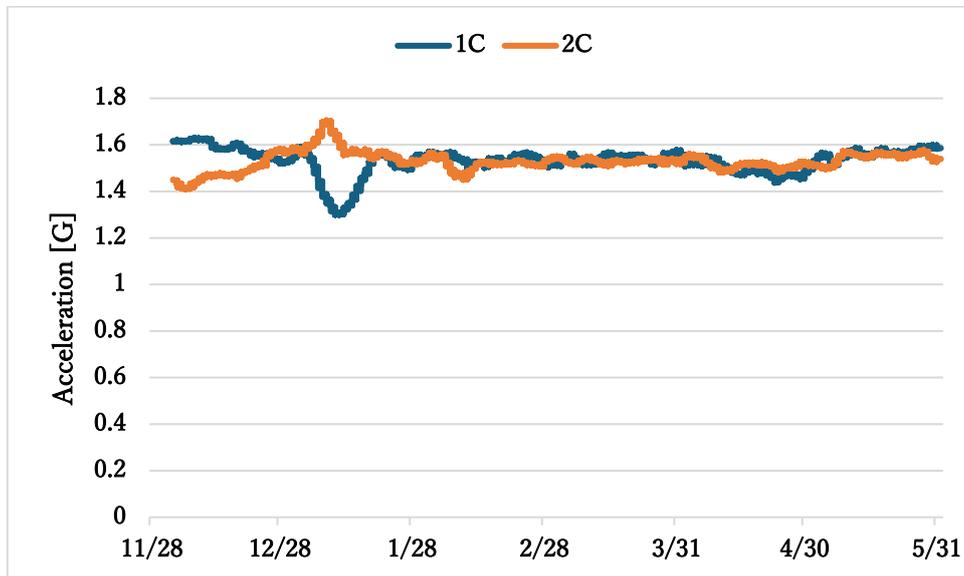


Fig. 8-c Seasonal changes of synthetic acceleration of the *U. pinnatifida* rope

ワカメが養殖されていた水域の海水の電気伝導度(塩分濃度の指標)の推移を Fig. 8-d に示す。値は 1C の結果であり、2C についてはセンサーの不具合によって、データ取得することができなかった。12 月後半が最も高く約 30,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ であり、その後、降雪、融雪などの影響により 3 月半ばの約 22,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ まで低下した。3 月半ば以降は、5 月後半まで上昇傾向であり、値が変動する機会 3 月半ば以前よりも多くなった。塩分濃度の結果は、水温と類似した傾向が見られた。

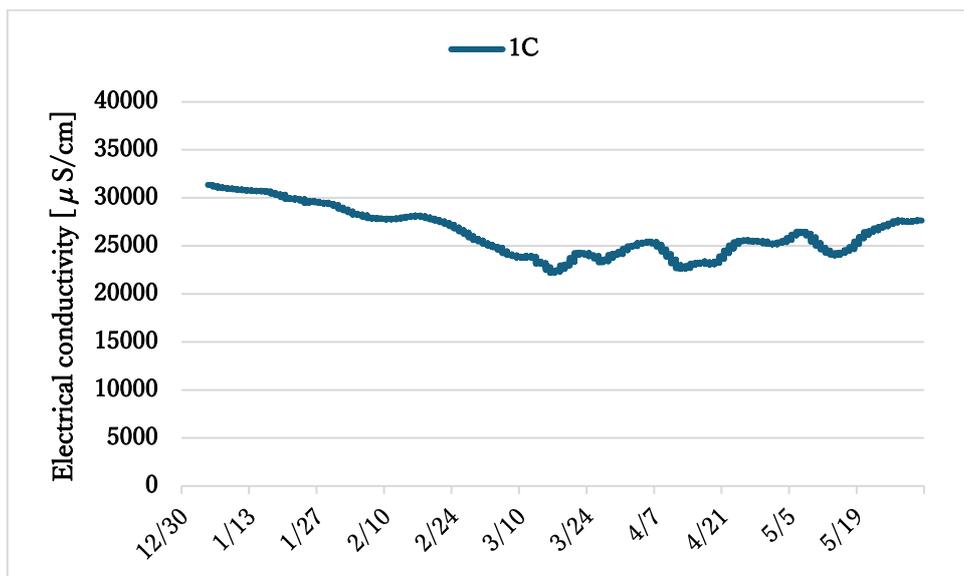


Fig. 8-d Seasonal changes of electrical conductivity of seawater in waters where *U. pinnatifida* was cultivated

下層のコンブ試験区画の 1C, 2C の水温の推移を Fig. 9-a に示す。いずれの区画においても、養殖の開始当初が最も高く約 15°C であり、2 月後半から 3 月前半に最も低い約 8°C まで低下した。その後、5 月後半にかけて約 14°C まで再度上昇した。2 つの区画を比べると、全期間通じてほぼ同じように推移し、上層のワカメの水温ともほぼ同じ傾向を示す。コンブロープ 1 およびロープ 2 間、また上層ワカメロープと下層コンブロープ間で、水温環境に差はないことが示唆された。

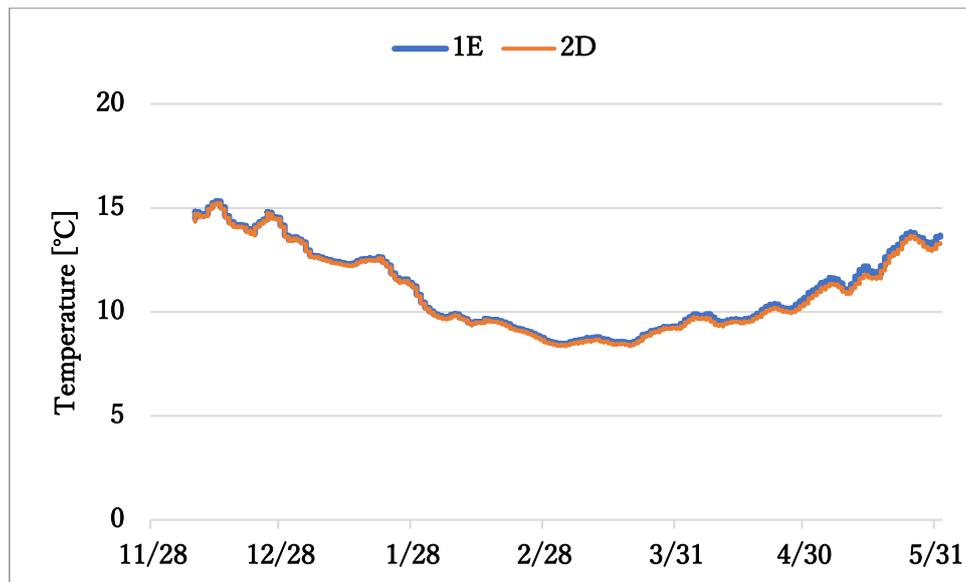


Fig. 9-a Seasonal changes of water temperature of *S. japonica* var. *religiosa*

コンブロープ操作区画(1E, 2A, 2D)における照度の推移を Fig. 9-b に示す。試験の始めから最後まで不具合なく測定ができた区画が 1E, 2A, 2D の 3 区画のみであり、その結果を示した。

ロガーの設置位置、例えばロープの影や成長したコンブの影、さらには上層のワカメの影などでそれぞれのロガーの値はばらつくことが予想されるが、どの区画でも、期間全般通じて、異なる傾向を示す。ワカメの照度と比較すると、低い値で推移した。ワカメのバイオマス量の 4 月前半までの増加、4 月の収穫によるワカメバイオマスの減少に対応した照度の変動は確認されなかったため、ワカメのバイオマス量以外の要因で照度が変化した可能性が考えられる。

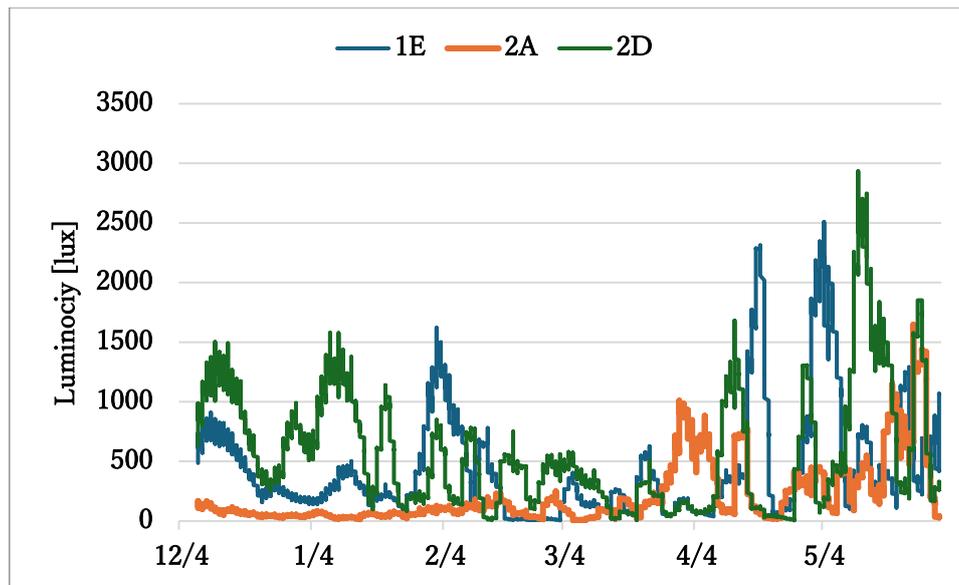


Fig. 9-b Seasonal changes of luminosity at the depth cultivated *S. japonica* var. *religiosa*

コンブ操作区画 1C, 2C の合成加速度の推移の結果を Fig. 9-c に示す。上層のワカメロープと同様に、全期間を通じて 1.5 前後で推移した。これにより、2つのコンブロープが受けた水流の状況は類似しており、上層のワカメロープとも値は類似していた。

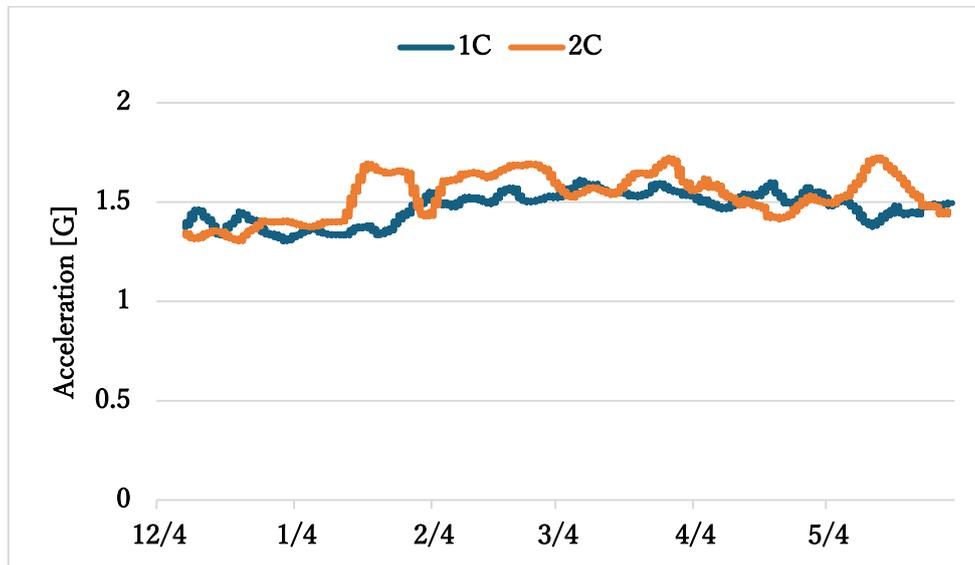


Fig. 9-c Seasonal changes of synthetic acceleration of the *S. japonica* var. *religiosa* rope

コンブロープの試験区画内に設置した電気伝導度(塩分濃度の指標)の推移を Fig. 9-d に示す。設置した2月後半から5月後半まで値は 30,000 μ S/cm 以上の値で、やや上昇傾向を保ちながら推移した。2C では 1C と異なり、5月前半に一時的な低下が見られたが、やがて、ほぼ同じ値となった。このことから、微細な時間変化による差は生じる一方、コンブのロープ間の塩分濃度の状況は大きく変化していないと考えられる。

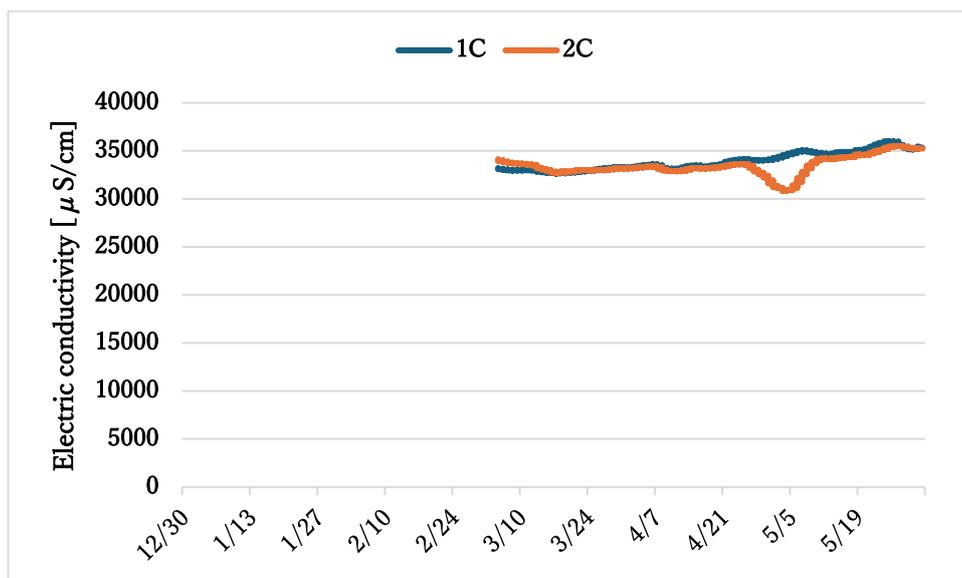


Fig. 9-d Seasonal changes of electrical conductivity of seawater in waters where *S. japonica* var. *religiosa* was cultivated

ワカメの密度操作の効果

対照区(1A, 2A), 高密度区(1B, 2B), 低密度区(1C, 2C)のワカメのバイオマス量(付着器除く)の推移を Fig. 10 に示す。Fig. 7 に前述の通り, 対照区のバイオマス量は, 1 月後半に 0.774 ± 1.04 kg/m, 2 月後半に 3.53 ± 1.78 kg/m, 4 月半ばには 10.5 ± 7.86 kg/m に達した。高密度区のバイオマス量は, 1 月後半に 1.17 ± 0.88 kg/m, 2 月後半に 8.47 ± 3.84 kg/m, 4 月半ばには 22.4 ± 6.16 kg/m に達した。低密度区のバイオマス量は, 1 月後半に 0.65 ± 0.58 kg/m, 2 月後半に 6.60 ± 3.97 kg/m, 4 月半ばには 14.0 ± 5.46 kg/m に達した。

1 月後半において, 3 つの区画間に有意な差はなかった(Kruskal-Wallis test, $H = 3.42$, $p > 0.05$)。しかしながら, 2 月後半においては, 区画間に有意な差が存在し(Kruskal-Wallis test, $H = 7.60$, $p < 0.05$), 高密度区が対照区よりも有意に大きかった(Steel-Dwass test, $Z = 2.52$, $p < 0.05$)。4 月半ばでも, 区画間に有意な差が存在し(Kruskal-Wallis test, $H = 10.2$, $p < 0.05$), 高密度区が対照区(Steel-Dwass test, $Z = 2.63$, $p < 0.05$), 低密度区よりも有意に大きくなり(Steel-Dwass test, $Z = 2.52$, $p < 0.05$), 高密度区は対照区よりも 2 倍以上の値となった。低密度区は対照区よりも大きな値となったが, 有意ではなかった(Steel-Dwass test, $Z = 1.58$, $p > 0.05$)。

各操作区の藻体数をワカメの収穫期である 4 月半ば(3 回目の測定)に計測した結果, 対照区(1A, 2A)で 45 本, 高密度区(1B, 2B)で 103 本, 低密度区(1C, 2C)で 49 本であった。対照区は低密度区の半分の種糸間隔であったものの, 区画内の株数, 藻体本数はほぼ変わらない値であった。

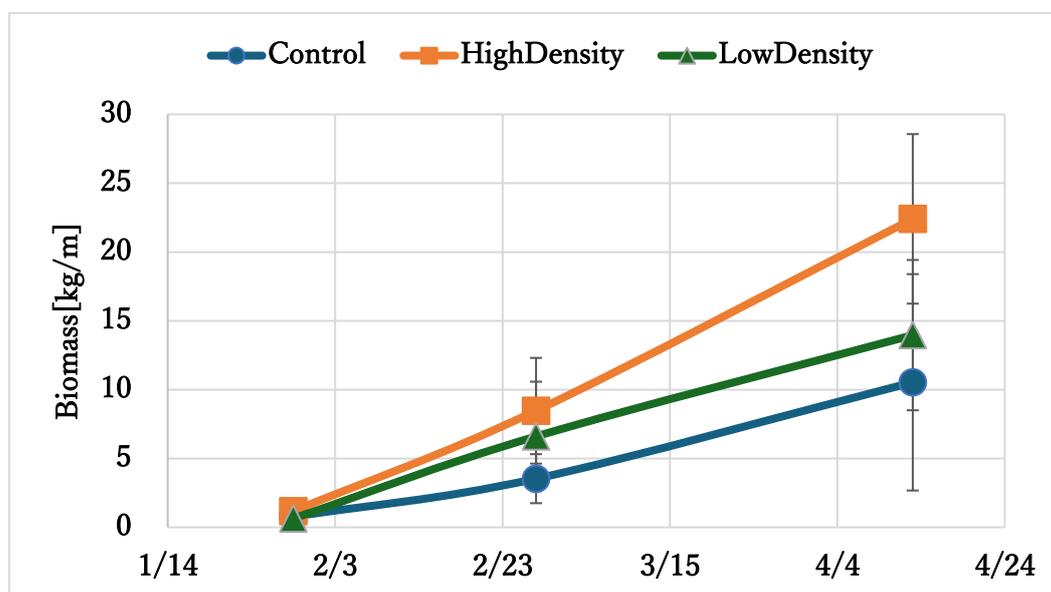


Fig. 10 Seasonal changes of biomass of *U. pinnatifida* in control group (1A, 2A), high density (1B, 2B) and low density group (1C, 2C)

対照区(1A, 2A), 高密度区(1B, 2B), 低密度区(1C, 2C)のワカメの1藻体あたりのバイオマス量(付着器除く)の推移をFig. 11に示す。対照区では, 1月後半に 41.4 ± 37.4 g, 2月後半に 245 ± 57.4 g, 4月半ばには 629 ± 171 gに達した。高密度区では, 1月後半に 32.2 ± 21.5 g, 2月後半に 244 ± 103 g, 4月半ばには 626 ± 111 gに達した。低密度区では, 1月後半に 34.3 ± 22.5 g, 2月後半に 371 ± 147 g, 4月半ばには 829 ± 284 gに達した。

ワカメの収穫期である4月には, どの区画においても有意な差はなかったが(Kruskal-Wallis test, $H = 4.02, p > 0.05$), 2月後半と4月半ばには低密度区のバイオマス量が他の2区画よりも大きくなる傾向を示した。対照区と高密度区はほぼ同じ値で推移していた。

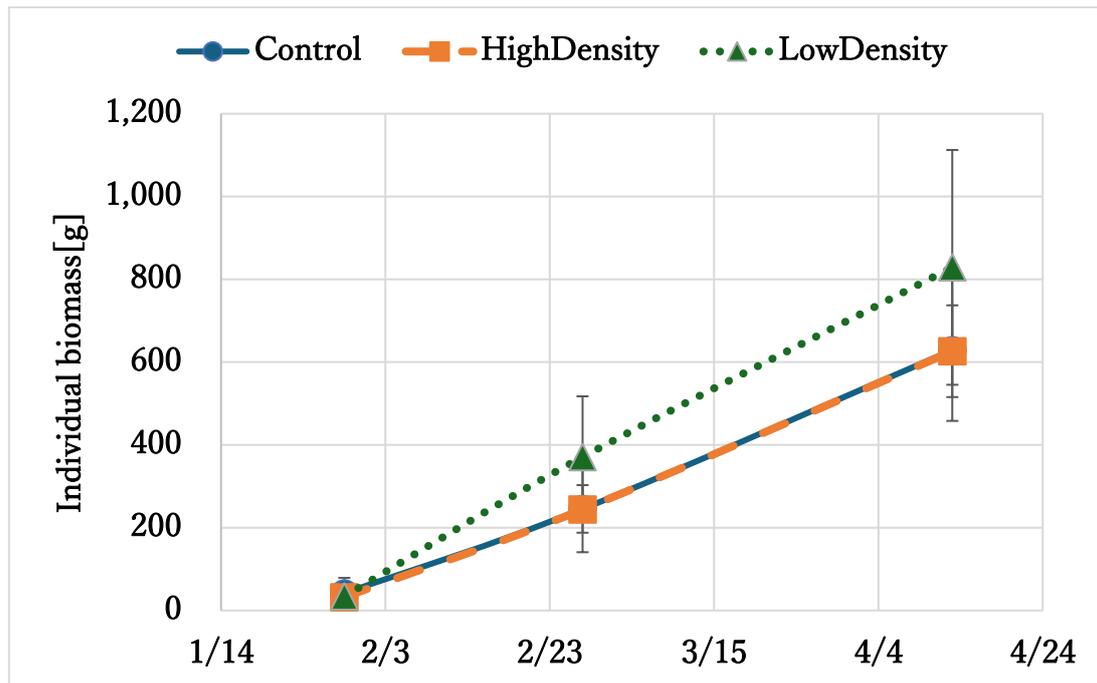


Fig. 11 Seasonal changes of individual wet weight of *U. pinnatifida* in control group (1A, 2A), high density (1B, 2B) and low density group (1C, 2C)

対照区(1A, 2A), 高密度区(1B, 2B), 低密度区(1C, 2C)のコンブの藻体バイオマス量 (付着器除く) の推移を Fig. 12 に示す。前述の通り, 対照区のバイオマス量は, 1月後半に 1.18 ± 0.62 kg/m, 2月後半に 3.68 ± 2.08 kg/m, 4月半ばには 23.2 ± 11.0 kg/m, 6月前半に 45.5 ± 24.1 kg/m に達した。高密度区のバイオマス量は, 1月後半に 0.932 ± 0.17 kg/m, 2月後半に 3.87 ± 2.03 kg/m, 4月半ばには 20.3 ± 6.07 kg/m, 6月前半に 38.1 ± 6.77 kg/m に達した。低密度区のバイオマス量は, 1月後半に 1.01 ± 0.36 kg/m, 2月後半に 2.75 ± 0.84 kg/m, 4月半ばには 14.9 ± 5.56 kg/m, 6月前半に 31.6 ± 7.50 kg/m に達した。4月半ば以降において, 平均値では対照区が他の2区画よりも大きい値で推移した。しかしながら, ワカメの収穫期である4月(Kruskal-Wallis test, $H = 0.889$, $p > 0.05$), コンブの収穫期である6月のいずれにおいても3つの区画間に有意な差はなかった(Kruskal-Wallis test, $H = 1.77$, $p > 0.05$)。高密度区が4月半ばに有意に大きな値となったワカメとは異なり, ワカメの密度の違いに応じたコンブバイオマス量の違いは生じないことが示唆された。

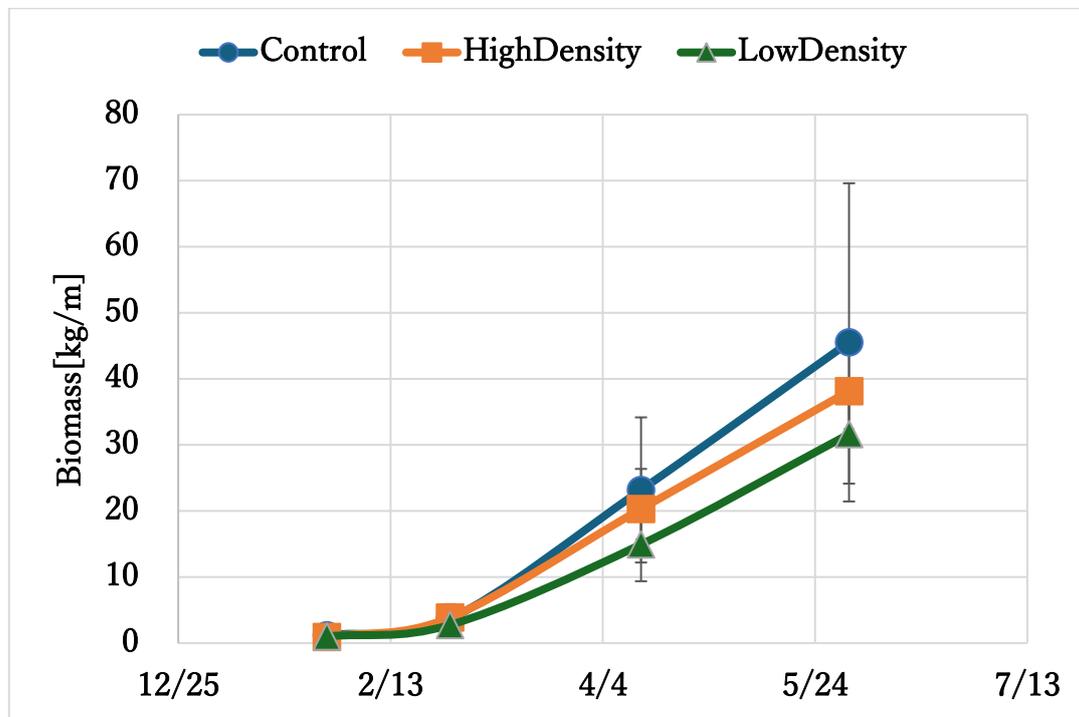


Fig. 12 Seasonal changes of biomass of *S. japonica var. religiosa* in control group (1A, 2A), high density (1B, 2B) and low density group (1C, 2C)

対照区(1A, 2A), 高密度区(1B, 2B), 低密度区(1C, 2C)の複層養殖のバイオマス量(付着器除く)の推移を Fig. 13 に示す。4月までのバイオマス量は、ワカメとコンブを合わせた値で、6月のバイオマス量(4回目の測定)はコンブのみの値となる。前述の通り、対照区のバイオマス量は、1月後半に 1.96 ± 1.24 kg/m, 2月後半に 7.21 ± 1.33 kg/m, 4月半ばには 33.7 ± 8.54 kg/m, 6月前半には 45.4 ± 16.8 kg/m に達した。高密度区のバイオマス量は、1月後半に 2.11 ± 0.88 kg/m, 2月後半に 12.3 ± 4.52 kg/m, 4月半ばには 42.7 ± 4.86 kg/m, 6月前半に 38.1 ± 6.29 kg/m と推移した。低密度区のバイオマス量は、1月後半に 1.65 ± 0.80 kg/m, 2月後半に 9.35 ± 4.26 kg/m, 4月半ばには 28.9 ± 3.87 kg/m, 6月前半に 31.6 ± 6.07 kg/m と増加した。

ワカメの収穫期である4月半ば(3回目の測定)では、高密度区が他の2区画よりも高く、区画間に有意な差があった(Kruskal-Wallis test, $H = 10.4$, $p < 0.05$)。有意な差があったのは、高密度区と低密度区であった(Steel-Dwass test, $Z = 3.36$, $p < 0.05$)。コンブの収穫期である6月では、ワカメの収穫によって高密度区の値が減少し、対照区の方が最も大きな値となったが、区画間に有意な差はなかった(Kruskal-Wallis test, $H = 3.46$, $p > 0.05$)。

対照区において、全体のバイオマス量の内、ワカメのバイオマス量の占める割合は2月後半で約49%、4月半ばで31%と推移した。高密度区では、ワカメの占める割合は2月後半で約69%、4月半ばで52%となった。低密度区では、ワカメの占める割合は2月後半で約71%、4月半ばで48%となり、コンブの成長に伴って、どの区画でも一貫してワカメの占める割合は減少した。

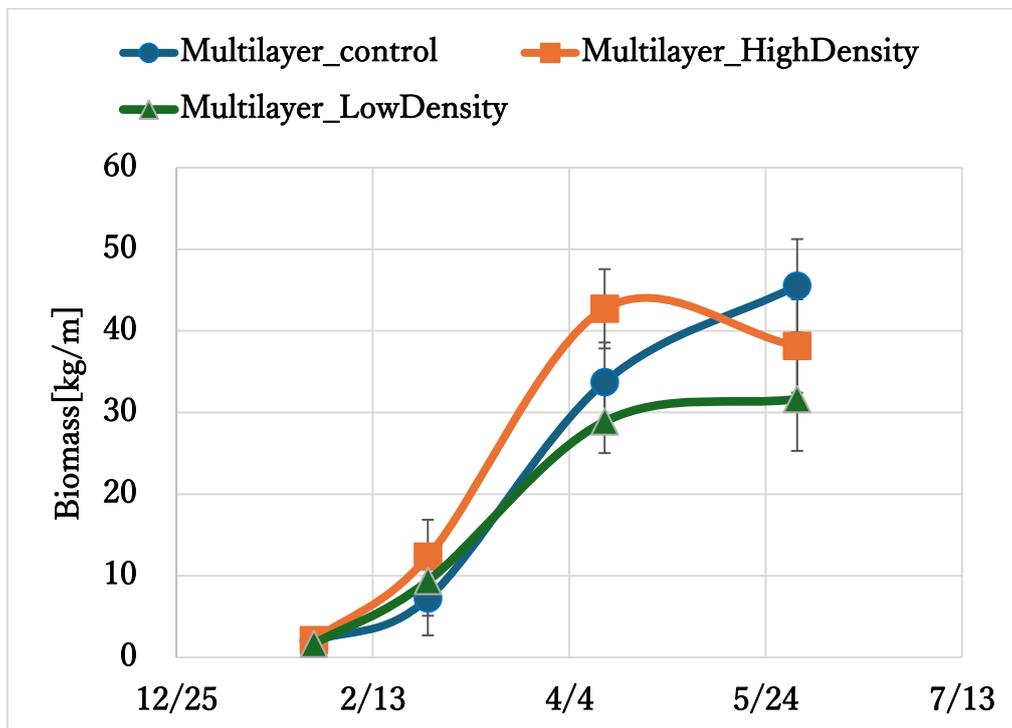


Fig. 13 Seasonal changes of biomass of Multilayer in control group (1A, 2A), high density (1B, 2B) and low density group (1C, 2C)

ワカメの養殖期間延長と部分切除の効果

養殖期間を延長した際の対照区2区画(1A, 2A)と部分切除区(1D)のワカメのバイオマス量(付着器除く)の推移を Fig. 14 に示す。

対照区のバイオマス量は、延長後の6月前半に 19.6 ± 14.9 kg/m に達し、期間を延長した場合、バイオマス量は収穫期(4月)の1.87倍に増加した。ただし、6月前半にサンプリングしたワカメの形態的特徴としては、孢子葉の肥大化、葉状部の高厚化、葉状部のうねりの増加、葉状部先端の先枯れ、付着生物の増加、斑点の増加など、食用目的には不適な特徴が見られた(Fig. 15)。先枯れは藻体により程度の差が大きく重量のばらつきが大きかったことから、6月前半のバイオマス量の値において大きな標準偏差が得られる結果となった。

部分切除区のバイオマス量は、1月後半に 0.891 ± 0.182 kg/m, 2月後半に 10.8 ± 2.24 kg/m(この後に切除, 部分切除量は 1.54 kg/m), 切除後の4月半ばには 12.4 ± 3.79 kg/m, 6月前半に 41.0 ± 12.4 kg/m に達した。全期間を通じてバイオマス量は部分切除を行っても増加し続けた。対照区との比較では、2月の段階において、部分切除区のバイオマス量は有意に大きかった。(Mann-Whitney U test; $U = 0, p < 0.05$)。その後に行った部分切除処理によって、4月の段階では対照区と類似したバイオマス量となり、有意な差はなかった(Mann-Whitney U test, $U = 10, p > 0.05$)。しかしながら、部分切除区はその後対照区よりも成長し、6月の段階では対照区の約2.1倍の値になり有意に大きくなった(Mann-Whitney U test, $U = 3, p < 0.05$)。

部分切除区の藻体全長に関しては2月後半に145cmであり、その内の約80cmを部分切除し、65cmとなった。その後、4月半ばまでに141cmまで伸長し、6月前半ではわずかに減少して140cmであった。対照区では2月後半に125cmであり、その後4月半ばまでに199cmと伸長し、6月前半に175cmと減少した。両区画のいずれも、2月後半から4月半ばまでの伸長は同じ程度であった。一方で、4月半ばから6月前半に関しては、対照区では全長が24cm減少したのに対し、部分切除区ではほぼ変わらない長さが維持された。つまり、対照区と比較して部分切除区の方が先枯れによる葉状部先端の減少が少ないことが示唆された。

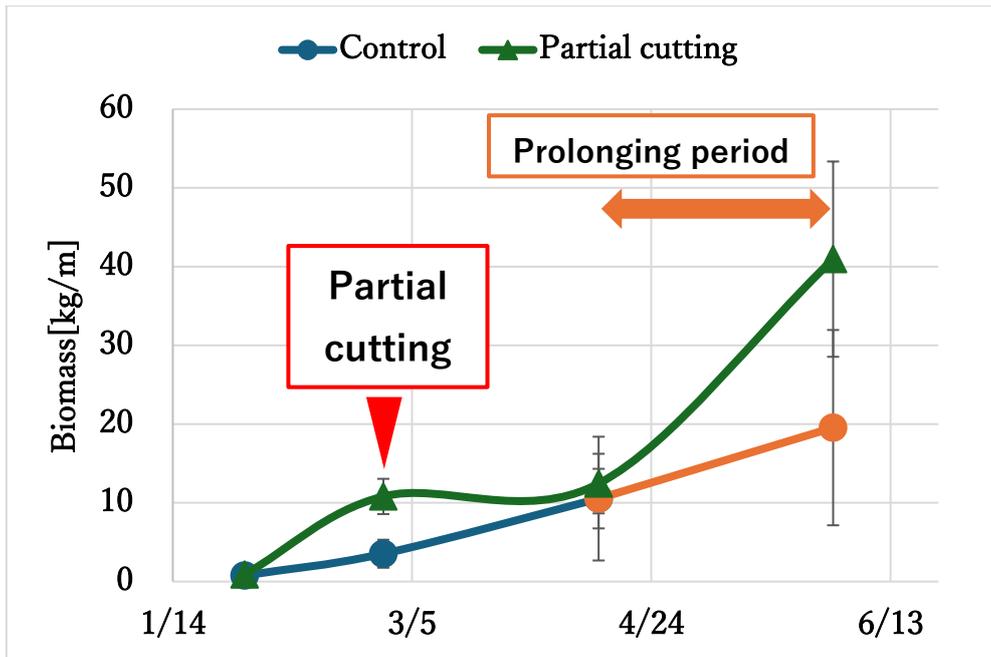


Fig. 14 Seasonal changes of biomass of *U. pinnatifida* in no cutting group (1A, 2A) and partial excision group (1D)



Fig. 15 Condition of *U. pinnatifida* in early June (left: tip of blade, center: Close-up of stipe and blade, right: whole algae)

ワカメの各部位の割合の変化

各時期の対照区(1A, 2A)のワカメの各部位の割合を Fig. 16, Table 3 に示す。葉状部の割合は一貫して減少し続けたが、2月から4月にかけては減少量が小さく、大きく減少したのは4月から6月にかけてであり、先枯れが目立った時期と重なる。中肋の割合は、増減を繰り返していたが、収穫期である4月に最も割合が小さくなった。孢子葉の割合は一貫して増加し続け、どの時期にかけても増加したが、特に増加したのは、4月半ばから6月前半であり、食用収穫時期を超過させて成長させたことにより、孢子葉が遊走子を放出し始める初夏の時期に近づくにつれて、大きくなった。

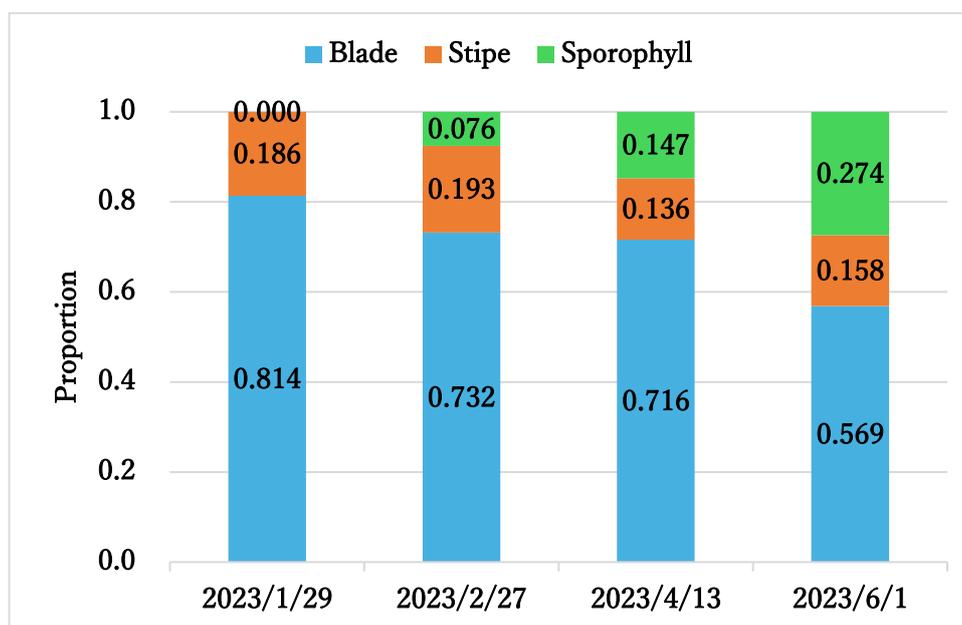


Fig. 16 Seasonal changes in the proportion of each part of *U. pinnatifida* in control group (1A, 2A)

Table 3 Seasonal changes in the proportion of each part of *U. pinnatifida* in control group (1A, 2A)

	Jan-29	Feb-27	Apr-13	Jun-1
Sporophyll	0.000	0.076	0.147	0.274
Stipe	0.186	0.193	0.136	0.158
Blade	0.814	0.732	0.716	0.569

対照区 (1A, 2A), 高密度区 (1B, 2B), 低密度区 (1C, 2C)の各時期のワカメの各部位の割合を Fig. 17 に示す。どの区画においても, 対照区と同様に, 葉状部の割合が減少し, 成熟のために孢子葉の割合が時間とともに増加する傾向を示した。ワカメの収穫期である4月半ばの各区画同士の葉状部の比率(Kruskal-Wallis test, $H = 3.76, p > 0.05$), 中肋の比率(Kruskal-Wallis test, $H = 5.84, p > 0.05$)のいずれも, 有意な差はなかったものの, 高密度区の葉状部の割合が低く, 中肋の割合が高い傾向が見られた。このことから, 密度操作によって, 高密度区ほど食用として最も価値のある葉状部の割合が減少し, より価値の低い中肋の割合が増加する傾向があることが分かった。

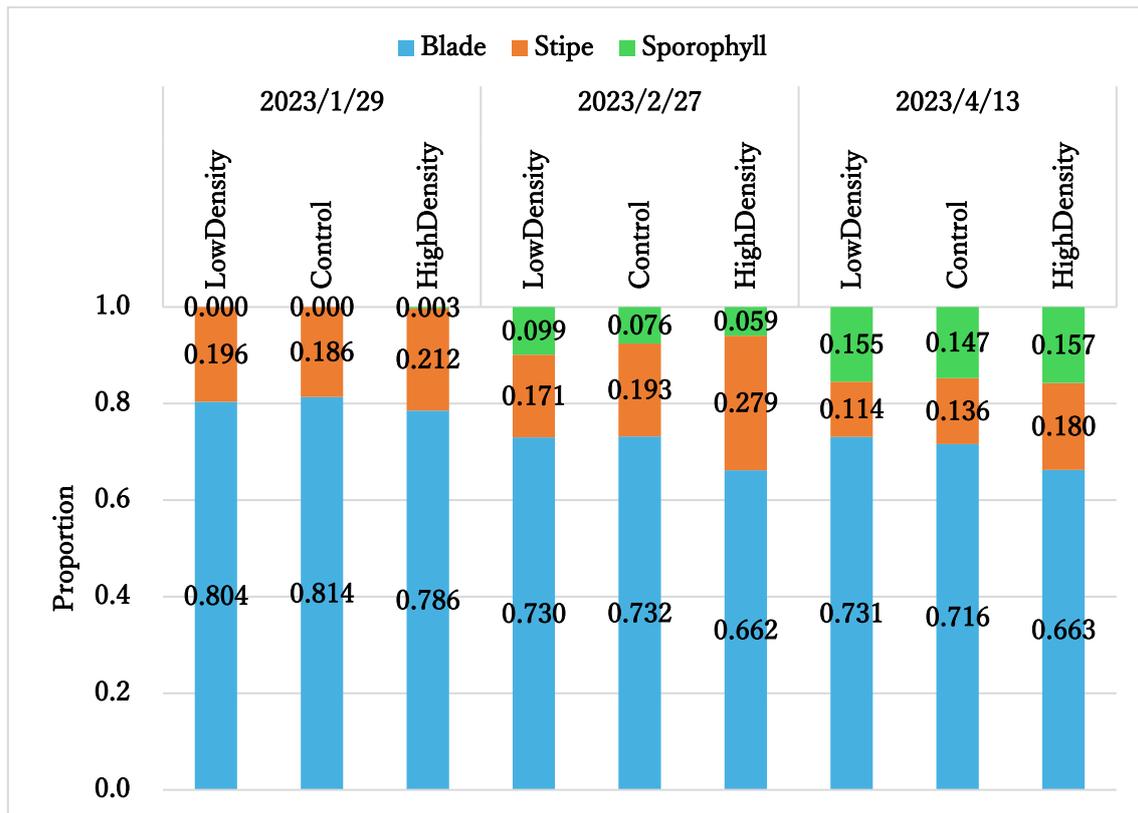


Fig. 17 Seasonal changes in the proportion of each part of *U. pinnatifida* in control group (1A, 2A), high density group (1B, 2B) and low density group (1C, 2C)

対照区(1A, 2A)と部分切除区(1D)の4月と6月のワカメの各部位の割合を Fig. 18 に示す。対照区の4月と6月の葉状部の割合は有意な差があった(Mann-Whitney U test, $U = 0$, $p < 0.05$)。対照区は Fig.15 に示すように、先枯れによる葉状部先端の減少が顕著であった。一方で、部分切除区の4月と6月の葉状部の割合は有意な差がなかった(Mann-Whitney U test, $U = 4$, $p > 0.05$)。部分切除区は、4月と6月で全長がほぼ変わらず、先枯れによる葉状部先端の減少が軽微であった。Fig.18 においても、対照区は葉状部の割合の減少が大きかったのに対し、部分切除区では、葉状部の割合の減少は比較的小さかった。

同時期で比較すると、4月では対照区と部分切除区の葉状部の割合には有意な差があった(Mann-Whitney U test, $U = 1$, $p < 0.05$)。しかしながら、6月では対照区と部分切除区の葉状部の割合には有意な差はなく(Mann-Whitney U test; $U = 12$, $p > 0.05$)、最終的には類似した比率となった。

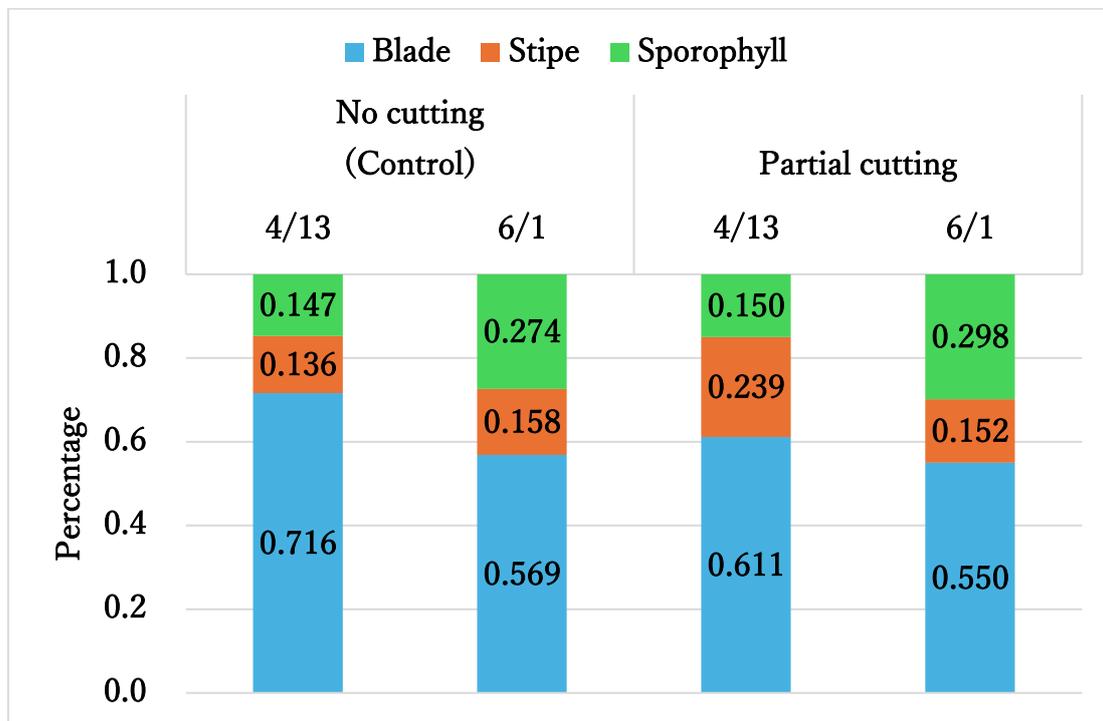


Fig. 18 Seasonal changes in the percentage of each part of *U. pinnatifida* in no cutting group (1A, 2A) and partial cutting group (1D)

CO₂貯留量の算定

各時期のワカメとコンブの各部位の乾燥重量/湿重量比率をまとめた結果を Table 4 に示す。全体の傾向として、ワカメ・コンブのいずれも、藻体が成長にするにつれてどの部位の値も大きくなった。ワカメの部位ごとで比較すると、葉状部の値が孢子葉と中肋の値と比べ、わずかに低かった。付着器については、CO₂貯留量の算出には用いなかったが、ワカメにおいてもコンブにおいても他の部位と比較的類似した値となった。

Table 4 Ratio of dry weight/wet weight of each part at each season

<i>U. pinnatifida</i>		Jan-29	Feb-27	Apr-13	Jun-1	Average
	Sporophyll	0.11	0.11	0.14	0.17	0.14
	Stipe	0.11	0.11	0.18	0.14	0.15
	Blade	0.097	0.10	0.12	0.15	0.12
	Rhizoid	-	-	0.21	0.15	0.18
<i>S. japonica var. religiosa</i>						
	Blade	0.10	0.13	0.11	0.14	0.13
	Rhizoid	-	-	-	0.12	0.12

次に、ワカメとコンブのバイオマスの付着器とそれ以外の部位との比率を Table 5 に示す。全体のバイオマスのうち付着器の占める割合は、ワカメでは 5.68%、コンブでは 3.06%であった。ワカメとコンブのバイオマスのいずれも、90%以上を付着器以外の部位が占めていた。

Table 5 Ratio of biomass of rhizoid and other part

<i>U. pinnatifida</i>		May-13	Jun-1
	Sporophyll	0.943	-
	Stipe		-
	Blade		-
	Rhizoid	0.0568	-
<i>S. japonica var. religiosa</i>			
	Blade	-	0.969
	Rhizoid	-	0.0306

Table 4 の値を用いて算出した、各操作における、ロープ 1m あたりの養殖期間 CO₂ 貯留量の結果を Fig. 19 に示す。対照区と密度操作区(High-Density, Low-Density)の複層養殖においては、ワカメで 4 月、コンブで 6 月のバイオマス量の値を合計した値を用いて算出した。期間延長時の対照区(Prolonging period(No cutting)), 部分切除区(Prolonging period(Partial cutting))の複層養殖においては、ワカメの 6 月、コンブの 6 月のバイオマス量の値を合計した値を用いて算出した。

各操作区画で種系の脱落や種系当たりの藻体本数の初期値が異なるなど、ばらつきを生み出す要因は除外できていないが、数値補正を全く行わない観測データそのものを用いた算定では、比較の基準とした、対照区のワカメの 4 月の値が最も低かった。複層養殖においては値の大きい順から、期間延長時の部分切除区(525 g/m/year), 期間延長時の対照区(414 g/m/year), 高密度区(385 g/m/year), 対照区(353g/m/year), 低密度区(289g/m/year)であった。ワカメのみの 4 月の結果と比較すると、その比率は、期間延長時の部分切除区：7.6, 期間延長時の対照区：6.0, 高密度区：5.6, 対照区：5.1, 低密度区：4.2 となり、最も効果的であったのは期間延長し、さらに、部分切除を行った場合であった。Table 4 および Table 5 より、測定できなかった付着器部分は測定した部位の乾燥重量の 1%であったため、藻体全部位では CO₂ 貯留量を 1.01 倍した値となる。

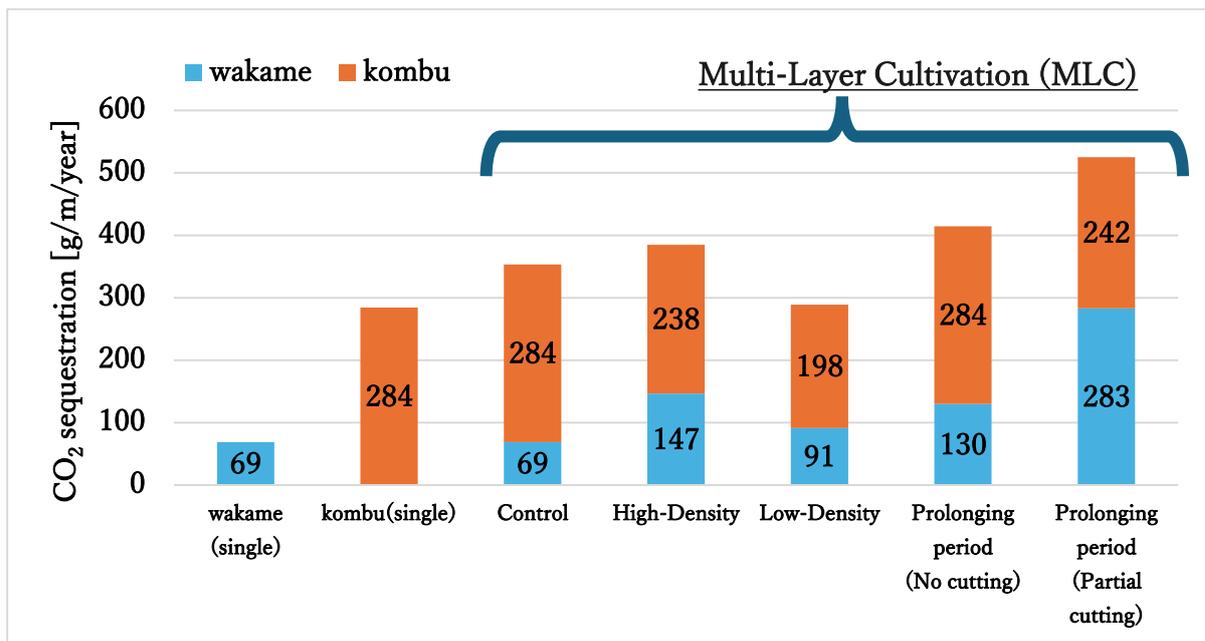


Fig. 19 Annual CO₂ sequestration per 1 m for each method at harvest

考察

バイオマス量と環境条件の妥当性

対照区のワカメのバイオマス量は1月後半から、2月後半、4月前半にかけて、0.774 kg/m, 3.53 kg/m, 10.5 kg/mと順調に増加した (Fig. 7)。対照区と同じ種糸間隔 20 cm で実験した徳島県の先行研究では、収穫時のバイオマス量が約 13 kg/m であり²⁷⁾、比較的近い値となった。同じ三陸地域の岩手県で行われた先行研究では、1m あたり藻体 10 本の密度の養殖で、4月初旬で 14.09 ± 2.93 kg という値であり²⁸⁾、こちらも同様に比較的近い値となった。本研究の対照区のワカメの密度は、1m あたりの平均藻体本数は 15 本であり、若干小さい値ではあるが、一般的な養殖生産量と大きな違いはないと考えられる。

ワカメの生育する最適な水温範囲について、Morita ら (2003) が 20 °C 以上では生育の低下がみられることを報告している³²⁾。Fig. 8-a のワカメの水温は 20 °C 以下の範囲にとどまっており、水温は適切な環境にあったと言える。

ワカメの光環境については、Fig. 8-b において、照度の値は 2 つのロープ間で、1月後半の時期まで似た傾向を示し、その後は不規則に変動しながら低い値で推移した。値が変動するとすれば、ワカメの藻体がセンサーに重なることが考えられるが、ワカメのバイオマス量の季節的な増減に対応したような変化は見られなかった。ワカメ幼胞子体の光合成量に及ぼす、水温と光の影響の先行研究において、本研究の温度範囲である約 8~16 °C の温度範囲では、30,000, 20,000 lux と比べて 10,000 lux の光の強さで最も光合成が盛んに行われていたことが報告されている³³⁾。また、8,000, 5,000, 2,000 lux の光環境での屋内水槽での先行研究では、8,000 lux と 5,000 lux で葉長と葉の重量の成長が同程度、2,000 lux では成長が低下した³⁴⁾。つまり、5,000 ~ <20,000 lux 程度が大きな光合成量の光環境であると言える。Fig. 8-b より、その範囲の光の強さに達していたのは、2C の 12 月前半から 1 月前半の一部期間のみであり、それ以外の期間の 2C と 1C のほぼすべての期間において、5,000 lux よりも低い値で推移していた。2C の方がより望ましい光環境であったにも関わらず、1月後半のサンプリングにおいて、藻体 1 つあたりの平均湿重量は 2C よりも 1C の方が大きかった。つまり、照度の大きさに比例して、バイオマス量が大きくなることはなかったため、照度の差よりも他の要因がバイオマス量に及ぼす影響が大きいと言える。また、Fig. 8-c より、ワカメのロープの加速度(ロープが受けていた水流環境の指標)は、ロープ間で類似した傾向が見られた。ロープの合成加速度について、言及された先行研究は無いものの、ワカメの生育と水流との関係性では、水流が 10-20 cm/s で最も幼胞子体の葉状部の生育が進むことが明らかとなっている³⁵⁾。今回測定した合成加速度と水流の関係は今後の解析が必要ではあるが、水温・照度環境・合成加速度の数値から、ロープ 1、ロープ 2 間でワカメの養殖環境に、ワカメの成長に影響する大きな差異がないことは示唆される。

本実験地域では、養殖期間の中盤にかけて塩分が低下したものの、ワカメは成長を続けていた。塩分濃度が低下した理由としては、一般的に河川水の方が海水よりも電気伝導度は低いため、河川水の流入量が増加していた可能性が考えられる。一部は塩分の低下によって、脱落した可能性も否定できないが、塩分が最も低下した 2 月後半以降の時期で目立った脱落は生じなかったため、塩分の低下に由来するバイオマス量の減少への影響は大きくないと考えられる。

養殖コンブのバイオマスを比較可能な先行研究は無かった。そのため、現地の養殖生産者に聞き取りした結果、2023年の成育状況は例年通りかそれ以上の収穫量であり、本研究の試験区間のコンブ生産量についても、同じロープの試験区間外、あるいは別のロープと比較しても成育状況に差は見られないとのことであった。この聞き取り結果より、本研究で得られた Fig. 7 の結果は、通常のコンブ養殖生産量の範疇から外れていないと考えている。

コンブが生育可能な温度範囲は、5~22℃であり、最も生育が盛んな温度範囲は15~20℃であることが先行研究で報告されている³⁶⁾。Fig. 9-aより、本実験で測定された水温の範囲はどちらのロープでも生育可能な範囲内に留まっており、その傾向はロープ間で類似していた。養殖の最終期である5月後半には15℃以上を上回る日もあり、養殖の後期になるにつれて望ましい水温環境に近づくとつれて、バイオマス量の増加は順調に大きくなっていったと考えられる。

Fig. 9-bより、コンブの照度はどの区画も不規則な変動を繰り返した。照度に影響を与えるとすれば、上層のワカメが光を遮る場合か、下層のコンブ自体がセンサーに重なるような場合が考えられるが、ワカメやコンブのバイオマス量の増減に対応した傾向は確認できなかった。そのため、下層の海藻に届く光に上下層のバイオマス量が影響を与えているとは考えにくい。少なくともロープ1とロープ2間でワカメやコンブのバイオマス量に影響するほどの明瞭な差があるとは考えにくい。

コンブロープの合成加速度(ロープが受けていた水流環境の指標)について、ロープ間での差異は小さかった(Fig. 9-c)。コンブ養殖時の海域流動環境について計測された先行研究は無いものの、生育と流速について比例関係にあることが先行研究で報告されている³⁷⁾。

Fig. 9-dより、本研究のコンブの塩分濃度についてはワカメと異なり、ほぼ安定して推移していた。おそらく、ワカメとコンブの養殖ロープの間に河川水等の層が形成されていると考えられる。少なくともコンブロープでは、ロープ間ではコンブのバイオマス量に影響するほどの顕著な差異は確認できなかった。

複層養殖におけるワカメの密度操作の効果

複層養殖では、ワカメ養殖単独で4月半ばに収穫する場合と比較して、同じ海面面積でバイオマス量を大きく増加させることができた。ワカメ単独では、収穫する4月の時点でロープ1mあたり10kg程度であるところ(Fig. 7)、6月まで養殖を実施する複層養殖ではコンブバイオマス量の貢献が大きく、平均で1mあたり45kg以上のバイオマス量となった。一方でコンブを生産することによるワカメバイオマス量への影響、ワカメ生産によるコンブバイオマス量への影響も確認されなかった。その結果、CO₂貯留量を大幅に増加させることとなった(Fig. 19)。本研究で対象とした養殖生産者による複層養殖は、従来食用を目的とした海藻養殖であるため、収穫時期のより早いワカメを上層に配置し、収穫作業時に下層のコンブの葉状部の傷や破断につながらないように工夫がされている。また、調査地周辺において、ワカメの方が、取引価格がより高価なため、ワカメに主眼を置いた複層養殖となっている。しかしながら、CO₂吸収量の増加を主眼に据えた海藻養殖とする場合、本研究の結果よりコンブとワカメを合計したバイオマス量を最大化させる複層養殖へ転換することも選択肢となる。ワカメ・コンブ双方のバイオマス量を最大化させる操作として、まずワカメ種糸密度操作によるワカメのバイオマス量と下層のコンブのバイ

オマス量について以下に考察する。

調査地の養殖生産者によれば、ワカメ種苗(種糸)の高密度化、あるいは低密度化による利点と弊害として、経験上以下に示すような点があげられている。

【高密度化】

① 総収穫量の増加

② 成長の鈍化

=> 収穫の最盛期に発達が不十分

=> 収穫の開始時期の後ろ倒し

③ 収穫期間の後ろ倒し

=> 養殖の終盤では、先枯れ・色調の薄化、付着生物の増加が起こる

=> 商品価値の低下、加工負荷の増加

【低密度化】

① 総収穫量の減少

② 成長の加速

=> 短期間の急成長により収穫が追い付かない

=> 胞子葉の硬化、葉状部の厚化

=> 商品価値の低下

③ 収穫期間の前倒し

Fig. 10 より、ワカメを従来の2倍の高密度で養殖した結果、複層養殖の対照区および低密度区と比べて、収穫時期におけるワカメのバイオマス量を有意に増加させることができた。CO₂吸収量においても、Fig. 19 より複層養殖の高密度区と複層養殖の対照区間で、ワカメによる吸収量だけ考慮すると、その値は対照区・低密度区の2倍近い大きな値であった。その一方、従来の半分の低密度で養殖した結果、その場合もワカメのバイオマス量、CO₂吸収量は対照区よりやや高い値となっている。対照区がより密度が高いにもかかわらず、このような結果となったのは、低密度によるワカメ藻体間の密度効果が緩和され、藻体1本当たりの成長量が増加して低密度操作によるバイオマス量減少の効果を相殺した結果か、あるいは試験中に対照区のワカメの株の脱落による減少が大きくなり、結果的に対照区と低密度区の藻体数が同じ程度になったことなどが原因と考えられる。4月半ばのワカメ藻体数の計測により、対照区では、養殖開始時に設置した15本の種糸のうち、1Aで8本、2Aで4本分しか残存していなかった、つまり8株、4株のワカメがそれぞれ残存していた。それに対し、低密度区では、養殖開始時に設置した種糸8本分のうち、1Aで8本、2Aで7本分が残っており、つまり、8株と7株のワカメがそれぞれ残存していた。対照区では種糸が水流等で流失するなどによって藻体数が減少し、区画間での藻体数の差が小さくなったと考えられる。バイオマス量の差が生まれなかったのは、後者の理由によるものと示唆される。

一方のコンブのバイオマス量においては、ワカメの密度操作は、どの区画においても有意な変

化をもたらさなかった (Fig. 12)。複層養殖としての総バイオマス量においても、ワカメの収穫期である4月半ばには高密度区と低密度区で有意差があったものの、コンブの収穫期である6月前半にはどの区画も有意な差はなかった (Fig. 13)。また、前述の通り、照度などのコンブの成長に影響を及ぼす環境条件が、ワカメのバイオマス量に依存して変化した結果は得られなかった。このことから、ワカメの密度操作は、ワカメ自身のバイオマス量やCO₂吸収量の増加にのみ影響を及ぼした可能性が示唆される。これらの結果は、地域の養殖生産者がワカメのバイオマス量とコンブのバイオマス量をお互いに影響を及ぼさない独立した存在とみなし、それぞれでバイオマス量増加のための工夫をしながら養殖している現状とも一致する (現地養殖生産者からの聞き取り)。複層養殖において、上層のワカメのバイオマス量が増え続ける範囲で藻体本数を高密度化することがCO₂吸収目的の海藻養殖においては有効であろう。さらに高密度化し続けてもワカメのバイオマス量が増え続けるのか、また、下層のコンブのバイオマス量へ与える影響が生じるかどうかについては、さらなる研究が必要である。

次に、密度操作の結果がバイオマス量、CO₂吸収量以外の点でどのような効果をもたらしたか考察する。前述のように、ワカメ1藻体あたりのバイオマス量は、対照区、高密度区、低密度区の間で有意差はなかったものの、低密度区のみやや大きい傾向が得られた (Fig. 11)。低密度区での1藻体あたりバイオマス量の増加は、密度効果によってもたらされた可能性がある。密度効果は海藻においても報告されており³⁸⁾、区落内に藻体が密集して生息する環境において、同種間の栄養や空間の競合により、死亡率の上昇、成長の低下などが生じるとされている。さらに、4月の収穫期における各区画の藻体の全長平均を比較すると、低密度区、対照区、高密度区でそれぞれ193, 204, 219 cmと密度が大きいほど、全長も長くなった。海藻の密度効果について調査した先行研究において、高密度生育環境の方が低密度生育環境よりも、全長の伸長が速かったことが報告されており³⁹⁾、本研究の結果と一致している。理由としては避陰反応 shade avoidance response が関係している可能性がある。これは陰に入った植物が示す反応であり、光合成ができない不利な環境から脱するために、茎の伸長などが生じるとされている。海藻でも起こることが知られており、本研究の高密度区においても同じ反応が起こった結果、高密度区でのワカメの全長が伸長した可能性がある。

さらに、2月後半、4月半ばにおいて、有意な差ではなかったものの、高密度化するにつれて、ワカメの葉状部の割合は小さく、中肋の割合は大きくなる傾向が見られた (Fig. 17)。葉状部が最も食用として価値のある部位であるため、高密度化によって、食用として出荷するには不向きな形態的特徴が生じたこととなる。これらの事実を踏まえると、ワカメの密度は食用利用とCO₂吸収量最大化の目的間で、トレードオフの関係にあることが示唆される。

ワカメの養殖期間延長と部分切除の効果

Fig. 14, Fig. 19 より, ワカメの養殖期間を6月前半まで延長することで, バイオマス量, CO₂吸収量は4月半ばの値から増加した。バイオマス量の増加速度に注目してみると, 4月半ばのバイオマス量に達するまでは, 養殖開始から4か月半の期間を要している一方, 4月からの約1.5か月の期間で, 4月までの期間と同程度のバイオマス量が生産されていた。Saitoら

(1958)はワカメの胞子体の光合成量は水温が上昇するにつれて増加し, 20℃をピークに減少することを報告している³³⁾。Fig. 8-aより, 海水温は2月後半に10℃を下回ったのち, 4月からの水温は10-15℃の間で上昇しており, この海水温上昇がバイオマスの増加に影響している可能性が考えられる。また, Satoら(2021)によると, 海水温の上昇に伴って, 養殖されたワカメのリン酸塩, 硝酸塩の取り込み速度が上昇した研究も報告されており, 温度環境の変化はバイオマスの増大に寄与した可能性がある⁴⁰⁾。さらに, 本実験地域が位置する追波湾の北上川河口付近の栄養塩状況を調べた先行研究⁴¹⁾において, 栄養塩濃度と塩分濃度が負の相関関係にあることが報告されており, 北上川の河川水が塩分濃度を低下させつつ, 栄養塩を供給している可能性について述べられている。本研究では, Fig. 8-dより, 4月半ば以降の海水の電気伝導度は30,000 μ S/cm以下の値で推移しており, 1月時点と比べると不規則な変動を繰り返しながら低い値で推移していた。また, Fig. 8-aの水温に注目しても, 4月以降は全体として上昇しつつも, 細かな上昇・下降の変動が確認されることから, 2月後半以降は, 海水よりも低温である淡水の流入量が不規則に増減を繰り返していた可能性がある。ワカメの成長にとって望ましい温度環境と栄養塩環境が養殖期間の後期に存在していた可能性がある。

養殖期間が延長された結果, 胞子葉の割合が増え, 葉状部の割合が低下した (Fig. 16)。ワカメの先端部は最も古い組織であり, 一定期間後に細胞が寿命をむかえることを, 一般的にアポトーシスとして知られている。それによる先枯れによって, 葉状部の割合が低下した一方で, 胞子葉は生殖のための器官であり, 遊走子放出の時期にかけて成長し続けることから, このような各部位の割合の変化につながったと考えられる。Gaoら(2013)の研究においては, 養殖開始から3か月経過後に葉状部の乾燥重量は最大に達したものの, その後も胞子葉は成長し続けており³⁰⁾, 本研究もこの結果に類似していた。CO₂吸収目的における胞子葉の割合の増加の利点は, Table 3より葉状部よりも水分含有率が1.5%低いいため, 同じバイオマス量であっても, CO₂吸収量が増加する点が挙げられる。さらに, 乾燥重量を期間ごとに比べると, 成長が進むにつれて, ワカメの水分含有率はどの部位においても低下していくことが明らかになった。つまり, 養殖期間の延長は, 乾燥重量の大きな部位である胞子葉の割合増加, 各部位の乾燥重量の増加という点で, CO₂吸収量の増加に寄与する取り組みであると言える。

続いて, 部分切除の効果について考察する。まず, 部分切除区が2月の時点で対照区よりも有意に大きなバイオマス量であった理由について考察する。対照区の藻体1つあたりの平均重量は245gであったのに対し, 部分切除区は330gと差が生じていた。また, 対照区で, 種糸が脱落せず順調に成長したワカメは6株であったが, 部分切除区では12株であった。その結果, 藻体の本数も対照区は1mあたり15本であったのに対し, 部分切除区は1mあたり31本となり差が生じていた。本調査で得たワカメ種苗は商用流通しているものを用いたため, 種糸一つ一つから生える本数にはばらつきがあった。種糸の脱落は, 親綱の種糸を挟み込んだ隙間に緩みが生じた

まま沖出ししたことによって生じた可能性も考えられる。種糸1つ1つから生えるワカメ藻体の本数と、種糸の脱落による藻体本数の違いが、2月時点のバイオマスの有意差につながった可能性がある。

Fig. 14より、部分切除によってバイオマス量が一時的に減少したとしても、バイオマス量は4月、6月と成長し続け、6月には対照区よりも2.1倍に大きくなり、有意な差が生じた。6月の時点で有意差が生じた原因については、2月の段階と同様に、藻体本数の差に起因する可能性がある。しかしながら、4月から6月にかけての傾きは対照区よりも大きく、藻体本数の差以外の他の要因が影響を与えた可能性も考えられる。そこで考えられる要因の一つとして、部分切除による補償成長が挙げられる。先行研究と比較すると、宮城県の松島湾で行われたワカメの部分切除の効果と実施時期についてのGaoら(2013)の研究では、10月に養殖開始したワカメに対して、1月後半と2月後半に部分切除を行い、それぞれ1か月半後、1か月後まで成長は継続し、全長、葉状部や孢子葉の乾燥重量の有意な増加を報告している³⁰⁾。本研究でも同じように、部分切除後も継続して葉状部の全長は成長し、孢子葉も成長することが確認された。Panschら(2009)によると褐藻類も補償成長をすることが明らかとなっており⁴²⁾、またYoshidaら(2011)らは、海藻は一般的に余剰の栄養塩類を体内に留めておいて、海水中の栄養塩が低下した際に利用することを報告している⁴³⁾。Gaoら(2013)の研究で、ワカメにおいても、養殖期間初期の部分切除の後に、栄養塩類の吸収速度の向上と葉状部の窒素含有量の増加が報告されている³⁰⁾。つまり、ワカメの部分切除によって、葉状部での若い細胞に入れ替わり、栄養塩類の取り込み速度の増加やため込んだ栄養塩類の利用などが補償成長につながった可能性がある。

形態的特徴に関しては、部分切除区も対照区も2月後半から4月半ばまでに全長は70-80 cmほど増加した。一方、4月半ばから6月前半まで部分切除区がほぼ全長が変わらなかったのに対して、対照区は24cmの全長の減少があった。このような結果となった理由として、部分切除された藻体の方が、対照区の藻体よりも、葉状部の先端がより新しい組織であり、先枯れが生じづらかった可能性が考えられる。一方で付着生物の増加や孢子葉の増加は、部分切除区の藻体でも同じように見られたため、期間延長によって見られる特徴の内、先枯れの軽減に対し、部分切除は効果的であったと言える。対照区よりも有意にバイオマス量が増加したのは、本数の差だけでなく、葉状部の減少の緩和も影響している可能性がある。

気候変動対策と水産業との両立

本研究により、ワカメとコンブとの複層養殖において、ワカメの部分切除と期間延長の組み合わせが、最も効果的なCO₂吸収量の増加をもたらしたことが明らかとなった(Fig. 19)。また、密度操作と部分切除なしの期間延長に関しては、CO₂吸収量の増加と共に葉状部の減少と劣化が生じ、水産業における経済的利益の低下につながる結果が得られた。

各手法について、気候変動対策と水産業との両立の観点から、長所と短所を以下に整理する。

複層養殖は上層のワカメ、下層のコンブという組み合わせで調査地では実施されている。長所として、面積を増やすことなくバイオマス量、CO₂量を増加させられること、短所としては、新たな資材が必要なことが挙げられる。地域によって最適な海藻種の組み合わせや複層の数を増やすなどの検討や手法構築を行うことで、さらなるCO₂吸収源となる可能性が考えられる。

ワカメ密度操作の効果としては、高密度化がワカメバイオマス量、CO₂吸収量を増加させ、下層のコンブの成長に負の影響を及ぼさないことが示唆された。長所としては、豊富な量の種苗糸があれば既往の設備を用いてすぐにできることが挙げられる。短所としては、水産業との両立を考えると、高密度区で生じた葉状部の割合の減少は経済的な価値低下につながる事が挙げられる。また、藻体1本あたりの重量の低下も、食用目的には不利な点がある。ワカメ食用保存のための塩蔵処理後、人の手による葉状部と中肋の分離作業において、藻体1本あたりに要する時間は重量に関係なくほぼ同じであり、藻体1本あたりの重量が低下することは、作業時間あたりの出荷量が増えにくいと言われている（養殖生産者への聞き取り）。食用目的の海藻養殖における高密度化はこのような不利な点があるため、食用に向けた生産とCO₂吸収目的の生産とを同時に行う場合は両者の効果を最大化する密度を探索する必要がある。

期間延長の効果としては、バイオマス量の増加、特に乾燥重量の大きな孢子葉の割合の増加、各部位の乾燥重量の増加が挙げられる。長所としては、追加の作業や資材が必要ではないこと、短所としては、葉状部の割合の低下や付着生物の増加などの食用価値の低下が挙げられる。水産業との両立を考えると、ワカメの各部位の肥大化、最も価値のある葉状部の割合の減少、葉状部のうねりの増加、付着生物の増加を引き起こし、形態を変化させ、食料として生じる利益は手放さざるを得なくなる。

ワカメの藻体の部分切除の効果としては、バイオマス量が増加傾向になること、先枯れによるバイオマス量の減少を軽減することが挙げられる。長所としては、部分切除分を食用、CO₂吸収の両方に使えること、実施のタイミングで食用目的とCO₂吸収目的のどちらにより比重を置くかを調節できること、短所としては、手間がかかることが挙げられる。水産業との両立を考えた際には、部分切除分を出荷することで利益を得ることができ、残りを残置し成長させ続けることによってCO₂吸収を達成することができる。また、切除時期の後ろ倒しによって食用目的の割合が増え、前倒しによってCO₂吸収目的の割合を調節できる可能性もあり、柔軟性を持つ。このような柔軟性は、年毎の海況の変化によって、収穫量変動することも多い水産業と、CO₂吸収を両立できる取り組みであると言える。

本研究により、水産業として食用利用とCO₂吸収量を両立させることが可能であることが示唆された。近年は非食用部位のバイオマス活用も進められており、これらの複層養殖、密度操作、期間延長、部分切除の各手法を組み合わせることで、CO₂吸収量を可能な限り増加させ、食用部位が得られない場合であっても、原材料での出荷に近い将来に実現する可能性もある。2024年からは、海藻類を我が国の温室効果ガスインベントリに登録する準備が進んでおり⁴⁴⁾、登録後は森林等と同様にさまざまな温暖化対策にも活用できるようになる。ただ、バイオマス活用や関連する法整備が十分でない現状では、水産業との両立を考慮した場合には、部分切除収穫時のロープへの残置量を調節し、食用目的に伴ったCO₂吸収との両立が現実的な管理である。得られる利益の大きさ、食品としての品質、成長具合などの要素を加味して、食用目的の利益とCO₂吸収量のバランスを調節することができる手法として、現場実装されていくことを期待したい。

謝辞

本論文の執筆にあたり、多くの方々にご支援いただきました。
最終審査では、堀正和教授、藤田大介准教授、米崎史郎教授、巨真吾准教授より、日々の研究では、堀正和教授、藤田大介准教授、丹羽恭介教授より貴重なご指導とご助言を賜りました。感謝申し上げます。

主指導教員である堀正和教授には、研究の着想から、調査、論文執筆まで多くのご指導をいただきました。心から感謝申し上げます。

本研究の調査のためにご協力いただいた現地の養殖生産者、国立研究開発法人水産研究教育機構の澤山周平様をはじめとする職員の皆様に心から感謝いたします。

応用藻類学研究室のみなさまにも多くのご支援をいただきました。お礼申し上げます。
ありがとうございました。

参考文献

- 1) IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- 2) UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement. Report No. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf> (UNFCCC, 2015)
- 3) Panwar, N. L, S. C Kaushik et al. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2011, 15(3), p.1513-1524.
- 4) Ali Hasanbeigi et al. Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, 16(8), p.6220-6238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>.
- 5) Nellemann, Christian., Emily Corcoran, Carlos M. Duarte, Luis Valdrés, Cassandra D. Young, Luciano Fonseca, and Gabriel Grimsditch. *Blue Carbon: The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon*. UN Environment, GRID-Arendal, 2009.
- 6) Seddon, Nathalie et al. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2020, 375, doi.org/10.1098/rstb.2019.0120
- 7) Hoegh-Guldberg. O. et al. *The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for*

Action.' Report. Washington, DC: World Resources Institute. 2019
<http://www.oceanpanel.org/climate>

8) Krause-Jensen, Dorte et al. Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. *Nature Geoscience*. 2016, 9(10), p.737-742.

9) Krause-Jensen, Dorte et al. Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room. *Biology letters*. 2018, 14(6)

10) Greenhouse Gas Inventory Office of Japan and Ministry of the Environment, Japan (eds.), National Greenhouse Gas Inventory Report of JAPAN 2023, Center for Global Environmental Research, Earth System Division, National Institute for Environmental Studies, Japan, 2023.
https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm1000001v3c7t-att/NIR-JPN-2023-v3.0_gioweb.pdf

11) 藤井 麻衣ほか. 国連気候変動枠組条約の下での「ブルーカーボン」に係る現状と課題. *海洋政策研究*. 2020, 14, p. 89-109.

12) 桑江 朝比呂ほか. 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計. *土木学会論文集 B2 (海岸工学)* . 2019, 75(1), p.10-20.

13) Albert Pessarrodona, Jorge Assis et al. Global seaweed productivity. *Sci. Adv.* 2022, 8(37), DOI:10.1126/sciadv.abn2465.

14) FAO. 2022. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461e>

15) Gretchen S. Grebe, Carrie J. Byron et al. An ecosystem approach to kelp aquaculture in the Americas and Europe. *Aquaculture Reports*. 2019, 15, doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100215

16) © FAO 2015-2023. Cultured Aquatic Species Information Programme. *Undaria pinnatifida*. Cultured Aquatic Species Information Programme. Text by Shao Jun Pang, Xia Li and Thierry Chopin. In: FAO Fisheries and Aquaculture Division [online]. Rome. Updated . [Cited 2 November 2023].

17) 宮城県. 宮城県の伝統的漁具漁法 VIII 養殖編 (わかめ・こんぶ) . 1995

18) MAFF (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries) 2022. Fisheries and aquaculture production statistics for 2022
URL: <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files/data?sinfid=000040053401&ext=xls>

- 19) FAO. 2009. *Laminaria japonica*. In Cultured aquatic species fact sheets. Text by Chen, J. Edited and compiled by Valerio Crespi and Michael New. CD-ROM (multilingual).
- 20) Yotsukura, N., Kawashima, S. et al. A systematic re-examination of four *Laminaria* species: *L. japonica*, *L. religiosa*, *L. ochotensis* and *L. diabolica*. *Journal of Japanese Botany*. 2008, 83, p.165-176.
- 21) Gao, X., Endo, H. et al. Effects of experimental thinning on the growth and maturation of the brown alga *Undaria pinnatifida* (Laminariales; Phaeophyta) cultivated in Matsushima Bay, northern Japan. *J Appl Phycol*. 2014, 26, p. 529–535. doi.org/10.1007/s10811-013-0071-y
- 22) Thompson, Kim-Ly et al. A review of Indigenous knowledge and participation in environmental monitoring. *Ecology and Society*. 2020, 25(2)
- 23) Aquaculture Stewardship Council Foundation, 2010 - 2023. Home - ASC Japan (asc-aqua.org)
- 24) Durga Prasad Behera, Viral Vadodariya et al. Seaweeds cultivation methods and their role in climate mitigation and environmental cleanup. *Total Environment Research Themes*. 2022, 3(4), doi.org/10.1016/j.totert.2022.100016.
- 25) 長谷川勝男ほか. 養殖ワカメの収穫および塩蔵加工作業調査. *水産工学研究所技報*. 2005, 27, p. 61-80.
- 26) NOAA Fisheries, URL: <https://www.fisheries.noaa.gov/national/aquaculture/seaweed-aquaculture#>
- 27) 團 昭紀ほか. 徳島県のワカメとコンブ資源の開発研究の変遷 (総説). *徳島水産試験場研究報告*. 2015, 10, p.25-48.
- 28) Sato Y, Fujiwara T et al. Density regulation of aquaculture production and its effects on commercial profit and quality as food in the cosmopolitan edible seaweed *Undaria pinnatifida*. *Front. Mar. Sci*. 2023, 10. doi: 10.3389/fmars.2023.1085054
- 29) Akio OSHINO, Kenjirou SAITO et al., The effect of thinning out or thallus excision of cultured Wakame seaweed, *Undaria pinnatifida* for increase its production, *Miyagi Pref. Rep Fish. Sci*. No. 19, 2019 (Japanese)
- 30) Gao, X., Endo, H. et al. Compensatory abilities depending on seasonal timing of thallus

excision of the kelp *Undaria pinnatifida* cultivated in Matsushima Bay, northern Japan. *J Appl Phycol.* 2013, 25, p.1331–1340. doi.org/10.1007/s10811-013-9989-3

31) 水産研究・教育機構 (2023) 海草・海藻藻場の CO₂貯留量算定ガイドブック. 水産研究・教育機構, pp. 13.

https://www.fra.go.jp/gijutsu/project/fisheries_ecosystems/files/bluecarbon_guidebook2023.pdf

32) Morita, T., Kurashima, A. et al. Temperature requirements for the growth and maturation of the gametophytes of *Undaria pinnatifida* and *U. undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycological Research.* 2003, 51, p.154-160. doi.org/10.1046/j.1440-1835.2003.t01-1-00305.x

33) 斎藤雄之助. ワカメの生態に関する研究一III. 光合成量に及ぼす光と温度の影響について(その1). *日本水産学会誌.* 1958, 24, p.484-486.

34) 中西達也ほか. 新たなノリ色落ち対策技術開発 ワカメの色落ち現象機構の解明と対策. 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究所事業報告書. 2012, 2011, p.61-65.

35) 馬場将輔ほか. 流水式回流水槽によるワカメの水温と水流に対する生育反応. *海洋生物環境研究所研究報告.* 2006, 9, p.55-64. 2006

36) 桑原伸司ほか. 藻類の成長に影響する環境要因の研究. *海洋開発論文集.* 1997, 13, p.285-290.

37) 伊東公人ほか. コンプの成長と流速の関係. *日本水産工学会 学術講演会 講演論文集.* 1998, p.127-128

38) Schiel, D. R. Growth, Survival and Reproduction of Two Species of Marine Algae at Different Densities in Natural Stands. *Journal of Ecology.* 1985, 73(1), p.199–217.

39) Monro K., Poore A. G. B. Light quantity and quality induce shade-avoiding plasticity in a marine macroalga. *J. Evol. Biol.* 2005, 18, p.426–435.

40) Sato Y., Hirano T. et al. Extending the Cultivation Period of *Undaria pinnatifida* by Using Regional Strains with Phenotypic Differentiation along the Sanriku Coast in Northern Japan. *Phycology.* 2021, 1(2), p.129-142. <https://doi.org/10.3390/phycolgy1020010>

41) 金子健司ほか. 宮城県長面浦における栄養塩の供給経路と高濃度のクロロフィル a の維持機構. *水産海洋研究.* 2019, 83(3), p.171–180.

42) C. Pansch, O. Cerda et al. Consequences of light reduction for anti-herbivore defense and bioactivity against mussels in four seaweed species from northern-central Chile. *Marine Ecology Progress Series*. 2009., 381, p.83-97.

43) 吉田吾郎ほか. 海藻類の一次生産と栄養塩の関係に関する研究レビューー および瀬戸内海藻場の栄養塩環境の相対評価ー. 水産総合研究センター研究報告. 2011, 34, p.1-31.

44) 環境省. 我が国インベントリにおける藻場（海草・海藻）の算定方法について.
<https://www.env.go.jp/content/000203001.pdf>