

室内培養のフリー配偶体を用いた瀬戸内海におけるワカメの促成栽培試験

二羽恭介*・原田和弘

兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター (〒674-0093 兵庫県明石市二見町南二見 22-2)

Kyosuke Niwa* and Kazuhiro Harada: Experiment on forcing cultivation of *Undaria pinnatifida* sporophytes in the Seto Inland Sea by using free-living gametophytes cultured in laboratory. Jpn. J. Phycol. (Sôru) 64: 10-18, March 10, 2016

The aim of this study was to attempt forcing cultivation of the marine crop *Undaria pinnatifida* sporophytes in the Seto Inland Sea. The seedling production was performed using free-living male and female gametophytes in indoor water tanks under artificially controlled temperature and light conditions from early September, and the germlings (juvenile sporophytes) were transferred to the sea for nursery cultivation from early October in *Undaria* farm of Eigashima, Akashi, Hyogo Prefecture. The produced seedlings were cultivated on ropes stretched horizontally in the floating cultivation facility in the farm from late October. From the result, it was possible to harvest the grown-up sporophytes (approximately 1 m in length) from late December, although the marine crop was usually harvested during February and March in the Seto Inland Sea. Moreover, since 1–1.5 m sporophytes only in total length were harvested, the harvest was carried out 6 times from same ropes until late February, leading to the increase of total harvest of sporophytes. It is therefore considered that this forcing cultivation is a useful method for stable fishery management during winter.

Key Index Words: cross breeding, forcing cultivation, free-living gametophyte, seedling production, *Undaria pinnatifida*

Fisheries Technology Institute, Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries, Akashi, Hyogo 674-0093, Japan

*Author for correspondence: kyosuke_niwa@pref.hyogo.lg.jp

緒言

瀬戸内海は多くの島嶼群が点在し変化に富む海域特性を有するため、多種多様な漁船漁業や養殖漁業が営まれている。しかし、近年、水産資源の減少により、瀬戸内海では漁船漁業の漁獲量は低迷している(反田ら 2014)。また、瀬戸内海は有明海に次ぐ全国有数の養殖ノリの生産海域であるが、近年、海水中の DIN (溶存無機態窒素) の減少により、養殖ノリの色落ちが年々深刻化し、ノリ生産者に大きな被害を与えている(永田ら 2001, 松岡ら 2005, 二羽・原田 2015)。このため、ノリ養殖を断念し通年の漁船漁業に転業する漁業者も増えているが、特に冬季は漁船漁業による漁獲量が減少するため、この時期の収入減を補完できる養殖漁業が求められている。

生産期が冬季にあたる養殖漁業のうち、ワカメはノリに次いで一定の需要がある食用海藻である(二羽 2015)。瀬戸内海では、兵庫県と徳島県が接する鳴門海峡周辺海域でワカメ養殖が盛んで、兵庫県南あわじ市丸山地区では養殖ローブを延べ約 450 km 設置した大規模なワカメ養殖が営まれている。当地区では、11 月下旬から 12 月上旬にかけて本養殖を開始し、およそ 3 ヶ月後の 3 月以降に収穫が行われ、全長 2 m 前後に生長した大型のワカメを養殖ローブから一度に収穫している。このように瀬戸内海でもワカメ養殖が盛んな海域もあるが、通常、ワカメ養殖はノリ養殖に比べて 1 経営体当たりの生産金額が 1/10 程度のため(兵

庫農林統計協会(2012)のデータから算出)、ノリ養殖ほど盛んではない。しかし、ワカメ養殖は、ノリ養殖に比べて、(1) 設備投資が格段に少なく新規参入しやすいこと、(2) 養殖管理に手間がかからず収穫直前まで漁船漁業が行えること、(3) 酸処理剤などの養殖管理経費が掛からないこと、(4) 加工経費が少なく原藻出荷も可能なこと、(5) 養殖ノリに比べて色落ちにくいこと(二羽 2015)、などから冬季漁船漁業の収入減を補完できる可能性が高い。また、兵庫県では、人口が集中する京阪神の都市近郊の海域で盛んに漁業が行われている。このため、当海域で早期にワカメ養殖を開始し、収穫と出荷も早くすることができれば、収穫最盛期に比べて高い単価でワカメを納入できる取引先を確保しやすいことが予想され、より一層、冬季漁業経営の安定化を図ることが可能になると思われる。

日本沿岸に生育するワカメは、微視的な配偶体で夏季を経て、9 月下旬から 10 月にかけて雌雄配偶体が成熟し、11 月上旬に胞子体が肉眼で見えるようになる(黒木・秋山 1957, 大野ら 2000)。このため、通常、ワカメ養殖の種苗生産では、春から初夏にかけて胞子体下部の胞子葉から放出させた遊走子を採苗器に着生させ、屋内水槽で培養、または海に採苗器を垂下し、着生した遊走子から配偶体に生長させる(井伊 1964, 秋山 1992, 小河 2004)。水温が低下してきた 10 月には雌雄配偶体は成熟し、受精卵から芽胞体が発達してきたら、海で仮沖出しを行い、数 cm サ

イズの幼孢子体に生長させることにより種苗が生産されている。一方、孢子葉から遊走子を放出させ、雌雄配偶体を別々に分離しておく、試験管やフラスコ内で基質に着生していない無基質配偶体（以下「フリー配偶体」と呼ぶ）の状態が長期間保存培養することができる。このため、室内培養では水温や日長時間などを制御してフリー配偶体を成熟促進させることにより、養殖を開始したい時期に合わせて短時間で種苗生産を行うことができる（秋山 1992, 團 2000, 大野ら 2000, 小河 2004, 二羽 2015）。従って、フリー配偶体を使った種苗生産により、通常に比べて種苗生産を早く開始し、収穫も早く行うワカメの促成栽培も試みやすくなる。

そこで、実際にワカメの促成栽培が可能であるか検討するため、兵庫県明石地区の漁業者の協力を得て、2012年度漁期からフリー配偶体を使って種苗生産を行い、ワカメの促成栽培試験に取り組んできた。2013年度漁期には、明石地区で養殖されていたワカメ由来の株を用いて促成栽培に取り組み、一定の生産量を上げたが、種苗の芽落ちやその後も生育不良が見られた。このため、2014年度漁期には、野生集団由来のワカメに養殖ワカメを繰り返し交配させた株を用いて、9月上旬から種苗生産を開始し、10月上旬から水温 24°C の海で仮沖出しを行った。仮沖出し終了後、瀬戸内海で通常行われている本養殖開始時期よりも約 1 ヶ月早い 10 月下旬から本養殖を開始したところ、順調にワカメは生長し、12 月下旬には全長 1 m を超えるワカメを収穫することができた。さらに、同じ養殖ロープから全長 1 m を超えたワカメを繰り返し収穫することにより、小規模のワカメ漁場でも、冬季漁船漁業の収入減を補完できる新たな養殖手法として活用できたので報告する。

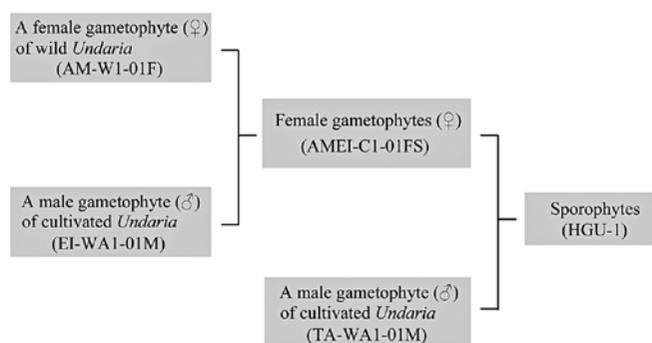


Fig. 1. Pedigree of *Undaria pinnatifida* sporophytes (HGU-1) bred by cross breeding. The parentheses show the stock number.

材料と方法

本研究で使用するワカメ種苗（HGU-1 株）を生産するため、兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センター（以下「水産技術センター」と呼ぶ）において、温度 20°C、光量 40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期 14 hL : 10 hD の長日条件下で雌雄別々に保存培養していたフリー配偶体の中から、雌性配偶体 AMEI-C1-01FS と雄性配偶体 TA-WA1-01M を選定して用いた（Fig. 1）。配偶体の選定にあたっては、事前に雌雄配偶体を同一容器内に入れ、上述の培養条件から明暗周期を 12 hL : 12 hD の中日条件下に変更して芽胞体発芽試験（二羽 2015）を行い、芽胞体の形成率が高かった雌雄配偶体を選んだ。このうち、雌性配偶体 AMEI-C1-01FS は、南あわじ市阿万のワカメ野生集団から採集した孢子体からの 1 遊走子由来の雌性配偶体 AM-W1-01F と明石市江井ヶ島産養殖ワカメからの 1 遊走子由来の雄性配偶体 EI-WA1-01M の交配により生じた F₁ 孢子体の養殖 1 個体から分離したもので、複数の遊走子に由来

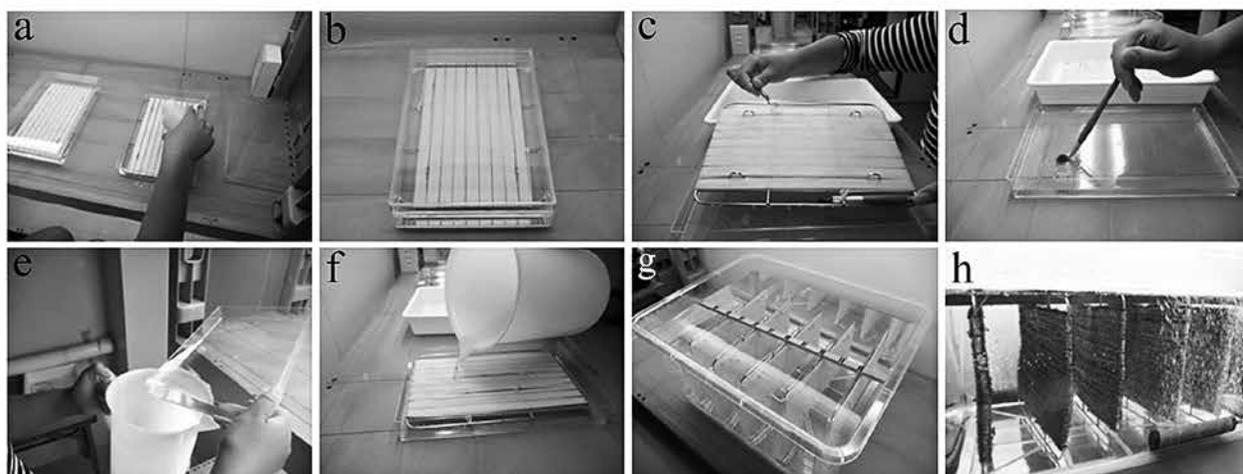


Fig. 2. Procedure for seedling production using free-living female and male gametophytes of *Undaria pinnatifida*. (a) The suspension that contains both of female and male gametophytes was poured to a collector winding strings. (b) The collector cultured in a flat vessel to produce fertilized eggs on strings wound around the collector. The culture was conducted for three days. (c) The collector taken from the flat vessel to reverse the collector. (d, e) Collection of gametophytes attaching on bottom of the flat vessel. (f) The suspension of the collected gametophytes was poured to the reversed collector. After pouring, the culture was conducted in the flat vessel for three days. (g) Culture of sporophyte germlings (seedlings) attaching on the strings wound around the collectors in an indoor water tank. (h) The collectors in the indoor water tank after 1 month of culture.

する株である (Fig. 1)。一方, 雄性配偶体 TA-WA1-01M は, 洲本市戸口産養殖ワカメからの 1 遊走子由来の株である。

上記の雌雄配偶体 (AMEI-C1-01FS と TA-WA1-01M) を用いて, 既報のフリー配偶体を使った種苗生産技術 (新村 1982, 團 2000, 二羽 2015, 棚田ら 2015) に改良を加え, 2014 年 9 月 2 日から次のとおりに種苗生産を行った。まず, 採苗器は, 油切り用のステンレス網 (23×17 cm, 4 箇所突起付) にクレモナ糸 (直径 2 mm, 左三ツ撚り, 以下「タネ糸」と呼ぶ) を巻き付けて作製した (棚田・中西 2011, 二羽 2015)。採苗器 1 個あたりに散布する配偶体液は, 雌性配偶体と雄性配偶体それぞれ 0.2 g (水分を吸い取らずに測定した湿重量) と 200 mL の NPM 培地 (愛知海苔協議会 1986, Niwa & Aruga 2003) を同時に入れ, ミキサー (IK-8200, 泉精器製作所) で 40 秒程度細断して調製した (二羽 2015)。この配偶体液 (200 mL) を採苗器に散布するため, ステンレス網 (採苗器) に付いている 4 箇所の突起が上面にくるよう採苗器をプラスチック製の透明な蓋付平容器 (26×17.5×4.5 cm) に入れ, 採苗器の上面全体に細断した配偶体が付くように配偶体液を注いだ (Fig. 2a)。さらに, 採苗器全体が浸かるよう NPM 培地を加え, 平容器の蓋を閉め, 恒温室内の照明棚に置き, 雌雄配偶体を成熟促進させるため, 温度 20°C, 光量 $80 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 明暗周期 12 hL : 12 hD の中日条件下で静置培養した (Fig. 2b)。3 日後に, 平容器から採苗器を取り出し (Fig. 2c), 平容器の底に溜まっていた配偶体を筆で水中に浮き上がらせ (Fig. 2d), 配偶体液を別容器に回収した (Fig. 2e)。取り出した採苗器は上下反転させて再び平容器に入れ, 回収した配偶体液を採苗器の上面全体にかかるように注ぎ (Fig. 2f), 採苗器全体が浸かるよう NPM 培地を追加

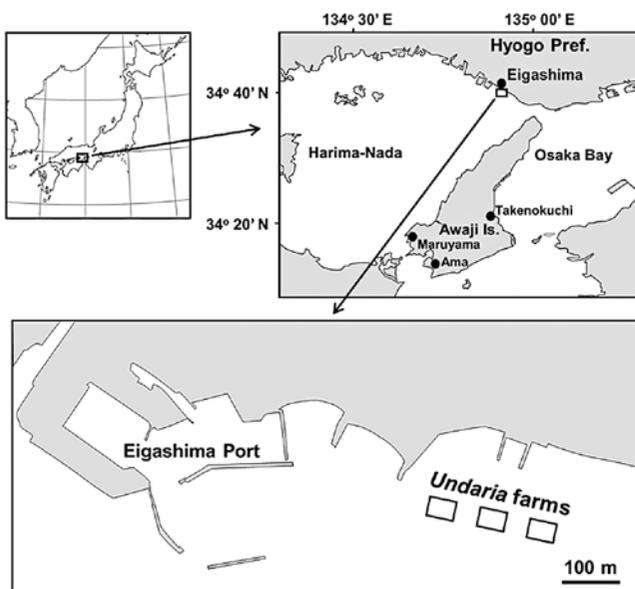


Fig. 3. Maps showing the cultivation site Eigashima in the Seto Inland Sea, and other localities mentioned in this study.

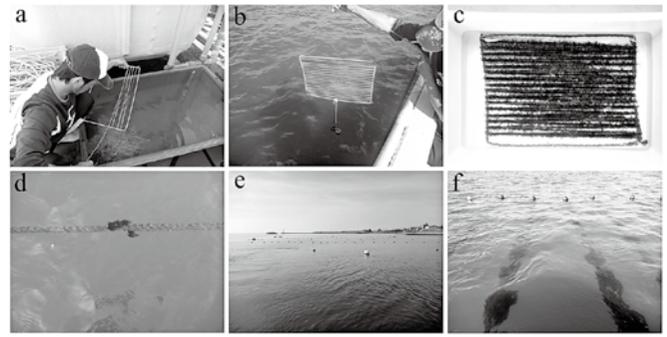


Fig. 4. Nursery cultivation (a-c) and cultivation for harvest (d-f) of *Undaria pinnatifida* sporophytes (HGU-1). (a) Seed string was detached from the collector and rewound around metal frame for nursery cultivation in the sea. (b) The frame was placed at a depth of about 1.5 m for nursery cultivation in *Undaria* farm. (c) The frame finished nursery cultivation. (d) The seed string produced by nursery cultivation was cut, and the cut string was inserted the rope for *Undaria* cultivation. (e) A view of *Undaria* farm at Eigashima. (f) *Undaria pinnatifida* sporophytes on December 26, 2014 just before first harvesting.

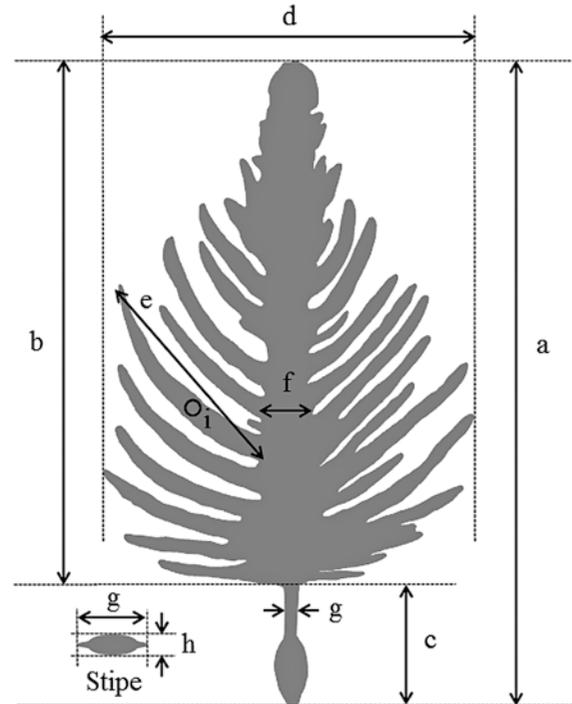


Fig. 5. Illustration of an *Undaria pinnatifida* sporophyte showing total length (a), blade length (b), stipe length (c), blade width (d), divided (pinnate) blade length (e), undivided blade width (f), stipe width (g), and stipe thickness (h). The circle area (i) was used for measurement of blade thickness.

Table 1. The size of juvenile sporophytes *Undaria pinnatifida* (HGU-1) collected at the beginning (October 7, 2014) and on the last day (October 31, 2014) of nursery cultivation in the sea. Average \pm SD (n = 20).

| | Total length (mm) | Blade width (mm) |
|---------------|-------------------|------------------|
| Oct. 7, 2014 | 4.99 \pm 1.23 | 0.88 \pm 0.37 |
| Oct. 31, 2014 | 12.17 \pm 1.64 | 3.71 \pm 0.59 |

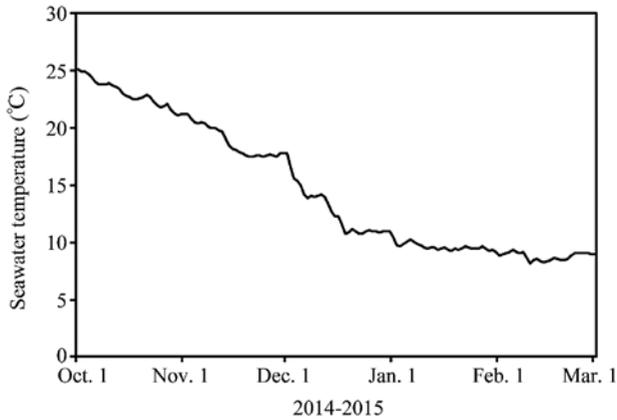


Fig. 6. Record of seawater temperature near the cultivation site (October 1, 2014 – March 1, 2015).

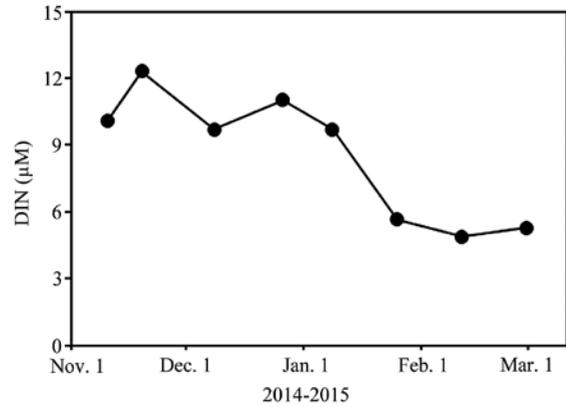


Fig. 7. Changes in dissolved inorganic nitrogen (DIN) concentration in seawater at the cultivation site (November 10, 2014 – February 28, 2015).

し、再度3日間静置培養した。その後、平容器から採苗器を取り出し、NPM培地を入れた小型水槽に吊るした (Fig. 2g)。採苗器を取り出した後、平容器の底に溜まっていた配偶体は筆を使って上述と同じように回収し、小型水槽に加え、発芽した芽胞体を生長促進させるため約1ヶ月間通気培養を行った (Fig. 2h)。なお、培地交換は1週間に1回行い、その他の培養条件 (温度、光量、日長時間) については、平容器を使った培養と同じ条件とした。

仮沖出しと本養殖は、明石市江井ヶ島地先のワカメ漁場 (水深4~5 m程度) に、ノリ網40枚分 (20枚×2列) の浮流し養殖施設 (60×45 m程度) を3セット設置して行った (Fig. 3)。仮沖出しは、2014年10月7~31日まで行った。仮沖出しの手法は、既報の方法 (團 2000, 二羽 2015, 棚田ら 2015) に従い、採苗器からタネ糸を取り外し、仮沖出し用の種枠 (50×35 cm, 以下「タネ枠」と呼ぶ) にタネ糸を巻き直した (Fig. 4a)。タネ枠には沈子と紐を取り付け (Fig. 4b)、その紐を浮流し式養殖施設のロープに括り付けて、水深約1.5 mの位置にタネ枠を垂下した。仮沖出ししてから2~3日後、タネ糸に付着珪藻などの汚れが付着し始めたため、随時、海水面付近でタネ枠を強く揺すり、さらにタネ糸の汚れが目立つようになってきた時

には海水によるポンプ洗いを行って、タネ糸を洗浄した。

仮沖出し終了後 (Fig. 4c)、タネ枠を回収し、本養殖で同一の養殖ロープから繰り返し収穫できるようワカメの着生個体数を多くするため、幼孢子体が着生しているタネ糸を通常に比べて長い約7 cm間隔で切断し、養殖ロープ (全長30 m, 直径1.2~1.4 cm) の約3 cm分に約40 cm間隔で巻き付け、タネ糸の両端は養殖ロープに挟み込んだ (Fig. 4d)。本養殖は、養殖ロープを浮流し式養殖施設に括り付けて水平に張り、ブロックを取り付けて、水深0.5~1 m程度沈めて行った (Fig. 4e, f)。初収穫は2014年12月28日に行い、全長約1 m以上の個体を適宜刈り取った。

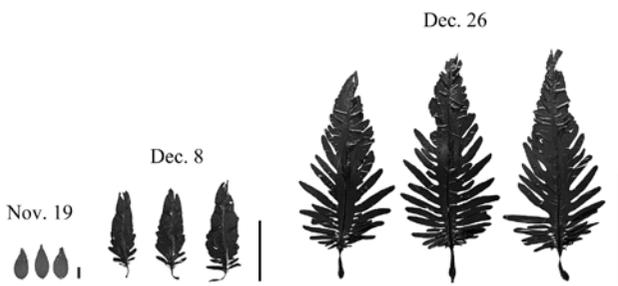


Fig. 8. Sporophyte samples of *Undaria pinnatifida* (HGU-1) collected before harvesting. Scale bars: 2 cm (November 19, 2014), 20 cm (December 8, 2014) and 50 cm (December 26, 2014).

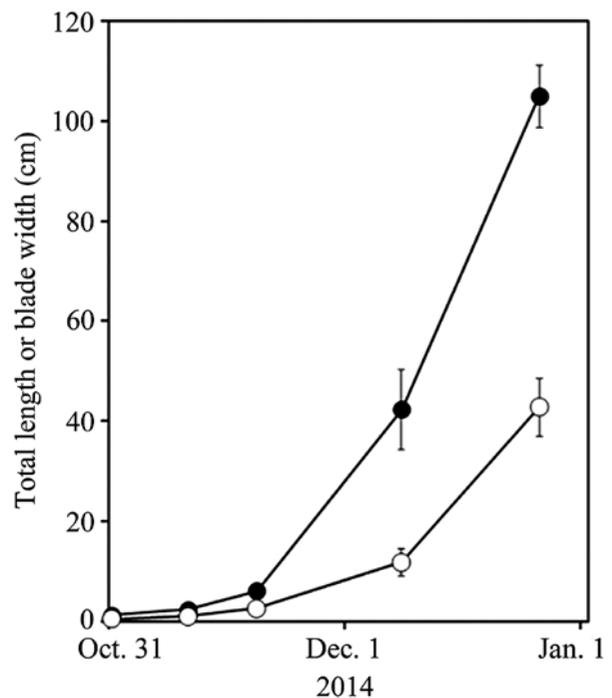


Fig. 9. Growth in total length (●) and blade width (○) of *Undaria pinnatifida* sporophytes (HGU-1) from October 31 to December 26, 2014 before harvesting. Average ± SD (n = 10 – 13).

養殖ロープに残した胞子体は次の収穫まで1～2週間程度の間隔を置いて生長させ、再び全長約1 m以上の個体を適宜収穫するという方法により、2014年12月28日から2015年2月20日までの期間に、同一ロープから合計6回収穫した。

本研究によるワカメ胞子体の生長を把握するため、次のとおり測定した。まず、仮沖出し期間中の生長については、仮沖出し開始日の10月7日と終了日の10月31日に、それぞれ採集した生長の良い幼胞子体20個体の全長と葉幅を測定した。本養殖期間中の生長については、10月31日に本養殖を開始した養殖ロープから、2014年11月から2015年2月までの期間に月2回、生長の良い個体を10～13個体採集し、全長と葉幅を測定した。また、同一ロープから繰り返し収穫することにより胞子体の形態的特徴が変化するかを把握するため、2015年1月8日以降の藻体については、Fig. 5に示した部位と胞子体の湿重量も測定し、全長/葉幅比 (TL/BW)、葉長/葉幅比 (BL/BW)、葉幅/欠刻幅比 (BW/UBW)、莖幅/莖厚比 (SW/ST) を算出した。なお、各形態比はTukey法により多重比較し、検定における有意水準は $p < 0.05$ とした。養殖期間中の水温は、隣接する水産技術センター地先に設置した自動観測装置で測定し算出された日平均水温を用いた。また、本養殖期間中のワカメ漁場のDIN濃度を把握するため、ワカメ漁場の表層水を採取し、水産技術センターで栄養塩自動分析装置 (BLTEC社製 QuAAtro 2-HR) を用いて、DIN濃度を分析した。

結果

平容器に配偶体液を加えたところ、細断された配偶体はしばらく海水中に浮遊していたが、ゆっくりと沈下したため、平容器を使った本手法 (Fig. 2a-f) により、配偶体は採苗器の両面全体に万遍なく付着した。このため、その後、採苗器を小型水槽に垂下し培養したところ (Fig. 2g)、Fig. 2hには本研究とは異なる時期に同一手法で行った結果を示したが、本研究でも同様に、採苗器の両面全体から多数の芽胞体が形成され、幼胞子体に生長した。

仮沖出しを開始した10月7日に水温は23.9°Cであったが、仮沖出し終了日の10月31日まで徐々に下降し21.2°Cを示した (Fig. 6)。本養殖を開始した後も水温は降下を続け、収穫を開始した12月28日に10.9°Cを示した。その後、本養殖試験終了後の2月20日までわずかに下降し続け、8.5°Cを示した。また、本養殖期間中におけるワカメ漁場のDIN濃度をFig. 7に示す。本養殖初期の11月10日に10.1 μM 、その後も多少の増減はあったものの1月8日に9.7 μM になり、この期間のDIN濃度は10 μM 前後であった。しかし、それ以降DIN濃度は減少し、1月25日には5.6 μM まで低下したが、その後は大幅に低下せず2月末まで5.3 μM あった (Fig. 7)。

仮沖出し開始時の幼胞子体は、平均全長4.99 mm、平均葉幅0.88 mmであった (Table 1)。仮沖出し終了時 (10月31日)、幼胞子体には先枯れが目立ったが、平均全長12.17 mm、平均葉幅3.71 mmの幼胞子体に生長した。Fig. 4cには、本研究と同じワカメ漁場で11月6日に仮沖

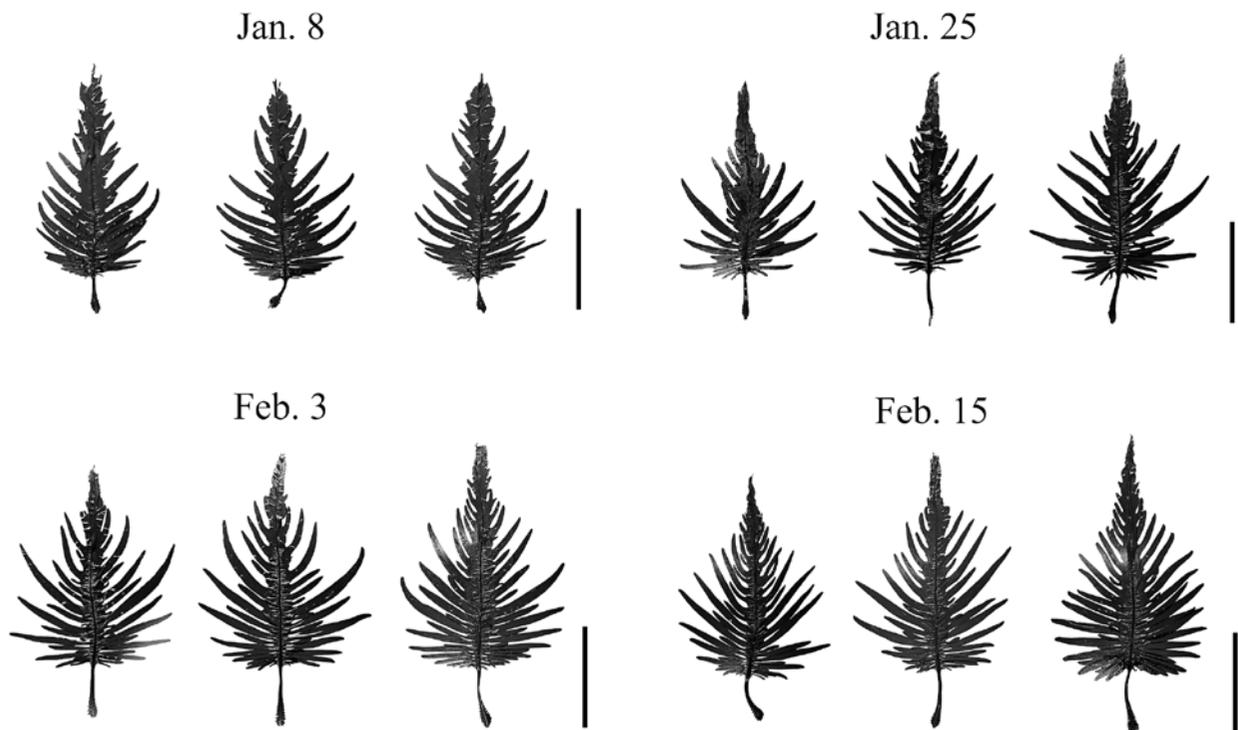


Fig. 10. Sporophyte samples of *Undaria pinnatifida* (HGU-1) collected in the harvesting period (January 8 and 25, and February 3 and 15, 2015). Scale bars: 50 cm.

Table 2. Size characteristics of larger sporophytes *Undaria pinnatifida* (HGU-1) sampled between harvests. Average \pm SD (n = 10). TL, total length; BL, blade length; BW, blade width; SL, stipe length; DBL, divided (pinnate) blade length; UBW, undivided blade width; BT, blade thickness; TW, total wet weight.

| | TL (cm) | BL (cm) | BW (cm) | SL (cm) | DBL (cm) | UBW (cm) | BT (mm) | TW (g) |
|---|------------------|------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|------------------|
| Jan. 8, 2015 (between 2nd – 3rd harvest) | 124.5 \pm 5.9 | 108.1 \pm 5.8 | 66.7 \pm 6.4 | 16.4 \pm 3.8 | 34.9 \pm 5.7 | 8.4 \pm 1.2 | 0.174 \pm 0.052 | 127.4 \pm 19.0 |
| Jan. 25, 2015 (between 4 – 5th harvest) | 122.7 \pm 11.5 | 101.9 \pm 11.0 | 66.7 \pm 16.1 | 20.8 \pm 2.8 | 32.7 \pm 8.6 | 9.1 \pm 1.5 | 0.374 \pm 0.045 | 111.7 \pm 56.7 |
| Feb. 3, 2015 (just before the 5th harvest) | 135.2 \pm 6.2 | 109.7 \pm 6.1 | 78.3 \pm 7.5 | 25.5 \pm 2.0 | 42.6 \pm 6.4 | 10.8 \pm 1.3 | 0.350 \pm 0.032 | 148.9 \pm 15.9 |
| Feb. 15, 2015 (between 5 – 6th harvest) | 134.7 \pm 9.4 | 109.0 \pm 7.4 | 79.1 \pm 7.5 | 25.8 \pm 2.7 | 39.9 \pm 5.2 | 10.5 \pm 1.6 | 0.353 \pm 0.044 | 145.0 \pm 21.4 |

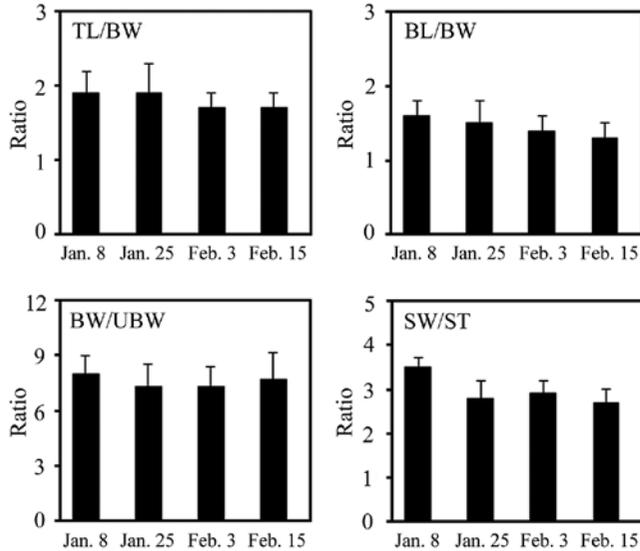


Fig. 11. Morphological characteristics of *Undaria pinnatifida* sporophytes (HGU-1) during the harvesting period (January 8 and 25, and February 3 and 15, 2015). TL, total length; BW, blade width; BL, blade length; UBW, undivided blade width; SW, stipe width; ST, stipe thickness.

出しを終了したタネ枠を示したが、これと同様に本研究で仮沖出しを終了した10月31日のタネ枠にもむらなく幼孢子体が着生しており、水温24°C付近から仮沖出しを開始してもワカメ種苗を生産することができた。

本養殖開始後、孢子体の先枯れは目立たなくなり、11月19日に採集した孢子体は長卵形を呈し、平均全長6.1 cm、平均葉幅2.6 cmであった (Figs 8, 9)。12月8日まで、孢子体で生長の良い個体は葉状部下部から裂葉の形成が始まっており、平均全長は42.4 cm、平均葉幅は11.6 cmであった (Figs 8, 9)。初収穫直前の12月26日に採集した孢子体の平均全長は105.0 cm、平均葉幅は42.6 cm、茎部には孢子葉が形成されていた (Figs 8, 9)。この時、養殖ロープにタネ糸を巻き付けた1箇所 (以下「1集塊」と呼ぶ) から50個体以上のワカメが生長していた。また、本養殖期間中に強い風波の後でも、養殖ロープの着生箇所から孢子体がずれたり脱落したりすることはほとんどなかった。

収穫期間中の孢子体の標本写真を Fig. 10 に、計測結果を Table 2 に示した。収穫直前の孢子体を計測したのは2月3日のみであったが、Table 2 の測定結果から収穫されたワカメのサイズは全長1～1.5 m程度であった。本研究

に用いた養殖株 (HGU-1) は葉状部の中肋付近に皺が見られたが、収穫を繰り返しても葉状部全体に艶があり色調も良く、孢子体の外観に大きな変化は見られなかった (Fig. 10)。また、収穫期間中における孢子体の全長/葉幅比 (TL/BW)、葉長/葉幅比 (BL/BW)、葉幅/欠刻幅比 (BW/UBW)、茎幅/茎厚比 (SW/ST) は、それぞれ有意に変化することはなかった (Fig. 11)。ただし、収穫初期の1月8日に採集した孢子体の葉状部はそれ以降のものに比べて薄かった (Table 2)。

考察

本研究では、2014年9月2日からフリー配偶体を使って種苗生産を開始したが、この時期の水産技術センター地先の水温は26°Cを越えていた。既報の知見 (齊藤 1956, 秋山 1965, Morita *et al.* 2003a, 馬場 2008) から、ワカメ配偶体の成熟適温は、生育地域により違いがみられるが、およそ10～20°Cの範囲であると報告されている。また、温度条件を細かく設定した室内培養実験から、配偶体の成熟上限温度は、三重県産では23°C (Morita *et al.* 2003a)、新潟県産では24°C (馬場 2008) であることが報告されている。これらの知見から、瀬戸内海沿岸域では、常温の海水のまま種苗生産を行っても、9月上旬に配偶体を成熟させ芽胞体を形成させることは難しいと考えられる。また、配偶体は直射日光を当てると死滅するが (秋山 1965)、光量100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ までは光量が高いほど成熟率が高まり、幼孢子体の生長も速いことが報告されている (Choi *et al.* 2005, 馬場 2008)。光周期による配偶体の成熟条件については、これまでの報告 (秋山 1965, Choi *et al.* 2005) から、生育地域により違いがあるものの長日条件よりも中日条件または短日条件で培養するほうが成熟しやすい傾向が認められる。これらのことから、本研究では保存培養していたフリー配偶体を成熟促進させるため、温度を保存培養時と同じ20°Cに設定し、光量を40 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から80 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に高め、長日条件から中日条件に変更して種苗生産を行った。

本研究では、種苗生産を行う前に、20°Cで芽胞体発芽試験 (二羽 2015) を行い、成熟しやすい配偶体を選定したが、保存培養していた配偶体の中で、成熟しにくい配偶体も存在した。三重県産ワカメ配偶体では、15°Cに比べて20°Cで成熟率が低下することも報告されているため (Morita *et*

al. 2003a), 今後, より多くの配偶体を使って種苗生産を可能にするためには, 既報の手法(團 2000)のように, フリー配偶体をミキサーで細断する2週間前から, 温度15°C(低温処理)の短日条件で培養するなど, さらに配偶体を成熟させやすい培養条件や成熟促進物質(倉島・山本 2012)の検討も必要と考えられる。また, 芽胞体発芽試験を行った時に, 以前に比べ極端に生殖能力が低下した配偶体も認められたため(二羽 未公表), 配偶体を長期間保存培養しても, 高い生殖能力を維持できる方法の検討も必要であると思われる。

ミキサーで細断した配偶体の散布方法については, 浸漬法(團 2000)や塗布法(棚田ら 2015)が用いられており, いずれの手法でもタネ糸全体に芽胞体が形成される(二羽 2015)。しかしながら, ワカメの促成栽培に取り組む場合, 仮沖出しの時期に高水温による影響とタネ糸の洗浄により芽落ちの危険性が高まるため, より確実にを行うためには, 秋口から時期をずらしながら種苗生産に取り組むとともに(二羽 2015), 従来に比べて種苗着生密度の高いタネ糸をつくる必要があると考えられる。このことから, 本研究では配偶体の使用量を増やすことなく受精率を高め芽胞体の形成を促進させるため, 収容スペースの狭い平容器を使用した。また, 上述のとおり光量が高いほど配偶体は成熟しやすくなるため, 配偶体を散布した直後に採苗器を小型水槽に入れ垂下するよりも, しばらく平容器で培養する方が光条件からも芽胞体の形成率は高まり, 促成栽培に適した種苗着生密度の高いタネ糸をつくることができると考えられる。芽胞体から幼胞子体に生長する時の適温については, 配偶体の生長適温と同様に地域差がみられるが, およそ10~20°Cの範囲と報告されている(斉藤 1956, 秋山 1965, Morita *et al.* 2003b, 馬場 2008)。本研究では2014年9月上旬から種苗生産を開始したが, 兵庫県明石市における当年9月の日平均気温の平均値は23.5°C(気象庁が公表した数値)であった。このため, この時期に室内の温度を20°Cに低下させ種苗生産を行うことにより, 配偶体の成熟促進だけでなく芽胞体や幼胞子体の生長促進も行うことができたと考えられる。

ワカメ養殖が盛んな鳴門海峡周辺では仮沖出しの開始水温は通常23°Cであるが(團ら 2015), 本研究の仮沖出しは, 台風通過後の10月7日, 水温23.9°Cから開始した。約1°C高い水温からの開始であったが, タネ糸全体に高密度に着生したワカメ種苗を生産することができた。ただし, 仮沖出し終了時(10月31日)の幼胞子体は平均全長1.2 cmであり, 通常行われている23°C以下の水温でかつ短い仮沖出し期間で生産したワカメ種苗に比べてサイズが小さかった(二羽 未公表)。この原因として, 水温20°C以上では水温が高くなるほど幼胞子体の生長が遅くなること(Morita *et al.* 2003b, 馬場 2008), 高水温の影響と思われる先枯れも起きていたこと, タネ糸洗浄時の物理的作用によりサイズの大きい幼胞子体が脱落した可能性も考えられる。し

かし, タネ糸の洗浄を行うことにより幼胞子体の多くが附着珪藻などの汚れに巻かれることなく生長したため, 種苗着生密度の高いタネ糸をつくることができた。このことから, 高水温で仮沖出しする場合には, 通常に比べてタネ糸の汚れを防ぐための養殖管理も重要と思われる。また, 兵庫県南あわじ市丸山地区のワカメ漁場では, 漁期始めに魚類の摂食行動による被害が深刻化している。このため, 本研究でも魚類による食害が懸念されたが, 仮沖出し終了後, 魚類による食害と思われる幼胞子体の欠損や消失(桐山ら 2000)は確認されなかったことから, 本研究を実施したワカメ漁場では魚類による食害はほとんどなかったと考えられる。

本研究は促成栽培を目的としたため, 鳴門海峡周辺で通常開始される時期に比べて約1ヶ月早い10月下旬から本養殖を開始したが, その後目立った芽落ちも見られず, 本養殖開始後も水温の影響や食害による種苗の損失はほとんどなかった。また, 同一の養殖ロープから繰り返し収穫できるようなワカメの着生個体数を多くするため, 上述の種苗着生密度の高いタネ糸づくりに加えて, 通常より2倍程度タネ糸を長く切って養殖ロープに巻き付け, タネ糸の両端は養殖ロープに挟み込んで本養殖を行った。この方法により, 1集塊当たり50個体以上のワカメが生長したが, タネ糸を養殖ロープに巻き付けていたため, 1集塊当たりの個体数が多っても幼胞子体は養殖ロープに活着しやすく, 風波による影響(胞子体が着生箇所からずれたり脱落したりすること)も受けにくかったと考えられる。

瀬戸内海の一部の地域では, 大型のワカメを収穫する前に間引き収穫し, 全長50 cm前後のワカメを年内に出荷する場合もあるが量は極めて少ない。本研究の促成栽培試験では, 10月下旬から早期に本養殖を開始し, 収穫までの本養殖期間も通常に比べて短い2ヶ月間であったが, 12月下旬から全長1 mを超えるワカメを収穫することができた。また, ワカメ養殖の盛んな南あわじ市丸山地区では3月から収穫が始まるが, 本研究では, 12月下旬から2月下旬までに全長1~1.5 mのワカメを同一ロープから計6回収穫した。こうした早い時期に全長1 mを超えるワカメを繰り返し収穫できたのは, 次のことも考えられる。すなわち, ワカメ養殖では, 密植して養殖すると藻体の生長が遅くなることがよく知られており, 養殖ロープに着生個体数が多い場合には, 生長を良くするため間引き収穫することがある。このため, 本研究の収穫方法も収穫ごとに藻体の個体数を少なくし生長促進させたため, 通常の養殖方法に比べて着生個体数が多っても早期に収穫を繰り返すことができたと考えられる。

本研究のワカメ漁場では, 本報と同様の手法で漁業者自らも種苗生産を行い, 促成栽培に取り組んだ。漁業者による種苗生産は, 以前ノリ加工場として使用していた施設内の小部屋にエアコンを取り付け, この小部屋に照明棚を設置し, 9月中旬以降, 水産技術センターから数回に分けて

配布したフリー配偶体を使って順次行われた。室内で種苗生産を行った後、仮沖出しも同様の手法で行うことにより、これらのタネ枠でもいづれも種苗着生密度の高いタネ糸をつくることができた。このように漁業者自ら生産した種苗も使って、11月上旬から11月中旬までに上述の養殖施設3セットを使って本養殖を開始した。なお、養殖施設1セットにつき57本前後の養殖ロープ(1本30m)を設置したので、本研究も含めた促成栽培全体の養殖ロープ長は5.1kmであった。促成栽培全体では、収穫は12月28日から3月3日までの期間に行われ、このうち1月4日から3月3日までの期間は漁協の定休日以外(2日間)はほぼ毎日収穫し、3月4日に養殖施設を海から撤去した。収穫方法は本研究と同様に1~2週間程度の間隔で生長の良いワカメ(全長1~1.5m)だけを収穫することにより、漁期終了日までに同一ロープから計5~6回収穫が行われた。また、1月10日以降になると、養殖施設に設置した全養殖ロープ(5.1km)から収穫が可能となり、それ以降は、30mの養殖ロープ10~15本程度から1日当たり400~500kg前後(湿重量)のワカメが収穫された。その結果、促成栽培全体では約28t(湿重量)、養殖ロープ1m当たり約5.5kg(5.5kg/m)のワカメが収穫された。一方、鳴門海峡周辺のワカメ漁場で大型のワカメを一度に収穫する方法では、約8.0kg/mに推定されることが報告されている(長谷川・鈴木2005)。このことから、本研究の収穫方法は、早い時期からサイズの小さいワカメを収穫したのにもかかわらず収穫を繰り返すことにより、3割程度の収量減にとどめることができたと考えられる。

収穫されたワカメは、葉状部、莖部、胞子葉に分けて原藻出荷されたほか、葉状部をボイル塩蔵加工して出荷されたが、瀬戸内海でワカメの収穫最盛期を迎える前から出荷することができたこともあり、原藻出荷においても通常に比べて高い単価で取引された。このため、本研究の収穫方法は上述のとおり収量減にはなったが、養殖ロープ長当たりの収益は従来の養殖方法に比べて大きく上回った。加えて、収穫を繰り返しても胞子体に先枯れや皺が顕著になるなどの品質低下が見られなかったこと、通常サイズの塩蔵ワカメでは葉状部の中肋(中芯)を除去していないと単価は安くなるが、収穫サイズが小さいため中肋除去の手間をかけずに塩蔵ワカメにしても単価は低下しなかったこと、なども本促成栽培の取り組みからわかった。また、南あわじ市丸山地区では、1人当たり約14kmの養殖ロープを使った大規模なワカメ養殖が行われているが、今回行った促成栽培は、漁業者2名による5.1kmの小規模なワカメ養殖であった。しかし、平容器と小型水槽を併用したフリー配偶体による種苗生産、仮沖出しでのタネ糸の洗浄、同一の養殖ロープから5回以上繰り返し収穫するなど新たな手法を取り入れた促成栽培に取り組んだこと、加えて都市近郊型漁業の利点を活かし漁業者自ら高い単価で納入できる取引先を開拓することにより、小規模なワカメ養殖であっ

ても、漁船漁業の漁獲量が落ち込む1~2月に十分な収益を得ることができた。今後、促成栽培が増えると単価の低下は懸念されるが、促成栽培は、漁船漁業者やノリ養殖を廃業した漁業者にとって、冬季漁船漁業の収入減を補完できる養殖漁業として十分活用できると思われる。

一方、本手法による促成栽培では、フリー配偶体を使った種苗生産のほか、収穫期間が約2ヶ月と通常に比べて長く、ほぼ毎日収穫するため、通常のワカメ養殖に比べて手間がかかる。しかし、ノリ養殖と比較した場合には、1日当たりの労働時間が短く、魚価単価が上がる12月下旬までは同時に漁船漁業が行え、漁獲量が増え始める3月上旬から漁船漁業を再開できるなどの利点もある。また、ノリ養殖に比べて小規模な養殖施設で行えるため、岸から近いところでも漁場を確保しやすい。本研究のワカメ漁場は岸から200~300m程度の海域であったため、ノリ漁場に比べて河川水等による陸域からの栄養塩供給を受けやすく、1月上旬まではDIN濃度は10 μ M前後、その後は減少傾向にあったが、2月末まで5 μ M前後であった。このため、本研究の促成栽培のように、収穫最盛期前に栄養塩環境の良い海域で品質の良いワカメづくりに取り組み、取引先や消費者から評価されるワカメを継続して出荷することができれば、今後、促成栽培によるワカメのブランド化も図っていくことが可能と思われる。

ワカメはノリに比べてDIN濃度が低下しても色落ちしにくいことが知られているが(二羽2015)、近年、瀬戸内海の播磨灘海域では、年明け以降、4月に近づくほどDIN濃度が大きく低下するため(二羽・原田2015)、ワカメ養殖が盛んな南あわじ市丸山地区を含む兵庫県播磨灘海域では漁期後半にワカメの色落ち被害が生じている。このことから、通常のワカメ養殖でもフリー配偶体を使った種苗生産に取り組み、養殖開始時期と収穫開始時期を早めることができれば、ワカメ養殖における色落ち対策にもつながると考えられる。本研究では、野生集団由来のワカメに養殖ワカメを繰り返し交配させた種苗を用いたが、今後さらに、高水温でも芽落ちせず、葉状部に皺の少ない高生長なワカメの品種改良に取り組んでいくことは、促成栽培のみならず従来から行われているワカメ養殖の振興のためにも重要である。

謝辞

本研究の遂行のため全面的にご協力いただいた江井ヶ島漁業協同組合の橋広洋氏と橋彦彦氏に感謝します。橋広洋氏には、論文公表のため詳細な養殖方法や収穫方法など促成栽培に関する有益な情報提供をいただいたこともここに記します。

引用文献

愛知海苔協議会 1986. フリー系状態の培養. 愛知海苔協議会. 名古屋.

- 秋山和夫 1965. ワカメの生態及び養殖に関する研究. 第2報配偶体の生長・成熟条件. 東北区水産研究所研究報告 25: 143-170.
- 秋山和夫 1992. ワカメ. 三浦昭雄 (編), 食用藻類の栽培. pp. 35-42. 恒星社厚生閣, 東京.
- 馬場将輔 2008. 新潟県産ワカメの生育に及ぼす温度, 光量, 塩分の影響. 海洋生物環境研究所研究報告 11: 7-15.
- Choi, H.G., Kim, Y.S., Lee, S.J., Park, E.J. & Nam, K.W. 2005. Effects of daylength, irradiance and settlement density on the growth and reproduction of *Undaria pinnatifida* gametophytes. *J. Appl. Phycol.* 17: 423-430.
- 團昭紀 2000. 新しいワカメの種苗生産マニュアル—フリー配偶体を使った種苗生産—. 徳島県水産試験場, 徳島.
- 團昭紀・大野正夫・松岡正義 2015. 徳島県のワカメとコンブ資源の開発研究の変遷 (総説). 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究課研究報告 10: 25-48.
- 長谷川勝男・鈴木四郎 2005. 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 27: 61-80.
- 兵庫農林統計協会 2012. 第60次兵庫農林水産統計年報. 兵庫農林統計協会, 神戸.
- 井伊明 1964. ワカメ養殖読本. 兵庫県漁業協同組合連合会, 神戸.
- 桐山隆哉・永谷浩・藤井明彦 2000. 島原半島沿岸の養殖ワカメに発生した魚類の食害が疑われる葉状部欠損現象. 長崎県水産試験場研究報告 26: 17-22.
- 倉島彰・山本清春 2012. ジベレリンとステビオサイドによるコンブ目3種配偶体の成熟と生長の制御. 藻類 60: 9-14.
- 黒木宗尚・秋山和夫 1957. ワカメの生態及び養殖に関する研究. 東北区水産研究所研究報告 10: 95-117.
- 松岡聡・吉松定昭・小野哲・一見和彦・藤原宗弘・本田恵二・多田邦尚 2005. 備讃瀬戸東部 (香川県沿岸) におけるノリ色落ちと水質環境. 沿岸海洋研究 43: 77-84.
- Morita, T., Kurashima, A. & Maegawa, M. 2003a. Temperature requirements for the growth and maturation of the gametophytes of *Undaria pinnatifida* and *U. undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol. Res.* 51: 154-160.
- Morita, T., Kurashima, A. & Maegawa, M. 2003b. Temperature requirements for the growth of young sporophytes of *Undaria pinnatifida* and *Undaria undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol. Res.* 51: 266-270.
- 永田誠一・名角辰郎・中谷明泰・鷲尾圭司・真鍋武彦 2001. 近年播磨灘主要ノリ漁場の環境調査結果. 兵庫県立水産試験場研究報告 36: 59-73.
- 二羽恭介 2015. 兵庫県明石海峡周辺のノリ漁場における二毛作に向けたワカメ養殖試験. 藻類 63: 90-97.
- Niwa, K. & Aruga, Y. 2003. Rapid DNA extraction from conchocelis and ITS-1 rDNA sequences of seven strains of cultivated *Porphyra yezoensis* (Bangiales, Rhodophyta). *J. Appl. Phycol.* 15: 29-35.
- 二羽恭介・原田和弘 2015. 養殖ノリ葉状体の窒素欠乏と添加に対する生理的応答. 海洋と生物 218: 243-249.
- 小河久朗 2004. ワカメ. 大野正夫 (編), 有用海藻誌. pp. 42-58. 内田老鶴圃, 東京.
- 大野正夫・團昭紀・平岡雅規・鍋島浩 2000. 海洋深層水と表層海水を用いたオフシーズンのワカメの屋内タンク培養. 日本水産学会誌 66: 737-738.
- 斉藤雄之助 1956. ワカメの生態に関する研究—II. 配偶体の成熟と芽胞体の発芽, 生長について. 日本水産学会誌 22: 235-239.
- 新村巖 1982. ワカメ類の育種について. 南西海区ブロック会議藻類研究会誌 19-26.
- 棚田教生・團昭紀・日下啓作・岡直宏・浜野龍夫 2015. 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.
- 棚田教生・中西達也 2011. フリー配偶体を用いた大量種苗生産による三陸ワカメ養殖の振興. *Algal Resources* 4: 69-72.
- 反田實・赤繁悟・有山啓之・山野井英夫・木村博・團昭紀・坂本久・佐伯康明・石田祐幸・壽久文・山田卓郎 2014. 瀬戸内海の栄養塩環境と漁業. 水産技術 7: 37-46.

(Received Oct. 14, 2015; Accepted Dec 14, 2015)