

ワカメにおける系統の異なる配偶体由来する 胞子体の生長・形態比較

梶原 慧太郎^{1*}・二羽 恭介²

¹ 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 兵庫県明石市南二見町二見 22-2)

² 東京海洋大学学術研究院海洋生物資源学部門 (〒 108-8477 東京都港区港南 4-5-7)

Keitaro Kajiwara^{1*} and Kyosuke Niwa²: Comparison of growth and morphology of *Undaria pinnatifida* sporophytes produced by crossbreeding using different gametophytic strains. Jpn. J. Phycol. (Sôru) 72: 1–9, March 10, 2024

We conducted a field experiment using hybrid and inbred sporophytes of *Undaria pinnatifida*, which were produced by free-living male/female gametophytes each isolated from a single zoospore, and compared their growth and morphological features to gain knowledge that will contribute to the efficiency of crossbreeding. The hybrid sporophytes were produced by the parental strains whose pedigree differed between males and females. As a result, those sporophytes were superior to inbred sporophytes in growth index, such as total length, blade length, and blade width. In addition, hybrid sporophytes with shorter genetic distance were found to be inferior to those with longer genetic distance in growth index. This study shows that growth of *U. pinnatifida* hybrid sporophytes can be predicted from the pedigree combination of the gametophyte used for parents.

Key Index Words: free-living gametophyte, heterosis, inbreeding weakness, *Undaria pinnatifida*

¹Fisheries Technology Institute, Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries, Akashi, Hyogo 674-0093, Japan

²Department of Marine Biosciences, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

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

緒言

ワカメ *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar は、日本、韓国および中国などの沿岸域に広く分布し、これらの地域で食用海藻として養殖されている (Yamanaka & Akiyama 1993, 大野ら 1999, Choi *et al.* 2007, Niwa & Kobiyama 2019)。わが国では主に三陸沿岸および鳴門海峡周辺海域で養殖され、養殖海藻ではノリ *Neopyropia yezoensis* (Kjellman) L.-E. Yang & J. Brodie に次ぐ第 2 位の生産規模を誇り、年間 100 億円程度の生産金額がある (二羽 2016)。

近年では、各生産現場に適したワカメの開発需要が高まっており (加藤・團 2010)、兵庫県下では生長が速い、藻体における産業利用が可能な部位の割合 (歩留まり) が高い、皺が少ないなどの形質を持つワカメが生産者から求められている。ワカメでは、目的とする形質を有する養殖種苗を作出するため、生育地の異なる天然の胞子体由来の配偶体同士や、異なる海域で養殖された胞子体から分離した配偶体を交配させる交雑育種法による品種改良が行われている (加藤ら 2010, 棚田ら 2015a, Niwa & Kobiyama 2019)。これらの方法により得られた雑種第一代の交配株 (一代交配株) は、異なる海域から種苗を導入する導入育種法 (原・石川 1988, 福澄ら 1999, 日下ら 2007, 加藤・團 2010) と異なり、品種改良の

効果が 1 代目で発現する。したがって、継代養殖により目的とする形質を固定化する必要が無い (棚田ら 2015a)、効率の良い育種法であるといえる。

一般に、ワカメは普段我々が食用として目にする無性世代 (2n) の胞子体と、微視的な有性世代 (n) の配偶体による異型世代交代を示す (名畑 2005, 川井ら 2009)。冬から春にかけて、胞子体の下部に形成された胞子葉 (メカブ) から遊走子が放出され、基質に着生すると雄性配偶体と雌性配偶体がそれぞれ発達してくる。夏は配偶体で過ごし、秋から成熟し始め、雄性配偶体から放出された精子と雌性配偶体に形成された卵が受精して受精卵ができる。やがて受精卵は芽胞体に発達し、さらに分裂を繰り返して幼胞子体へと生長する (黒木・秋山 1957, 二羽 2015)。ワカメの養殖用種苗はこのような生活環を利用して生産され、西日本で広く普及している「遊走子付け」では、春から初夏にかけて陸上水槽内に多数の胞子葉と採苗器を入れ、放出された遊走子を着生させて配偶体を培養する。その後、配偶体は秋口の水温低下とともに成熟・受精することで種苗を大量に生産できる (井伊 1964, 秋山 1992)。一方で、この方法は配偶体を保存することができないうえ、複数の胞子体由来の胞子葉を用いるため、遺伝的に均一な種苗生産が困難であることから、交雑育種には不向

きとされる (二羽 2016)。

これに対し、孢子葉から遊走子を放出させた後、基質に着生させずに試験管やフラスコ内に雌雄の配偶体を分離・保存した無基質配偶体 free-living gametophyte (以下、「フリー配偶体」とする) を用いた種苗生産方法が知られている (名畑 2005, 難波ら 2013, 二羽 2015, 棚田ら 2015a, 二羽 2016, 棚田 2016, Kanamoto *et al.* 2023)。ワカメでは、1 遊走子ずつ単離した (1 遊走子由来の) 雄性配偶体と雌性配偶体とを用いて種苗生産すれば、遺伝的に均一な種苗 (幼孢子体) の作出が可能となる (棚田ら 2015a, 二羽 2016, 棚田 2016, Niwa *et al.* 2017)。またこの方法では、インキュベータ内で温度、光量、明暗周期を調節することにより、配偶体を長期間保存できる。そのため、有用形質を持つ養殖種苗の作出に必要な配偶体を確実に保存し、効率良く品種改良に供することができる (棚田ら 2015b)。

これまでに、ワカメにおいて 1 遊走子由来のフリー配偶体を用いた他殖・自殖試験では、正逆交配株と自殖株の生長や形態などの比較 (棚田ら 2015a, 棚田 2016) や、4 世代にわたり自殖を繰り返し、各世代の自殖株の生長比較 (石川 1992) などが行われている。より生産現場のニーズに応じた養殖種苗を効率的に生産するためには、各交配株から分離した配偶体を用いて様々な組み合わせでさらに交配させる必要がある。しかし、配偶体の系統の組み合わせと、それにより生産された交配株の生長や形態などの関係性は明らかになっていない。

本研究では、兵庫県の生産現場や試験研究現場で養殖されているワカメの孢子体 HG16, HG17, HG18 および HG19 を用い、基準となる雌性配偶体 (HG18 由来) と雄性配偶体 (HG16, HG17, HG18 および HG19 由来) から交配株と自殖株を作出し、生長、形態および色調を比較・評価することで、交雑育種の効率化に資する知見を得ることを目的とした。

材料と方法

養殖試験に用いた交配株と自殖株の作出方法

本研究では、生長や各形質を比較する孢子体を作成するために用いた、1 遊走子由来のフリー配偶体を次の方法で分離した。2021 年 3 月に明石市江井ヶ島地先のワカメ養殖漁場 (Fig. 1, 以下「養殖漁場」とする) で、由来が異なる孢子体から分離されたフリー配偶体を用いて作出され、生産者から生長や形態に違いがあると認識されている孢子体 HG05, HG12, HG14 および HG15 (Fig. 2) を採集した。孢子体 HG05 と HG12 からは 1 遊走子由来の雌性配偶体 (HG05-G-F1, HG12-G-F1) を、孢子体 HG14 と HG15 からは 1 遊走子由来の雄性配偶体 (HG14-G-M1, HG15-G-M1) をそれぞれ分離した (Fig. 3)。これらの配偶体は、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「センター」とする) において、二羽 (2015) の方法により分離・培養した。

分離した系統の異なる雌性配偶体 (2 系統) と雄性配偶体 (2 系統) を、二羽・原田 (2016) の方法により Fig. 3 に示す 4

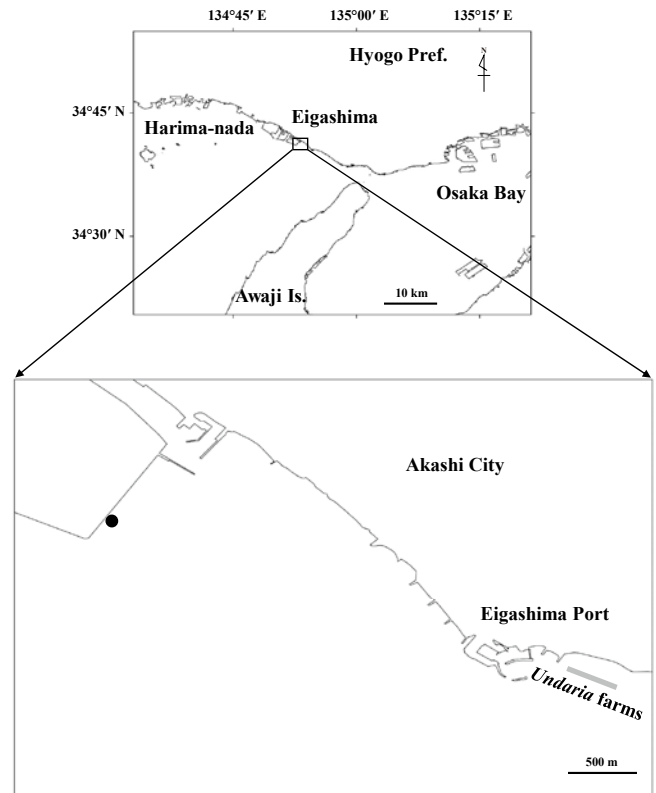


Fig. 1. Maps showing the farming site of Eigashima in the Seto Inland Sea. Closed circle shows the measurement site for seawater temperature.

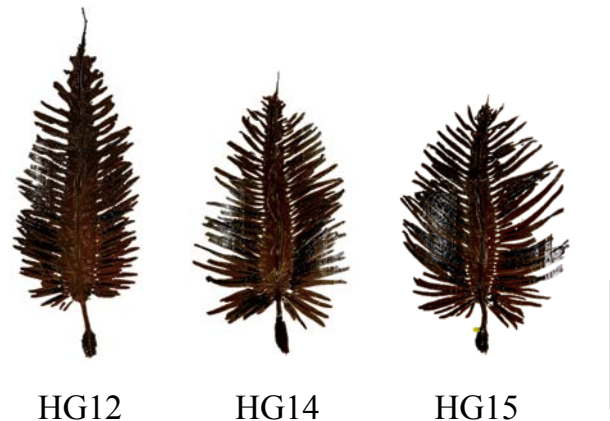


Fig. 2. Sporophyte samples of *Undaria pinnatifida* used to breed sporophytes which were used to isolate parental gametophytes. Scale bar, 1 m. Photograph of sporophyte HG05 was not obtained.

通りの組み合わせで交配させ、2021 年 11 月から養殖漁場で養殖し、2022 年 3 月に孢子体 HG16, HG17, HG18 および HG19 (Fig. 4) を採集した。これらの孢子体の各 1 個体の孢子葉から、前述と同じ方法で親となる 1 遊走子由来の配偶体を分離し、交配株と自殖株の作出に用いた。

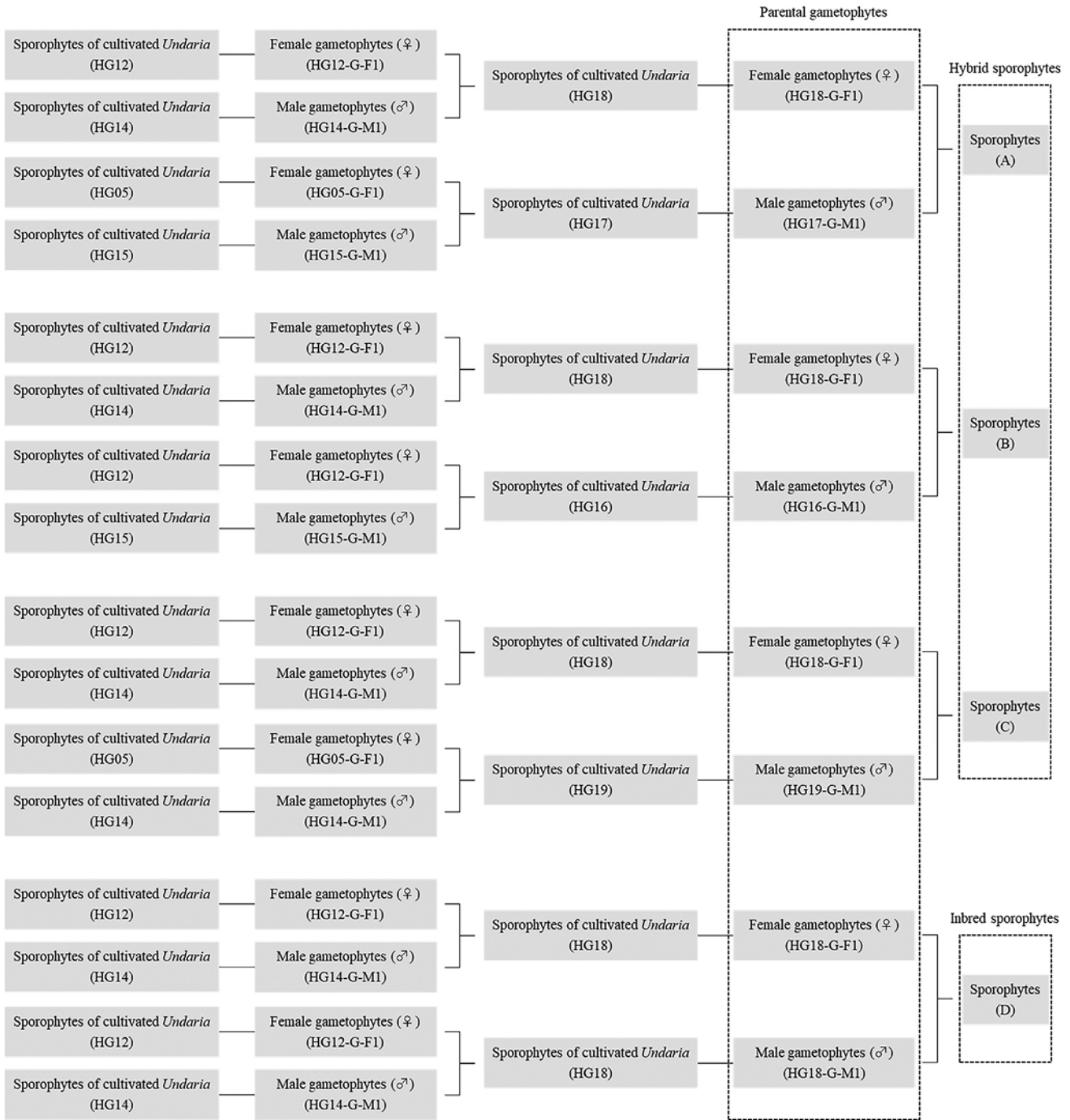


Fig. 3. Pedigree of *Undaria pinnatifida* gametophytes used to produce hybrid sporophytes and inbred sporophytes. The parentheses show the gametophytic strain code.

交配株と自殖株の作出と種苗生産

HG16 ~ HG19の各胞子体1個体から分離された1遊走子由来のフリー配偶体を用い、二羽・原田(2016)の方法により Fig. 3 に示す4通りの組み合わせで交配させ、交配株A, B, Cと自殖株Dを作出した。交配株A, BおよびCは、それぞれ胞子体HG17, HG16およびHG19から分離した雄性配偶体(HG17-G-M1, HG16-G-M1およびHG19-G-M1)と、胞子体HG18から分離した雌性配偶体(HG18-G-F1)を交配さ

せて作出した。自殖株Dは同じ胞子体HG18から分離した雄性配偶体(HG18-G-M1)と雌性配偶体(HG18-G-F1)を交配させて作出した。

各交配株と自殖株の種苗生産には、2022年10月11日および14日に、ステンレス棒(7.3 × 5.5 cm, 直径(断面)3 mm)にあらかじめ二羽(2015)の方法により油成分と毛羽を除去した長さ4 mのクレモナ糸(左三ツ撚り, 直径(断面)2 mm, 以下「種糸」とする)を巻き付けて製作した採苗器を用



Fig. 4. Sporophyte samples of *Undaria pinnatifida* used to produce parental gametophytes. Scale bar, 1 m.

いた。HG16～HG19の各孢子体から分離した1遊走子由来のフリー配偶体を、雌雄それぞれ0.2 g (湿重量) ずつ採取し、Fig. 3に示す組み合わせで100 mLのNPM培地(愛知海苔協議会1986, Niwa & Aruga 2003; 以下「培地」とする)とともにミキサーに同時に入れ、約60秒間細断して配偶体液を作成した。これをスプレーボトルに注入し、採苗器の表裏になるべく均一になるように30 mL散布した。その後、培地を入れた500 mLビーカーに採苗器を収納し、インキュベータ内で通気培養した(Fig. 5a)。培養中は温度18°C、光量 $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期10 hL:14 hDの短日条件に設定し、配偶体を成熟促進させ、受精させた。培地交換は1週間に1回行った。

仮沖出しと本養殖

通常、ワカメでは配偶体の成熟促進を開始してから約1カ

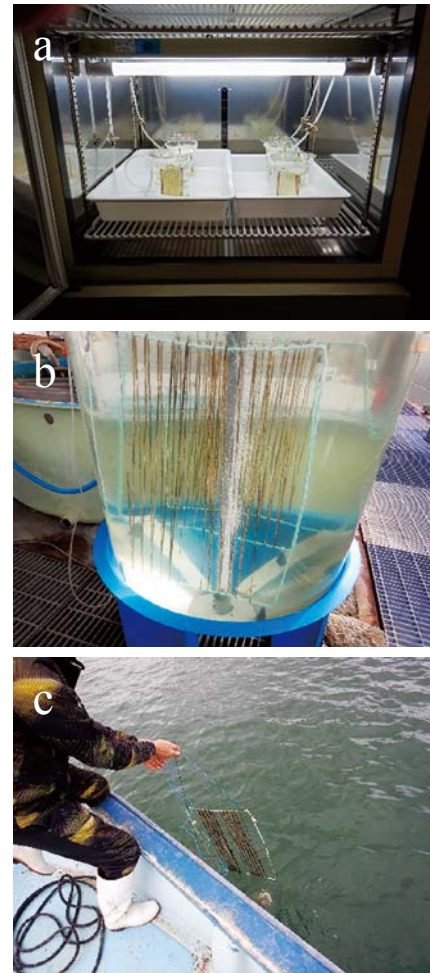


Fig. 5. Procedure for seedling production using free-living female and male gametophytes and nursery cultivation of *Undaria pinnatifida*. (a) Small seed collectors placed in beakers after spraying gametophytes. (b) The collectors in the outdoor water tank. (c) The collector was placed at a depth of about 1.5 m for nursery cultivation in *Undaria* farm.

月間通期培養を行うと、採苗器の種糸を種枠に巻き直して海中に垂下(仮沖出し)できるようになるが、本研究では1カ月が経過しても芽胞体の形成数が少なく、生長も悪かった。そこで、11月28日に各交配株および自殖株の種糸を種枠(51.3×35.3 cm)に巻き直し、センターの屋外に設置したアルテミア孵化槽(SBF-200, 日本サカス; 以下「野外水槽」とする)内で通気培養し、太陽光により受精および生長を促進させた(Fig. 5b)。野外水槽による培養中は、センターのポンプから汲み上げられた砂ろ過海水を掛け流した。また、1週間に1回種糸を砂ろ過海水で洗浄するとともに、12月14日には水道水で水槽内を洗浄した。12月26日から種枠を養殖漁場(水深4～5 m)の浮き流し養殖施設のロープに括り付け、水深約1.5 mの位置に垂下して仮沖出しを開始した(Fig. 5c)。仮沖出し中は、種糸に付着した珪藻などの汚れを洗浄するため、随時ポンプにより海水を噴出して洗浄した(二羽・原田2016)。

2023年1月17日に、約3 cmに切断した種糸をポリエチレ

ン製の養殖ロープ（直径（断面）約 1.4 cm）に 1 株ごとに約 10 本ずつ、約 50 cm 間隔で挟み込み、養殖漁場内に養殖ロープを張り込んで二羽・原田（2016）の方法により本養殖を開始した。1 集塊あたりの孢子体の密度は 12～15 個体であった。なお、生育環境が均一になるように、1 本の養殖ロープに全ての種糸を挟み込んで養殖した。

測定と解析

2023 年 2 月 8 日、2 月 27 日および 3 月 14 日に、各交配株と自殖株において、全ての集塊から生長の良い孢子体をまんべんなく採集し、合計 9～10 個体の孢子体を測定用標本とした。各標本の写真を撮影し、目視により形態を観察した後、全長、葉長、葉幅、全重量、葉重量を測定して採集日ごとの生長の指標とした（Fig. 6）。さらに、各交配株と自殖株の近交係数（ F_i ）を、佐藤（1999）が示した以下の式 1 を用いて算出し、近交の程度について調べた。

$$F_i = \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{2}\right)^{n_j} (1 + F_j) \quad (\text{式 1})$$

ここで n_i は i 番目の経路における個体数で、 F_i は i 番目の経路において両親の共通祖先の近交係数を示し、 m は経路の数である。なお、本研究では交配記録がある全ての経路をたどり、HG05、HG12、HG14、HG15 の全ての近交係数（ F_i ）が 0 であることを確認し、佐藤（1999）にしたがい近交係数が 0.5 以上を示した株は近交系とみなした。

ワカメでは加工利用としての歩留まりや形態の指標として、全長・葉長、全重量・葉重量、葉幅・欠刻幅（石川 1991）および葉長・最大裂葉長（加藤ら 2010）などの各形質間の比が用いられている。そこで、各交配株と自殖株において、形態比較が可能となる全長 70 cm 以上（石川 1991, 1994）の個体を抽出し、測定済みの項目（全長、葉長、葉幅、全重量、葉重量）に加え、欠刻幅と最大裂葉長も測定して（Fig. 6）、葉長/全長、葉重量/全重量、欠刻幅/葉幅および最大裂葉長/葉長を求めた。また、色調の指標となる SPAD 値（Soil and Plant Analyzer Development）は、3 月 14 日に採集した各交配株と自殖株において、最大裂葉の中肋側から先端方向にかけて間隔が均等になるように 4 カ所を選び、葉緑素計（SPAD-502、コニカミノルタ）で測定した（Fig. 6）。生長、各形質間の比および色調の各データは、統計解析ソフト R（ver. 4.2.2）を用いて Steel-Dwass の多重比較検定により、各交配株と自殖株の平均値を比較した。有意水準（ p ）は 0.05 とした。

野外水槽による培養中、養殖漁場における仮沖出しおよび本養殖の期間中の水温は、隣接するセンター地先に設置した自動観測装置で測定・算出された日平均値を用いた。

結果

各交配株と自殖株の特徴

3 月 14 日における交配株（A～C）と自殖株（D）の代表的な孢子体の写真を Fig. 7 に示す。藻体は概ね A が最も大きく、次いで B および C が続き、自殖株 D は最も小さかった。A、

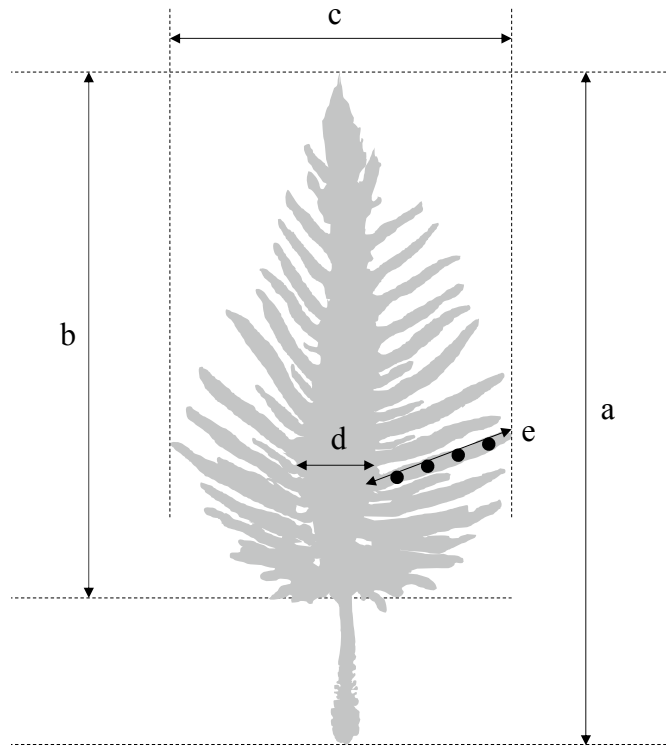


Fig. 6. Illustration of an *Undaria pinnatifida* sporophyte showing total length (a), blade length (b), blade width (c), undivided blade width (d), and divided (pinnate) blade length (e). SPAD value was measured at 4 points along the longest pinnate from the base to the top.

B および C は、各交配株内で個体ごとに葉長に対する裂葉の枚数、裂葉の形状、葉状部の切れ込みの深さなどに目立った差はみられなかった。一方で D は裂葉が波打ち、先端が縮れているものが多く、個体ごとに左右の裂葉の数や葉形が著しく異なっていた。

各交配株と自殖株の生長比較と水温の推移

各採集日における交配株と自殖株の生長の指標を比較した結果を Fig. 8 に示す。2023 年 2 月 8 日では、全ての生長の指標において交配株 A が B、C および自殖株 D よりも有意に高い値を示し、葉幅は、C が B よりも有意に広がった。2 月 27 日も全ての生長の指標において、A が B、C および D よりも有意に高い値を示し、全長と葉長は、B が D よりも有意に長かった。

3 月 14 日では、全長と葉長は A、B がいずれも C と D よりも有意に長かった。また、C は D よりも有意に長かった。葉幅は A、B および C が D よりも有意に広く、A が C よりも有意に広がった。全重量と葉重量は、A が B、C および D よりも有意に重かった。また全重量は、B が C および D よりも有意に重く、葉重量は、B が D よりも有意に重かった。

2022 年 11 月 1 日～2023 年 3 月 31 日におけるセンター地先の日平均水温変化を Fig. 9 に示す。野外水槽による培養を開

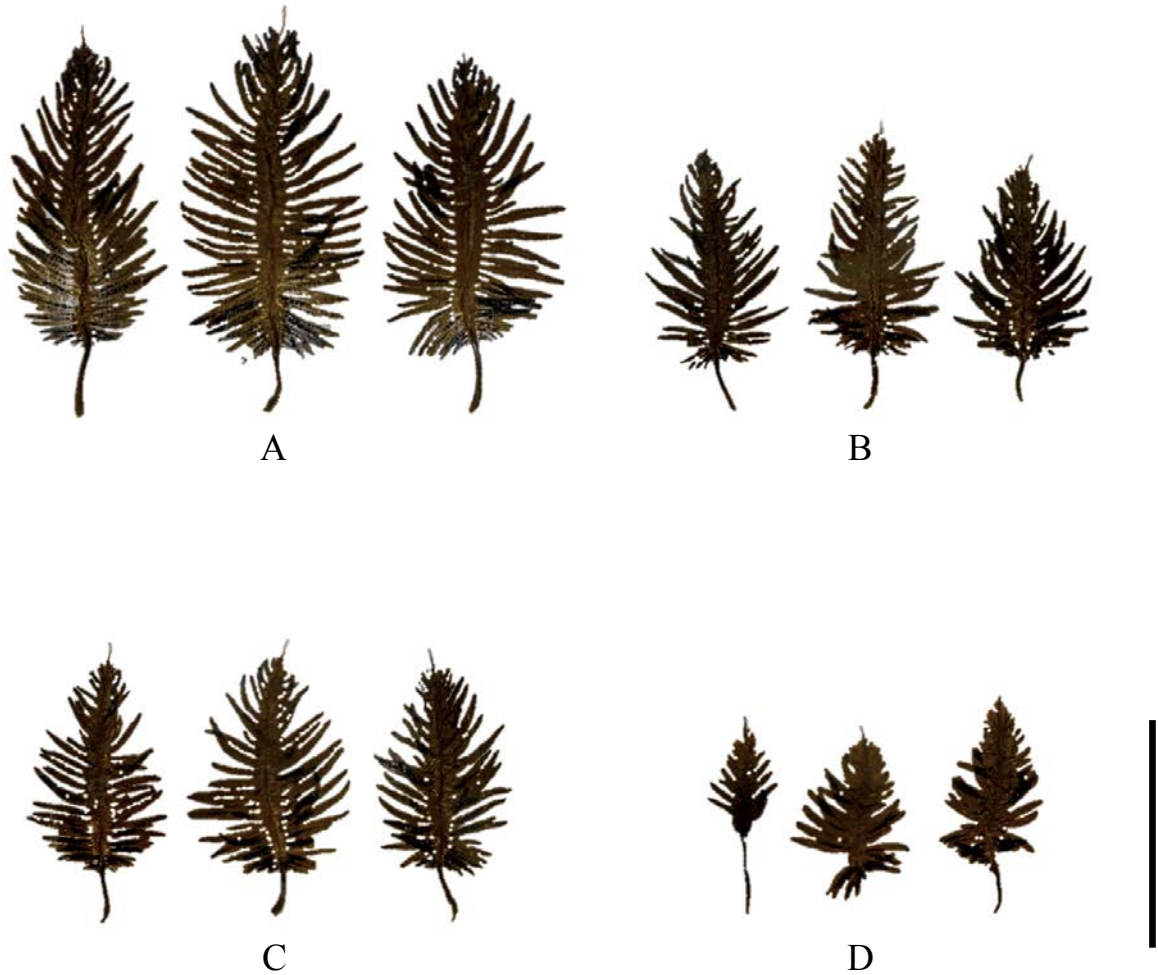


Fig. 7. Sporophyte samples of *Undaria pinnatifida*, hybrid sporophytes (A–C) and inbred sporophytes (D), collected on March 14, 2023. Scale bar, 1 m.

始した11月28日の水温は18.1°Cとなり、幼孢子体の生育適温である20°C (Morita *et al.* 2003, 二羽 2015) をやや下回っていた。その後、水温は徐々に低下して仮沖出しを開始した12月26日では10.9°Cを示した。本養殖を開始した1月17日も10.9°Cを示し、1月30日に8.6°Cに達した後、上昇に転じて2月8日は9.2°C、2月28日は9.5°C、3月14日は10.9°Cを示した。

近交係数、各形質間比および色調の比較

近交係数は自殖株D (0.50)、交配株BおよびC (0.13)、交配株A (0) の順に大きい値を示し、Dのみ近交系と判断された。各形質間の比について、葉重量/全重量はBがA、Cおよび自殖株Dと比較していずれも有意に低く、欠刻幅/葉幅はBがDよりも有意に高かった。葉長/全長、最大裂葉長/葉長はいずれも差がみられなかった (Table 1)。SPAD 値 (平均値 ± 標準偏差) は、Aで 15.5 ± 1.0 、Bで 15.2 ± 1.4 、Cで 15.3 ± 1.5 、Dで 16.5 ± 1.8 となり、差はみられなかった (Table 1)。

考察

生長の比較

近交係数が最小値を示した交配株Aは、全採集日において、全ての生長の指標で自殖株Dを上回り、葉形もDと異なり個体ごとに均一であった。また、Aは同じく非近交系の交配株B、Cと比較しても、ほとんどの採集日において生長面で上回った。一方で、近交系のDは各交配株と比較して生長が概ね悪く、葉長/全長 (BL/TL) の標準偏差が4株の中で最大となり個体間で葉形が大きく異なっていたことから、近交弱勢が生じたと考えられる。ワカメでは、遺伝的に異なる雌雄の配偶体から作出された交配株は自殖株を上回るヘテロシス (雑種強勢) が認められ、より大型に生長することが報告されている (原・秋山 1985, 棚田ら 2015a, 棚田 2016, 棚田ら 2017)。また、養殖ワカメにおいて、全長、葉長、葉幅は生産量に密接に関係し (原・秋山 1985)、生長が速いほど生産量も増大する。さらに、収穫時に集塊ごとに孢子体をまとめて刈り鎌で刈り取る際に、葉長/全長の標準偏差がCと並んで最も小さく、個体間で葉形が均一に近いAは収穫損失が少な

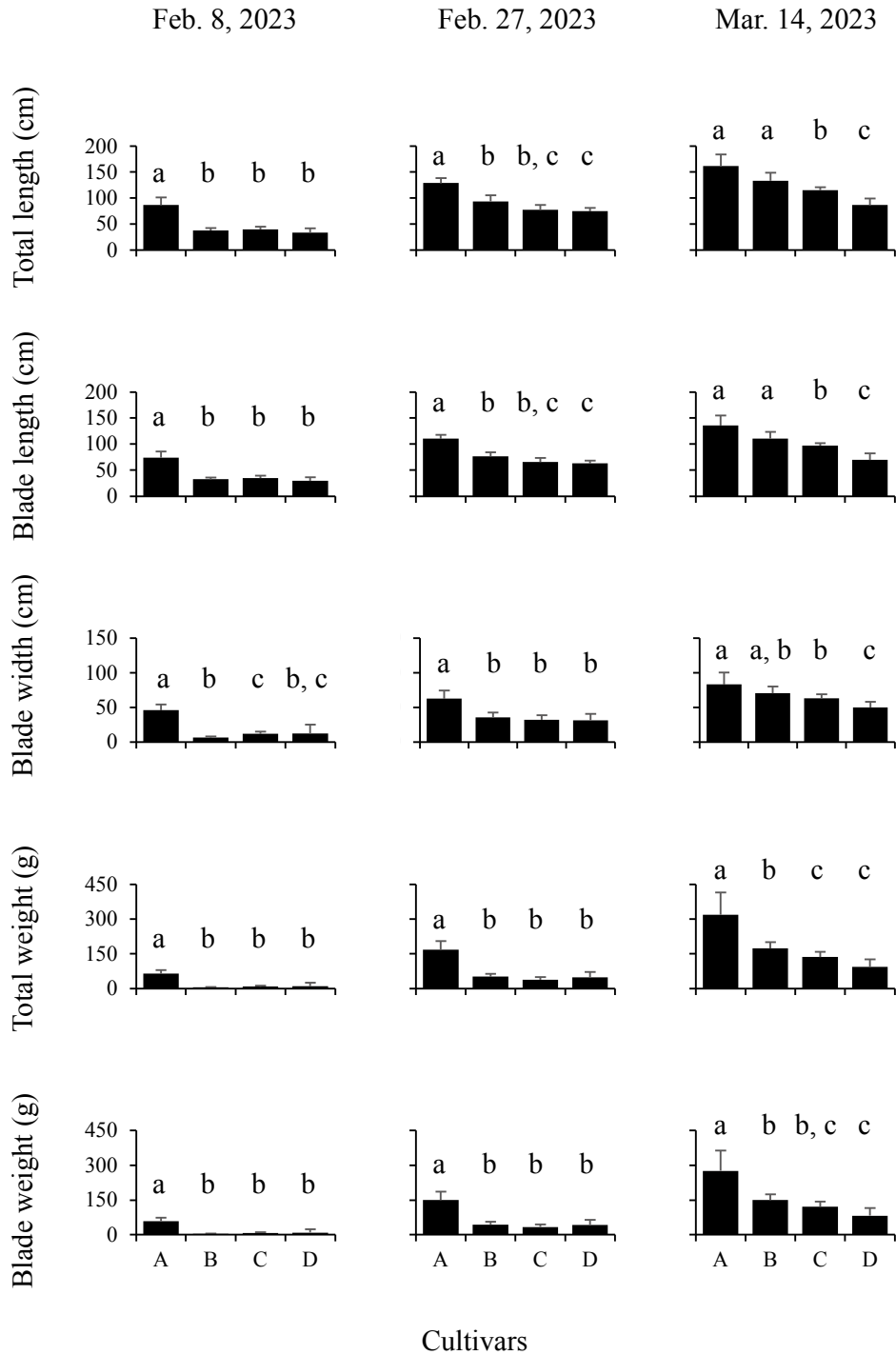


Fig. 8. Total length, blade length, blade width, total weight, and blade weight of hybrid sporophytes (A–C) and inbred sporophytes (D) of *Undaria pinnatifida* at each sampling date. Different characters indicate significant group of means found with the Steel-Dwass's multiple test ($p < 0.05$).

くなる可能性が高い。これらのことから、雌雄の配偶体において、近交の程度がより低くなる組み合わせで交配させることで、生長がよく、より多くの収穫量が見込める交配株を作出することが可能と考えられる。

交配株 B, C は、自殖株 D と比較して 2 月 8 日では生長に差はみられなかったが、3 月 14 日では全長、葉長、葉幅で上

回った。すなわち D の藻体の大きさは、B, C と比較して養殖初期では同程度であったものの、それ以降の生長が悪く、養殖後期では相対的に小さくなった。一般に、自殖あるいは近親交配によりホモ接合の遺伝子座が多くなった個体は、生長力や繁殖能力、環境への適応度が低下することが知られている (近交弱勢)。褐藻類では、個体群レベルではオオウキモ

Table 1. Soil and Plant Analyzer Development (SPAD) values, and ratios of several biometric parameters (only > 70 cm total length) of *Undaria pinnatifida* hybrid and inbred sporophytes (collected on March 14, 2023 for SPAD values; on February 8, 27, and March 14, 2023 for the other values).

	Sporophytes			
	A	B	C	D
SPAD value	15.5 ± 1.0 ^a	15.2 ± 1.4 ^a	15.3 ± 1.5 ^a	16.5 ± 1.8 ^a
BL / TL	0.85 ± 0.02 ^a	0.84 ± 0.04 ^a	0.84 ± 0.02 ^a	0.82 ± 0.06 ^a
BWT / TW	0.89 ± 0.03 ^a	0.87 ± 0.04 ^b	0.89 ± 0.02 ^a	0.88 ± 0.07 ^a
UBW / BWH	5.46 ± 1.03 ^{a,b}	6.63 ± 1.51 ^a	5.34 ± 1.22 ^{a,b}	4.57 ± 1.02 ^b
DBL / BL	0.34 ± 0.04 ^a	0.32 ± 0.06 ^a	0.33 ± 0.04 ^a	0.34 ± 0.08 ^a

Data of ratios of several biometric parameters are shown as average ± SD.

TL, total length; BL, blade length; BWH, blade width; BWT, blade weight; TW, total weight; UBW, undivided blade width; DBL, divided (pinnate) blade length.

Letters a to c indicate significant group of means found with the Steel-Dwass's multiple tests ($p < 0.05$).

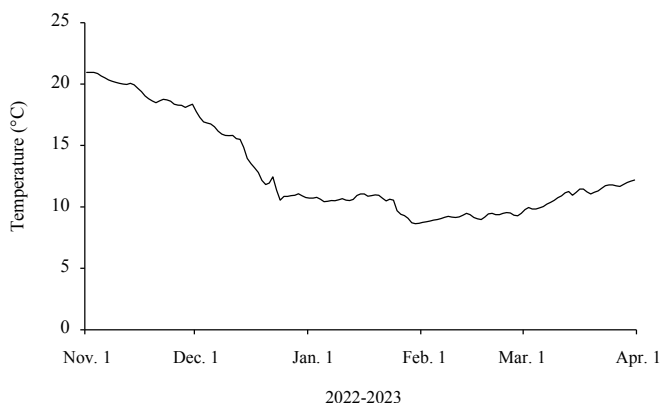


Fig. 9. Record of seawater temperature near the farming site (November 1, 2022–March 31, 2023).

Macrocystis pyrifera (Linnaeus) C.Agardh において自殖率が高いと胞子体の生残率や成熟率が低下することが示されている (Raimondi *et al.* 2004)。近交の程度の違いによる胞子体の生長を比較した報告は見当たらないが、本研究において近交系とみなされた自殖株 D は、比較的近交係数が小さい交配株 B, C よりも近交弱勢が強く発現し、生長が劣るものと考えられる。

ワカメにおいて、親とする配偶体の系統の違いによる生長差には、雄性配偶体側の影響が強い (伏屋・藤崎 1983, 棚田ら 2015a) とする指摘がある一方で、雌性配偶体側の方が強いとする指摘もある (加藤ら 2010)。今後、父親となる雄性配偶体を統一した交配試験も行い、雌雄の配偶体が交配株の生長におよぼす影響について比較する必要がある。

また、本研究では種苗生産開始直後から芽胞体の生育が悪く、結果的に本養殖期間が当初の予定 (12 月中旬～3 月中旬) よりも約 1 カ月間短縮された。この生育不良の原因は不明であるが、本研究を開始した 2022 年は、11 月 1 日時点で仮沖出しが可能とされる 23°C 以下 (二羽 2016) に水温が低下していた。したがって、仮に例年と同時期 (11 月上旬～中旬) に仮沖出しが開始できていた場合、藻体の生長は本研究の結果よりも全体的に良好であったものと推察される。

各形質間比と色調の比較

葉長 / 全長, 葉重量 / 全重量の値はいずれも高いほど歩留まりが良く、葉形の指標となる欠刻幅 / 葉幅の値は低いほど高品質とされる (日下ら 2007, 三枝ら 2009)。また、最大裂葉長 / 葉長の値は大きくなるほど葉長に対して葉幅が広がり、藻体全体が丸型に近くなる。SPAD 値は高いほど濃緑色に近づき、品質が高くなる (加藤ら 2010)。本研究において、交配株 B の葉重量 / 全重量は交配株 A, C および自殖株 D と比較していずれも低く、欠刻幅 / 葉幅は D よりも高かった。以上より、親とする配偶体の分離元となる胞子体の作出に用いた配偶体のうち、雌性配偶体側が同じ系統である場合は、生産された胞子体の最終的な歩留まりが悪く、品質が低下する可能性が示された。

なお、本研究ではこれら以外の各形質間比および SPAD 値に差はみられなかったため、親となる配偶体の系統は交配株の歩留まりや形態、色調にほとんど影響を与えないことが考えられた。ただし、ワカメの形態的特徴と色調は、雌性配偶体の影響を強く受けるとされており (加藤ら 2010, 棚田ら 2015a)、本研究ではこれを統一したため差が顕在化しなかった可能性がある。

まとめ

養殖ワカメにおいて、生長速度は収穫時期を決める要素の 1 つであり、製品単価にも影響をおよぼす。また、歩留まりは収穫量に影響をおよぼし、形態や色調は胞子体の等級を左右する重要な要素である (濱田ら 2001)。兵庫県のワカメ生産現場では、より遺伝的な固定度を高めるために、生長が速い、歩留まりが良いなどの産業上有用な形質を持つ養殖種苗を用いて、自殖や親に用いた配偶体の雌雄どちらか片方を再度交配させる戻し交配が行われている。しかし近年では、同一系統のワカメから繰り返し種苗生産を行うことにより、単位養殖ロープ長あたりの収穫量が減少しており、近交弱勢が生じている可能性が指摘されている (二羽 2016)。本研究で示された交配株の生長が自殖株よりも優れたという結果は、この可能性を強く支持するものである。また同時に、交雑育種に供する配偶体におい

て、配偶体の系統の組み合わせから交配株の生長のよし悪しをある程度予察できることがわかった。

ワカメの特性や品質の指標は、生長、歩留まり、形態などの他に葉状部の皺の数(棚田ら 2015a)や食味、香味、葉の質感(棚田 2022)、水分・塩分量、夾雑物の有無(濱田ら 2001)など多岐にわたる。特に皺の数は、食感に影響するとともに自家加工において最も投下労働時間が必要とされる「芯抜き」(藻体を元葉、芯(中肋)、葉状部に分離する工程(長谷川・鈴木 2005))の作業効率を左右する。これらのことから、皺が少なくなめらかな藻体が見込める養殖種苗は、食感の良い高品質なワカメになりやすく、また芯抜きを円滑に行うことができるため本県のワカメ生産者から好まれているが、必ずしも一代交配株が自殖株よりも少ないとは限らない(棚田ら 2015a)。今後、ワカメのこれらの指標と交雑育種に用いる配偶体の遺伝的構造との関係性は、さらに詳しく調べる必要がある。

謝辞

本研究を通して多大なるご協力を賜った江井ヶ島漁業協同組合の橘広洋氏に深く感謝します。本稿の執筆にあたり、校閲と貴重なご意見を賜った兵庫県立農林水産技術総合センター水産技術センターの宮原一隆主席研究員兼課長と岡本繁好研究員に感謝します。

引用文献

愛知海苔協議会 1986. フリー糸状体の培養. 愛知海苔協議会, 名古屋.
 秋山和夫 1992. ワカメ. 三浦昭雄(編), 食用藻類の栽培. 名古屋. pp.35-42. 恒星社厚生閣, 東京.
 Choi, H. G., Kim, Y. S., Lee, S. J. & Nam, K. W. 2007. Growth and reproductive patterns of *Undaria pinnatifida* sporophytes in a cultivation farm in Busan, Korea. *J. Appl. Phycol.* 19: 131-138.
 福澄賢二・太刀山透・深川敦平 1999. 福岡湾における養殖ワカメの種苗による生長と形態の相違. 福岡県水産海洋技術センター研究報告 9: 11-17.
 伏屋満・藤崎洗右 1983. ワカメ類交配試験. 愛知県水産試験場業務報告 昭和 57 年度: 81-84.
 濱田武士・松村一弘・井上喜洋・赤井雄次 2001. 塩蔵ワカメ製品製造システムの作業分析に基づく省力化の計画. *水産工学* 38: 61-68.
 原素之・秋山和夫 1985. ワカメのヘテロシス効果について. 東北区水産研究所研究報告 47: 47-50.
 原素之・石川豊 1988. 同一漁場で養殖したワカメの種苗による生長と形態の違い. *水産育種* 13: 29-33.
 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.
 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.
 石川豊 1991. 養殖ワカメの量的形質の解析と把握. *水産育種* 16: 19-24.
 石川豊 1992. 雌雄各 1 遊走子起源の配偶体から得られたワカメの形態について. *水産育種* 18: 25-32.
 石川豊 1994. 養殖ワカメの量的形質について. *水産育種* 20: 9-16.
 Kanamoto, Y., Kiyokawa T. & Sasaki, T. 2023. Improvement of productivity for the early shipment of cultivated *Undaria pinnatifida*, in Shimane Peninsula using a high-temperature resistant strain obtained from crossbreeding. *Aquacult. Sci.* 71: 9-22.
 加藤慎治・團昭紀 2010. 鳴門海域で養殖された国内 8 海域産のワカメ種苗の生長と形態. *Algal Resources* 3: 19-26.

加藤慎治・住友寿明・團昭紀 2010. 1 遊走子由来の雄雌配偶体交配によるワカメ品種改良. *Algal Resources* 3: 205-210.
 川井浩史・上井進也・羽生田岳昭 2009. 遺伝子マーカーを用いた褐藻ワカメ移入集団の起源・動態解析と緑藻アオサ類移入集団の検出. *日本生態学会誌* 59: 145-152.
 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. 東北海区水産研究所研究報告 10: 95-117.
 日下啓作・佐々木良・塚田輝夫・及川浩人 2007. 寒暖 8 水域で採取、育苗した天然ワカメ種苗の成長と形質. *宮城県水産研究報告* 7: 17-28.
 Morita, T., Kurashima, A. & Maegawa, M. 2003. Temperature requirements for the growth of young sporophytes of *Undaria pinnatifida* and *Undaria undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol. Res.* 51: 266-270.
 名畑進一 2005. コンブ・ワカメ. 森勝義(編), 水産増養殖システム 3. 貝類・甲殻類・ウニ類・藻類. pp. 49-55. 恒星社厚生閣, 東京.
 難波信由・藤原孝行・桑野和可・石川豊・加戸隆介 2013. 岩手県産ワカメ地方株の形態的変異. *Sessile Organisms* 30: 37-41.
 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.
 二羽恭介 2016. 大型水槽によるフリー配偶体を使ったワカメの種苗生産. *水産増殖*. 64: 173-182.
 Niwa, K. & Aruga, Y. 2003. Rapid DNA extraction from conchocelis and ITS-1 rDNA sequences of seven strains of cultivated *Porphyra yezoensis* Ueda (Bangiales, Rhodophyta). *J. Appl. Phycol.* 15: 29-35.
 二羽恭介・原田和弘 2016. 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. *藻類* 64: 10-18.
 Niwa, K. & Kobiyama, A. 2019. Development of a new cultivar with high yield and high-temperature tolerance by crossbreeding of *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyta). *Aquaculture* 506: 30-34.
 Niwa, K., Kobiyama, A., Fuseya, R. & Sakamoto, T. 2017. Morphological and genetic differentiation of cultivated *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyta). *J. Appl. Phycol.* 29: 1473-1482.
 大野正夫・松岡正義・團昭紀・Pang, S.・Wu, C. Y. 1999. 中国産と鳴門産天然ワカメの形態形質特性. *水産増殖* 47: 61-64.
 Raimondi, P. T., Reed, D. C., Gaylord, B. & Washburn, L. 2004. Effects of self-fertilization in the giant kelp, *Macrocystis pyrifera*. *Ecology* 85: 3267-3276.
 三枝美穂・熊野芳明・塚田輝夫 2009. 気仙沼湾で継代養殖した対馬系ワカメ 6 世代の生長と形態特性. *宮城県水産研究報告* 9: 25-32.
 佐藤良三 1999. 近交係数の推定について. *養殖研ニュース* 41: 3-5.
 棚田教生 2016. フリー配偶体を用いたワカメの実用規模種苗生産法および高水温耐性品種の開発. *海洋と生物* 38: 464-471.
 棚田教生 2022. 聞き取り調査による一代雑種養殖ワカメの実用性の評価(短報). 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 14: 31-34.
 棚田教生・團昭紀・加藤慎治・岡直宏・浜野龍夫 2015a. 鹿児島県産天然ワカメと鳴門産養殖品種の雌雄フリー配偶体正逆交雑による品種改良の効果. *Algal Resources* 8: 103-112.
 棚田教生・團昭紀・日下啓作・岡直宏・浜野龍夫 2015b. 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検証. *Algal Resources* 8: 23-36.
 棚田教生・岡直宏・浜野龍夫 2017. 徳島県太平洋沿岸由岐地先に適したワカメ養殖種苗の検討. 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 11: 25-30.
 Yamanaka, R. & Akiyama, K. 1993. Cultivation and utilization of *Undaria pinnatifida* (wakame) as food. *J. Appl. Phycol.* 5: 249-253.

(2023 年 10 月 12 日受付, 2024 年 1 月 20 日受理)
 通信担当編集委員: 倉島 彰