

## 新潟県産ワカメの生育に及ぼす温度, 光量, 塩分の影響

馬場将輔

### Effects of Temperature, Irradiance and Salinity on the Growth of *Undaria pinnatifida* from Niigata Prefecture, Central Japan

Masasuke Baba\*

**要約:** 新潟県柏崎産ワカメについて, 配偶体および幼孢子体の成長と生残に及ぼす温度, 光量, 塩分の影響を室内培養により調べた。成長に適した温度と光量の条件は, 配偶体では22°Cの100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 幼孢子体では15°Cの100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であった。雌雄配偶体の成熟上限温度は24~26°Cにあることが推定された。成長に適した温度と塩分の条件は, 配偶体では20~22°Cの28~36psu, 幼孢子体では10~20°Cの32psuであった。雌性配偶体の成熟は15~22°Cの20~36psuでほぼ100%に達した。高温と低塩分による生残率の低下傾向が, 配偶体では26~30°Cで, 幼孢子体では22~28°Cでそれぞれ認められた。

**キーワード:** ワカメ, 配偶体, 成長, 光量, 成熟, 塩分, 温度, 幼孢子体

**Abstract:** The effects of temperature, irradiance and salinity on the growth and survivorship of gametophyte and young sporophyte in *Undaria pinnatifida* collected at Niigata Prefecture, central Japan were examined under laboratory cultures. The optimal growth conditions of gametophyte and young sporophyte at different temperature/irradiance conditions were 22°C/100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  and 15°C/100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , respectively. The upper critical temperature for maturation of gametophyte was 24-26°C. The optimal growth conditions of gametophyte and young sporophyte at different temperature/salinity conditions were 20-22°C/28-36 psu and 10-20°C/32 psu, respectively. The maturity of female gametophyte attained 100% under the combination of 15-22°C/20-36 psu. The significant decline of survivorship under high temperature and low salinity was observed at 26-30°C in gametophyte and 22-28°C in young sporophyte, respectively.

**Keywords:** *Undaria pinnatifida*, gametophyte, growth, irradiance, maturity, salinity, temperature, young sporophyte

#### まえがき

ワカメ *Undaria pinnatifida* は九州から北海道にかけて, 内湾から外海域に面した海岸に広く分布する一年生褐藻類である。低潮線付近から漸深帯上部に生育し, 日本各地で栽培対象種になっていることから, 環境変化に対して広い適応性を持つと考えられている (大野, 1987; 小河, 2004)。ワカメは日本, 韓国, 中国に自生する特産種であったが, 近年ではヨーロッパ, オーストラリア, ニュージーランド, 北米太平洋岸, アルゼンチンに移入して分布が拡大している (Yamanaka and

Akiyama, 1993; 小河, 2004; 川井ら, 2007)。

ワカメの生活史は, 巨視的な孢子体と微視的な配偶体との異型世代交代である (斎藤, 1962; 館脇, 1993)。ワカメの生育と成長に関連する知見は, 栽培技術と品質の向上を目的として, 現場海域での試験を主体に集積されてきた (秋山, 1986; 小河, 2004)。室内培養によるワカメの生活史に及ぼす温度の影響は, 配偶体 (斎藤, 1956a, 1956b; 秋山, 1965; Morita *et al.*, 2003a) および幼孢子体 (斎藤, 1962; Morita *et al.*, 2003b) で基礎的な研究が行われている。温度以外の環境要因では, 配偶体について日長 (秋山, 1965), 光量 (斎藤, 1962), 塩分 (斎藤, 1956b),

(2008年2月6日受付, 2008年2月28日受理)

\* 財団法人 海洋生物環境研究所 実証試験場 (〒945-0017 新潟県柏崎市荒浜4-7-17)

E-mail: baba@kaiseiken.or.jp

乾燥（斉藤，1962）への影響が報告されている。このほか，配偶体と孢子体の温度と光量（斎藤，1958；秋山，1965；松山，1983），配偶体の日長と光量（Choi *et al.*, 2005），孢子体の温度と水流（馬場ら，2006）に関する複合的な影響がそれぞれ検討されている。

財団法人海洋生物環境研究所では，発電所取放水に係わる温排水の影響を予測するために必要な知見の集積を目的として，海生生物を対象とした室内実験を実施している。本研究では，ワカメの配偶体と幼孢子体の成長，生残等に及ぼす複合的な影響を検討することを目的として，本種の生育を左右する重要な環境要因である温度，光量，塩分の影響を室内培養実験により調べた。

### 材料と方法

**供試材料** 成熟したワカメ孢子体は新潟県柏崎市の岩礁域の水深1m付近で，平成16年5，6月に採集した。採集後，直ちに（財）海洋生物環境研究所実証試験場へ持ち帰り，成熟した孢子葉を切り取って滅菌海水で数回洗浄した。この孢子葉を10℃の保冷庫に入れ2時間の低温処理を行ったのちに，15℃の滅菌海水に浸漬することにより遊走子を放出させた。次に，あらかじめ22×22mmのカバーガラスを敷き詰めて培養液150mLを入れたガラス製シャーレに，滅菌海水で希釈した遊走子液5mLを添加し，15℃，光量30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ ，12時間明期：12時間暗期の条件で静置培養した。カバーガラスに着生した遊走子は，培養2日目に1細胞期の配偶体になったところで各実験に用いた。一方，幼孢子体は，配偶体の成熟後に形成された幼芽を2ヶ月間以上培養して，葉長約1cmに成長した時点で各実験に用いた。なお，本研究で用いた培養液は，海水を濾過滅菌した後に通常濃度のPESI（Tatewaki, 1966）培地を添加したものである。

ワカメ配偶体の成熟と日長との関係は，生育地により異なることが指摘されている（秋山，1965）。そのため予備実験を行った結果，本研究の材料である新潟県柏崎産のワカメ配偶体は，秋山（1965）が用いた新潟県佐渡産ワカメのものと同様に明期14時間の長日条件では成熟せず，明期が12時間および9時間の条件で成熟することが確認された（馬場，未発表資料）。そこで，以下の培養実験では日長を12時間明期に設定した。

**温度と光量の影響** 配偶体の成長に及ぼす温度と光量の実験では，培養液15mLを各穴に入れた組織培養用マイクロプレート（6穴，イワキ製）を使用し，配偶体が着生したカバーガラスをそのなかに入れた。実験区は温度10，15，20，22，24，26，28，30℃の8段階，光量10，25，50，100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の4段階を組み合わせた32条件を設定した。培養期間は7日間とし，培養液の交換は行わなかった。雌雄の配偶体別に20個体について細胞数を測定した。

配偶体の成熟に及ぼす温度と光量の実験は，上記の配偶体の成長実験と同様の培養方法を用いた。培養期間は21日間とし，7，14日目に培養液の全量を交換した。21日目の雌雄配偶体についてそれぞれ20個体を測定した。なお，培養容器は1条件について4個準備し，4回の繰り返しとした。その際，成熟は雌性体が生卵器に卵を形成した状態，雄性体が造精器を形成した状態のものとした（館脇，1993）。

幼孢子体の成長に及ぼす温度と光量の実験では，培養容器に直径6cm×高さ6cmのガラス製腰高シャーレを使用し，培養液100mLを入れた。各シャーレに葉長約1cmの幼孢子体を10個体収容した。実験区は温度5，10，15，20，22，24，26，28，30℃の9段階，光量10，25，50，100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の4段階を組み合わせた36条件を設定した。培養期間は21日間とし，7，14日目に培養液の全量を交換した。21日目の藻体を撮影し，画像解析ソフト（NIH Image）で処理することにより茎状部を除いた葉状部の面積を測定した。葉状部面積の日間成長率（daily growth rates：DGR）は次式によって計算した。 $\text{DGR} = (\ln A_t - \ln A_0) / t \times 100$ ，ここで $A_0$ は開始時の葉面積， $A_t$ はt日後の葉面積。

**温度と塩分の影響** 実験に使用した培養液の塩分調整は，海水を凍結・解凍して作製した約65psuの滅菌海水，32～33psuの滅菌海水，蒸留水をそれぞれ混合することにより行った。そして，所定の塩分に調整した海水にPESI培地を添加した。すべての塩分の実験において，光量は100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ に設定した。

配偶体の成長に及ぼす温度と塩分の実験では，塩分を調整した培養液を15mL入れた6穴マイクロプレートを培養容器として使用し，配偶体が着生したカバーガラスをそのなかに入れた。実験区を温度10，15，20，22，24，26，28，30℃の8段階，塩

分8, 16, 20, 24, 28, 32, 36psuの7段階を組み合わせた56条件とした。培養期間は7日間とし、雌雄の配偶体別にそれぞれ20個体について細胞数を測定した。

配偶体の成熟に及ぼす温度と塩分の実験では、上記の配偶体の成長実験と同様の培養方法を用いた。試験区は温度10, 15, 20, 22, 24, 26, 28, 30°Cの8段階、塩分8, 16, 20, 24, 28, 32, 36psuの7段階を組み合わせた56条件を設定した。培養期間は21日間とし、7, 14日目に培養液の全量を交換した。21日目の雌雄配偶体について20個体を測定した。なお、培養容器は1条件について4個準備し、4回の繰り返しとした。配偶体の成熟の観察では、温度と光量の実験と同様に、生卵器を形成した雌性体および造精器を形成した雄性体を成熟個体とした。

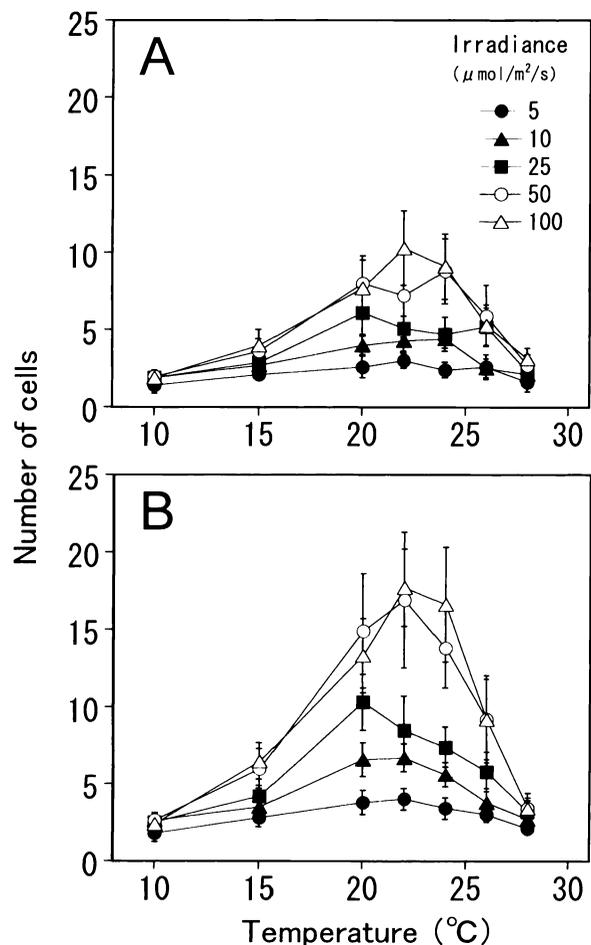
幼胞子体の成長に及ぼす温度と塩分の実験では、塩分を調整した培養液100mLを入れた直径6cm×高さ6cmのガラス製腰高シャーレを使用した。各シャーレに葉長1cmの胞子体を10個体入れた。実験区は温度5, 10, 15, 20, 22, 24, 26, 28, 30°Cの9段階、塩分8, 16, 20, 24, 28, 32, 36psuの7段階を組み合わせた63条件を設定した。培養期間は21日間とし、7, 14日目に培養液の全量を交換した。21日目の胞子体について、前出の温度と光量の実験と同様の方法により葉面積を測定し、日間成長率を算出した。

配偶体の生残に及ぼす温度と塩分の実験では、塩分を調整した培養液を15mLづつ入れた6穴マイクロプレートを使用し、配偶体が着生したカバーガラスをそのなかに入れた。実験区は温度10, 15, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34°Cの10段階、塩分8, 12, 16, 20, 24, 28, 32psuの7段階を組み合わせた70条件を設定した。なお、各実験区について培養容器を6個準備し6回の繰り返しとし、24時間接触を行った。所定の時間が経過した配偶体は32psuに調整した培養液を入れた6穴マイクロプレートに移し、20°C, 100 $\mu$ mol/m<sup>2</sup>/s, 12時間明期:12時間暗期の条件で培養を続け、7日後に40個体について生残の有無を観察した。

幼胞子体の生残に及ぼす温度と塩分の実験では、塩分を調整した培養液200mL入れた三角フラスコを使用し、葉長1cmの幼胞子体20個体をその中に入れた。なお、三角フラスコは1条件について6本準備し、6回の繰り返しとした。実験区は温度10, 15, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34°Cの10段階、

塩分8, 12, 16, 20, 24, 28, 32psuの7段階を組み合わせた70条件を設定した。各実験区について6回反復とし、24時間接触を行った。所定の時間が経過した幼胞子体は、32psuに調整した培養液500mLを入れた三角フラスコに移し、20°C, 100 $\mu$ mol/m<sup>2</sup>/s, 12時間明期:12時間暗期の条件で培養を続け、7日後に20個体について生残の有無を観察した。

**統計処理** データは二元配置の分散分析により検定を行い、次にTukey-Kramerの多重比較検定により、各実験区の平均値の有意差 ( $p < 0.05$ ) を判定した。なお、成長に関するデータは対数変換を、また、成熟率と生残率のデータは逆正弦変換をそれぞれ行い、統計処理を実施した。



**Fig. 1** Growth of gametophytes in *Undaria pinnatifida* after 7 days culture period under different temperature and irradiance conditions. A: Female gametophyte, B: Male gametophyte. Data are expressed as mean value  $\pm$  standard deviations (n=20). Symbols of irradiances are given in Fig. 1A.

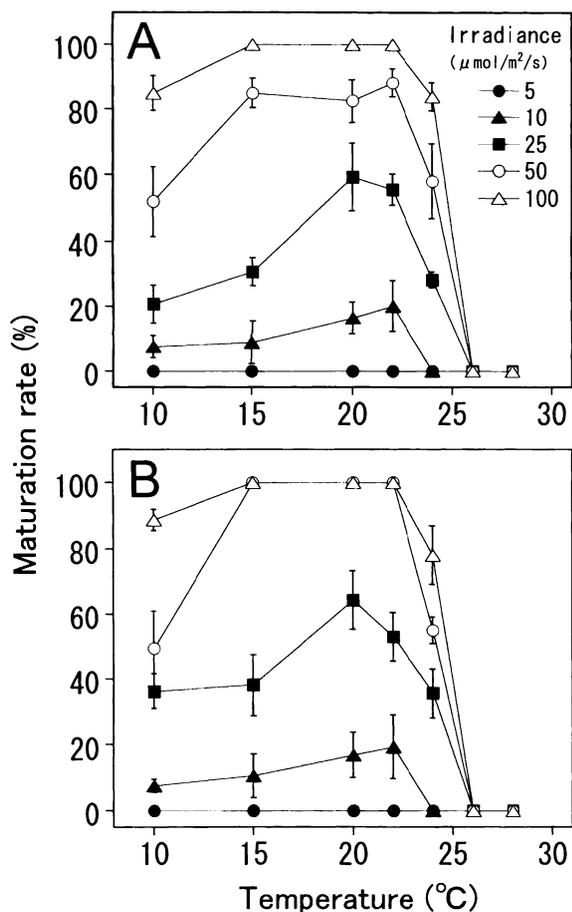


Fig. 2 Maturation rate of gametophytes in *Undaria pinnatifida* after 21 days culture period under different temperature and irradiance conditions. A: Female gametophyte, B: Male gametophyte. Data are expressed as mean value  $\pm$  standard deviations ( $n=20$ , four replicates). Symbols of irradiances are given in Fig. 2A.

### 結 果

**配偶体の成長に及ぼす温度と光量の影響** 雌性および雄性配偶体は10~28°Cで成長がみられたが、30°Cにおいて実験開始後の数日以内にすべて枯死し、28°Cが生育上限温度であると推定された (Figs. 1A, 1B)。雌雄の配偶体は20~24°C、50~100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ で良く成長し、他の実験区よりも有意に高い値を示した ( $p<0.001$ )。光量50, 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ での配偶体の成長は、10~22°Cで温度が高いほど良く、24°C以上で概ね低下する傾向を示した。また、25 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の低光量条件では20°C以上で配偶体の成長低下がみられたほか、5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ では温度条件に係わらず配偶体の成長はわずかであった。

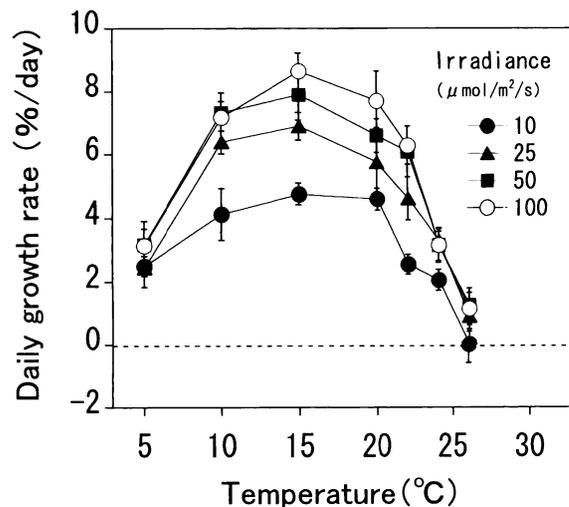


Fig. 3 Growth of young sporophytes in *Undaria pinnatifida* after 21 days culture period under different temperature and irradiance conditions. Data are expressed as mean value  $\pm$  standard deviations ( $n=10$ ).

**配偶体の成熟に及ぼす温度と光量の影響** 雌性配偶体の造卵器形成および雄性配偶体の造精器形成は、21日間の培養において10~24°Cの10~100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の条件で観察され、10~22°Cで温度と光量の増加とともに成熟率が増加する傾向にあった (Figs. 2A, 2B)。しかし、10~24°Cの5 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ および26, 28°Cの全ての光量区では、配偶体の成熟が観察されなかった。このことから、雌雄配偶体の成熟上限温度は24~26°Cにあることが推定された。雌性配偶体の成熟率は15~22°Cの100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ で100%に達し、50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下よりも有意に高くなった ( $p<0.001$ )。10, 24°Cの各光量区の雌性配偶体の成熟率は15~22°Cよりも低く、低温あるいは高温と光量の減少による成熟率の低下が認められ、この傾向は雄性配偶体でもみられた。雄性配偶体の成熟率は、15~22°Cの50~100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ で100%に達し、25 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 以下よりも有意に高くなった ( $p<0.001$ )。

**幼胞子体の成長に及ぼす温度と光量の影響** 幼胞子体は5~26°Cで成長がみられたが、28, 30°Cでは、実験開始後7日以内にすべての個体が枯死し、26°Cが生育上限温度であると推定された (Fig. 3)。幼胞子体の成長率は、15°Cの100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ で最も高く、次いで15°Cの50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、20°Cの100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の順であり、その他の条件よりも有意に高い値を示した ( $p<0.05$ )。21日間の成長率は0.02~

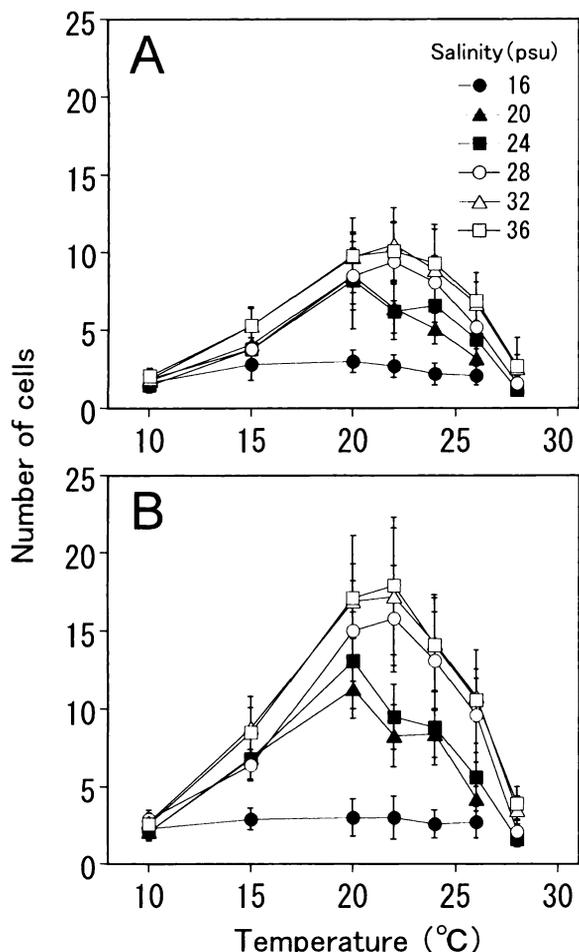


Fig. 4 Growth of gametophytes in *Undaria pinnatifida* after 7 days culture period under different temperature and salinity conditions. A: Female gametophyte, B: Male gametophyte. Data are expressed as mean value  $\pm$  standard deviations (n=20). Symbols of salinities are given in Fig. 4A.

8.65%の範囲にあり、5~15°Cで温度が高いほど増加したが、20°C以上で高温と光量の減少にともない次第に低くなった。

**配偶体の成長に及ぼす温度と塩分の影響** 雌雄の配偶体は10~26°Cの16~36psu、28°Cの20~36psuで成長がみられたが、10~28°Cの8psu、28°Cの16psu、30°Cの全ての塩分区で実験開始後の数日以内に、それぞれすべて枯死した (Figs. 4A, B)。16psuの成長はわずかであり、温度の違いによる差はほとんどなかった。22~26°Cの雌性配偶体、20~26°Cの雄性配偶体の成長は、各温度区とも28~36psuで有意な差はみられず ( $p > 0.05$ )、24psu以下で有意に低下する傾向が認められた ( $p < 0.01$ )。低温区の15°Cおよび高温区の28°Cでの雌

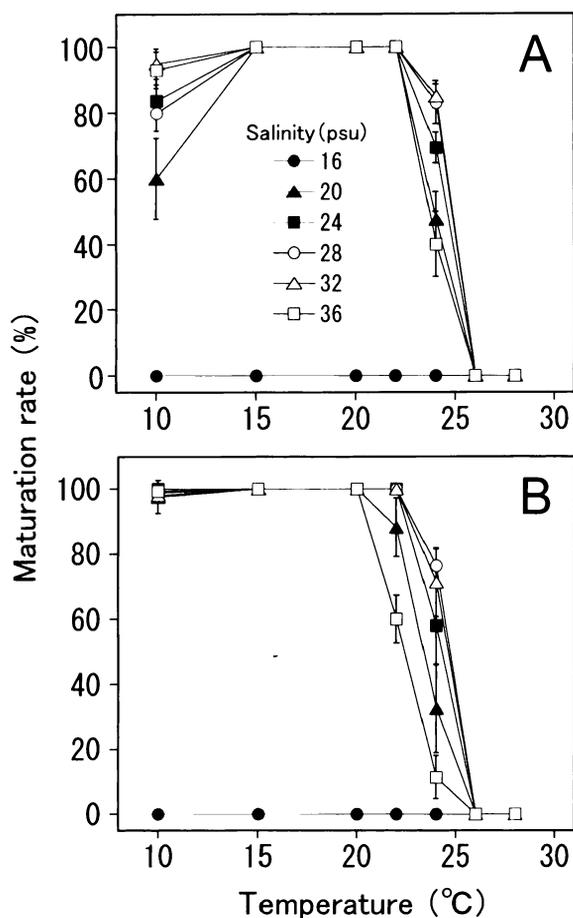


Fig. 5 Maturation rate of gametophytes in *Undaria pinnatifida* after 21 days culture period under different temperature and salinity conditions. A: Female gametophyte, B: Male gametophyte. Data are expressed as mean value  $\pm$  standard deviations (n=20, four replicates). Symbols of salinities are given in Fig. 5A. Maturation rates of female (15-22°C and 20-36 psu) and male (15-20°C and 20-36 psu) gametophytes attained 100% after 21 days culture period, respectively.

雄配偶体の成長は28psu以下において、32、36psuよりも有意に低下した ( $p < 0.05$ )。

**配偶体の成熟に及ぼす温度と塩分の影響** 雌雄配偶体の成熟は、21日間の培養において10~24°Cの20~36psuで観察されたが、10~24°Cの16psuおよび26、28°Cの全ての塩分区では観察されなかった (Figs. 5A, 5B)。このことから、雌雄配偶体の成熟下限塩分は16~20psuにあることが推定された。雌性配偶体の成熟率は、15~22°Cの20~36psuで93~100%に達し、塩分の違いによる有意差は認

められなかった ( $p > 0.05$ )。10、24°Cの雌性配偶体の成熟率は、20psuが28、32psuよりも有意に低くなり ( $p < 0.01$ )、低温あるいは高温と低塩分による成熟率の低下傾向が認められた。さらに、24°Cでは低塩分条件のほか、36psuの高塩分でも成熟率の低下傾向が認められた。雄性配偶体の成熟率は10~20°Cの20~36psuで98~100%に達し、これらの実験区間では有意差は認められなかった ( $p > 0.05$ )。しかし、22、24°Cの20psuにおいて24~32psuよりも有意に低下し ( $p < 0.01$ )、雌性配偶体と同様に高温と低塩分による成熟率の低下傾向が認められた。さらに、22、24°Cでは低塩分条件のほか、36psuの高塩分でも成熟率の低下傾向が認められた。

**幼胞子体の成長に及ぼす温度と塩分の影響** 幼胞子体の成長率の増加は、5~20°Cの20~36psu、22°Cの24~36psu、24°Cの28~36psu、26°Cの32~36psuでみられたが、20°C以上では低塩分による成長率の低下傾向が顕著であった (Fig. 6)。28、30°Cでは、培養開始後7日以内にすべての藻体が枯死したほか、26°Cの8~20psu、24°Cの8~16psu、10~22°Cの8~16psuでは実験終了時まですべての藻体が枯死した。幼胞子体の成長率は10~20°Cの32psuでは有意な差はなく ( $p > 0.05$ )、それぞれ28psu以下および36psuよりも有意に高い値を示した ( $p < 0.001$ )。

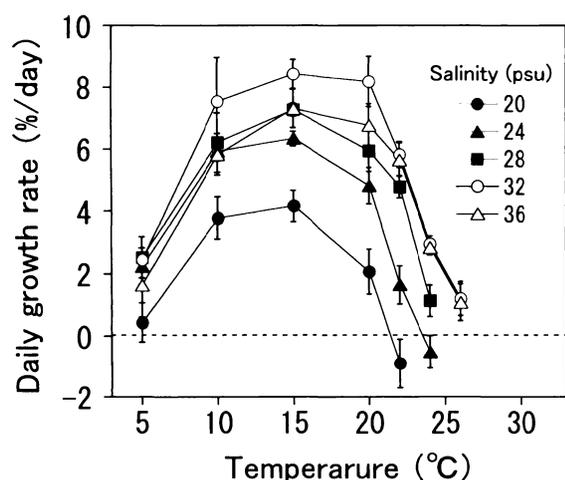


Fig. 6 Growth of young sporophytes in *Undaria pinnatifida* after 21 days culture period under different temperature and salinity conditions. Data are expressed as mean value  $\pm$  standard deviations (n=10).

**配偶体の生残に及ぼす温度と塩分の影響** 配偶体の生残率は10~24°Cにおいて、8psuが13~20%、12psuが85~88%、16~32psuが98~100%と、それぞれの塩分区で同程度の範囲にあることから、この条件内では温度よりも塩分の影響が大きいものと推測された (Fig. 7A)。しかし、26°C以上では低塩分による配偶体の生残率低下が次第に顕著になり、32、34°Cでは全ての塩分区で配偶体は生残しなかった。24時間接触において配偶体が50%以上の生残率を示した条件は、10~24°Cが12~32psu、26°Cが16~32psu、28°Cが24~32psuであった。

**幼胞子体の生残に及ぼす温度と塩分の影響** 幼胞子体の生残率は10~20°Cにおいて、8、12psuが0%、16psuが80~83%、20~32psuが100%と、それぞれの塩分区でほぼ同じ範囲にあることから、この条件内では温度よりも塩分の影響が大きいものと推測された (Fig. 7B)。しかし、22°C以上では、低塩分による幼胞子体の生残率低下が顕著になり、30°C以上では全ての塩分区で幼胞子体は生残しなかった。24時間接触において幼胞子体が50%以上生残した条件は、24°Cが20~32psu、26、28°Cが24~32psuであった。

## 考 察

本研究では新潟県柏崎産の天然ワカメから放出させた遊走子を培養することにより得た配偶体と幼胞子体について、生育に及ぼす温度、光量、塩分の影響を室内培養により明らかにした。これまでにワカメ配偶体の成長と温度の関係について、培養方法の違いがあるが、その成長適温は宮城県産が15~20°C (秋山, 1965)、愛知県産が17~20°C (斎藤, 1956a)、三重県産では雄性体が20°Cであるが雌性体は10~25°C (Morita *et al.*, 2003a) であることが知られている。また、配偶体の生育上限温度は、三重県産が28°C (Morita *et al.*, 2003a)、宮城県産が27.5~30°C (秋山, 1965)、北海道産が20~23.4°C (木下・渋谷, 1944; 木下, 1947) とされ、成長適温と生育上限温度は地域差があることが考えられる。このほか、斎藤 (1962) は30°Cでも配偶体が生残して夏期の高水温期 (32°C) を越すとしている。この実験の温度設定は一定温度ではないため、高温に対する耐性が生じる可能性があったことが指摘されている (秋山, 1965)。本研究の結果では、新潟県産ワカメ配偶体の成長

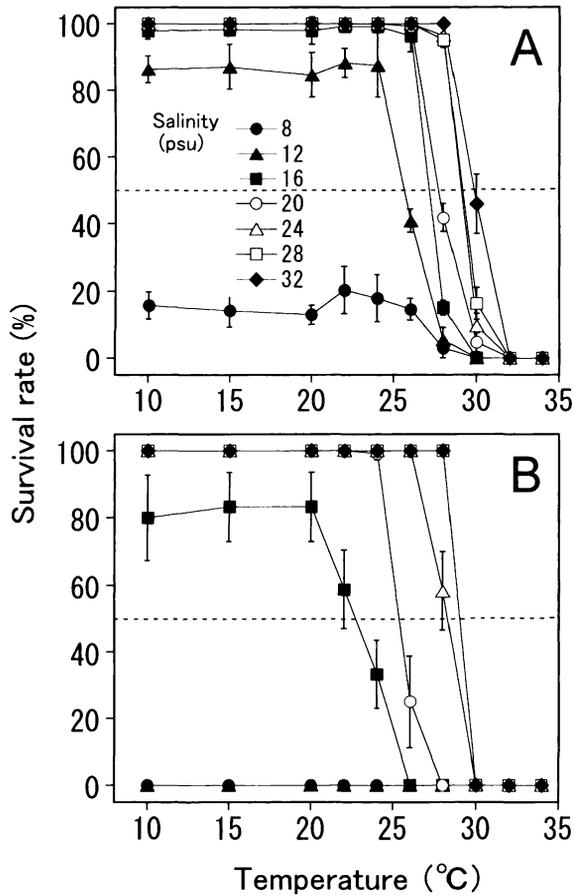


Fig. 7 Survival rates of gametophytes (A) and young sporophytes (B) in *Undaria pinnatifida* after 24 hours exposure under different temperature and salinity conditions. After exposure treatment at the experimental conditions, the thalli were transferred into multiple well plates for gametophytes or Erlenmeyer flasks for young sporophytes containing full strength PESI medium adjusted at 32 psu, and were postcultivated at 20°C, 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ , 12L:12D condition. After 7 days the survival condition of thalli were observed. Data are expressed as mean value  $\pm$  standard deviations (six replicates). Symbols of salinities are given in Fig. 7A.

に適した条件は22°Cの100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 、生育上限温度は28°Cであることが明らかになり、既往知見とほぼ類似した結果が得られた。

新潟県産ワカメの雌性配偶体の成熟適温範囲は15~22°C、成熟上限温度は24°Cであった。これまでに報告されている配偶体の成熟適温範囲は生育地域により異なり、北海道産が12~17°C (木下・渋谷, 1944)、宮城県産が15~20°C (秋山, 1965)、愛知県産が17~20°C (斎藤, 1956b)、三重県産が10~15°C (Morita *et al.*, 2003a)、京都府産が8~

15°C (古旗, 1964)である。さらに、配偶体の成熟上限温度は、宮城県産が27.5°C (秋山, 1965)、愛知県産が22~23°C (斎藤, 1962)、三重県産が23°C (Morita *et al.*, 2003a)である。したがって、本研究の新潟県産ワカメ配偶体の成熟適温はこれまでの報告よりも高温側にやや広いことが分かったが、成熟の上限温度は既往知見の範囲内であった。

本研究の結果から、ワカメ配偶体の成長は5~100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の範囲では、光量が強いほど成長が促進されたほか、その成熟は50~100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ で良好であった。配偶体の成長と光量の関係について、秋山 (1965) は日中の最高照度が570~4,000 Lx ( $\approx$ 11.4~80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )の範囲では、明るい条件ほど良く成長して成熟することを報告している。斎藤 (1956a) は、50~2,200Lx ( $\approx$ 1~44 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )の範囲において配偶体の成長が20°C以下の明光下でもっとも良いこと、また、荒川・松生 (1992) は10,000Lx ( $\approx$ 200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ )でもっとも良く成長したとしている。このほか、Kim and Nam (1997) は韓国産ワカメ配偶体の成長と成熟に適した条件を、17°C、60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ と報告している。これらのことから、ワカメ配偶体の成長と成熟には、50~100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 前後の光量が適していると考えられる。一方、本研究の結果から雄性配偶体の成熟適温は、雌性配偶体よりも低温側に広い傾向にあり、さらに雌性配偶体よりも弱光条件で成熟が可能であることが推測された。このようなワカメ配偶体の成熟と光量の関係の雌雄差について、斎藤 (1956b) は雌性配偶体の方が光量の影響を強く受け、やや弱光下でも成熟個体の割合が低いが、雄性配偶体は影響が少なくやや弱光においても造精器を形成し、暗光下でも成熟したことを指摘しており、本研究でも同様の傾向が認められた。

新潟県産ワカメ幼胞子体の成長に適した温度と光量は15°Cの100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ であり、その成長率は5~15°Cで温度が高いほど増加し、20°C以上で次第に低下する傾向を示し、26°Cが生育限界温度であると推定された。室内培養による幼胞子体の成長適温は、宮城県産が10~20°C (秋山, 1965)、愛知県産が10~17°C (斎藤, 1956b)、三重県産が20°C (Morita *et al.*, 2003b)であり、また、生育限界温度は三重県産が27°C (Morita *et al.*, 2003b)であると報告されていることから、ワカメの成長適温と生育限界温度は、配偶体よりも幼胞子体が

やや低いことが確認された。

海藻類の生育に及ぼす温度と塩分の影響は、それぞれ別々の要因として研究されることが多いが、これらの要因の相互作用による影響は一般的にみられると指摘されている (Druehl, 1981; Lobban and Harrison, 1994)。ワカメの生育と塩分の関係について、ワカメが分布する海域での塩分下限値は23.7psuとされている。この値はアラメの30.0 psu, カジメの30.9psu, クロメの31.8psuよりも低く (須藤, 1992), さらにワカメ養殖漁場および天然漁場の塩分は27psu以上がよい (日本水産資源保護協会, 1992) ことから、ワカメはアラメやカジメなどの多年生大型褐藻類よりも、低塩分に対して耐性のあることが推定される。しかし、これまでにワカメの生育に及ぼす温度と塩分の影響を一定温度の条件で比較した報告はなく、室内で気温の上昇と下降を伴う培養実験の結果から、配偶体の発芽, 成長および成熟, 芽胞体の発芽と成長は27.9psu以下で悪影響を受け、特に高温における低塩分の影響が大きいと指摘されているにすぎない (斉藤, 1962)。

本研究の結果から、ワカメ配偶体の成長に及ぼす温度と塩分の影響は、温度により異なり、22~26℃では24psu以下で、15, 28℃では28psu以下でそれぞれ有意な成長低下が認められ、低温と高温のそれぞれの条件下で低塩分による影響が大きくなることが示唆された。ワカメ配偶体の成長への影響とは異なり、その成熟に及ぼす温度と塩分の影響は、20psu以上で成熟が観察され、15~22℃の24~32psuで成熟率は100%に達したことから、低塩分の影響は成熟よりも成長に現れやすいことが推測された。さらに、幼胞子体の成長は32psuでよく、28psu以下で有意に低下したことから、幼胞子体は塩分低下の影響を受けやすく、配偶体よりも低塩分に対する耐性、適応範囲が狭いことが示された。このほか、本研究では、ワカメの配偶体および幼胞子体の生残に及ぼす温度と塩分の影響について24時間接触により検討したが、配偶体は幼胞子体よりも高温と低塩分に対する耐性が強く、配偶体は26℃以上、幼胞子体は22℃以上で、それぞれ高温と低塩分の複合的な作用による生残率の低下が推測された。

本研究では、ワカメの配偶体と幼胞子体の生育に及ぼす温度、光量、塩分の複合的な影響を室内培養により検討した。今後は、海域の環境変化が海藻類へ及ぼす影響を詳細に検討するために、こ

のような複合要因での生育反応を多くの海藻類で明らかにする必要がある。

## 謝 辞

著者は本論文を御校閲下さった東京大学名誉教授 平野禮次郎博士, 東京大学名誉教授 沖山宗雄博士, (財) 海洋生物環境研究所理事 城戸勝利博士に謹んで感謝いたします。この論文は、経済産業省原子力安全・保安院から委託された温排水生物複合影響調査の報告のうち一部を許可を得て公表するものであり、関係各位に謝意を表す。

## 引用文献

- 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. 東北水研研報, **No.25**, 143-170.
- 秋山和夫 (1986). ワカメの増養殖. 「農林水産研究文献解題 No.12 水産増養殖編」(農林水産技術会議事務局編), 農林統計協会, 東京, pp.278-287.
- 荒川久幸・松生 洽 (1992). 褐藻類ワカメ・カジメ遊走子の着生と成長, 生残および成熟に及ぼす海底堆積粒子の影響. 日水誌, **58**, 619-625.
- 馬場将輔・山本正之・渡辺幸彦 (2006). 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. 海生研研報, **No.9**, 55-64.
- Choi, H.G., Kim, Y.S., Lee, S.J., Park, E.J. and 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.
- Druehl, L.D. (1981). Geographical distribution. In "The Biology of Seaweeds" (eds. Lobban, C.S. and Wynne, M.J.), Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp.306-325.
- 古旗喜太夫 (1964). ワカメの増養殖を目的とする基礎的研究. 京都水試業積, **No.17**, 1-19.
- 川井浩史・上井進也・羽生田岳昭・山田味佳・寫田 智・中村規代典 (2007). 大型海藻類の大陸間越境移動. 海洋と生物, **29**, 212-220.
- Kim, Y.S. and Nam, K.W. (1997). Temperature and light responses on the growth and maturation of gametophytes of *Undaria*

- pinnatifida* (Harvey) Suringar in Korea. *J. Korean Fish. Soc.*, **30**, 505-510.
- 木下虎一郎 (1947). コンブとワカメの増殖に関する研究. 北方出版社, 札幌, 79pp.
- 木下虎一郎・渋谷三五郎 (1944). ワカメの発生適温試験. 北水試月報, **1**, 369-373.
- Lobban, C.S. and Harrison, P.J. (1994). *Seaweed Ecology and Physiology*, Cambridge University Press, New York, 366pp.
- 松山恵二 (1983). 忍路湾産褐藻ナンブワカメ (*Undaria pinnatifida* SURINGAR f. *distans* MIYABE et OKAMURA) の光合成 I. 光合成速度と呼吸速度の季節変化. 北水試報, **25**, 187-193.
- Morita, T., Kurashima, A. and Maegawa, M. (2003a). Temperature requirements for the growth and maturation of the gametophytes of *Undaria pinnatifida* and *Undaria undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol. Res.*, **51**, 154-160.
- Morita, T., Kurashima, A. and Maegawa, M. (2003b). Temperature requirements for the growth of young sporophytes of *Undaria pinnatifida* and *Undaria undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol. Res.*, **51**, 266-270.
- 日本水産資源保護協会 (1992). 環境が海藻類に及ぼす影響を判断するための『判断基準』と『事例』. 日本水産資源保護協会, 東京, 104pp.
- 小河久朗 (2004). ワカメ. 「有用海藻類」(大野正夫編著), 内田老鶴圃, 東京, pp.42-58.
- 大野正夫 (1987). ワカメ類. 「海藻資源養殖学」(徳田 廣・大野正夫・小河久朗 著), 緑書房, 東京, pp.133-144.
- 斎藤雄之助 (1956a). ワカメの生態に関する研究— I. 配偶体の発芽, 生長について. 日水誌, **22**, 229-234, pl. 1.
- 斎藤雄之助 (1956b). 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. 日水誌, **22**, 235-239.
- 斎藤雄之助 (1958). ワカメの生態に関する研究— III. 光合成量に及ぼす光と温度の影響について (その1). 日水誌, **24**, 484-486.
- 斎藤雄之助 (1962). ワカメの増殖に関する基礎的研究. 東大水産実験所業績, **No.3**, 1-101, pls. I-IV.
- 須藤俊造 (1992). 海藻・海草相とその環境条件との関連をより詰めて求める試み. 藻類, **40**, 289-305.
- Tatewaki, M. (1966). Formation of a crustacean sporophyte with unilocular sporangia in *Scytosiphon lomentaria*. *Phycologia*, **6**, 62-66.
- 館脇正和 (1993). ワカメ. 「藻類の生活史集成 第2巻 褐藻・紅藻類」(堀 輝三編), 内田老鶴圃, 東京, pp.136-137.
- Yamanaka, R. and Akiyama, K. (1993). Cultivation and utilization of *Undaria pinnatifida* (wakame) as food. *J. Appl. Phycol.*, **5**, 249-253.