

## 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

馬場将輔・山本正之・渡辺幸彦

### Growth Responses to Water Temperature and Water Velocity of *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae) under Outdoor Raceway Tank System

Masasuke Baba<sup>\*1§</sup>, Masayuki Yamamoto<sup>\*2</sup>  
and Yukihiro Watanabe<sup>\*2</sup>

**要約:**新潟県佐渡島産の養殖ワカメ胞子体の成長に及ぼす水温と水流の影響を検討するため、屋外に設置した流水式回流水槽で実験を行った。水流に対する生育反応は発育段階で異なり、全長15.5cmの幼胞子体では、10, 20cm/sで成長がよかった。水温に対する実験では、高い成長率が11~17°Cでみられ、17°Cを越えると成長は著しく低下し、上限側の枯死温度は27°Cであった。成長適温の上限付近の成長率は、低流速(約5cm/s)よりも高流速(約40cm/s)の条件で高かった。本研究の結果から、水温と水流はワカメ幼胞子体の成長に重要な影響を及ぼすことが明らかになった。

**キーワード:** ワカメ, 成長, 水温, 水流, 幼胞子体

**Abstract:** Young sporophytes of *Undaria pinnatifida* cultivated in Sado Island (Niigata Prefecture) were grown in the outdoor raceway tank system in order to determine the effects of different combinations of water velocity and water temperature. Effects of water velocity were varied depending on thallus size and the optimal water velocity for growth was 10-20cm/s in young sporophytes (15.5cm in total length). In water temperature experiments, high growth rates were maintained at 11-17°C, but growth was significantly reduced above 17°C, and upper lethal temperature was 27°C. Growth rates observed at upper limit of optimal growth temperature were higher in high water velocity (40cm/s) than in lower water velocity (5cm/s). These results indicate that both water temperature and water velocity have significant effects on the growth of young sporophyte in *Undaria pinnatifida*.

**Keywords:** *Undaria pinnatifida*, growth, water temperature, water velocity, young sporophyte

#### まえがき

ワカメ *Undaria pinnatifida* は、北海道南部から本州、四国、九州に分布する食用海藻であり、波浪の強い外海岩礁域から平穏な内湾域まで広くみられ、大潮時の最大干潮線付近から漸深帯の浅所に生育する。秋から春にかけて成長し、春から夏に成熟して枯れる1年生の海藻である(斉藤, 1962; 秋山, 1992)。天然および養殖により生産されているが、近年では養殖による生産が全体の

97%に達している(佐藤, 2004)。

ワカメの生育と環境条件に関する研究は、主に養殖技術を確立するため、漁場がある現場海域で行われてきた(秋山, 1986)。そのため、環境を制御した条件で胞子体の成長を調べた報告は少なく、幼胞子体(斉藤, 1962; Morita *et al.*, 2003)、成熟期までの胞子体(Sanbonsuga and Hasegawa, 1967; Pang and Lüning, 2004)の室内培養がそれぞれ行われているにすぎない。本研究では、ワカメ胞子体の成長に及ぼす水温と水流の影響を、屋

(2005年8月24日受付, 2005年11月7日受理)

\*1 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

\*2 財団法人 海洋生物環境研究所 中央研究所 (〒299-5105 千葉県夷隅郡御宿町岩和田300)

外に設置した流水式回流水槽を用いて検討したので報告する。

### 材料および方法

**供試材料** 本研究には、新潟県佐渡島で養殖されていた種苗糸に着生したワカメ胞子体を使用した。胞子体は実験を開始する数日前に入手して、海水が入ったビニール袋に入れた状態で、新潟県柏崎市の（財）海洋生物環境研究所実証試験場へ運んだ。これらの胞子体を、濾過海水をかけ流しにした30Lパンライト水槽に入れ、実験に適した大きさの藻体を選別した。

**実験装置の構造** ワカメの生育実験に使用した流水式回流水槽は長さ10m、幅3m、水路幅1mの回流式で、直線水路部が2カ所あり、それぞれ長さ7m、幅1mである（Fig. 1）。満水時の水深は60cmになる。各直線水路部の一端には水流発生機（Landia社製、水中ミキサーPOD-I）が設置され、水流発生機の前方約1mのところに注水口がある。排水口は直線水路部の他端にあり、底層に注水し、表層から排水される構造である。水流発生機によって生じた水流はガイドバンド、整流板を通過したのち、藻体に到達する。流速は水流発生機のプロペラの回転数により制御される。実験にはこの回流水槽を6基使用した。

水槽の容量は約15 tであり、未濾過の海水を毎時12 t注水した。その海水の温度および流量の調節は、流水式回流水槽温度・流量調節装置（東洋瓦斯機工社製）によって自動的に制御した。この装置により、自然海水（ $\Delta T 0^{\circ}\text{C}$ ）、温排水（ $\Delta T 6^{\circ}\text{C}$ ：自然海水温度にプラス $6^{\circ}\text{C}$ ）および加温海水（ $\Delta T 16^{\circ}\text{C}$ ：自然海水温度にプラス $16^{\circ}\text{C}$ ）を所定の比率で混合攪拌した後に、回流水槽に注水することができ、水槽内では流水状態で設定昇温幅（ $\Delta T$ ）を維持できた。なお、温排水は実証試験場に隣接する発電所から当該試験場へ供給されるものであり、加温海水は海水加温装置により温排水をさらに $10^{\circ}\text{C}$ 加温したものである。

**実験条件の設定** 本研究ではワカメの生育に及ぼす水流、水温、水温と水流の影響を検討するため、1990年から1993年にかけて、各年の12月と1月にそれぞれ20日間の実験を行った。自然海水温度を基準として屋外水槽で行った実験のため、以下条件別に12月期、1月期の実験と呼ぶ。

水流に関する12月期（1990年12月8～28日）および1月期（1991年1月12日～2月1日）の実験では、水温を自然海水の1条件、水流を5, 10, 20, 30, 40, 50cm/sの6条件として、6区を設けた。

水温に関する12月期（1991年12月5～25日）および1月期（1992年1月16日～2月5日）の実験



Fig. 1 General view of an outdoor raceway tank system for culture of *Undaria pinnatifida*.

では、水温を自然海水とそれにプラス2, 4, 6, 8, 10°Cの加温をした6条件、水流を20cm/sの1条件として、6区を設けた。

水温と水流に関する12月期（1992年12月6～26日）の実験では、水温を自然海水とそれにプラス3, 6°Cの加温をした3条件、水流を5, 40cm/sの2条件として、これらを組みあわせた6区を設けた。また、水温と水流に関する1月期（1993年1月17日～2月6日）の実験では、水温を自然海水とそれにプラス4, 8°Cの加温をした3条件、水流を5, 40cm/sの2条件として、これらを組みあわせた6区を設けた。

**環境項目の測定** 水温は各水槽内の2カ所に水温センサーを設置し、30分間隔で自動測定した。塩分および栄養塩類の測定のための採水は、実験期

間中の日曜日を除く毎日実施した。塩分は誘導起電式塩分計（YEO-KAL社製、601MK-IV）を用いて測定した。栄養塩類の測定のため、回流水槽で採水した海水は孔径0.2μmのヌクレポア・メンブレン・フィルターで濾過したのち、分析するまで-40°Cで凍結保存した。栄養塩（溶存無機窒素：NH<sub>4</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N，リン酸態リン：PO<sub>4</sub>-P）は自動化学分析装置（テクニコン社製、TRAACS-800）を用いて分光光度法により分析した。流速は二次元式の電磁流速計（ユニオン・エンジニアリング社製、UECM-200ミニチュア形）を用いて、水平方向（X, Y）の流速を2ペンアナログ記録計に1分間連続記録し、チャート上からそれぞれ平均的な値を読みとった。測定位置は藻体の上流側水深48cmで12点測定し、実験期間

**Table 1** Summary of water temperature and water velocity during 20 days experimental periods of *Undaria pinnatifida*

Experimental conditions	Water temperature (°C)				Water velocity (cm/s)
	$\Delta T^*$	Mean	Minimum	Maximum	Mean
<b>Effect of water velocity</b>					
December experiment (Dec. 8–Dec. 28, 1990)	0	13.6	12.3	15.7	4.7, 8.7, 17.5, 28.0, 38.9, 45.8
	-----				
January experiment (Jan. 12–Feb. 1, 1991)	0	11.3	8.8	13.9	4.2, 10.5, 20.8, 31.5, 40.0, 48.2
	<b>Effect of water temperature</b>				
December experiment (Dec. 5–Dec. 25, 1991)	0	15.4	12.8	17.8	20.5
	2	17.3	14.8	19.7	21.1
	4	19.3	16.6	21.6	22.1
	6	20.8	18.0	22.8	21.6
	8	23.1	20.3	25.5	20.2
	10	25.2	22.2	27.4	21.0
January experiment (Jan. 16–Feb. 5, 1992)	0	11.5	9.7	13.3	21.0
	2	13.6	11.7	15.4	19.8
	4	15.4	13.5	17.3	21.0
	6	17.2	15.5	19.2	20.5
	8	19.4	17.5	21.2	20.3
	10	21.5	19.5	23.6	20.0
<b>Effects of water temperature and water velocity</b>					
December experiment (Dec. 6–Dec. 26, 1992)	0	15.1	13.5	16.8	5.1, 39.4
	3	17.9	16.3	19.7	5.0, 38.9
	6	21.4	19.6	23.3	4.7, 40.3
January experiment (Jan. 17–Feb. 6, 1993)	0	11.5	10.4	12.8	4.9, 40.7
	4	15.4	14.2	16.7	5.4, 39.8
	8	19.0	17.9	20.3	5.5, 39.0

\* Elevation level of temperature above natural seawater temperature.

中に2回実施した。水中の光合成有効日射量は、水中用球形光量子センサー（LI-COR社製、LI-193S）を水深48cmに設置して、60分間ごとの積算値をデータロガー（LI-COR社製、LI-1000）に記録した。

**成長の測定** 各12月期の実験では種苗糸に着生したワカメを、養殖用ノリ網を加工した試験枠に固定した。また、各1月期の実験では種苗糸からワカメを取り外し、塩化ビニール製パイプに藻体を固定した。これらのワカメは水槽直線水路部の水深48cmの位置に収容した。なお、湿重量および葉面積の日間成長率に関する平均値の差の検定には、Scheffe法による多重比較を用いた。

水流12月期の実験開始時の全長は $11.2 \pm 2.5$ mmであった。一実験区あたり10個体を水槽に入れ、葉面積を測定した。また、水流1月期の実験開始時の全長は $15.5 \pm 0.9$ cmであり、一実験区あたり9個体を水槽に入れ、葉面積と湿重量を測定した。

水温12月期の実験開始時の全長は $1.0 \pm 0.7$ mmであり、種苗糸1cm当たりの平均着生数は94.5個体であった。その実験終了時には大きな藻体から順に50個体について全長を測定した。また、水温1月期の実験開始時の全長は $10.7 \pm 0.5$ cmであり、一実験区あたり9個体を水槽に入れ、葉面積と湿重量を測定した。

水温と水流12月期の実験開始時の全長は $6.5 \pm 1.1$ mmであり、一実験区あたり39個体を水槽に入れ、葉面積を測定した。また、水温と水流1月期の実験開始時の全長は $10.3 \pm 0.4$ cmであり、一実験区あたり9個体を水槽に入れ、葉面積と湿重量を測定した。

**藻体成分の測定** 光合成色素（クロロフィルa, c およびカロチノイド）および炭素（C）、窒素（N）含量を、各1月期の実験において測定した。分析用サンプルは、実験終了時に各実験区から2～5個体以上の藻体をそれぞれ用いた。藻体は、純水で換水しながら5回以上洗浄して脱塩し、藻体表面の余分な水分をペーパータオルで除き、湿重量を測定した。この藻体を $-40^{\circ}\text{C}$ で凍結し、乾燥処理するまで保存した。凍結後の藻体を真空凍結乾燥し、粉碎したものを色素測定用試料とした。光合成色素の定量は天野・野田（1978）に従って行った。C, N分析用サンプルは、凍結後の藻体を真空凍結乾燥し、24メッシュ以下の大きさになるよう粉碎した後、さらに $60^{\circ}\text{C}$ で5時間乾燥したものを成分測定用試料とした。試料の乾重量は真空凍結後の重量に、 $60^{\circ}\text{C}$ で乾燥した時の重量減少率を乗じて求めた。分析はCHN分析計（柳本製作所社製、MT-3型）を用い、乾式酸化方式により行った。

**Table 2** Summary of environmental variables during 20 days experimental periods of *Undaria pinnatifida*

Experimental conditions	Mean value (minimum-maximum)			
	Salinity (psu)	DIN ( $\mu\text{g-at/L}$ )	PO <sub>4</sub> -P ( $\mu\text{g-at/L}$ )	Mean photosynthetic photon flux density ( $\text{mol/m}^2/\text{day}$ )
Effect of water velocity				
December experiment	32.44 (31.73-33.03)	3.20 (1.57-4.84)	0.17 (0.05-0.26)	4.52 (1.23-14.58)
January experiment	33.18 (32.73-33.54)	3.84 (1.43-4.97)	0.22 (0.07-0.33)	5.75 (3.21-16.68)
Effect of water temperature				
December experiment	32.48 (32.03-32.88)	2.04 (0.79-3.49)	0.15 (0.09-0.22)	8.28 (1.37-17.26)
January experiment	32.65 (32.20-33.02)	4.51 (2.94-5.96)	0.24 (0.18-0.56)	7.16 (1.70-18.63)
Effects of water temperature and water velocity				
December experiment	32.13 (31.54-33.20)	3.09 (0.78-5.11)	0.14 (0.05-0.18)	Not measured
January experiment	33.03 (32.36-33.40)	4.26 (1.34-6.54)	0.26 (0.14-0.34)	Not measured

## 結果

**水流の影響** 実験期間中の環境項目（水温，流速，塩分，溶存無機窒素，リン酸態リン，水中光合成有効日射量）の測定結果をTable 1, 2にそれぞれ示す。水流12月期の水温は実験の開始時が15°C台，終了時が12°C台であり，20日間の平均が13.6°Cであった。水流12月期におけるワカメの葉面積の平均日間成長率は14.2~18.2%であり，17.5cm/sでもっとも高い値を示したが，実験区間に有意差は認められなかった（Fig. 2）。

水流1月期の水温は実験の開始時が13°C台，終了時が8°C台であり，20日間の平均が11.3°Cであった。水流1月期における各実験区の代表的な藻体をFig. 3に，葉面積および湿重量の日間成長率をFig. 4Aにそれぞれ示す。ワカメ葉状部の形態を比較すると，小葉片の形成が低流速（4.2cm/s）と高流速（48.2cm/s）において，10.5~40.0cm/sの条件よりも抑制される傾向にあった。葉面積の平均日間成長率は6.7~11.4%であり，10.5，20.8cm/sで他の実験区に対して有意に高くなる傾向がみられた（ $P < 0.01$ ）。また，湿重量の平均日間成長率は11.7~14.7%であり，10.5~31.5cm/sで高くなる傾向がみられたが，実験区間に有意差は認められなかった。葉面積について高い成長率を示した10.5，20.8cm/sでは，20日目の平均全長が44

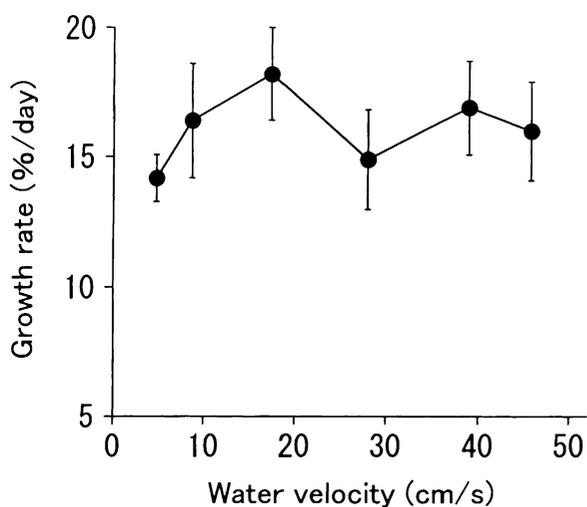


Fig. 2 Effect of water velocity on growth of *Undaria pinnatifida* after 20 days culture for December experiment. Growth rate (leaf area) expressed as mean  $\pm$  SD (n=10). Mean water temperature during the experiment was 13.6°C.

~47cmに達したが，孢子葉を形成した個体は観察されなかった。藻体成分のうち，光合成色素量は流速の違いに係わらずほぼ同じ範囲にあった（Fig. 4B）。また，流速の増加にしたがいC含量は増加したが，N含量はほぼ同程度であり，C:N比はやや低下する傾向を示した（Fig. 4C）。  
**水温の影響** 実験期間中の環境項目の測定結果をTable 1, 2にそれぞれ示す。水温12月期における自然海水区の水温は実験の開始時が17°C台，終了時が12°C台であり，20日間の平均が15.4°Cであった。水温12月期では，実験開始時の藻体が小さく個体識別することが困難であったため，終了時の各実験区の平均全長をもとに日間成長率を算出した（Fig. 5）。その平均日間成長率は5.4~9.1%であり，17.3°Cよりも高温側で成長率が次第に低下する傾向を示した。25.2°Cの実験区では実験開始直後の水温が約27°Cであり，10日目までにすべての藻体が枯死して流失した。

水温1月期における自然海水区の水温は実験の開始時が13°C台，終了時が9°C台であり，20日間

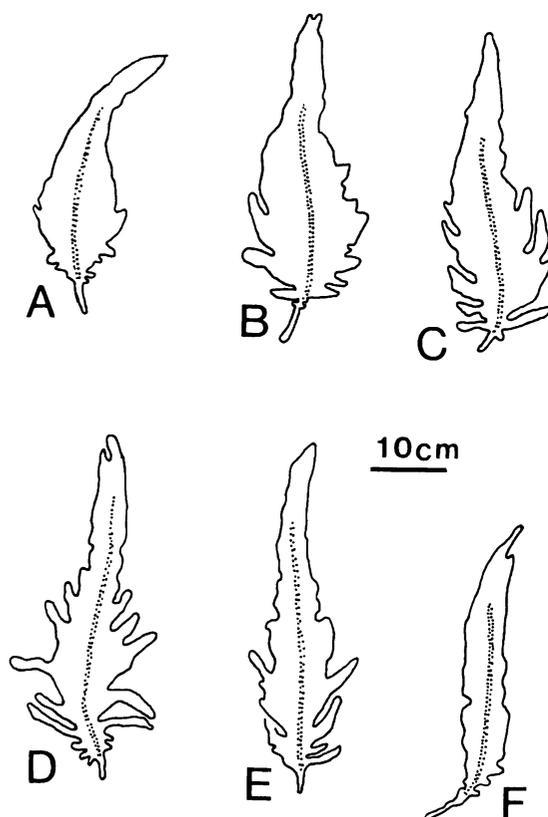


Fig. 3 Schematic illustration of *Undaria pinnatifida* cultured under different water velocities for January experiment. A: 4.2cm/s, B: 10.5cm/s, C: 20.8cm/s, D: 31.5cm/s, E: 40.0cm/s, F: 48.2cm/s.

の平均が11.5°Cであった。水温1月期における各実験区の代表的な藻体をFig. 6に、葉面積および湿重量の日間成長率をFig. 7Aにそれぞれ示す。葉状部の形態を比較すると、11.5~17.2°Cで小葉片の形成がみられたが、19.4, 21.5°Cではほとんどみられなかった。葉面積の平均日間成長率は7.5~16.0%であり、17.2°Cで最も高くなり、その

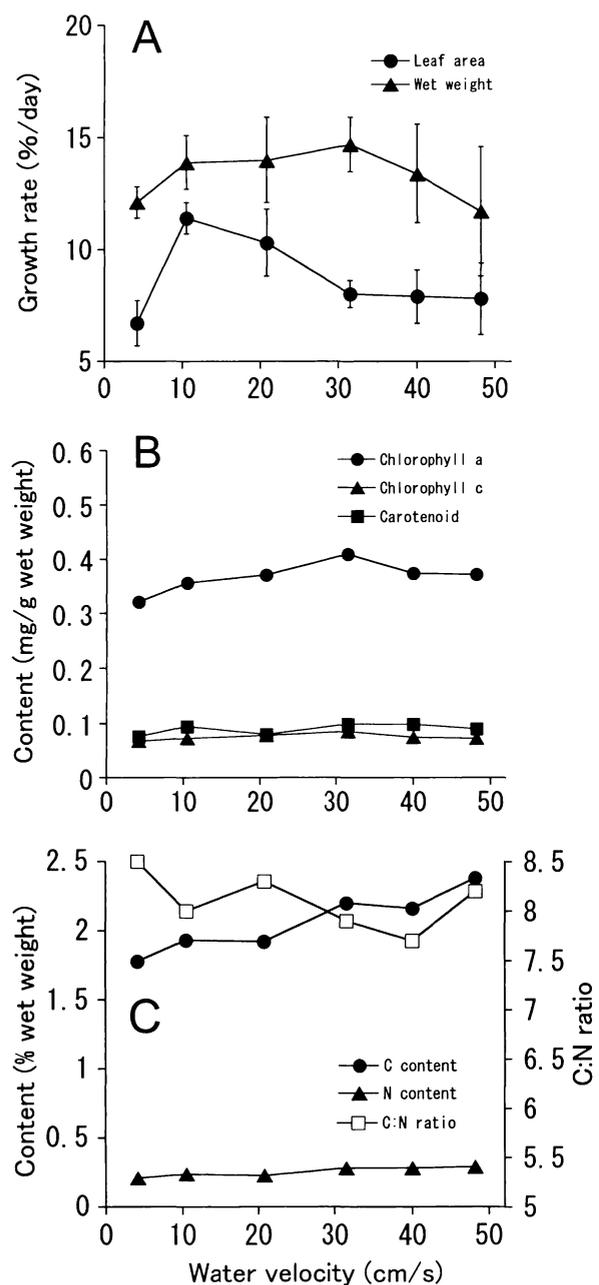


Fig. 4 Effect of water velocity on growth and tissue contents of *Undaria pinnatifida* after 20 days culture for January experiment. Growth rate (A, mean  $\pm$  SD, n=9), photosynthetic pigment contents (B, mean), tissue carbon and nitrogen contents (C, mean). Mean water temperature during the experiment was 11.3°C).

低温側および高温側で低下する傾向がみられた。また、湿重量の平均日間成長率は9.7~17.2%の範囲にあり、11.5~17.2°Cではほぼ同じ範囲にあり、

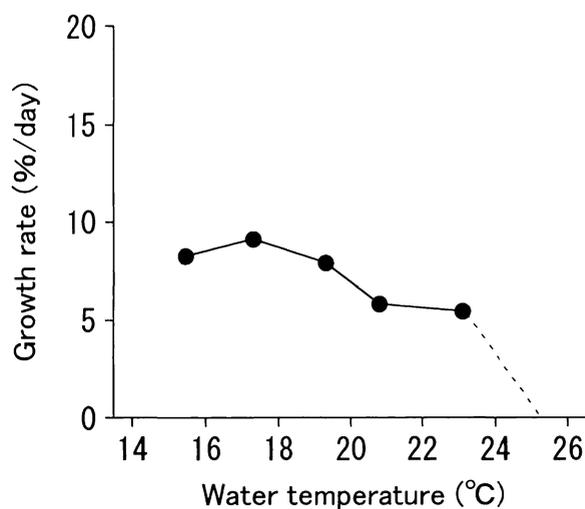


Fig. 5 Effect of water temperature on growth of *Undaria pinnatifida* after 20 days culture for December experiment. Growth rate (total leaf length) expressed as mean (n=50). Mean water velocity during the experiment was 21.1cm/s.

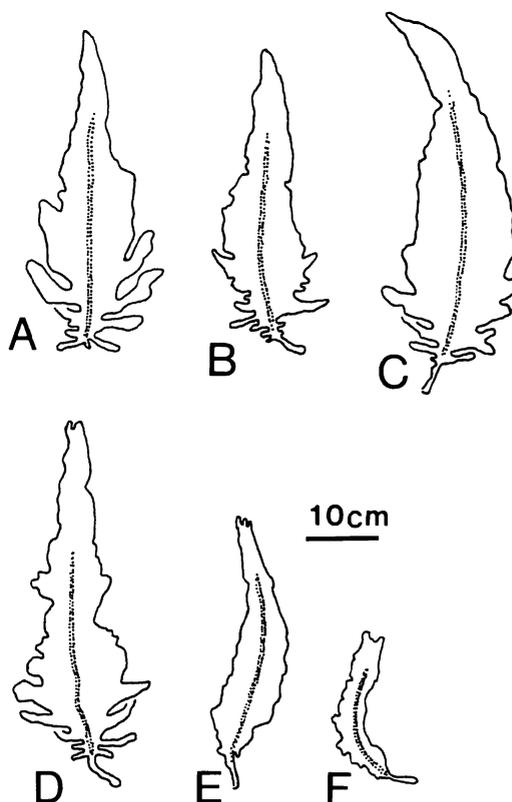


Fig. 6 Schematic illustration of *Undaria pinnatifida* cultured under different water temperatures for January experiment. A: 11.5°C, B: 13.6°C, C: 15.4°C, D: 17.2°C, E: 19.4°C, F: 21.5°C.

17.2°Cを越える温度区で低下傾向を示した。21.5°Cの葉面積および湿重量の日間成長率は、それよりも低温側の実験区に対して、有意に低い値を示した ( $P < 0.05$ )。葉面積について高い成長率を示した11.5~17.2°Cでは、20日目の平均全長が44~49cmであったが、孢子葉を形成した個体は観察されなかった。藻体成分のうち、光合成色素量

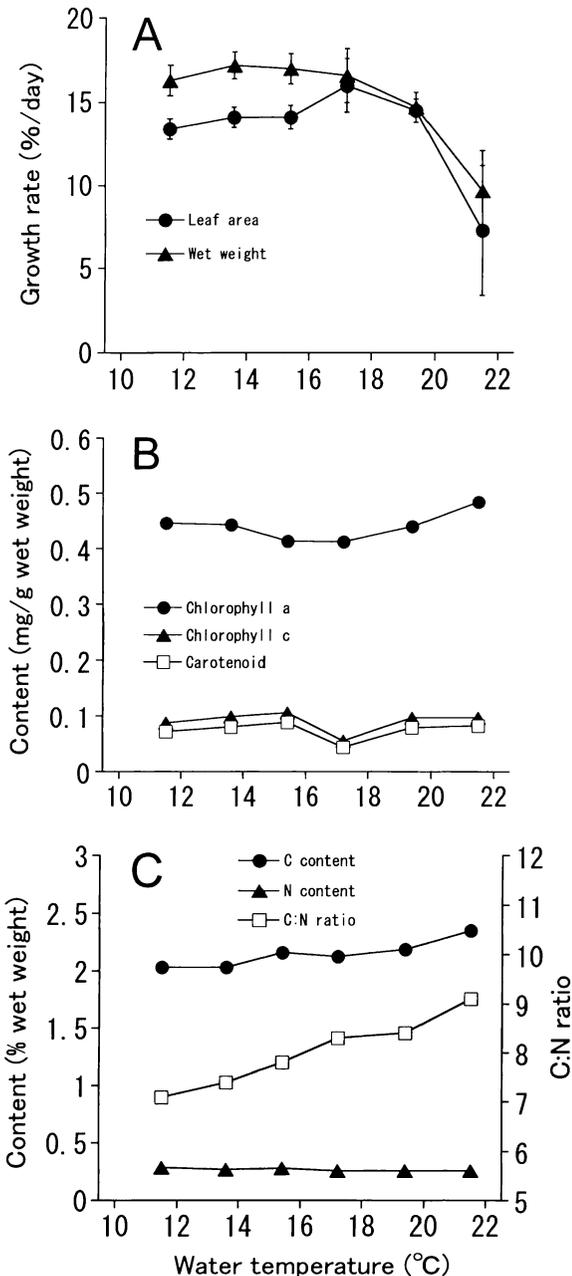


Fig. 7 Effect of water temperature on growth and tissue contents of *Undaria pinnatifida* after 20 days culture for January experiment. Growth rate (A, mean  $\pm$  SD,  $n=9$ ), photosynthetic pigment contents (B, mean), tissue carbon and nitrogen contents (C, mean). Mean water velocity during the experiment was 20.4cm/s.

は水温の違いに係わらず同じ範囲にあった (Fig. 7B)。C含量は高水温側でしだいに増加したが、N含量はわずかに減少し、C:N比が高水温側で増加する傾向を示した (Fig. 7C)。

**水温と水流の影響** 実験期間中の環境項目の測定結果をTable 1, 2にそれぞれ示す。水温と水流12月期における自然海水区の水温は、実験の開始時が16°C台、一時13°C台になり、終了時が14°C台であり、20日間の平均は15.1°Cであった。水温と水流12月期におけるワカメの葉面積の平均日間成長率は1.9~17.4%であり、15.1、17.9°Cの実験区では、それぞれ流速条件の違いによる有意差が認められたが ( $P < 0.01$ )、21.3°Cでは流速の違いによる有意差は認められなかった (Fig. 8)。

水温と水流1月期における自然海水区の水温は、実験の開始時が12°C台、終了時が10°C台であり、20日間の平均は11.5°Cであった。水温と水流1月期におけるワカメの葉面積および湿重量の日間成長率をFig. 9Aに示す。葉面積の平均日間成長率は3.8~13.9%、湿重量の平均日間成長率は6.6~16.1%であり、19.0°Cの5 cm/sにおいて日間成長率が最も低い値を示し、そのほかの実験区との間に有意差が認められた ( $P < 0.01$ )。高い成長率を示した11.5、15.4°Cの40cm/sでは、20日目の平均全長が40~54cmに達したが、孢子葉を形成した個体は観察されなかった。光合成色素量はいずれの水温区においても40cm/sで高くなる傾向を示した (Fig. 9B)。C含量はいずれの水温区におい

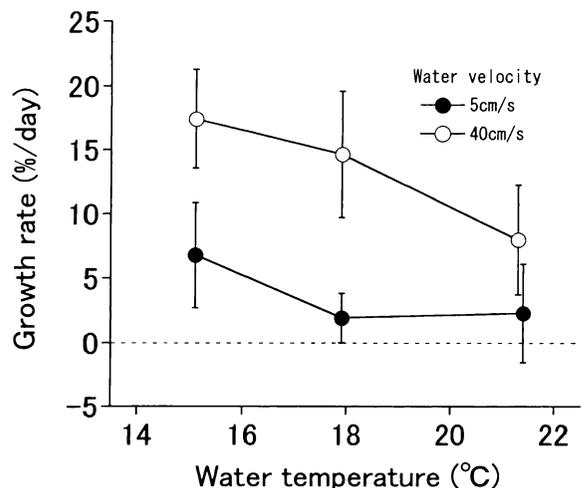


Fig. 8 Effects of water temperature and water velocity on growth of *Undaria pinnatifida* after 20 days culture for December experiment. Growth rate (leaf area) expressed as mean  $\pm$  SD ( $n=39$ ).

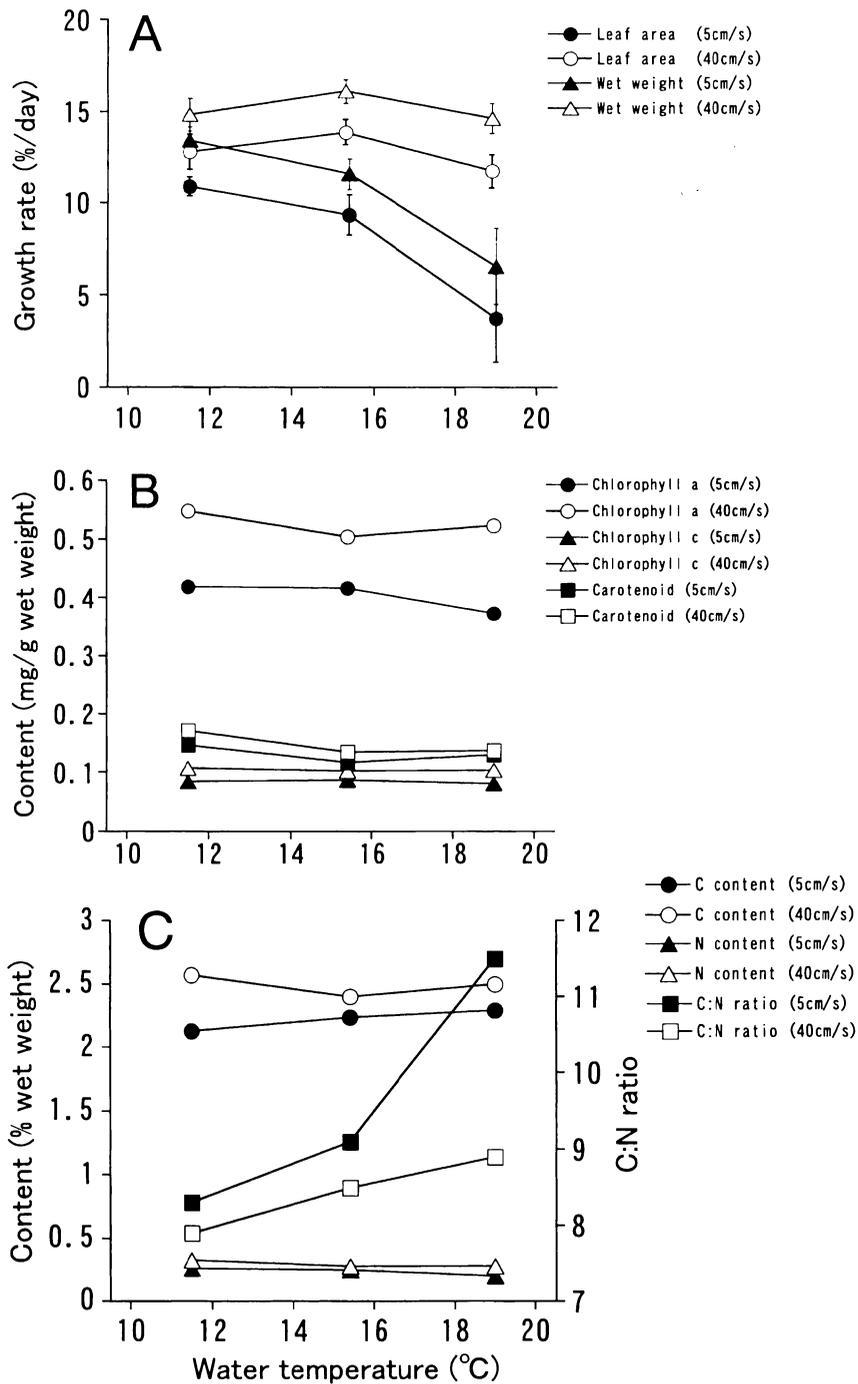


Fig. 9 Effects of water temperature and water velocity on growth and tissue contents of *Undaria pinnatifida* after 20 days culture for January experiment. Growth rate (A, mean  $\pm$  SD, n=9), photosynthetic pigment contents (B, mean), tissue carbon and nitrogen contents (C, mean).

でも40cm/sで高くなる傾向を示したが、N含量は流速条件に係わらず高水温でやや減少した。C:N比は高水温で高くなり、特に5cm/sでその傾向が顕著であった (Fig. 9C)。

### 考察

本研究ではワカメ幼孢子体について、生育に及ぼす水流、水温、水温と水流の影響を、屋外に設置した流水式回流水槽を用いた実験により検討した。水流、水温、水温と水流の実験において、溶

存無機窒素濃度の平均値は2.0~4.5 $\mu\text{g-at/L}$ 、リン酸態リン濃度の平均値は0.1~0.3 $\mu\text{g-at/L}$ であった。ワカメの養殖漁場および天然漁場における栄養塩類の濃度は、溶存無機窒素が2~18 $\mu\text{g-at/L}$ 、リン酸態リンが0.0~1.4 $\mu\text{g-at/L}$ である（日本水産資源保護協会, 1992）ことから、本研究における栄養塩濃度は、これらの範囲内の下限に近い値であった。

これまでに、ワカメの成長に及ぼす水流の影響を調べた研究はほとんどなく（秋山, 1986; 小河, 2004）、天然海域の生育状況を観察した結果から、湾内や沿岸で得られる流速ならば、なるべく速い場所がよいことが報告されているにすぎない（斎藤, 1964）。水流に関する本研究の結果から、12月期（開始時の平均全長11mm, 平均水温13.6 $^{\circ}\text{C}$ ）では水流と成長との関係は明瞭ではなかった。一方、1月期（開始時の平均全長15cm, 平均水温11.3 $^{\circ}\text{C}$ ）の発育段階が進んだ幼孢子体においては、葉状部面積の成長が10~20 $\text{cm}^2/\text{s}$ で高く、5 $\text{cm/s}$ および30~50 $\text{cm/s}$ で低くなる傾向にあった。海水流動の増加は、海藻類の生育に必要な栄養塩の取り込み、ガス交換などを促進させることが知られている（Lobban and Harrison, 1994; Hurd, 2000）。この1月期では、ワカメの窒素含量が5~50 $\text{cm}^2/\text{s}$ の流速区間で同じ範囲にあったことから、流速と藻体の栄養塩吸収の関係について明確にすることはできなかった。ワカメは全長7~10cmになると茎の両側に櫛葉状の小葉片を作りはじめる（斎藤, 1962）。水流、水温に関する各1月期でのワカメは20日間の実験で全長40~50cmに達し、設定条件の違いにより小葉片の形成に差が認められた。このため、海水流動および水温の変化が、この発育段階の藻体の形態に影響を及ぼす可能性が推測される。

水温と成長の関係について、異なる水温条件で調べた結果から、12月期では15~19 $^{\circ}\text{C}$ で、また、1月期では11~17 $^{\circ}\text{C}$ で、それぞれ良好な成長を示した。これらの実験では、いずれも20 $^{\circ}\text{C}$ を越えると成長が顕著に鈍化する傾向が認められた。斎藤（1962）は愛知県産ワカメについて室内培養を行い、幼葉期の成長は15 $^{\circ}\text{C}$ 位で早く、水温がこれより低いとやや遅れること、また、成葉期の成長は、12~13 $^{\circ}\text{C}$ 以下の低水温でもっとも成長が良く、15 $^{\circ}\text{C}$ 位までは比較的良いが、それ以上の水温では成長の速度は鈍ることを報告している。このほか、幼孢子体の成長適温について、宮城県産が10~20

$^{\circ}\text{C}$ （秋山, 1965）、三重県産が20 $^{\circ}\text{C}$ （Morita *et al.*, 2003）であることが知られている。したがって、本研究で得られた屋外栽培による結果は、これまで報告されている室内実験でのワカメの成長と水温の関係と概ね一致した。

1年生の海藻であるワカメの成長・成熟は生育温度条件に左右される（小河, 2004）。天然ワカメの分布南限にあたる大分県沿岸では、近年の地球温暖化による冬季の高水温傾向が続いたために、ワカメの発生や成長不良を引き起こし不漁につながったことが推定されている（伊藤, 2001）。また、天然ワカメの分布と発電所の温排水放出の関係を調査した結果から、調査地点・水深別の分布密度や成長量に明瞭な相違を見出せなかったとしている（安田ら, 1982）。その理由として調査期間内の水温は、温排水放出による昇温が加わった地点においても、ワカメの生育適水温の範囲内に収まる条件であったことを挙げている。このほか、発電所温排水の拡散域でワカメの垂下・水平養殖試験を行い、養殖期間中の昇温がワカメの成長を抑制し、成熟を促進したことが報告されている（堀, 1981）。

ワカメ孢子体の高温側の生育限界温度は、三重県産の幼孢子体を室内培養した結果から27 $^{\circ}\text{C}$ であると報告されている（Morita *et al.*, 2003）。本研究の水温12月期の結果では、実験開始時の水温が約27 $^{\circ}\text{C}$ の条件で藻体が枯死したことから、実験に使用したワカメの生育上限温度は27 $^{\circ}\text{C}$ よりも低いことが考えられる。ワカメは日本各地に広く分布するため、温度に対する反応が異なる地域的な生態型（ecotype）の存在の可能性が指摘されている（Morita *et al.*, 2003）。そのため、産地および発育段階の違いによる温度反応について、より詳細に検討する必要がある。

異なる水温と水流の条件でワカメの成長を調べた12、1月期での平均水温は、それぞれ15.1~21.4 $^{\circ}\text{C}$ 、11.5~19.0 $^{\circ}\text{C}$ であり、高水温側の実験区は、ワカメの成長適温の上限もしくは成長が鈍化する水温域にあたる（斎藤, 1962）。これらの高水温区では、低流速（約5 $\text{cm/s}$ ）よりも高流速（約40 $\text{cm/s}$ ）条件で高い成長率が維持される傾向がみられた。さらに、光合成色素（クロロフィルa）も同様に高流速（40 $\text{cm/s}$ ）条件で高くなることが分かった。したがって、水温がワカメの生育適温の上限付近にあっても、水流を増加させることにより藻体の生理活性を高め、高温による成長

低下を軽減させる効果があることが示唆される。

### 謝 辞

本研究の実施に協力していただいた辻 雅明研究員（現在、㈱ベルグ東京営業所）にお礼申し上げます。本論文をご校閲いただいた東京大学名誉教授平野禮次郎博士，海洋生物環境研究所顧問の会沢安志博士，海洋生物環境研究所理事の城戸勝利博士に深謝の意を表す。この論文は，通商産業省資源エネルギー庁（当時）から委託された温排水生物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. 東北水研研究報告, 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 水産増殖編」（農林水産技術会議事務局編），農林統計局，東京，pp.278-287.
- 秋山和夫（1992）. ワカメ. 「食用藻類の栽培」（三浦昭雄編），恒星社厚生閣，東京，pp.35-42.
- 天野秀臣・野田宏行（1978）. のりの品種と光合成色素. 日水誌, **44**, 911-916.
- 堀 俊明（1981）. 原子力発電所からの温排水が生物に与える影響について—内浦湾におけるワカメ養殖試験—. 水産増殖, **29**, 88-97.
- Hurd, C.L. (2000). Water motion, marine macroalgal physiology, and production. *J. Phycol.*, **36**, 453-472.
- 伊藤龍星（2001）. 1998年春に見られた大分県国東半島沿岸の天然ワカメ不漁とその原因. 大分海水研調研報, No.3, 5-7.
- Lobban, C. S. and Harrison, P. J. (1994). Seaweed ecology and physiology. Cambridge University Press, New York, 366pp.
- Morita, T., Kurashima, A. and Maegawa, M. (2003). 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. 「有用海藻の生物学」（大野正夫編著），内田老鶴圃，東京，pp.42-58.
- Pang, S. and Lüning, K. (2004). Photoperiodic long-day control of sporophyll and hair formation in the brown alga *Undaria pinnatifida*. *J. appl. Phycol.*, **16**, 83-92.
- 斉藤雄之介（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.
- 斎藤雄之介（1964）. ワカメの養殖. 水産増養殖叢書2，日本水産資源保護協会，東京，40pp.
- Sanbonsuga, Y. and Hasegawa, Y. (1967). Studies on Laminariales in culture. I. On the formation of zoosporangia on the thalli of *Undaria pinnatifida* and *Costaria costata* in culture. *Bull. Hokkaido Reg. Fish. Lab.*, No.32, 41-48.
- 佐藤純一（2004）. ワカメ産業の現状と展望. 「有用海藻の生物学」（大野正夫編著），内田老鶴圃，東京，pp.356-369.
- 安田 徹・川代雅和・日比野憲治（1982）. 原子力発電所の温排水が生物に与える影響—内浦湾におけるワカメの分布と温排水—. 水産増殖, **30**, 10-18.