

駿河湾深層水中で培養したカジメ *Ecklonia cava* (Phaeophyceae) 幼体の生長 表層海水との比較および光量・水温の影響

Growth of juvenile *Ecklonia cava* (Phaeophyceae) sporophytes cultured in pumped Suruga Bay deep-sea water comparison with surface seawater culture and effects of irradiance and water temperature

二村 和視・岡本 一利・高瀬 進
Kazumi NIMURA, Kazutoshi OKAMOTO and Susumu TAKASE

Abstract

Juvenile *Ecklonia cava* sporophytes were cultured in indoor tanks with flowing deep-sea water (DSW, known as clean, cold and nutrient-rich) pipelined from a depth of 397 m in Suruga Bay, central Pacific Coast of Japan, in 2004 to determine the best growth condition for its seed production. In the experiment I (April 26th to June 6th), growth was compared between the deep-sea water and surface seawater (SSW) pipelined from a depth of 24 m at a temperature around 18 °C. As a result, blade elongation in DSW was $2.9 \pm 0.4 \text{ mm day}^{-1}$, which was 1.2 times higher than that in SSW ($2.4 \pm 0.5 \text{ mm day}^{-1}$). Therefore, the latter two experiments were merely conducted in DSW. In experiment II (May 10th to June 6th), in which growth was compared between two levels of irradiance (0.3 and $1.0 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) conditioned with and without a cover above the tanks, blade elongation in high irradiance ($3.0 \pm 0.6 \text{ mm day}^{-1}$) was 3 times higher than that in low irradiance ($1.0 \pm 0.1 \text{ mm day}^{-1}$). In Experiment III (June 29th to July 26th), growth was compared among three levels of water temperature (13, 16 and 20 °C) conditioned by changing the mixing rate of ambient and heated DSW. Blade elongation at low and mid water temperatures ($1.8 \pm 0.3 \text{ mm day}^{-1}$) was 1.2 times higher than that at high water temperature ($1.5 \pm 0.5 \text{ mm day}^{-1}$). In stipe elongation, higher growth rates were obtained in high irradiance in Exp. II and low and mid water temperatures in Exp. III, while no difference was found between DSW and SSW in Exp. I. These results indicate that Suruga Bay deep-sea water is useful as a medium for culturing juvenile *E. cava* and that optimal culture conditions were $1 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ and 13–16 °C.

Key Words: *Ecklonia cava*, *Suruga Bay deep-sea water*, *irradiance*, *water temperature*

要　旨

カジメ幼体の生長に及ぼす駿河湾深層水、光量、水温の影響について調べた。深層水区で培養した幼体の介在生長速度は $2.9 \pm 0.4 \text{ mm day}^{-1}$ であり、表層海水区での生長速度 $2.4 \pm 0.5 \text{ mm day}^{-1}$ に比べて 1.2 倍高かった。高光量区 ($1.0 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) での介在生長速度は $3.0 \pm 0.6 \text{ mm day}^{-1}$ であり、低光量区 ($0.3 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) での生長速度 ($1.0 \pm 0.1 \text{ mm day}^{-1}$) に比べて高かった。また、低・中水温区での介在生長速度は $1.8 \pm 0.3 \text{ mm day}^{-1}$ であり、高水温区での $1.5 \pm 0.5 \text{ mm day}^{-1}$ に比べて 1.2倍高かった。茎状部の生長については、試験 II での高光量区および試験 III の低・中水温区において高い生長を示したが、試験 I において深層水と表層海水での生長の差はなかった。このように幼体の生長速度が速いことから、駿河湾深層水は培養海水として利用価値が高く、また深層水を培養海水とする際には光量約 $1 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、水温 13~16 °C が適していた。

キーワード：カジメ、駿河湾深層水、光量、水温

1. 諸 言

カジメ *Ecklonia cava* は大型の多年生褐藻で、沿岸域に海中林を構成する（川嶋, 1993）。カジメの幼体は単葉のささの葉状を呈し、生長に伴い葉状部の下端から側葉が形成され、成体になると葉の両側に多数の側葉を有する形態となる（川嶋, 1993）。海中林は魚介類の育成場や生息場として沿岸生態系において重要な役割を果たしているが、近年では海中林が縮小する磯焼け現象が顕在化している（谷口・長谷川, 1999）。特に静岡県駿河湾西岸の榛南海域では、約 8000 ヘクタールものカジメ・サガラメ海中林が消失する大規模な磯焼けが発生している（静岡県, 1978；長谷川, 1996a, 1996b；相楽, 2000）。現在、当該海域に現存するカジメ群落はほとんど無く、海域内での再生産は期待できない状況にあり、増殖用種苗を生産、移植する必要がある。過去の移植事例として、主に冬期から春期にかけて海域に設置したコンクリートブロックへのカジメ幼体や成体の移植が試みられている（中久, 1980；清水, 1981；山内, 1983；大野ら, 1983）。移植用種苗には食害による影響を低減するため 10 cm 以上の個体が用いられ（清水, 1981），高齢かつ側葉面積が大きいほど成熟面積が大きいことから（Aruga *et al.*, 1997），より大きな個体での移植が必要と考えられる。そこで種苗生産や移植後の天然海域での生育条件を把握するため、本種幼体の生長に及ぼす培養海水、光量および水温の影響を明らかにする必要がある。

駿河湾深層水は水深 397 m および 687 m から陸上取水しており、両深層水中の硝酸態窒素およびリン酸態リン濃度は、表層海水に比べて高く、水深 397 m から取水した駿河湾深層水は高知県室戸市および富山県滑川市の深層水と同様の栄養塩濃度（約 0.37, 0.06 mg l⁻¹）である（五十嵐, 2004）。また、室戸海洋深層水中で培養したカジメは表層海水中で培養した個体に比べて生長が速いことが報告されており（田島・山中, 1989, 1990），駿河湾深層水においても高い生長が期待される。また、発生直後および葉長約 1 cm のカジメ幼体の生長には

光量および水温が影響を及ぼし、光量の増加に伴い葉面積が増加することや、10~20 °Cにおいて正常に生長することなどが知られている（太田, 1988；後藤・伊藤, 1988；川崎・山田, 1991）。しかし、これらの影響については、1 cm 以下の小型のものの報告であり、葉長 10 cm 以上の大型の幼体への影響について調べた事例はない。そこで本研究ではカジメ幼体を用いて、駿河湾深層水と表層海水中での生長を比較するとともに、深層水中での生長に及ぼす光量および水温の影響について調べた。

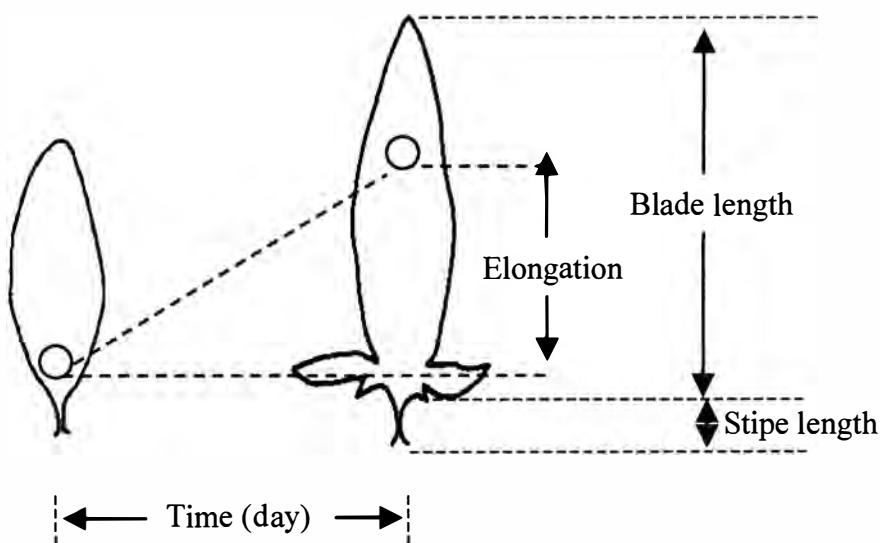
2. 材料と方法

材料には、2004 年 1 月に発生した静岡県下田市産のカジメ *Ecklonia cava* 幼胞子体を用いた。この幼体を静岡県焼津市焼津新港地先沖合約 4 km の水深 397 m から取水し、水温 17 °C に調整した駿河湾深層水中で育成して各試験に供した。培養容器には屋内に設置した透明なポリカーボネート製円形水槽を用い、水量は 1 kℓ とした。培養海水には駿河湾深層水および静岡県焼津市焼津新港地先の水深 24 m から取水した表層海水を用いた。培養水温は約 10 °C の深層水と加温した約 20 °C の深層水を混合することで試験区毎に調整し、注水量は時間あたり 0.5 kℓ 以上とした。また、水槽内において一定方向の水流を発生させるため、内径 65 mm の塩化ビニール管内でエアリフトにより水槽底部から上部へ移流させた海水を水槽表面から水平方向に流した。光条件は天然光とし、培養容器を設置した部屋全体を農業用遮光ネット（遮光率 90 %）を用いて適宜遮光した。

培養海水中の栄養塩濃度は 2 週間毎に硝酸および亜硝酸態窒素濃度、リン酸態リン濃度を Parsons *et al.* (1984) に従い分析した。光量は、水槽内に設置したセンサー (Li192SA, LI-COR Biosciences) にデータロガー (Li-cor 1400, LI-COR Biosciences) を接続して用いて毎日日の出から日の入りまで 30 分間隔で光量を連続測定し、日積算光量を算出した。水温は棒状水銀温度計もしくはデジタル温度計ではば 2 日毎に測定した。

Table 1. Daily light intensities, water temperatures and nutrient concentrations in Experiments I, II and III

Culture condition	Experiment I		Experiment II		Experiment III		
	Deep-sea water	Surface water	Low light ^{*1}	High light ^{*1}	Low water temperature ^{*1}	Mid water temperature ^{*1}	High water temperature ^{*1}
Daily light quantity ($E\ m^{-2}\ day^{-1}$) ^{*2}	1.1 ± 0.7	1.1 ± 0.7	0.3 ± 0.2	1.0 ± 0.6	1.3 ± 0.6	1.3 ± 0.6	1.3 ± 0.6
Water temperature (°C) ^{*2}	17.8 ± 1.3	18.0 ± 1.2	15.9 ± 0.3	15.9 ± 0.3	13.0 ± 0.7	16.1 ± 0.6	20.2 ± 0.6
Nitrate + nitrite concentration (μM) ^{*2}	18.5 ± 3.3	4.5 ± 0.7	16.7 ± 1.3	16.7 ± 1.3	18.1 ± 1.8	18.1 ± 1.8	18.1 ± 1.8
Phosphate concentration (μM) ^{*2}	2.2 ± 0.3	0.4 ± 0.1	2.3 ± 0.3	2.3 ± 0.3	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2	2.0 ± 0.2

^{*1}Culture medium in each experiment was deep-sea water^{*2}Each character was average ± standard deviationFig. 1. Measurements of blade and stipe length and estimation of blade elongation of juvenile *Ecklonia cava* sporophytes.

各試験区の培養条件を Table 1 に示した。培養海水による生長への影響を調べるために、2004 年 4 月 26 日から 6 月 6 日までの期間に、深層水および表層海水中で試験を行った（実験Ⅰ）。培養海水中の硝酸および亜硝酸態窒素、リン酸態リン濃度は、深層水区でそれぞれ 18.5 ± 3.3 , $2.2 \pm 0.3 \mu M$ を示し、表層海水区では 4.5 ± 0.7 , $0.4 \pm 0.1 \mu M$ であった（Table 1）。光量試験は 2004 年 5 月 10 日から 6 月 6 日にかけて行い、低光量区は遮光ネット（遮光率 90 %）で水槽を覆うことで設定し、高光量区は遮光しなかった（実験Ⅱ）。日積算光量は低および高光量区でそれぞれ 0.3 ± 0.2 , $1.0 \pm 0.6 E\ m^{-2}\ day^{-1}$ であった（Table 1）。水温試験では低、中、高水温区を深層水と加温した深層水の混合比を変化させることで設定し、2004 年 6 月 29 日から 7 月 26 日に行った（実験Ⅲ）。各試験区の水温は、

低、中、高水温区の順に 13.0 ± 0.7 , 16.1 ± 0.6 , $20.2 \pm 0.6 ^\circ C$ を示した（Table 1）。上記のすべての試験区において単葉のカジメ（各試験区平均葉長 139~235 mm）を 7~8 個体用い、試験条件に馴致するため、2~3 日間前培養した。

培養期間中における葉長、最大葉幅、茎長は約 2 週間毎に測定した（Fig. 1）。また、葉状部の介在生長量を測定するために、基部から 30 mm に直径 8 mm の円形の穴をあけ、培養終了時までの穴の移動量と培養日数から生長速度 ($mm\ day^{-1}$) を算出した（Fig. 1）。同様に、茎長の変化量と培養日数から、茎状部の伸長速度 ($mm\ day^{-1}$) を算出した。

3. 結 果

培養海水、光量および水温試験での葉長、葉幅お

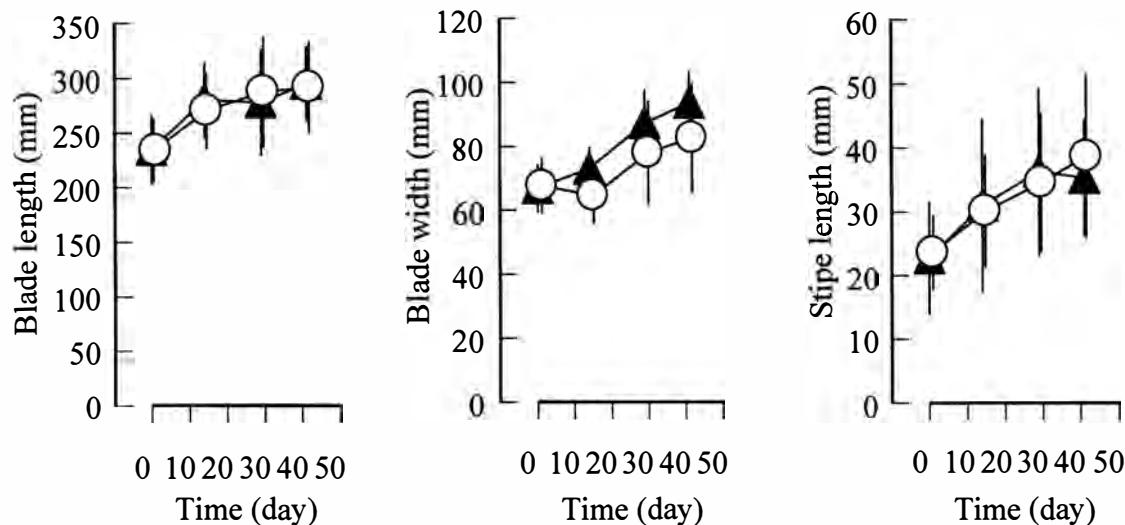


Fig. 2. Effects of culture medium on blade length, blade width and stipe length (Experiment I). Triangles and open circles indicate values for deep-sea water and surface water, respectively. Data are means \pm standard deviations ($n = 7-8$).

Table 2. Blade and stipe elongation (mm day^{-1}) in Experiment I, II and III (see Table 1 for detailed culture conditions), data are means \pm standard deviations ($n = 7-8$)

Condition	Blade elongation	Stipe elongation
Deep-sea water	2.9 ± 0.4^b	0.4 ± 0.2
Surface water	2.4 ± 0.5^a	0.4 ± 0.2
Low light	1.0 ± 0.1^a	0.0 ± 0.2^a
High light	3.0 ± 0.6^b	0.3 ± 0.2^b
Low water temperature	1.8 ± 0.3	0.2 ± 0.1^a
Mid water temperature	1.8 ± 0.3	0.2 ± 0.2^a
High water temperature	1.5 ± 0.5	0.0 ± 0.1^b

Different characters indicate significant difference among culture conditions (*t*-test or Fisher's PLSD, $p < 0.05$)

Table 3. Ratio of number of plants with bladelets/total number of plants in Experiment I

Condition	Time (day)		
	14	29	41
Deep-sea water	0/7	7/7	7/7
Surface water	0/8	0/8	7/8

個体で側葉を形成した (Table 3). 表層海水区では 29 日後には側葉を形成せず、41 日後に 8 個体中 7 個体で側葉を形成した。

低光量区では培養終了時に葉長、葉幅および茎長はそれぞれ 154 ± 35 , 31 ± 5 , 11 ± 4 mm, 高光量区では 206 ± 50 , 68 ± 19 , 21 ± 7 mm を示し、高光量区では低光量区に比べて高い値を示した (Fig. 3). また、高光量区での葉状部の生長速度は $3.0 \pm 0.6 \text{ mm day}^{-1}$ であり、低光量区の $1.0 \pm 0.1 \text{ mm day}^{-1}$ に比べて約 3 倍の高い値を示した (Table 2).

低水温区での培養終了時における葉長、葉幅および茎長は、それぞれ 206 ± 24 , 60 ± 13 , 17 ± 3 mm, 中水温区では 215 ± 26 , 57 ± 6 , 22 ± 8 mm, 高水温区では 203 ± 45 , 60 ± 21 , 15 ± 5 mm であり、葉状部のサイズに差はなかった (Fig. 4). また、葉状部の生長速度は低・中水温区では 1.8 mm day^{-1} , 高水温区では 1.5 mm day^{-1} を示し

より茎長の変化を Fig. 2~4 に、葉状部の介在生長速度および茎状部の伸長速度を Table 2 に示す。深層水区での培養終了時の葉長、葉幅および茎長はそれぞれ 295 ± 33 , 94 ± 10 , 35 ± 9 mm, 表層海水区では 292 ± 41 , 83 ± 17 , 39 ± 18 mm であり、栄養塩条件は幼体の葉長、葉幅および茎長に影響を及ぼさなかった (Fig. 2). しかし、深層水区で培養した幼体の介在生長速度は $2.9 \pm 0.4 \text{ mm day}^{-1}$ であり、表層海水区での生長速度 $2.4 \pm 0.5 \text{ mm day}^{-1}$ に比べて 1.2 倍高い生長速度を示した (Table 2). また、深層水区では表層海水区に比べて側葉の発達が早く、培養開始 29 日後にしてすべての

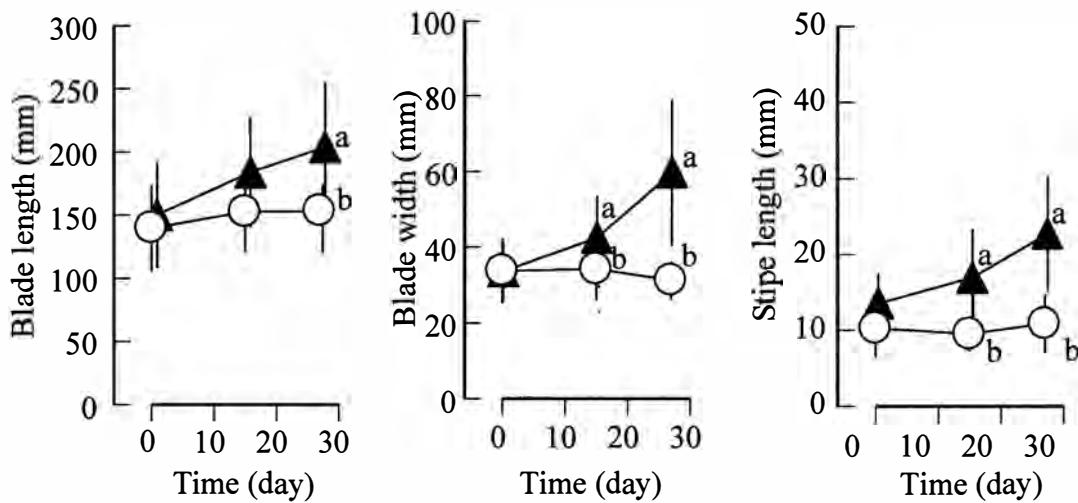


Fig. 3. Effects of light intensity on blade length, blade width and stipe length (Experiment II). Circles and triangles indicate values for low and high light intensity, respectively. Data are means \pm standard deviations ($n = 8$). Different characters indicate significant differences among culture conditions (t -test, $p < 0.05$).

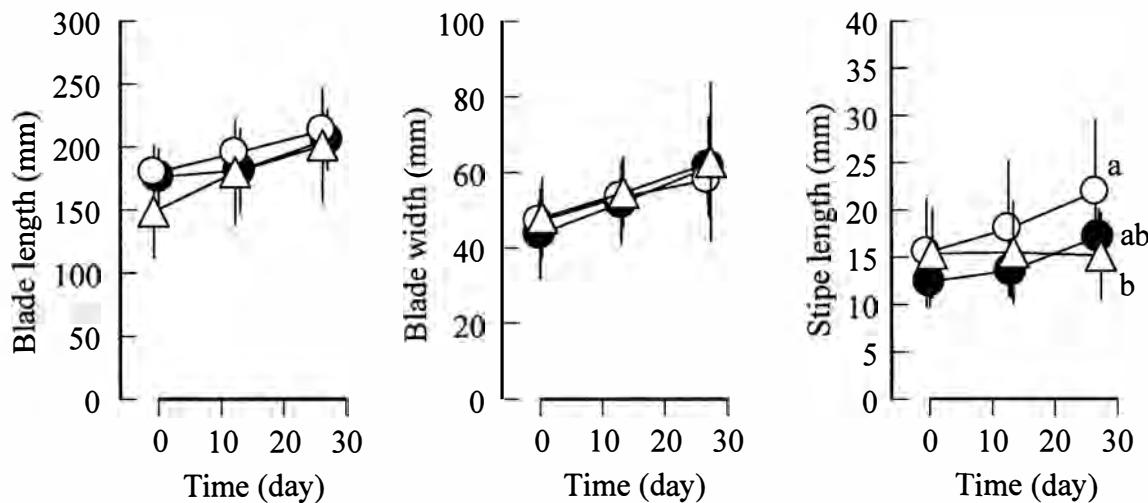


Fig. 4. Effects of water temperature on blade length, blade width and stipe length (Experiment III). Closed circles, open circles and triangles indicate values for low, mid and high water temperatures, respectively. Data are means \pm standard deviations ($n = 7-8$). Different characters indicate significant differences among culture conditions (Fisher's PLSD, $p < 0.05$).

た (Table 2). 茎状部は低および中水温区でそれぞれ 0.2 ± 0.1 , 0.2 ± 0.2 mm day $^{-1}$ を示したのに対し、高水温区ではほとんど伸長しなかった (Table 2)。

4. 考 察

深層水区において表層海水区よりも介在生長速度が速かった (Fig. 2). 同じコンブ科の *Laminaria longicruris* やリシリコンブでは表層海水での低い

栄養塩濃度が生長の制限要因になり、施肥により生長が促進されることが知られている (赤池ら, 1998; Chapman and Craigie, 1977)。カジメにおいても同様に栄養塩濃度が高い深層水中では生長が制限されないため、高い生長速度を示したと推察された。なお、本試験では培養終了時に全長に差がなかったが、深層水と表層海水の介在生長速度の差を考慮すると、より長期の培養では深層水中で全長が長くなるものと推察される。またカジメの幼体は単葉のささの葉状を呈し、生長に伴い葉状部の下端

から側葉が形成される（川嶋，1993）。このため、表層水区よりも側葉の形成時期が早い深層水区が生長に適していると考えられた。

低光量区では、介在生長および葉長の増加量は低く、また茎状部はほとんど伸長しなかった（Fig. 2, Table 2）。カジメ幼体の日積算補償光量は水温 $15\sim20^{\circ}\text{C}$ において約 $0.4 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であり（倉島ら，1996），低光量区と同等の光量条件であるため低い生長を示したと考えられた。また低光量区では葉状部および茎状部がほとんど伸長しないため、移植用幼体が目的の大きさに達して海域に移植するまでの保存条件となり得ると考えられた。

カジメが生育する静岡県河津町および牧之原市地先の水深約10m地点での年平均日積算光量はそれぞれ 7.7 ± 4.8 , $2.3 \pm 2.6 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であり、カジメ成体は光量約 $7 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 、水温約 16°C の時、最大の介在生長速度 3 mm day^{-1} を示すことが報告されている（霜村ら，2004）。本試験での光量は天然海域に比べて低かったが、高光量区において天然海域と同等の高い生長（ $3.0 \pm 0.6 \text{ mm day}^{-1}$ ）を示した（Table 1, 2）。このことは深層水を培養海水とした場合、光量約 $1 \text{ E m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ において天然海域での最大生長速度と同等の生長速度が得られると考えられた。

水温試験では $13\sim20^{\circ}\text{C}$ の範囲では葉状部の生長速度に差がなかった（Fig. 3, Table 2）。伊豆半島産のカジメは冬期から初春にかけて肉眼的な大きさとなり（林田，1984），この期間の水温は $13\sim18^{\circ}\text{C}$ であり（海野ら，2004），また高知県土佐湾産のカジメ幼体は1月から5月頃まで生長し、この間の水温は $15\sim20^{\circ}\text{C}$ であることが報告されている（笠原・大野，1983）。また、葉長約1cmの幼体では $10\sim20^{\circ}\text{C}$ で正常に発生した（太田，1988）。これらのことから、本試験でのいずれの水温も葉状部の生長に適した水温であると考えられる。一方、茎状部は冬期から春期に伸長し、夏期から秋期にはほぼ伸長しないことが報告されている（喜田・前川，1985；Serisawa *et al.*, 2002）。本研究においても低、中水温区（約 13 , 16°C ）では茎状部が約 0.2 mm day^{-1} で伸長したのに対して、高水温区（約 20°C ）においてはほとんど生長しなかった（Table 2）。

このように茎状部は、水温の上昇により生長が阻害されることが明らかとなった。

以上から、カジメ幼体の生長には駿河湾深層水が適しており、深層水中での光量、水温による影響が明らかとなった。今後はさらに培養方法を改良し、深層水を利用した種苗生産技術を確立する必要がある。

謝 辞

本研究を行うにあたり、御助言および実験の補助を頂いた静岡県水産試験場利用普及部の職員の方々に厚くお礼申し上げる。

文 献

- 赤池章一・菊池和夫・門間春博・野澤靖（1998）1年目シリコンブ胞子体の生長に及ぼす窒素・リン施肥の影響。水産増殖, 46, 57-65.
- Aruga, Y., A. Kurashima and Y. Yokohama (1997) Formation of zoosporangial sori and photosynthetic activity in *Ecklonia cava* Kjellman (Laminariales, Phaeophyta). J. Tokyo Univ. Fish., 83, 103-128.
- Chapman, A. R. O. and J. S. Craigie (1977) Seasonal growth in *Laminaria longicruris*: Relations with dissolved inorganic nutrients and internal reserves of nitrogen. Mar. Biol., 40, 197-205.
- 後藤弘・伊藤康男（1988）石炭灰利用人工藻礁の開発－アラメ・カジメの配偶体および幼胞子体の成長に対する光量の影響－。電中研研報, U88038, 1-27.
- 長谷川雅俊（1996a）サガラメ異変。伊豆分場だより, 264, 2-8.
- 長谷川雅俊（1996b）御前崎の潜水漁業と磯焼け。伊豆分場だより, 265, 2-6.
- 林田文郎（1984）カジメの群落生態学的研究－II。カジメの生長について。東海大紀要海洋, 18, 275-280.
- 五十嵐保正（2004）陸上取水した駿河湾深層水中の主要成分の変動。平成14年度駿河湾深層水利用可能性調査報告書, 1-2.
- 笠原均・大野正夫（1983）土佐湾産カジメ類の生理生態学的研究III. 個体の生長と形態の変化。高知大海洋生物研報, 5, 77-84.
- 川崎保夫・山田貞夫（1991）海中砂漠緑化技術の開発第5報 アラメ、カジメ、クロメの配偶体および幼胞子体に対する成長限界光量と浮泥堆積量。電中研研

- 報, U91034, 1-22.
- 川嶋昭二 (1993) カジメ. 日本産コンブ類図鑑 (川嶋昭二編), 北日本海洋センター, 札幌, pp. 124-127.
- 喜田和四郎・前川行幸 (1985) アラメ・カジメ群落に関する生態学的研究-V. 茎長組成および年齢群の季節変化. 三重大水産研報, 12, 119-129.
- 倉島彰・横浜康継・有賀祐勝 (1996) 褐藻アラメ・カジメの生理特性. 藻類, 44, 87-94.
- 中久喜昭 (1980) 磯焼け漁場の海中林造成試験. 栽培技術, 9, 25-30.
- 大野正夫・笠原均・井本善次 (1983) 土佐湾産カジメの生理生態学的研究II成体からの移植実験. 高知大洋生物研報, 5, 65-75.
- 太田雅隆 (1988) アラメ・カジメの配偶体の生長と成熟ならびに生長に及ぼす水温の影響. 海生研報告, No. 88202, 1-29.
- Parsons T. R., Y. Maita and C. M. Lalli (1984) Nutrients. In "A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis" (ed. by T. R. Parsons, Y. Maita and C. M. Lalli), Pergamon Press, Oxford, pp. 3-33.
- 相楽充紀 (2000) 磯焼け海域における海中林復元にむけて-配偶体を利用した藻場造成法の検討-. 伊豆分場だより, 282, 2-7.
- Serisawa, Y., Y. Yokohama, Y. Aruga and J. Tanaka (2002) Growth of *Ecklonia cava* (Laminariales, Phaeophyta) sporophytes transplanted to a local-ity with different temperature conditions. Phycological Research, 50, 201-207.
- 清水昭治 (1981) アラメ等藻場造成試験-II. 和歌山水試報, 12, 29-43.
- 静岡県 (1978) 干潟, 藻場, サンゴ礁分布調査報告書 [16]. 第2回自然環境保全基礎調査 (環境庁), 1-25.
- 霜村胤日人・長谷川雅俊・伊藤円・山田博一・斎藤久輝・上嶋慎一・村尾秀治・山田照義・田中直也 (2004) 藻食性魚類生態管理研究. 平成15年度静岡水試事業報告, 95-100.
- 田島健司・山中弘雄 (1989) 海洋深層水を利用した大型藻類の培養技術に関する研究. 高知海深研報, 1, 6-11.
- 田島健司・山中弘雄 (1990) 海洋深層水を利用した大型藻類の培養技術に関する研究. 高知海深研報, 2, 7-11.
- 谷口和也・長谷川雅俊 (1999) 磯焼け対策の課題. 磯焼けの機構と藻場修復 (谷口和也編), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 25-37.
- 海野幸雄・鈴木朋和・吉田洋子 (2004) 定置観測調査. 平成15年度静岡水試事業報告, 7-8.
- 山内幸児 (1983) 人工藻場に関する研究-I. 兵庫水試研報, 21, 61-70.

(2006. 2. 24 受付, 2006. 5. 9 受理)