

駿河湾深層水および表層海水中でのサガラメ・カジメ幼体の生長に及ぼす流速の影響

Effect of flow rate on the growth of juvenile *Eisenia arborea* and *Ecklonia cava* (Laminariales, Phaeophyceae) cultured in Suruga Bay deep and surface seawaters

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

Abstract

The authors previously reported the usefulness of deep seawater (DSW, known as clean, cold and nutrient-rich seawater pipelined from a depth of 397 m in Suruga Bay, central Pacific coast of Japan) in seed production of brown algae *Eisenia arborea* and *Ecklonia cava* and the effects of light intensity and water temperature on their juvenile growth. In the present study, juvenile sporophytes of the two species were cultured at four flow rates (0.5–9.4 cm sec⁻¹) of DSW and surface seawater (SSW, pipelined from a depth of 24 m) in a transparent pipe to determine the best flow rate condition. The culture was conducted under the natural light condition at a water temperature of 14 °C for 24 days in *E. arborea* and at 18 °C for 16 days in *E. cava*. As a result, no significant difference was found in the relative growth rates (in blade length) of the two species in the examined range of flow rate (but data was not obtained at 9.4 cm sec⁻¹ in *E. arborea*) when cultured in DSW. However growth rates of *E. arborea* and *E. cava* increased with the flow rate in SSW [*E. arborea*: $y = 0.40 \ln(x) + 4.47$ ($r^2 = 0.99$); *E. cava*: $y = 0.84 \ln(x) + 7.99$ ($r^2 = 0.99$)], attaining each maximum, 5.4 % day⁻¹ and 9.7 % day⁻¹, respectively. These results indicate that juvenile sporophytes of *E. arborea* and *E. cava* can grow in DSW faster than in SSW regardless of the flow rate. Use of DSW may result in the decrease of unevenness of juvenile growth in the culture tank.

Key Words: *Eisenia arborea*, *Ecklonia cava*, Flow rate, Suruga-Bay deep seawater, Growth

要 旨

著者らは、先に、駿河湾深層水（水深397mから取水、以下、深層水）がサガラメとカジメの種苗生産に有効であることを明らかにし、水温と光の影響についても報告した。本研究では、深層水または表層海水（水深24mから取水）を掛け流した透明パイプ内でサガラメとカジメの幼体を培養し、0.5～9.4 cm · sec⁻¹の4段階の流速条件で生長を比較した。サガラメは約14 °Cで24日間、カジメは約18 °Cで16日間、いずれも自然光下で培養を行った。深層水中では、2種の葉長の相対生長率は調べた範囲（ただしサガラメでは9.4 cm sec⁻¹が欠測）の流速に対してほぼ一定で、サガラメで4.9～5.2 % day⁻¹、カジメで9.1～9.7 % day⁻¹となった。しかし、表層海水中では、流速の増加に伴い増加し [サガラメ: $y = 0.40 \ln(x) + 4.47$ ($r^2 = 0.99$) ; カジメ: $y = 0.84 \ln(x) + 7.99$ ($r^2 = 0.99$)]、最大でそれぞれ5.4, 9.7 % day⁻¹となった。以上、サガラメやカジメは深層水を用いれば、流速の多少に関わらず培養できることが示唆された。

キーワード：サガラメ、カジメ、流速、深層水、生長

1. はじめに

サガラメ *Eisenia arborea* およびカジメ *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）。しかし、静岡県牧之原市から御前崎市にかけての海域では、サガラメ・カジメ海中林が消失する大規模な磯焼けが発生している（相楽 2000）。このため、両種の増殖用種苗を生産・移植する必要があり、効率的な種苗生産を行う目的で、培養海水、光量および水温が幼体の生長に及ぼす影響が研究されている（二村ら 2006a; 2006b）。

海藻の光合成速度や栄養塩取り込み速度に影響を及ぼすことが室内実験で確かめられている要因として流速が挙げられる（Wheeler 1980; Gerard 1982; Hurd *et al.* 1996）。天然海域では、生育環境の海水流動と海藻の生産量に正もしくは負の相関関係があることが報告されている（Kain 1977; Gerard and Mann 1979; Leigh *et al.* 1987; Sjøtun *et al.* 1998）。また、水槽実験において、ワカメ *Undaria pinnatifida* では、流速が 10 cm sec^{-1} 以上の時よりも 4.2 cm sec^{-1} の時に生長が抑制される（馬場ら 2006）。そこで本研究では、駿河湾深層水を用いてサガラメおよびカジメの種苗を生産する際の基礎的知見として、これらの幼体の生長に及ぼす流速の影響を、深層水をかけ流した水槽実験により調べた。また、表層海水中においても同様に実験し、深層水との影響の相違を比較した。

2. 材料と方法

実験に用いた幼体は、1999年8月に静岡県御前崎市御前崎で採集したサガラメ胞子体の経代培養株（成体）から得た配偶体（二村ら 2005），および2004年11月に静岡県下田市白浜で採集したカジメ胞子体から得た配偶体を培養して得た。これらの配偶体をミキサーで細断し、直径1.0 mmのクレモナロープに着生させた。この配偶体付きのロープを1/4濃度Provasoli栄養塩補強海水を満たした70 ℥容プラスチックコンテナ内に設置し、光量 $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期12 hr : 12 hrで通気培養し、

1週間毎に換水した。このように種糸に付着させた幼体（サガラメ：平均葉長2.4 mm；カジメ：平均葉長3.1 mm）を実験に供した。

生長実験には異なる流速を作り出せる装置（Fig. 1A）を用いた。本装置は、入水パイプ（a）からの海水流量をバルブ（b）で調整し、長さ200 mm、内径25 mmの培養パイプ内（c）の流速を変化させることができる。幼体が付着した種糸（Fig. 1B-e）はステンレス製の枠（f）に固定し、パイプ内で幼体を培養した。流速（ cm sec^{-1} ）は流量（ $\text{cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ ）を断面積（ cm^2 ）で除することで算出した。流速条件は、サガラメ・カジメ共に $0.5, 1.9, 4.7, 9.4 \text{ cm sec}^{-1}$ の4段階とし、培養海水には静岡県焼津市焼津新港地先の水深397 mから取水した駿河湾深層水および水深24 mから取水した表層海水を用いた。なお安定した流速を保つため、両海水共に給水側に受水槽を設け、さらに2日に1度流量を調整した。

流速以外の環境条件については、以下の通りとした。まず、サガラメ試験では深層水および表層海水中の栄養塩濃度は、硝酸態窒素でそれぞれ $16.0, 4.9 \mu\text{M}$ 、リン酸態リンで $2.0, 0.7 \mu\text{M}$ であった。光

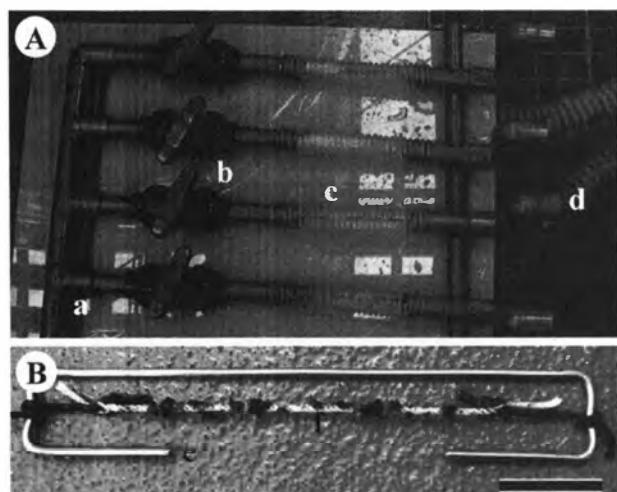


Fig. 1. Experimental apparatus for generating different flow rates (A) and the string holder (B). Deep seawater or surface seawater flows through a pipe (a) in which flow rate is controlled with a bulb (b). Juvenile sporophytes of *Eisenia arborea* or *Ecklonia cava* (f) attached on the string and held with stainless frame (e) are cultured in a transparent pipe (c), and the seawater was drained through a pipe (d). Scale bar indicates 2 cm.

量は流速装置周辺に設置したセンサー (Li192SA, LI-COR Biosciences) とデータロガー (Li-cor 1400, LI-COR Biosciences) を用いて、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、これに培養パイプの透過率を乗じて日積算光量を求めた。光は自然光を与えた。日積算光量（平均±標準偏差）は $0.7 \pm 0.3 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。水温は深層水、表層海水で 14.2 ± 0.5 , 14.7 ± 0.2 °C であり、実験期間は 2005 年 12 月 27 日から 2006 年 1 月 20 日までの 24 日間とした。

一方、カジメでは、深層水および表層海水中の栄養塩濃度は硝酸態窒素でそれぞれ 19.3 , $4.3 \mu\text{M}$ 、リン酸態リンで 2.0 , $0.1 \mu\text{M}$ であった。また、光はサガラメの実験と同様に自然光を与えた。日積算光量は $2.4 \pm 1.1 \text{ mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ であった。水温は深層水、表層海水で 18.0 ± 0.2 , 17.8 ± 0.4 °C であり、実験期間は 2005 年 5 月 18 日から 6 月 3 日までの 16 日間とした。実験期間中、週に 1 回の頻度で培養パイプ内側をブラシで洗浄した。また、サガラメおよびカジメを培養した際の表層海水および深層水中の無機炭素濃度 ($\text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) を Parsons *et al.* (1984) に従い測定した結果、無機炭素濃度は $2.2 \sim 2.3 \text{ mM}$ であった。

いずれの場合も試験開始時および終了時に、各実験区 10 個体の葉長をノギスを用いて 0.1 mm 刻みで測定し、これにより得られた葉長から下式により相対生長率 (RGR) を求めた。

$$\text{RGR} (\%) = 100 t^{-1} \ln(V_a/V_b)$$

t ：日数 V_a ： t 日後の葉長 V_b ：試験開始時の葉長

流速条件による相対生長率は、ANOVA で分散分析を行い、post-hoc テストとして Tukey-Kramer 法により比較した。

3. 結 果

深層水および表層海水中でのサガラメの生長に関する実験結果を Fig. 2 に示す。深層水中でのサガ

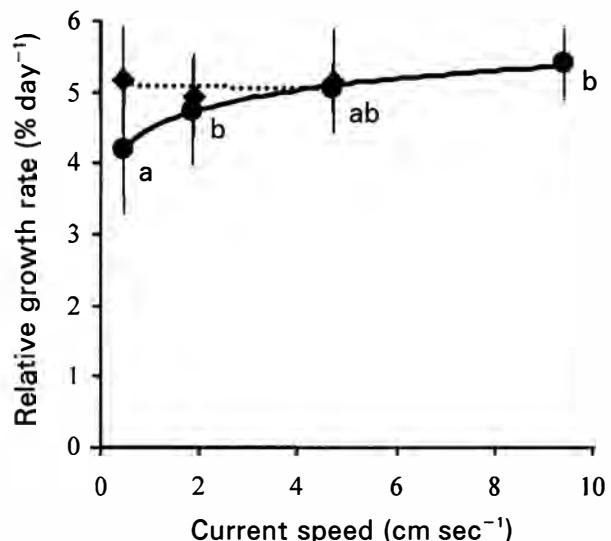


Fig. 2. Effect of flow rate on the growth of *Eisenia arborea* in deep seawater (diamond) and in surface seawater (circle). Dotted and solid curves show the kinetics of growth rate versus current speed in deep seawater [$y = -0.02 \ln(x) + 5.10$; $r^2 = 0.03$] and surface seawater [$y = 0.40 \ln(x) + 4.47$; $r^2 = 0.99$]. Different characters indicate significant difference in surface seawater (Tukey-Kramer analysis, $p < 0.05$). No significant differences were found among each flow rate condition in deep seawater.

ラメの実験において、秒速 9.4 cm sec^{-1} 区は実験中に培養パイプ内に空気が恒常に混入したため幼体が乾出し、かつ一定の流速が得られなかったため欠測とした。深層水中でのサガラメの相対生長率は、流速 $0.5 \sim 4.7 \text{ cm sec}^{-1}$ の範囲で有意差はなく、流速条件による生長の差はなかった。表層海水中では流速の増加に伴い生長速度が増加した [$y = 0.40 \ln(x) + 4.47$; $r^2 = 0.99$]。

深層水および表層海水中でのカジメの生長に関する実験結果を Fig. 3 に示す。深層水中でのカジメの相対生長率は流速 $0.5 \sim 9.4 \text{ cm sec}^{-1}$ の範囲で有意な差はなく、流速と相関関係がみられた [$y = 0.18 \ln(x) + 9.16$; $r^2 = 0.90$]。表層海水中でのカジメの生長は、流速の増加に伴い生長速度が増加した [$y = 0.84 \ln(x) + 7.99$; $r^2 = 0.99$]。なお、いずれの試験においても、試験終了時に、付着基質のクレモナロープに付着珪藻などによる汚れは特に認められなかった。

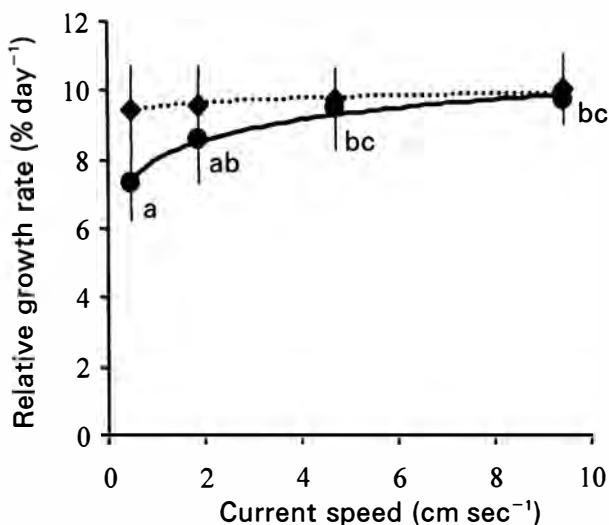


Fig. 3. Effect of flow rate on the growth in *Ecklonia cava* in deep seawater (diamond) and in surface seawater (circle). Dotted and solid curves show the kinetics of growth rate versus current speed in deep seawater [$y = 0.18 \ln(x) + 9.16$; $r^2 = 0.90$] and surface seawater [$y = 0.84 \ln(x) + 7.99$; $r^2 = 0.99$]. Different characters indicate significant difference in surface seawater (Tukey-Kramer analysis, $p < 0.05$). No significant differences were found among each flow rate condition in deep seawater.

4. 考 察

駿河湾深層水は表層海水に比べて硝酸態窒素やリン酸態リンの栄養塩類が多く、生菌数や植物プランクトン数が少ないことが知られている（カサレト 2003；五十嵐 2004；伴野 2004）。海藻の光合成および生長は、海水中から藻体表面への二酸化炭素や栄養塩類など（以下、基質という）の移動量に依存している（Lobban & Harrison 1994）。この基質の移動量は藻体表面に形成される拡散境界層の厚さに関係しており、流速が増加して境界層が薄くなると基質が藻体表面に供給されやすくなる（Wheeler 1980）。また、藻体表面への基質の供給量は、海水中の基質の濃度が高い場合や、流速の増加により基質との接触量が増大する場合に増加する。このため、深層水中で流速が生長に影響を及ぼさない理由として、栄養塩濃度が高いため、非常に低い流速 0.5 cm sec^{-1} においても藻体表面に基質が十分に供給されることが考えられる。

サガラメおよびカジメにおいて、表層水中では流

速の増加により生長率が増加した（Figs. 2, 3）。これは表層海水中では基質濃度が低く、低流速では拡散境界層の厚みと基質濃度の低さから、基質が藻体表面に十分供給されないためと考えられる。表層海水は深層水と同じ無機炭酸濃度（ $2.2 \sim 2.3 \text{ mM}$ ）であったが、硝酸態窒素およびリン酸態リンの濃度は深層水で表層海水の $1/20 \sim 1/3$ と少ないと少いことから、表層海水での低流速条件では栄養塩濃度が生長の制限要因になると推察される。

コンブ類の種苗を生産する際に一般的に用いられるコンテナでの育成（小河 1987）を模し、水槽（縦 \times 横 \times 高さ = $40 \times 50 \times 40 \text{ m}$ ）の様々な位置で流速を測定したところ、最大流速は、エアストーン（直径 \times 高さ = $30 \times 65 \text{ mm}$ ）の直上では 3 cm sec^{-1} 以上になるが、それ以外の場所では $1 \sim 2 \text{ cm sec}^{-1}$ にしかならない（二村ら、未発表）。このことから、表層海水を培養海水とした場合、水槽内の位置によっては流速が生長の制限要因になり、生長にばらつきが生じ得る。しかし、流速が生長の制限要因とならない深層水を培養海水とした場合には、このような問題を排除することができる。

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駿河湾深層水水産利用施設の職員の方々に厚くお礼申し上げる。

文 献

- 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, 9, 55-64.
- Gerard. V. A. and K. H. Mann (1979) Growth and production of *Laminaria longicurris* (Phaeophyta) populations exposed to different intensities of water movement. J. Phycol., 15, 33-41.
- Gerard. V. A. (1982) *In situ* water motion and nutrient uptake by the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. Mar. Biol., 69, 51-54.
- Hurd, C. L., P. J. Harrison and L. D. Druehl (1996) Effect of seawater velocity on inorganic nitrogen uptake by morphologically distinct forms of *Macrocystis integrifolia* from wave-sheltered and

- exposed sites. Mar. Biol., 126, 205-214.
- 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.
- Kain, J. M. (1977) The biology of *Laminaria hyperborea* X. The effect of depth on some populations. J. mar. biol. Ass. U.K., 57, 587-607.
- カサレト・ベアトリス・エステラ (2003) 平成 13 年度駿河湾深層水利用可能性調査報告書, 29-65.
- 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.
- Leigh E. G., R. T. Paine, J. F. Quinn and T. H. Suchanek (1987) Wave energy and intertidal productivity. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 84, 1314-1318.
- Lobban, C. S. and P. J. Harrison (1994) Light and photosynthesis. In "Seaweed Ecology and Physiology" (ed. By C. S. Lobban and P. J. Harrison), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 123-162.
- 二村和視・岡本一利・高瀬進 (2005) サガラメ *Eisenia arborea* Areschoug (Phaeophyceae) 配偶体の生長・成熟に及ぼす駿河湾深層水の影響. 海深研, 6, 31-35.
- 二村和視・岡本一利・高瀬進・窪田久・大河内敏雄 (2006a) サガラメ・カジメ胞子体生育特性の把握. 平成 16 年度静岡県水産試験場事業報告, 69-70.
- 二村和視・岡本一利・高瀬進 (2006b). 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. 海深研, 7, 9-16.
- 小河久朗 (1983) コンブ類. 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. 116-133.
- 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方法の検討. 伊豆分場だより, 282, 2-7.
- Sjøtun K., S. Frederiksen and J. Ruess (1998) Effect of canopy biomass and wave exposure on growth in *Laminaria hyperborea* (Laminariaceae: Phaeophyta). Eur. J. Phycol., 33, 337-343.
- 伴野安彦 (2004) 駿河湾深層水の微生物相に関する研究. 平成 14 年度駿河湾深層水利用可能性調査報告書, 3-7.
- Parsons T. R., Y. Maita and C. M. Lalli (1984) Determination of carbonate alkalinity and total carbon dioxide (all forms). 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. 141-149.
- Wheeler, W. N. (1980) Effect of boundary layer transport on the fixation of carbon by the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. Mar. Biol., 56, 103-110.

(2006. 8. 29 受付, 2006. 11. 30 受理)