

ヒジキ幼体の生長と形態形成におよぼす水温の影響

森田晃央¹・小黒敏行²・斎藤洋一³・井上美佐⁴・松田浩一⁴・神谷直明⁴・倉島彰^{2*}・前川行幸²

¹ 三重大学社会連携研究センター (〒 514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)

² 三重大学生物資源学部・生物資源学研究科 (〒 514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577)

³ 鳥羽市水産研究所 (〒 517-0005 三重県鳥羽市坂手町 373-2)

⁴ 三重県水産研究所 (〒 517-0404 三重県志摩市浜島町 3564-3)

Teruwo Morita¹, Toshiyuki Oguro², Youichi Saitou³, Misa Inoue³, Hirokazu Matsuda³, Naoaki Kamiya³, Akira Kurashima^{2*} and Miyuki Maegawa²: Growth and morphogenesis of young *Sargassum fusiforme* (Harvey) Setchell at various temperatures. Jpn. J. Phycol. (Sôru) 62: 93-98, July 10, 2014

Here we report the effect of temperature on the growth and morphogenesis of young *Sargassum fusiforme* developing from embryos. Growth was measured at four temperatures (10 – 25°C). Shoot growth was highest at 20°C. The morphology of leaves produced from shoots was affected by temperature. Most plants produced serrate leaves at 25°C, and linear or oval leaves at lower temperatures. The optimum temperature for production and growth of filamentous holdfasts was between 10 and 15°C, and the optimum temperature for shoot growth was 20°C. In contrast, the development of filamentous holdfasts was poor at temperatures above 20°C. The results indicate that temperature is a major factor affecting the growth and morphogenesis of young *S. fusiforme*.

Key Index Words: filamentous holdfast, growth, morphology, *Sargassum fusiforme*, temperature.

¹Social Cooperation Research Center, Mie University, 1577 Kurimamachiya, Tsu, Mie 514-8507, Japan

²Graduate School/Faculty of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya, Tsu, Mie 514-8507, Japan

³Toba City Science Fisheries Research Institute, 373-2 Sakate, Toba, Mie 517-0005, Japan

⁴Mie Prefectural Science Fisheries Research Institute, 3564-3 Hamajima, Shima, Mie 517-0404, Japan

* Author for correspondence: kurasima@bio.mie-u.ac.jp

緒言

ヒジキ *Sargassum fusiforme* (Harvey) Setchell は、日本沿岸に広く分布するホンダワラ類であり、食用として重要な藻類である。初夏に生殖器床を形成し、雌雄異株の藻体からそれぞれ卵と精子を放出する。受精卵（幼胚）は粘液物とともに生殖器床上にしばらく留まるが、やがて落下し、仮根で基質に着生するとともに、莖葉(吉田 1984)を形成する。一方、生殖器床を形成した藻体は、卵・精子を放出後、繊維状根を残して流出する。残存した繊維状根からは、夏から秋にかけて新芽が形成され、新たな個体として生長を開始する。ヒジキは、有性生殖の結果放出される幼胚よりも、繊維状根からの個体の再生によって群落を維持していると考えられている(新井・新井 1983)。

ヒジキの季節消長については、福岡県志賀島のヒジキ群落において主枝重量の季節変動の面から定量的に調査されている(長門・川口 2003)。長門・川口(2003)は、ヒジキは多年生藻類であり、成熟期が終了する夏季に新芽が繊維状根から出芽し、個体群が維持されていることを明らかにしている。また、千葉県房総半島の内浦湾のヒジキについても、有性生殖による幼胚よりも繊維状根の伸長による栄養繁殖によって群落が維持されていると考えられている(新井・新井 1983)。一方で、新井・新井(1983)は、試験区の岩面から幼胚の出芽による個体の確認をしており、出芽したヒジキは

12月頃から繊維状根を伸長させると共に、繊維状根から出芽していることを報告している。

これまでにホンダワラ類については、藻場造成や養殖技術の開発の観点から、その生育と環境要因との関係について調べられてきた。ホンダワラ類の生長及び成熟に影響をおよぼす環境要因として、これまでに水温、日長及び光量などが知られている(小河 1986, Uchida 1993, 松井ら 1994, 吉田 1995, 吉田ら 1997, 村瀬 2001, 吉田ら 2003, 原口ら 2005, Zou & Gao 2005, Pang *et al.* 2006, Zou *et al.* 2006, 馬場 2007, Hwang *et al.* 2007, 伊藤ら 2009, 西垣ら 2010)。

これまでヒジキについては、発芽体の初期生長に及ぼす環境要因(Pang *et al.* 2006, 馬場 2007)や天然群落の季節消長(長門・川口 2003)などについて主に調べられているが、ヒジキの生活史におよぼす環境要因についての報告は数少ない(Park *et al.* 1995)。ヒジキは幼胚による有性繁殖と、繊維状根の伸長・出芽による栄養繁殖によって群落を維持しており、それぞれの繁殖方法には異なる生態学的な意義があると考えられる。すなわち、幼胚由来の発芽体からの主枝伸長や繊維状根の形成に影響する環境要因の解明は、有性繁殖によるヒジキ群落の維持機構を知るうえで重要となる。吉田ら(1997)は、ノコギリモク幼体の成長に及ぼす光量と水温の影響を調べ、ホンダワラ類の幼体については群落維持機構の観点から、葉状部と繊維状根の生態的な役割を個別に考え

る重要性について報告している。

一般的にホンダワラ科に属する種は、生育域によって形態変異が大きいことで知られている（寺脇ら 1983, 吉田ら 1995, 島袋 2007）。ヒジキについても生育地によって葉の形態変異が大きく、南方に生育するものは葉が扁平して縁辺の鋸歯が明瞭であるが、北方に生育するヒジキの葉は円柱状であるとの報告がある（堀 1993, 吉田 1998）。また、ヒジキの形態的な特徴には生育密度も大きく影響することが報告されている（Arenas *et al.* 2002, 遠藤 2010）。三重県南部においても、ヒジキ主枝上の葉に多様な形態が確認されており、葉の形態的特徴と水温等環境要因の影響について明らかにする必要がありと考えられる。

そこで本研究では、ヒジキ幼体の生長及び形態形成におよぼす環境要因、特に水温の影響について室内培養によって明らかにした。また、ヒジキの葉の形態的特徴と生育水温の関連について興味深い結果が得られたのであわせて報告する。

材料と方法

ヒジキの幼胚は 2009 年 6 月 22 日に三重県鳥羽市大村島で採集した母藻から採取した。ヒジキの母藻は水道水で数分間洗浄し、絵筆を用いて生殖器床に付着した珪藻、原生動物や甲殻類をぬぐい取った。洗浄した雄性生殖器床および雌性生殖器床は基部から切断し、20 mL の 1/5PESI（西澤・千原 1979）補強海水を注いだ 9 cm シャーレ中に収容し、振盪培養を行いながら、幼胚を落下させた。その間、培養液の交換は行わなかった。なお、雌性生殖器床をシャーレに収容した際に、卵の放出はなかった。本研究では、幼胚から仮根が伸長した状態を発芽体とし、茎葉の屈曲部から新たな茎葉が形成された状態を幼体とした。

幼胚の落下は 6 月 23 日に確認できた。幼胚はパスツールピペットでシャーレから回収し、滅菌海水を満したシャーレに滴下した。この作業を 3 回繰り返して、洗浄を行った。洗浄した幼胚の懸濁液はスライドグラスを入れた 9 cm シャーレに滴下し、水温 20°C で光周期 12L:12D、光強度 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の条件下で 2 日間培養し、スライドグラスへ付着させた。シャーレは、幼胚の付着を確認後に、培養液を 1/5PESI 補強海水に交換し、各培養条件に移した。発芽体については、水温 7, 10, 15, 20, 25°C で光周期 12L:12D、光強度 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の条件下で約 2 ヶ月間予備培養した。また、10°C の条件下で培養した個体の藻体長は、予備培養開始から 16 日後に約 1 mm となった。この時点で全ての幼胚をスライドグラスから剥離し、450 ml の 1/5PESI 補強海水を注いだ 500 ml 平底フラスコで通気培養（0.3l air/min.）を行った。なお、7°C の条件下で培養したヒジキの発芽体はほとんど生長しなかったため本研究では測定を行わなかった。

本研究では、生長の指標として、藻体の全長、形成主枝数、形成葉数、形成繊維状根数、また最大の繊維状根長を全ての個体について測定した。測定は、培養開始後、7 日ごとに培

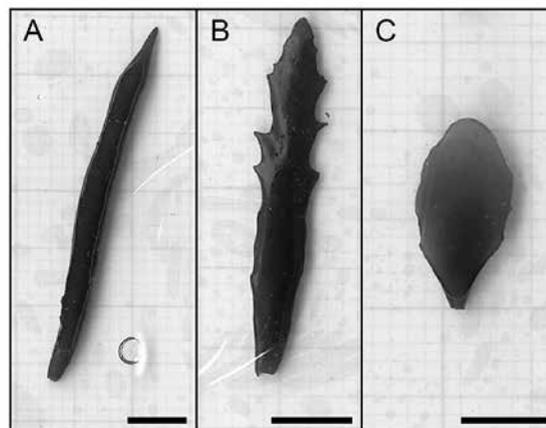


Fig. 1. Three leaf types of young *S. fusiforme*. A, linear; B, serrate; C, oval; (Scale bar: 5 mm).

地を交換する際に行った。幼体については、2 ヶ月間予備培養した後に、水温 10, 15, 20, 25°C で光周期 12L:12D、光強度 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の条件下で 63 日間培養し測定を行った。8 個体の幼体は 2.5 L の 1/5PESI 補強海水を注いだ 3 L 三角フラスコで通気培養（1.5l air/min.）し、各水温条件につき 1 容器で培養した。全長は、繊維状根と主枝の境界から主枝先端部の生長点までの長さとした。また、形成主枝数及び形成葉数については、1 個体の幼胚から形成された全ての主枝数及び主枝に形成された葉の総数をそれぞれ計数した。なお、繊維状根の長さは幼体 1 個体に形成された各繊維状根の最大長とし、形成繊維状根数は測定による幼体へのダメージを最小限にするため、幼体 1 個体あたり最大 20 本を上限とし計数した。さらに、幼体に形成される葉の形態を線形全縁、線形浅鋸歯縁及び卵形（へら状）に分類し、それぞれの水温条件下の葉数を計数した（Fig.1.）。なお、形成された葉は、明瞭に形態が異なっており容易に分類できた。

結果

幼体の全長におよぼす水温の影響

異なる水温条件下における幼体の平均全長の変化を、Fig. 2A に示す。幼体の全長には培養温度及び培養日数の影響が認められた (** $p < 0.01$, Two-way ANOVA)。Table 1 には培養温度及び培養日数の二元配置分散分析結果と交互作用について示した。20°C 下での幼体の全長は、培養 63 日後には 41.9 ± 13.4 mm に生長し、10°C 下 (18.4 ± 9.2 mm, ** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)、15°C 下 (39.1 ± 6.9 mm, * $p < 0.05$, Two-way ANOVA, Bonferroni test) 及び 25°C 下 (26.5 ± 4.5 mm, ** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test) での幼体に比較して有意に長かった。また、水温 15°C 下での幼体については、10°C 下の幼体に比較して有意に長かった (** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)。各水温で 63 日間培養した幼体について、典型的な生長・形態形成を示した個体を Fig. 3 に示した。

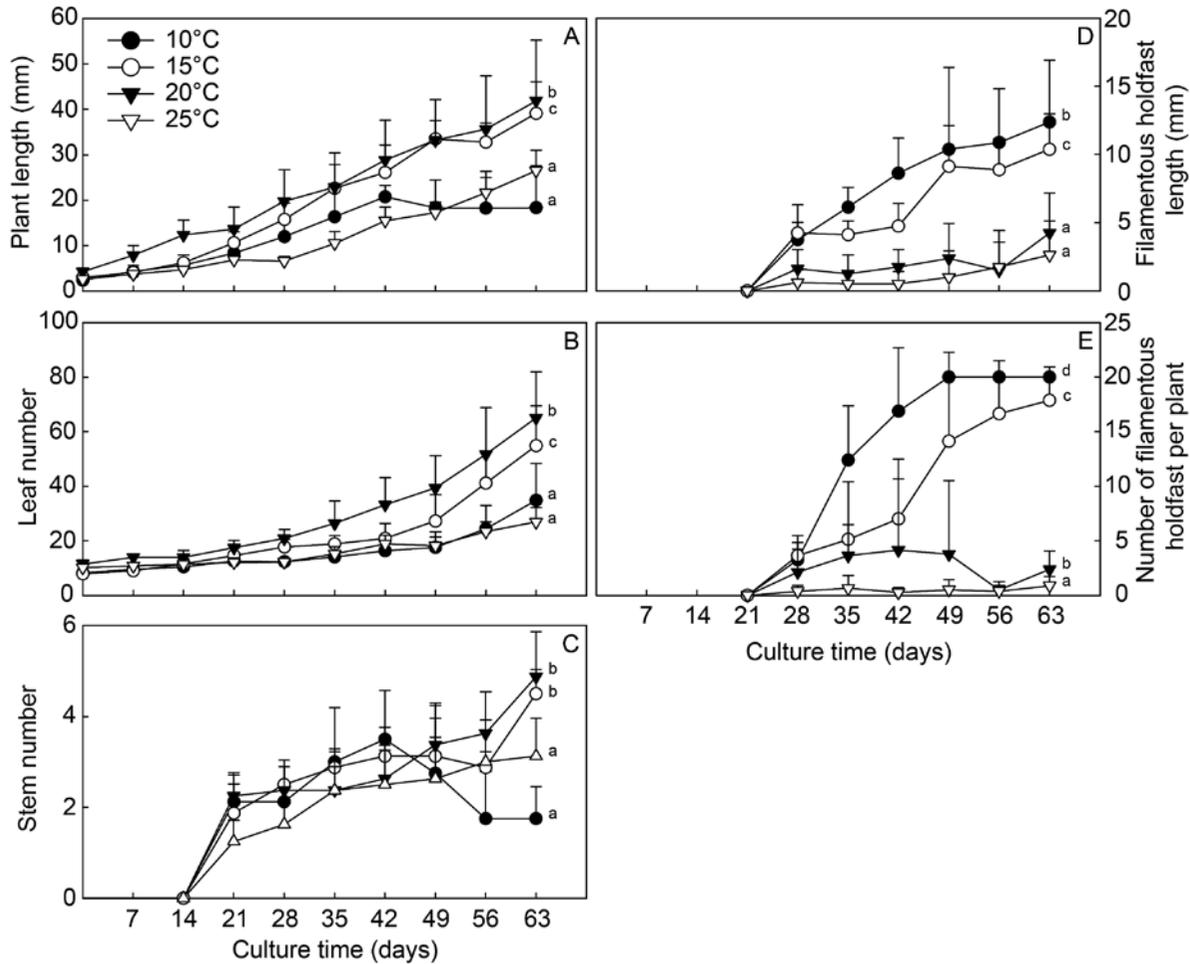


Fig. 2. Growth and morphogenesis of young *S. fusiforme* at various temperatures: A, length of young plant; B, number of leaves per young plant; C, number of stems per young plant; D, maximum length of filamentous holdfasts per young plant; E, maximum number of filamentous holdfasts per young plant. Different letters indicate significant difference ($*p < 0.05$, Two-way ANOVA, Bonferroni post hoc test). Data are mean \pm SD ($n = 8$).

葉形成数及び主枝形成数におよぼす水温の影響

異なる水温条件下における幼体の葉形成の変化を、Fig. 2Bに示す。葉形成数には培養温度及び培養日数の影響が認められた (** $p < 0.01$, Two-way ANOVA)。Table 1には培養温度及び培養日数の二元配置分散分析結果と交互作用について示した。幼体は、20°C下の高温において最も葉の形成数が多く、63日後には平均65.1 \pm 16.9枚を形成した。水温20°C下の幼体における葉形成数は、10°C下(34.9 \pm 13.4枚, ** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test), 15°C下(54.9 \pm 14.7枚, ** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)及び25°C下(26.9 \pm 5.4枚, ** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)での形成数に比較して有意に多かった。また、水温15°C下の幼体における葉形成数は、10°C下(** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test), 20°C下(** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)及び25°C下(** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)での形成数に比較して有意に多いことが明らかとなった。

異なる水温条件下における幼体の主枝形成の変化を、Fig.

2Cに示す。主枝形成数には培養温度及び培養日数の影響が認められた (** $p < 0.01$, Two-way ANOVA)。Table 1には培養温度及び培養日数の二元配置分散分析結果と交互作用について示した。幼体は、20°C下の高温で最も主枝の形成数が多く、63日後には平均4.9 \pm 1.0本を形成した。水温20°C下の幼体における主枝形成数は、10°C下(1.8 \pm 0.7本, ** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)及び25°C下(3.1 \pm 0.8本, ** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)での形成数に比較して有意に多かった。また、水温15°C下での幼体の主枝形成数は、10°C下(** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)及び25°C下(** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test)での形成数に比較して有意に多かった。しかし、15°C下の主枝数は、20°C下での主枝形成数に対して有意な差は認められなかった。

葉の形態におよぼす水温の影響

異なる水温条件下における幼体の葉の形態的な特徴の変化を、Fig. 4に示す。線形全縁の葉は、15°C下及び20°C下で多く形成され、それぞれ77.7% (42.6 \pm 15.6枚)及び

76.0% (49.5±16.6 枚) となった。また、15°C下で形成された線形全縁の葉数は、10°C下 (20.3±15.3 枚, *p<0.05, One-way ANOVA, Bonferroni test) 及び 25°C下 (2.5±1.5 枚, **p<0.01, One-way ANOVA, Bonferroni test) での葉形成数に比較して有意に多かった。15°C下の線形全縁の葉数は、20°C下での葉数に対して有意な差は認められなかった。20°C下で形成された線形全縁の葉数は、10°C下 (**p<0.01, One-way ANOVA, Bonferroni test) 及び 25°C下 (**p<0.01, One-way ANOVA, Bonferroni test) での葉形成数に比較して有意に多かった。

線形浅鋸歯縁の葉は、25°C下で最も多く形成され、47.9% (12.9±6.2 枚) であった。また、25°C下で形成された線形浅鋸歯縁の葉数は、10°C下 (5.0±2.1 枚, **p<0.01, One-way ANOVA, Bonferroni test), 15°C下 (4.9±2.0 枚, **p<0.01, One-way ANOVA, Bonferroni test) 及び 20°C下 (6.1±1.7 枚, **p<0.01, One-way ANOVA, Bonferroni test) での葉形成数に比較して有意に多かった。

卵形の葉は、25°C下で最も多く形成され、42.8% (11.5 ± 3.1 枚) であった。また、25°C下で形成された卵形の葉数は、15°C下 (7.4±2.1 枚, **p<0.01, One-way ANOVA, Bonferroni test) での葉形成数に比較して有意に多かった。しかし、ヒジキの初期葉は、主に卵形 (へら状) が多く形成されるため 10°C, 15°C及び 20°Cにおける有意な差は認められなかった。

繊維状根の伸長及び形成数におよぼす水温の影響

異なる水温条件下における繊維状根の伸長の変化を、Fig. 2D に示した。繊維状根の伸長には培養温度及び培養日数の影響が認められた (**p<0.01, Two-way ANOVA)。Table 1 には培養温度及び培養日数の二元配置分散分析結果と交互作用について示した。繊維状根の伸長は、10°C下で良好であり、12.4±4.5 mm であった。また、10°C下での繊維状根の長さは、15°C下 (10.4±2.6 mm, **p<0.01, Two-way ANOVA, Bonferroni test), 20°C下 (4.3±2.9 mm, **p<0.01, Two-way ANOVA, Bonferroni test) 及び 25°C下 (2.6±2.5 mm, **p<0.01, Two-way ANOVA, Bonferroni test) での伸長に比較して有意に長かった。しかし、20°C下での繊維状根の伸長は、25°C下での伸長に対して有意な差は認められなかった。

異なる水温条件下における繊維状根の形成数の変化を、Fig. 2E に示した。繊維状根の形成数には培養温度及び培養



Fig. 3. Young *S. fusiforme* 63 days after the start of culture at various temperatures: A, 10°C; B, 15°C; C, 20°C; D, 25°C.

日数の影響が認められた (**p<0.01, Two-way ANOVA)。Table 1 には培養温度及び培養日数の二元配置分散分析結果と交互作用について示した。繊維状根の形成は、10°C下で良好であり、20.0±0.0 本であった。10°C下の繊維状根形成数については、15°C下 (17.9±3.0 本, **p<0.01, Two-way ANOVA, Bonferroni test), 20°C下 (2.4±1.7 本, **p<0.01, Two-way ANOVA, Bonferroni test) 及び 25°C下 (0.9±0.8 本, **p<0.01, Two-way ANOVA, Bonferroni test) での形成数に比較して有意に多かった。しかし、10°C下の繊維状根形成数については、15°C下の形成数に対して有意な差が認められなかった。また、15°Cの繊維状根形成数については、20°C下

Table 1. ANOVA results of growth and morphogenesis of young plant under various culture conditions.

Factor	Length of young plant			Number of leaves per young plant			Number of stems per young plant			Maximum length of filamentous holdfast per young plant			Maximum number of filamentous holdfasts per young plant		
	d.f.	SS	F-value	d.f.	SS	F-value	d.f.	SS	F-value	d.f.	SS	F-value	d.f.	SS	F-value
Culture time	9	29131.55	118.24 ***	9	38995.74	95.15 ***	9	553.07	140.61 ***	9	5636.72	73.45 ***	9	2275.44	64.84 ***
Temperature	3	6316.41	76.91 ***	3	9755.01	71.41 ***	3	16.01	12.21 ***	3	4163.68	162.76 ***	3	1149.88	98.29 ***
Culture time×Temp	27	3256.28	4.41 ***	27	7615.49	6.19 ***	27	66.15	5.61 ***	27	4687.35	20.36 ***	27	1023.02	9.72 ***

***p<0.0001

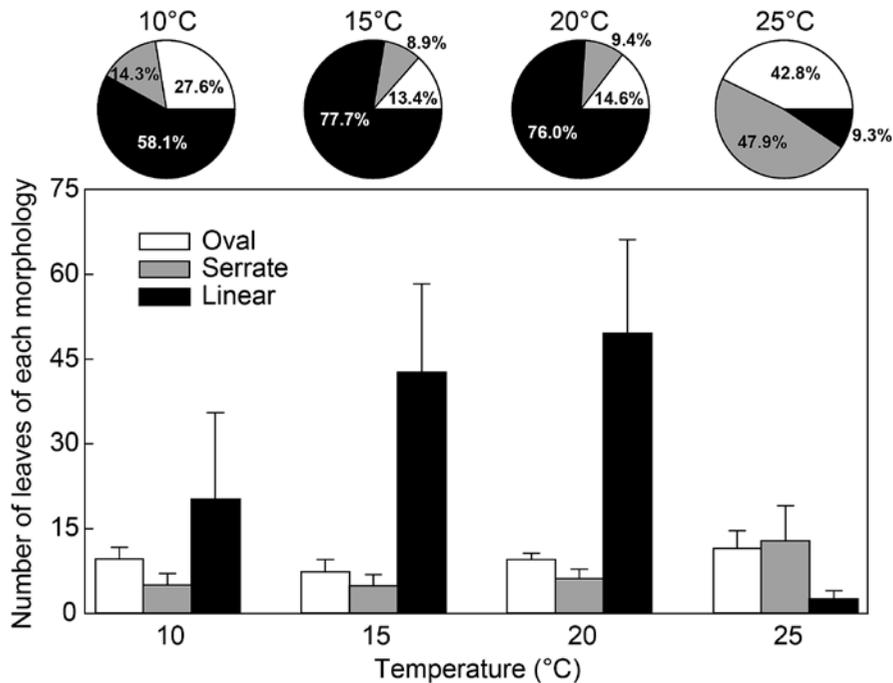


Fig. 4. Number of leaves of each morphology per young plant. Pie charts show the percentage of each leaf shape at each temperature. Data are mean \pm SD (n = 8).

(** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test) 及び 25°C 下 (** $p < 0.01$, Two-way ANOVA, Bonferroni test) での形成数に比較して有意に多かった。

考察

原口ら (2005) は、山口県沿岸でガラモ場を構成するホンダワラ類 9 種の生育の適温と上限温度について、天然の藻体を用いた培養実験により評価している。その研究では、ホンダワラ類を、その生育適温の範囲により、15-20°C に適温がある低温型、20-25°C もしくは 25°C に適温がある高温型、および 10-25°C もしくは 15-25°C の広い範囲に適温がある広温型に分類している。本研究で得られたヒジキ幼体の生育適温は 15-20°C であったことから、幼体の生育適温は低温型に属すると考えられる。これまでに森田ら (2014) は、ヒジキの発芽体の生長適温について試験し、ヒジキ発芽体の生育適温は 20-25°C の高温型であることを明らかにした。すなわち、ヒジキは生育ステージによって生育温度の適温が異なっていることが示唆される。三重県のヒジキの成熟時期は 5 月下旬から 7 月上旬であり、この時期の海水温はおおむね 20°C 付近である。よって、天然のヒジキ群落において生殖器床からの幼胚の落下後にすばやく生長するためには、20-25°C の高温側に生育適温を持つ必要がある。一方で、幼体の生育適温については生育適温を低温側に持つことによって秋季における生長にとって有利となることが考えられる。

本研究では、ヒジキにおいて水温と葉の形態について試験を行った。鋸歯を発達させた線形浅鋸歯縁の葉の割合は、水温 10-20°C の培養条件で 8.9-14.3% であったのに対し、水温 25°C の培養条件下では、47.9% に達した。これまでに

ヒジキの生育地によって葉の形態変異が大きく、南方に生育するものは葉が扁平して縁の鋸歯が明瞭であり、北方に生育するヒジキの葉は円柱状であるとの報告がある (堀 1993, 吉田 1998)。本研究では、ヒジキの葉の形態について、地理的な変異だけでなく、水温などの環境要因によっても多様性が生じることがはじめて示唆された。また、ホンダワラ類では、同種であっても藻体の成長段階、季節や生育環境などの環境要因によって葉の形などの形態的な変異が大きいことで知られている (Kilar & Hanisak 1988)。吉田ら (1995) は、アカモクの茎伸長が開始された個体を用いて日長と葉の形態形成の特徴について観察している。アカモクの葉の特徴は、第 1 葉及び第 2 葉までは線形全縁であったが、全ての培養条件においてアカモク特有の線形で羽状の切れ込みを持つ葉が観察された。しかし、葉の形態は各条件間で若干異なっており、短日条件下では葉長が短く切れ込みが浅く重鋸歯の発達が認められたのに対し、長日条件下では葉長が増大し切れ込みが深く線状の突起を持つ細長い葉が多く形成されたとしている。ヒジキにおいても葉の形態に日長が影響する可能性も考えられるため、日長と葉の形態形成にとの関係を明らかにする必要があると考えられる。また、ホンダワラ科海藻の葉の光合成速度は季節によって変化していることが知られている (Zou & Gao 2005)。本研究では水温が葉の形態形成に影響することが明らかとなった。すなわち、天然のヒジキ群落においても季節により異なる形状の葉を形成することが予想され、今後は葉の形態的な特徴と生理学的な関係について明らかにする必要がある。また、棒状の葉で気胞が少ないヒジキは一般的に高品質であるとされており (北村 2006)、将来的に品質の高いヒジキを生産するための海域選定において、

本研究で得られた生育水温と葉の形態特性の情報は有用であると考えられる。

ホンダワラ類は日本各地の沿岸にガラモ場と呼ばれる大きな群落を形成し、高い一次生産力を示し、魚介類の産卵場や保育場として役割を果たすほか、環境の保全機能などの観点から注目されている。藻場造成や養殖技術において仮根の発達が生育基盤への固着力に影響をおよぼすことから、ホンダワラ類の仮根形成に関する研究について数多くの報告がある(小河 1986, 吉田ら 1997, Yoshida *et al.* 1999, 村瀬 2001, Pang *et al.* 2006, 馬場 2007)。吉田ら (1997) は、ノコギリモク幼体の生長に及ぼす水温の影響について試験している。ノコギリモク幼体の繊維状根面積は、培養 2 週間後では 20-25°C の高温側が最大であるのに対し、培養 4 週間後では 15°C の低温側で良好な生長を示す。また、森田ら (2014) は、ヒジキの発芽体における仮根の伸長と水温の関係について試験し、ヒジキ仮根は培養 2 週間では 20°C の高温側で最も生長することを明らかにした。本研究では、ヒジキ幼体の繊維状根の伸長及び形成数と水温の関係について調査した。繊維状根の形成・伸長は、水温 10°C もしくは 15°C の比較的低温側で良好であった。すなわち、ヒジキの発芽体から幼体についても生育段階が進むにつれ生育適温が高温側から低温側へ移行することが示唆された。よって、天然のヒジキ群落において幼体からの繊維状根形成及び伸長は、主に水温が低下した時期に活発なことが推察できる。本研究では、幼体から生長した幼体の生育適温について明らかにしたが、今後は繊維状根からの出芽とその生長等、栄養繁殖の過程に影響をおよぼす環境要因についても研究を進める必要がある。

謝辞

本研究の一部は、平成 22 年度 (財) 岡三加藤文化振興財団の研究助成によって行われた。また、三重大学伊賀研究拠点の皆様には本論文をまとめるにあたり有益なご助言をいただき感謝する。

引用文献

- 新井朱美・新井章吾 1983. ヒジキとウミトラノオの入植に影響する諸条件. 水産増殖 30: 184-191.
- Arenas, F., Viejo, R. M. & Fernández, C. 2002. Density-dependent regulation in an invasive seaweed: responses at plant and modular levels. *Journal of Ecology*. 90: 820-829.
- 馬場将輔 2007. ホンダワラ類 8 種の初期成長に及ぼす温度と光量の影響. 海洋生物環境研究所研究報告 10: 9-20.
- 遠藤光・山本圭吾・西垣友和・竹野功壘 2010. 攪拌培養条件下における褐藻ホンダワラの葉状部と気胞の形成に対する密度の影響. 京都府農林水産技術センター海洋センター研究報告 32: 29-32.
- 原口展子・村瀬昇・水上譲・野田幹雄・吉田吾郎・寺脇利信 2005. 山口県沿岸のホンダワラ類の生育適温と上限温度. 藻類 53: 7-13.
- Hwang, E. K., Baek, J. M. & Park, C. S. 2007. Assessment of optimal depth and photon irradiance for cultivation of the brown algae, *Sargassum fulvellum* (Turner) C. Agardh. *Journal of Applied Phycology*. 19: 787-793.

- 堀輝三 1993. 藻類の生活史集成 褐藻・紅藻類. 内田老鶴圃. 東京.
- 伊藤龍星・寺脇利信・サトイトシルグレン・北村等 2009. ヒジキ繊維状根の保存, 細断および培養条件. 水産増殖 57: 579-585.
- Kilar, J. A. & Hanisak, M. D. 1988. Seasonal patterns of morphological variability in *Sargassum polyceratum* (Phaeophyta). *Journal of Phycology*. 24: 467-473.
- 北村裕司 2006. なぜ【伊勢ひじき】なのか〜美味しいひじきとは〜. 海藻資源 15: 84-86.
- 松井敏夫・大貝政治・村瀬昇 1994. 褐藻類アカモク・ヤツマタモクの幼体および葉状部の成長に及ぼす光質・光量の影響. 日本水産学会誌 60: 727-733.
- 森田晃央・小黒敏行・齋藤洋一・井上美佐・松田浩一・神谷直明・倉島彰・前川行幸 2014. ヒジキ発芽体の生長および仮根伸長におよぼす水温と光の影響. 藻類 62: 88-92.
- 村瀬昇 2001. 褐藻ノコギリモク *Sargassum macrocarpum* C. Agardh の生態学的研究. 水産大学校研究報告 49: 131-212.
- 西垣友和・山本圭吾・遠藤光・竹野功壘 2010. 阿蘇海で養殖されたホンダワラ科褐藻アカモクの生長と生残. 京都府農林水産技術センター海洋センター研究報告 32: 23-27.
- 西澤一俊・千原光雄 1979. 藻類研究法. 共立出版. 東京.
- 長門祐子・川口栄男 2003. 主枝重量の変動からみた九州北岸志賀島におけるヒジキの季節的消長. 日本水産学会誌 69: 30-35.
- 小河久朗 1986. 海藻の初期発生におよぼす温度と塩分濃度の影響 II. アカモクの仮根形成. 藻類 34: 137-141.
- Pang, S. J., Gao, S. Q. & Sun, J. Z. 2006. Cultivation of the brown alga *Hizikia fusiformis* (Harvey) Okamura: controlled fertilization and early development of seedlings in raceway tanks in ambient light and temperature. *Journal of Applied Phycology*. 18: 723-731.
- Park, C. S., Hwang, E. K., Yi, Y. H. & Sohn, C. H. 1995. Effects of daylength on the differentiation and receptacle formation of *Hizikia fusiformis* (Harvey) Okamura. *The Korean Journal of Phycology*. 10: 45-50.
- 島袋寛盛・寺田竜太・外林純・Nishihara, G. N.・野呂忠秀 2007. 鹿児島県薩摩半島南部における褐藻フタエモク *Sargassum duplicatum* (Fucales, Phaeophyceae) の季節的消長. 日本水産学会誌 73: 454-460.
- 寺脇利信・野沢治治・新村巖 1983. ホンダワラ類の初期形態形成に関する研究 - III. アカモク. 藻類 31: 97-101.
- Uchida, T. 1993. The life cycle of *Sargassum horneri* (Phaeophyta) in laboratory culture. *Journal of Phycology*. 29: 231-235.
- 吉田吾郎・有馬郷司・内田卓志 1995. 褐藻アカモクの初期生長に及ぼす日長, 照度, 水温の影響. 南西海区水産研究所研究報告 28: 21-32.
- 吉田吾郎・新井章吾・寺脇利信 1997. 広島湾大野瀬戸産ノコギリモク幼体の成長に及ぼす光量・水温の影響. 南西海区水産研究所研究報告 30: 137-145.
- Yoshida, G., Murase, N. & Terawaki, T. 1999. Comparisons of germling growth abilities under various culture conditions among two *Sargassum horneri* populations and *S. filicinum* in Hiroshima Bay. *Bull. Fish. Environ. Inland Sea*. 1: 45-54.
- 吉田吾郎・吉川浩二・寺脇利信 2003. アカモク促成種苗に観察された二季成熟について. 藻類 51: 173-175.
- 吉田忠生 1998. 新日本海藻誌. 内田老鶴圃. 東京.
- Zou, D. & Gao, K. 2005. Photosynthetic characteristics of the economic brown seaweed *Hizikia fusiforme* (Sargassaceae, Phaeophyta), with special reference to its "leaf" and receptacle. *Journal of Applied Phycology*. 17: 255-259.
- Zou, D., Gao, K. & Ruan, Z. 2006. Seasonal pattern of reproduction of *Hizikia fusiformis* (Sargassaceae, Phaeophyta) from Nanao Island, Shantou, China. *Journal of Applied Phycology*. 18: 195-201.

(Received Aug. 27, 2010; Accepted Jun. 3, 2014)