

山口県沿岸のヒジキの生育適温と生育上限温度

村瀬 昇^{1*}, 阿部真比古¹, 野田幹雄¹, 杉浦義正²

The Optimal and Upper Critical Temperatures of *Sargassum fusiforme* from Yamaguchi Prefecture

Noboru Murase^{1*}, Mahiko Abe¹, Mikio Noda¹ and Yoshimasa Sugiura²

Abstract : In order to the optimal and upper critical temperature for growth in *Sargassum fusiforme* collected from Yamaguchi prefecture, we carried out in the laboratory culture at 5°C interval from 5°C to 35°C and 1°C interval from 30°C to 35°C under the light intensity of 100μmol photons m⁻² s⁻¹, respectively. The optimal temperature of main branch in *S. fusiforme* after 15 days culture was the range of 15 °C to 30°C. The upper critical temperature of main branch in *S. fusiforme* was 32°C.

Key words : *Sargassum fusiforme*, Growth, Optimal temperature, Upper critical temperature

緒 言

ヒジキ *Sargassum fusiforme* はホンダワラ科ホンダワラ属に属する大型の多年生褐藻である。ヒジキは岩礁域の潮間帯下部に群落を形成し、日本の北海道南西岸から沖縄本島南東岸まで、香港、中国および韓国に分布する^{1,2)}。しかし、潮汐差の小さい日本海では本種の分布域が限られ、青森県から能登半島では粟島を除いて生育せず、能登半島以南の日本海沿岸では点在して生育している²⁾。一方、ヒジキは古くから食用として利用され、国内では採藻漁および養殖種苗用に幼体採取が行われているため³⁾、天然ヒジキ群落の資源動態を把握し、管理する必要がある。

近年、地球温暖化に伴う海水温上昇が問題となり、日本近海では2013年までの約100年間にわたる海域平均海面水温の上昇率が+1.08°C/100年と報告されている⁴⁾。潮間帯に生育する天然ヒジキ群落にとっては、特に夏季において高水温による影響を受けることが懸念される。ヒジキ群落を保全し、安定した資源量を確保するとともに、温暖化に伴う分布変化を予測するためには、本種の生育温度特性として生育適温と生育上限温度を明らかにする必要がある⁵⁾。

ヒジキの初期生長に及ぼす温度の影響については、幼胚から培養した発芽体で精査され、生育上限温度が32°Cと報告されている⁶⁾。一方、天然海域から採集した藻体の生育上限温度については、藻体が伸長しているため生長点を含む主枝の一部（主枝先端部）を用いることが多く、これまで山口県沿岸のホンダワラ類9種⁷⁾、新潟県沿岸のホンダワラ類5種⁸⁾で明らかになっているが、ヒジキでは調べられていない。

本研究では、ヒジキの生育温度特性を明らかにすることを目的として、天然ヒジキ群落から採集した藻体の主枝先端部を用いて、詳細な温度別培養実験を実施し、生育適温および生育上限温度を明らかにした。

材料と方法

材 料

材料には、2012年10月に山口県下関市吉見沿岸で採集した全長10cm程度のヒジキを用いた。採集したヒジキについては、葉、主枝および生長点に損傷が認められない藻体を選別し、藻体上の付着物を取り除いた後、流水水下で1晩置いた。その後、生長点を含む主枝先端部（長さ約1cm）

¹ 水産大学校生物生産学科 (Department of Applied Aquabiology, National Fisheries University)

² 水産大学校食品科学科 (Department of Food Science and Technology, National Fisheries University)

* 別刷り請求先 (Corresponding author: murasen@fish-u.ac.jp)

を切り出し、温度別培養実験を始めるまで予備培養を行った。予備培養では温度 20°C、光量 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期 12L:12D とし、光源には三波長形昼白色蛍光灯 (National, FL20SS・EX-N/18) を用いた。培養液には 1000 mL あたり 10 mL の ES - enrichment と KI を加えた 1/2 濃度の PESI 培地を用いた⁹⁾。培養容器には 1000ml の培養フラスコを用い、10 個体分の主枝先端部を入れて 3 日間通気して培養した。

温度別培養実験

温度別培養実験では 5°C から 35°C までの 5°C 間隔の温度条件によって生育適温を求めるとともに、30°C から 35°C までの 1°C 間隔に設定した詳細な温度条件下によって生育上限温度を求めた。5°C 間隔の培養実験では光照射型空調式恒温庫 (三洋電機, MIR153)、1°C 間隔の実験では流水式温度勾配培養装置を用いた^{5,7)}。温度別培養実験では、予備培養と同様に光量 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、明暗周期 12L:12L、光源に三波長形昼白色蛍光灯 (National, FL20SS・EX-N/18) を用いた。また、培養液は 1/2 濃度の PESI 培地とし、培養容器には 1000ml の培養フラスコを用い、そこに培養液とともに予備培養後の試料を 6 個体入れ、通気して培養した。温度別培養実験に用いた予備培養後の試料は、全長 1.1 ~ 1.4cm、湿重量 0.14 ~ 0.68g および葉数 2 ~ 6 枚であった。

生長測定については主枝長、湿重量および葉数を実験開始から 3 日ごとに 15 日間測定した。生長測定時には培養液を交換した。ヒジキの生長は相対生長率 (RGR) を次式により求めて評価した。

$$\text{RGR} (\% \text{ day}^{-1}) = \{ \ln (\text{培養 15 日目の値}) - \ln (\text{培養開始日の値}) \} / \text{培養日数} \} \times 100$$

各温度間の相対生長率の相違については、データ解析ソフト (カイエンス, KyPlot 5.0) を用いて Tukey-Kramer の多重比較検定を行った。本実験で判断した枯死については、葉状部が黒色に変色し、柔らかくなり、さらに生長点の脱落が認められた場合とした。

結 果

5°C 間隔での温度別生長

5°C から 35°C までの 5°C 間隔でのヒジキの主枝長から求めた 15 日間の相対生長率 (RGR) を Fig. 1A に示す。RGR は 25°C 区で $6.68 \pm 0.90 \% \text{ day}^{-1}$ (平均 \pm SD, n=6) と最も高い値を示した。次いで 30°C 区が $5.58 \pm 1.42 \% \text{ day}^{-1}$ 、20°C 区

が $4.82 \pm 1.44 \% \text{ day}^{-1}$ 、15°C 区が $3.38 \pm 0.78 \% \text{ day}^{-1}$ 、10°C 区が $2.32 \pm 0.56 \% \text{ day}^{-1}$ および 5°C 区が $0.43 \pm 0.75 \% \text{ day}^{-1}$ の順であった。

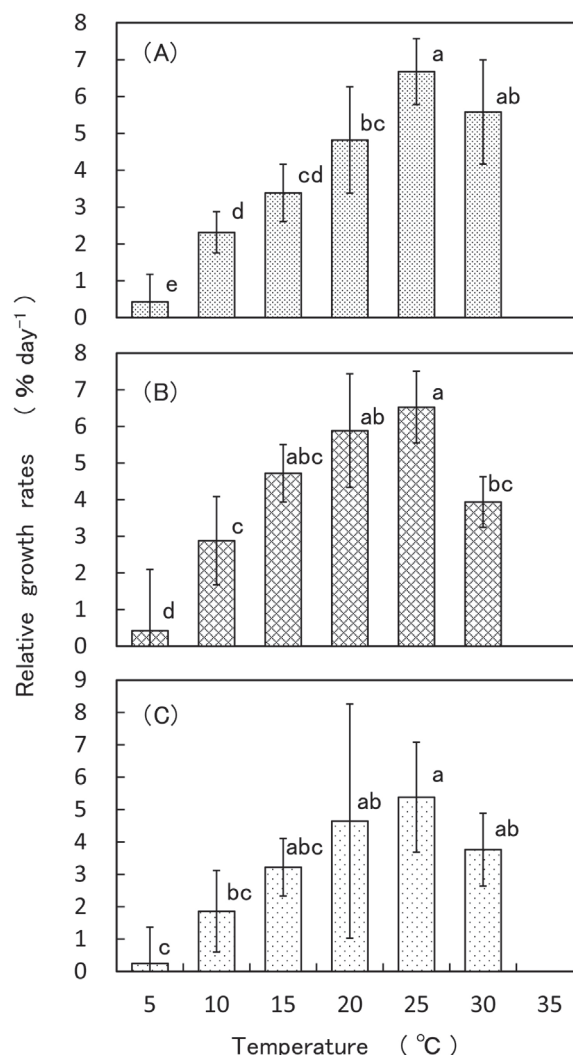


Fig. 1. Relative growth rates of main branch length (A), wet weight (B) and the number of leaves (C) in *Sargassum fusiforme* at 5°C interval from 5°C to 35°C, respectively. The culture experiments were carried out under the light intensity of 100 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for 15 days. Each value is the mean of six samples (mean \pm SD). Different letters on bars represent significantly different according to Tukey - Kramer's multiple comparison test ($P < 0.05$).

35°C 区では培養 3 日目以降、葉状部の柔軟化と黒色化がほとんどの個体で認められ、6 日目までにすべての個体で葉や生長点が脱落し、枯死した (Fig. 2)。RGR は 25°C 区と 5°C 区、10°C 区、15°C 区および 20°C 区との間でそれぞれ有意な差が認められた ($P < 0.05$)。



Fig. 2. Photograph showing *Sargassum fusiforme* cultured for 6 days at 35°C .

5°C間隔でのヒジキの湿重量から求めた15日間のRGRをFig. 1Bに示す。RGRは25°C区で $6.53 \pm 0.98 \% \text{ day}^{-1}$ と最も高い値を示した。次いで20°C区が $5.88 \pm 1.55 \% \text{ day}^{-1}$, 15°C区が $4.72 \pm 0.78 \% \text{ day}^{-1}$, 30°C区が $3.94 \pm 0.69 \% \text{ day}^{-1}$, 10°C区が $2.88 \pm 1.20 \% \text{ day}^{-1}$ および5°C区が $0.42 \pm 1.67 \% \text{ day}^{-1}$ の順であった。35°C区では前述のように6日目までにすべての個体で枯死した。RGRは25°C区と5°C区, 10°C区および30°C区との間でそれぞれ有意な差が認められた ($P < 0.05$)。

5°C間隔でのヒジキの葉数から求めた15日間のRGRをFig. 1Cに示す。RGRは25°C区で $5.38 \pm 1.70 \% \text{ day}^{-1}$ と最も高い値を示した。次いで20°C区が $4.64 \pm 3.62 \% \text{ day}^{-1}$, 30°C区が $3.77 \pm 1.12 \% \text{ day}^{-1}$, 15°C区が $3.22 \pm 0.89 \% \text{ day}^{-1}$, 10°C区が $1.86 \pm 1.26 \% \text{ day}^{-1}$ および5°C区が $0.25 \pm 1.12 \% \text{ day}^{-1}$ の順であった。35°C区では前述のように6日目までにすべての個体で枯死した。RGRは25°C区と5°C区および10°C区との間でそれぞれ有意な差が認められた ($P < 0.05$)。

1°C間隔での温度別生長

30°Cから35°Cまでの1°C間隔でのヒジキの主枝長から求めた15日間のRGRをFig. 3Aに示す。RGRは31°C区が $6.18 \pm 1.57 \% \text{ day}^{-1}$, 30°C区が $5.58 \pm 1.42 \% \text{ day}^{-1}$, および32°C区が $3.31 \pm 1.58 \% \text{ day}^{-1}$ の順であった (Fig. 4)。33°C区では12日目までに, 34°C区では9日目までに, 35°C区では6日目までにすべての個体が枯死した。RGRは31°C区と32°C区との間で有意な差が認められた ($P < 0.05$)。

1°C間隔でのヒジキの湿重量から求めた15日間のRGRをFig. 3Bに示す。RGRは30°C区が $3.94 \pm 0.69 \% \text{ day}^{-1}$, 31°C区が $1.59 \pm 0.79 \% \text{ day}^{-1}$ および32°C区が $-0.39 \pm 2.18 \% \text{ day}^{-1}$ の順であった。33°C区以上では前述のようにすべての個体が枯死した。RGRは30°C区と31°C区および32°C区との間で有意な差が認められた ($P < 0.05$)。

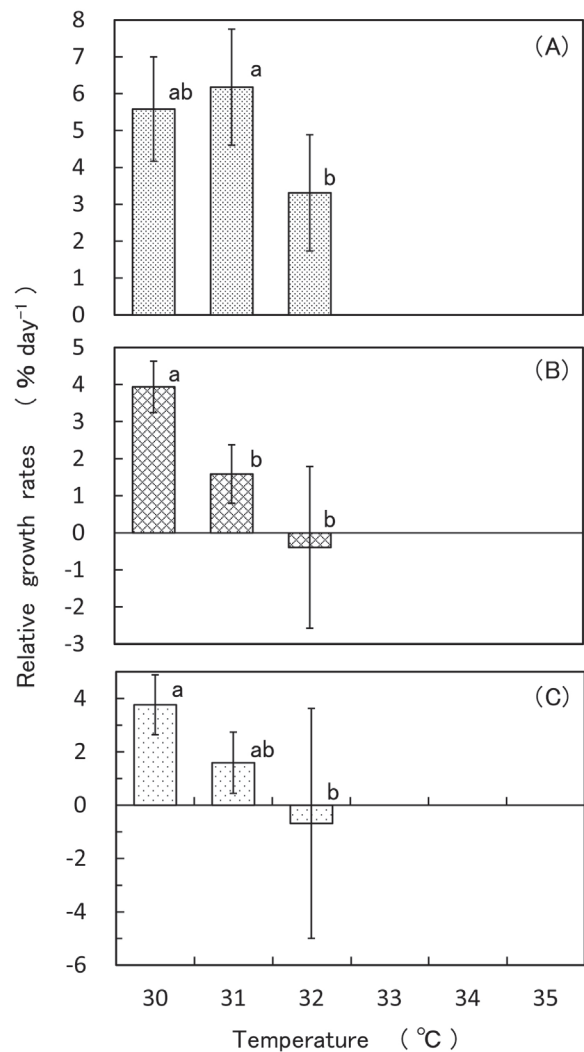


Fig. 3. Relative growth rates of main branch length(A), wet weight(B) and the number of leaves (C) in *Sargassum fusiforme* at 1°C interval from 30°C to 35°C , respectively. The culture experiments were carried out under the light intensity of $100 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for 15 days. Each value is the mean of six samples (mean \pm SD). Different letters on bars represent significantly different according to Tukey - Kramer' s multiple comparison test ($P < 0.05$).



Fig. 4. Photograph showing *Sargassum fusiforme* cultured for 15 days at 32°C. Arrows show the growing points.

1°C間隔でのヒジキの葉数から求めた15日間のRGRをFig. 3Cに示す。RGRは30°C区が $3.77 \pm 1.12 \% \text{ day}^{-1}$, 31°C区が $1.59 \pm 1.15 \% \text{ day}^{-1}$ および32°C区が $-0.68 \pm 4.31 \% \text{ day}^{-1}$ の順であった。33°C区以上では前述のようにすべての個体が枯死した。30°C区と32°C区との間で有意な差が認められた ($P < 0.05$)。

考 察

本研究では、天然群落から採集したヒジキの主枝先端部を用いて、まず生育適温を明らかにするために、5°Cから35°Cまでの5°C間隔の温度条件下で培養を行った。その結果、相対生長率(RGR)は25°C区で最も高い値を示し、部位別にみると主枝長が25~30°C、湿重量が15~25°Cおよび葉数が15~30°Cの各温度範囲で増加した。したがって、ヒジキの生育適温は25°Cで、生育適温範囲は15~30°Cと広いことが明らかとなった。

日本沿岸の海藻相と温度環境との関係からヒジキが生育可能な温度範囲については、高水温期で20~28°Cであることが知られている¹⁰⁾。また、ヒジキが生育する福岡県志賀島北部のヒジキでは7月(26.6°C)に主枝長が最大(平均17.7cm)であった¹¹⁾。さらに、神奈川県小田湾では、夏季の詳細な観察によって8月(26°C)には若い主枝が認められ、生長の良好な藻体では全長が約15cmであったと報告された¹²⁾。このように天然ヒジキが25°Cを超える温度でも伸長して分布が確認されることは、主枝長が良好に増加する温度範囲が25~30°Cであったという本培養実験結果を支持していると推察された。

本研究と同様な培養実験から藻場構成種の生育適温を求めた研究としては、これまでにホンダワラ類9種について報告されている⁷⁾。これによると生育適温が15~20°Cのアカモク *Sargassum horneri*, マメタワラ *S. piluliferum*, イソモク *S. hemiphylum* およびトゲモク *S. micracanthum* は低温型、20~25°Cのヤツマタモク *S. patens* とホンダワラ *S. fulvellum* および25°Cのノコギリモク *S. macrocarpum* は高温型、10~25°Cのジョロモク *Myagropsis myagroides* および15~25°Cのウミトラノオ *S. thunbergii* は広温型にタイプ分けされている。本研究によるヒジキの15~30°Cという生育適温範囲は、前述したウミトラノオの生育適温よりもやや高く、その温度範囲も広いことから高温・広温型と考えられる。

本研究では、35°C区でのヒジキが培養3日目以降、ほとんどの藻体が黒色化および柔軟化し、6日目までにすべての個体で葉や生長点に脱落が認められ、枯死した(Fig. 2)。したがって、ヒジキの生育上限温度は30°Cから35°Cの間に存在すると考えられた。そこで、1°C間隔の詳細な温度条件下において、ヒジキの生長を調べたところ、33°C区では12日目までに、34°C区では9日目までに、35°C区では6日目までにすべての個体が枯死し、高温ほど早期に枯死流失する傾向が認められた。32°C区の藻体では、培養15日目の相対生長率が湿重量で $-0.39 \% \text{ day}^{-1}$ とわずかに低下した(Fig. 3B)。これは、主枝長の相対生長率が $3.31 \% \text{ day}^{-1}$ と高い値を示すものの(Fig. 3A)、葉数のそれが $-0.68 \% \text{ day}^{-1}$ と葉の脱落が新生を上回ったためと推察された(Fig. 3C)。しかし、32°C区でのヒジキは、主枝が伸長したこと、すべての藻体で主枝先端部にある生長点の脱落が認められなかったことから(Fig. 4, 矢印)、生存している

と判断した。したがって、ヒジキの生育上限温度は32°Cであるとした。

詳細な培養実験によるヒジキの生育上限温度については、千葉県沿岸で採取された幼胚からの発芽体で調べられ、32°Cであることが報告された⁶⁾。本研究では10月に採集した全長10cm程度のヒジキ藻体の主枝先端部を用いており、前述の研究とは材料の採集地や生長段階、培養条件に違いがあるが、発芽体と主枝先端部での生育上限温度は同じ32°Cであった。しかし、ヒジキと同じホンダワラ属のオオバモク *S. ringgoldianum* とウミトラノオの生育上限温度は、発芽体では前者が32°C、後者が34°C、成体（主枝）では両種とも31°Cで、発芽体のほうが高い値であった¹³⁾。また、ワカメ属のワカメ *Undaria pinnatifida* とヒロメ *U. undarioides* の生育限界温度は、幼胞子体では前者が27°C、後者が26°C¹⁴⁾、配偶体では両種とも28°Cで¹⁵⁾、配偶体のほうが高い値であった。このように海藻の生育段階の違いによって生育上限温度が異なることが示されている。今後は、同種間では生長段階や生育地などの違い、異種間では種の違いに伴う生育上限温度が容易に比較できるように、培養条件を統一することが望ましい。

これまで培養実験によって明らかにされた藻体の主枝先端部を用いたホンダワラ類の生育上限温度は、山口県沿岸のアカモク、トゲモクおよびイソモクが27°C、マメタワラ、ホンダワラおよびジョロモクが30°C、ヤツマタモク、ノコギリモクおよびウミトラノオが31°Cと報告された^{5, 7)}。これら潮下帯に分布する9種と比べ、本研究でのヒジキの生育上限温度は最も高い値を示した。ヒジキは潮間帯下部に分布し、潮汐による干満の影響で急激な温度変化を受ける。特に夏季の低潮時には、高い温度下にさらされる。したがって、ヒジキは潮間帯下部のような高い温度環境下で生育できる優れた高温耐性を有する海藻であることが培養によって確認できた。

一方、ヒジキの増養殖においては、種苗生産を行う際の温度管理として、15~30°Cが生長に適する温度範囲であることが示された。しかし、33°C以上ではヒジキが枯死流失することから、夏季には32°Cを超えないように種苗生産時の温度管理を慎重に行う必要がある。

今後、地球温暖化や暖流の影響が強く受ける沿岸において、生育上限温度を上回る高水温環境下が数日間連続する場合には、ヒジキ群落の衰退が懸念される。ヒジキだけでなく、海水温の上昇に伴う藻場への盛衰に関する影響を予測し、評価するためには、藻場を構成する多様な種を対象に全国各地で本研究と同様な培養実験を実施し、生育適温

および生育上限温度を集積する必要がある。

謝 辞

本研究に協力いただいた水産大学校生物生産学科生物環境学講座藻場生態系保全研究室の横山夏美氏、山本沙季氏および崎山和昭氏に感謝申し上げる。本研究は平成24年度学内横断プロジェクト推進費「里海の保全、活用による漁村振興」における「山口県沿岸のヒジキにおける天然群落の動態、増養殖及び機能性に関する研究」の一環で実施されたもので、関係各位に謝意を表する。

文 献

- 1) 吉田忠生：ヒバマタ目類. 大野正夫（編著），有用海藻誌. 内田老鶴圃，東京，111-132（2004）
- 2) 新井章吾：ヒジキ. 堀輝三（編），藻類の生活史集成 第2巻 褐藻・紅藻類. 内田老鶴圃，東京，166-167（1993）
- 3) 四井敏雄：ヒジキ. 森勝義（編），水産増養殖システム 貝類・甲殻類・ウニ類・藻類. 恒星社厚生閣，東京，57-62（2005）
- 4) 気象庁：海面水温の長期変化傾向（日本近海），海洋の健康診断表.（2014）
http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html
- 5) 村瀬昇：水温—高水温の影響の現れ方. 藤田大介，村瀬昇，桑原久実（編著），磯焼け対策シリーズ3 藻場を見守り育てる知恵と技術. 成山堂書店，東京，33-38（2010）
- 6) 馬場将輔：ホンダワラ類8種の発芽体の高温耐性. 海生研研報，**14**，25-28（2011）
- 7) 原口展子，村瀬昇，水上謙，野田幹雄，吉田吾郎，寺脇利信：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（2005）
- 8) 馬場将輔：新潟県産ホンダワラ類5種の成長と生残に及ぼす温度の影響. 海生研研報，**19**，53-61（2014）
- 9) Tawewaki M.: Formation of a crustacean sporophyte with unilocular sporangia in *Scytosiphon lomentaria*. *Phycologia*, **6**, 62-66（1966）
- 10) 須藤俊造：海藻・海草相とその環境条件との関係をより詰めて求める試み. 藻類，**40**，289-305（1992）
- 11) 長門祐子，川口栄男：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. 日水誌, **69**, 30-35 (2003)
- 12) 寺脇利信: 三浦半島小田湾におけるヒジキの生長と成熟. 水産増殖, **33**, 115-118 (1985)
- 13) 馬場将輔: オオバモクとウミトラノオの成長と生残に及ぼす温度の影響. 海生研研報, **14**, 1-8 (2011)
- 14) Morita T., Kurashima A., Maegawa M.: Temperature requirements for the growth of young sporophytes of *Undaria pinnatifida* and *Undaria undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol Res*, **51**, 266-270 (2003)
- 15) Morita T., Kurashima A., Maegawa M.: Temperature requirements for the growth and maturation of the gametophytes of *Undaria pinnatifida* and *U. undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol Res*, **51**, 154-160 (2003)