

## 褐藻ヒジキ *Sargassum fusiforme* の挟み込み養殖と 人工種苗生産に関する研究\*

伊藤龍星\*\*

### A Study on Hiziki, *Sargassum fusiforme*, Cultivation by Clipping Seedlings between Culture Ropes and Its Artificial Seedling Production

RYUSEI ITO

#### Abstract

Hiziki, *Sargassum fusiforme*, has been traditionally used as food in Japan. However, over 80% of the domestic demand is supplied by imports from Korea and China. Domestic Hiziki has become increasingly important in recent years due to the natural food boom and the mandatory indication of origin of products. In the present study, cultivation of Hiziki was tested by clipping natural seedlings between culture ropes. In addition, artificial seedling production and cultivation of Hiziki were also investigated by cultivating chopped filamentous roots removed from holdfasts.

Natural seedlings of Hiziki were clipped between culture ropes cultivated off Kunimi, and Nakatsu, Oita, Japan. Cultivation began in November using 10-15cm-length seedlings. Cultivation in Kunimi was conducted on rafts while that in Nakatsu used support pillars placed in the tideland. Growth of Hiziki were observed and measured on a regular basis and these were harvested in May of the following year. Natural seedlings of Hiziki cultured in both Kunimi and Nakatsu grew up to over 1m in length in May of the following year and production yields were over 10kg wet weight per 1m of the culture rope. Various fouling organisms attached to cultured Hiziki as the temperature increased, indicating that antifouling measures must be considered.

After the harvest in May, holdfasts that were still remaining on cultivation ropes were collected, loosened to separate the filamentous roots, washed in the laboratory and then stored in a culture medium at a low temperature under a dark condition. After 2 months of storage, the filamentous roots were chopped and cultured in the laboratory at 23 °C in 120-230  $\mu$  /m<sup>2</sup>/s, 12L:12hD for 3 months. These were then transferred in outdoor tanks and cultured for 2 months. Artificial seedlings grew to over 10cm in length. These were clipped between culture ropes and cultured in Nakatsu. Artificial seedlings also grew to over 1m in length and production yields exceeded 10kg wet weight/ m of the culture rope by harvest time. These results proved that cultivation of Hiziki using the artificial seedlings is possible.

---

\* 本報告は、長崎大学審査学位論文を基本とし、その一部を改変した。

\*\* 現所属：大分県 農林水産部 水産振興課（大分市大手町 3-1-1）

## 目 次

第1章	緒 言	2 3
第2章	天然藻体のロープへの挟み込みによるヒジキ養殖	2 4
第1節	海面における浮き流し方式による養殖	2 5
	材料および方法	
	結 果	
	考 察	
第2節	干潟域における支柱を利用した養殖	3 0
	材料および方法	
	結 果	
	考 察	
第3節	部位別ヒジキ種苗の生長と生産量	3 6
	材料および方法	
	結 果	
	考 察	
第3章	繊維状根の細断によるヒジキ人工種苗生産技術の開発	3 9
第1節	ヒジキ繊維状根の保存、細断および培養条件の検討	3 9
	材料および方法	
	結 果	
	考 察	
第2節	種苗の量産化の検討と海域での生長	4 4
	材料および方法	
	結 果	
	考 察	
第4章	総合考察	4 8
要 旨		5 3
謝 辞		5 4
参考文献		5 4

## 第1章 緒 言

現在、地球上には約 25,000 種の海藻類が生息していると言われる<sup>1)</sup>。このうち我が国には、南北の長い海岸線や黒潮と親潮の二大潮流の影響により、約 1,500 種が分布している<sup>2)</sup>。これらの海藻の多くは藻場を形成し、魚類をはじめとする水棲生物の保育場や生息場となり、あるいは産卵場としての役割や餌料供給の場など、生物生産にとって非常に重要な役割をはたしている。また、海藻類の栄養塩吸収や、光合成による CO<sub>2</sub> 吸収機能なども生態系の安定には欠かせないものである<sup>3)</sup>。

このように生態系にとって重要な海藻類であるが、近年の埋め立てなどにより、我が国の沿岸の藻場面積は、1973 年以降の約 20 年間で約 1 万 ha 減少したと言われている<sup>4)</sup>。さらに最近では、全国的な磯焼け現象が確認され、1988～1992 年に行われた第 4 回自然環境保全基礎調査<sup>5)</sup>によると、磯焼けが原因とされる国内の藻場消滅面積は 1,016ha (消滅面積のうちの 14.7%) とされている<sup>6)</sup>。特に九州沿岸では近年、藻食性魚類による海藻類への食害被害による藻場の衰退がみられることから<sup>7,8)</sup>、その対策が急務となっている。

大分県の場合、前述の第 4 回自然環境保全基礎調査では 228 カ所、3,990ha の藻場が確認されているが、1979 年に行われた第 2 回調査<sup>10)</sup>に比べると 222ha (5.3%) 減少しており、特に別府湾海域では、埋め立てなどによる直接改変で 9 カ所、142ha の藻場が消滅したとされている<sup>9)</sup>。また、別府湾海域のアマモ場は、第 2 回調査では 61ha、第 4 回調査では 85ha であったものが、1996～97 年度の第 5 回調査では 15ha (第 4 回の 18%減) にまで減少している<sup>11)</sup>。さらに本県では、1994 年もしくは 1997 年頃より、県南域でいわゆる磯焼け現象が見られるようになり<sup>12)</sup>、旧蒲江町沿岸一帯での 1998 年の調査<sup>13)</sup>では 514ha と、1988 年の前回調査時の 557ha よりも 7%程度の減少が認められた。特に県下最南部の名護屋地区では、前回 69ha あった藻場が、優占種であったカジメ類の減少で 38ha (48%) にまで激減する状況となり、磯焼けの持続原因として、藻食性魚類による食害が関与していることが明らかにされた<sup>14)</sup>。その後、海域での仕切網等を使い、藻食性魚類の食圧を下げることで、藻場が回復することが確認されており<sup>15)</sup>、今後は実用的規模での回復対策が課題とされている。

以上のような本県での藻場に関する調査は、その手

法や調査の季節等が必ずしも統一されておらず、藻場面積や植生を一律に比較することは困難である。しかし、長期的な視点から見ると、本県の藻場の減少傾向は疑う余地はない。また、最近の研究から、瀬戸内海の多くの魚種で、灘別の藻場面積と漁獲量との相関が明らかにされつつあり<sup>16)</sup>、藻場や海藻と水産資源との深い関わり、重要性が再認識されている。本県においても藻場の回復や藻場の造成は、減少を続ける水産資源の維持・回復のための最重要対策として、緊急に取り組むべきものである。

一方、海藻は食糧資源として、また各種産業の原材料としても重要な生物群である。世界的にみると、各種産業の原材料として利用されている場合が多く、キリンサイからカラギーナン (アイスクリーム等の食品用、化粧品) が、オゴノリから寒天 (食品用、金属加工バインダーなどの工業用、歯形やカプセル等の医療用) が、コンブからはアルギン酸 (アイスクリーム、結着剤等の食品用、歯形や手術用縫い糸などの医療用、化粧品) が生産されている<sup>1)</sup>。また、近年では海藻多糖類の用途拡大で、熱帯域のキリンサイ養殖や南米のオゴノリ養殖、中国のコンブ養殖など、養殖による生産量の増大が図られている<sup>16)</sup>。さらに最近では、海藻類のバイオ燃料としての有効性も検討されるなど<sup>17)</sup>、今後、海藻類の需要は一段と増加していくものと思われる。

食糧資源としては、世界的にみるとその役割はまだ少ない状況にあるが、我が国では古くから盛んに食品として利用されている。日本には約 1,500 種の海藻が分布していることは先に述べたが、このうち現在 50 種以上が食用とされている。我が国における主な食用海藻の天然の漁獲量および養殖生産量 (湿重量) は、ノリ (*Porphyra* spp.) が最大で約 36 万トン (ほとんど養殖)、コンブ類 (*Laminaria* spp.) 14 万トン (天然 9 万トン、養殖 5 万トン)、ワカメ類 (*Undaria* spp.) 6 万 4 千トン (天然 4 千トン、養殖 6 万トン)、ヒジキ (*Sargassum fusiforme*) 6 千トン (すべて天然)、テングサ類 (*Gelidium* spp.) 2 千トン (すべて天然)、その他 2 万 5 千トン (天然 1 万トン、養殖 1 万 5 千トン)、総計約 60 万トンである<sup>18)</sup>。これらの内、近年ヒジキの需要が急速に増大している。

ヒジキは褐藻綱ヒバマタ目ホンダワラ科に属し、国内では北海道南部、本州太平洋岸、四国、九州、本州日本海岸中・南部、南西諸島、国外では朝鮮半島や中国南部の潮間帯下部の岩礁帯に分布し<sup>19)</sup>、単独で藻場

を形成する。本種はワカメやコンブ、モズクと同じ綱に属し、古来より食用として利用されてきた<sup>20)</sup>。カリウム、カルシウム、マグネシウム、鉄等のミネラルが多く含まれているのが特徴である<sup>21)</sup>。

本種の主産地は長崎県、千葉県、三重県、大分県、愛媛県等で、国内では年間8,000～10,000トン程度（湿重量）の生産があり<sup>22)</sup>、これらはすべて天然物である。しかし現在、国内で取り扱われているヒジキの80%以上が韓国や中国からの養殖を主体とする輸入品で占められ、国産ヒジキは10～15%に過ぎない<sup>22)</sup>。また、近年の食の安全・安心に対する意識の高まりに加え、2004年9月のJAS法改正によるヒジキ加工食品の原料原産地表示の義務化<sup>23)</sup>の影響で、国産ヒジキの価格は急上昇し、素干し乾燥品で1kg当たり2,000円を超える浜も見られている<sup>24)</sup>。このため、生産サイドのみならず、流通、加工業界からも、国産ヒジキの増産と増養殖の推進が強く求められている状況にある。

これまでヒジキの生態や増殖については多くの研究がなされてきた<sup>25-38)</sup>。しかし、養殖に関する報告はほとんどない。韓国や中国における養殖では、天然の藻体をロープに挟み込んで海域展開が行われているが、その概要を紹介した例も大野<sup>39)</sup>やSohn<sup>40)</sup>がある程度で、具体的手法や生長経過等の詳細についての報告はない。

そこで、第2章第1節では国内において本種の養殖が可能であることを実証するため、大分県国東市国見町沿岸において、浮き流し方式による天然藻体のロープへの挟み込みによる養殖を行い、本種の生長経過や生産量、養殖ヒジキの形態的特徴を明らかにした。また、商品価値に深く関与する付着生物の着生状況や、収穫適期等についての検討を行った<sup>41)</sup>。

第2章第2節では、前節で述べた浮き流し方式による養殖とは異なり、ロープへの挟み込みによる養殖を干潟域に適用した。通常、干潟域や砂質海岸には本種は分布しないため、初めての試みと言える。近年、我が国では干潟の主な漁業であるアサリ漁業やノリ養殖業が衰退しており、これらに代わる漁業育成が求められている。そこで本節では、大分県中津市干潟域のノリ養殖漁場において、ノリ養殖で使用する支柱を利用してのヒジキ養殖を試みた。干潟域での養殖は、前節の浮き流し方式とは異なり、干出により乾燥や大気温度の影響を受ける。そこで干出時間とヒジキの生長や付着生物との関係を検討した。

以上の第1節、第2節を通して本種の浮き流し方式、および干潟での支柱方式による養殖が可能であることが明らかとなった。これらの種苗は天然ものを付着器

ごと採取しているが、過剰な採取はヒジキ漁場の荒廃を招く懸念もある。ところで、キリンサイ類 *Eucheuma* spp.<sup>20)</sup> やクビレズタ *Caulerpa lentillifera*<sup>42)</sup> の養殖においては、種苗とする藻体の切断と再生による栄養繁殖が生産量増大に大きな役割を果たしている。そこで、ヒジキ養殖においても直立部のみを種苗とした養殖や、藻体の切断と再生による栄養繁殖を利用した養殖が可能となれば、種苗採取量の軽減につながる事が期待される。このため第2章第3節では、ヒジキの付着器を使用せず、直立部のみを種苗とした場合や、切断された藻体の各部位を種苗とした場合の養殖試験を行い、最も生産量の多い種苗の利用形態を明らかにした。

先の第2章では、天然藻体を種苗とした挟み込みによるヒジキ養殖を行ったところ良好な結果が得られた。今後は養殖の普及や規模拡大が予測されるが、天然藻体の過剰な採取で本種資源の荒廃が懸念される。そこで第3章では、収穫後の養殖ロープに残存する本種の付着器に注目した。第3章第1節では、生殖細胞を用いない方法として繊維状根の細断による人工種苗生産の可能性を検討した。すなわち、養殖後にロープに残る付着器を採取したのち、これらを1本ずつの繊維状根にほぐして低温で保存し、細断、培養して多数の種苗を生産する方法である。繊維状根の適切な細断幅を明らかにし、細断後の培養条件である光量や温度などを検討した<sup>43)</sup>。

第3章第2節では、人工種苗量産化のための細断方法として家庭用ミキサーを使用しての繊維状根の細断と培養を行い、人工種苗を完成させた。これらを海域に沖出しして天然種苗との生長や生産量を比較したところ、人工種苗は天然種苗と同等の生長、生産量が得られることを確認した。以上で人工種苗生産技術の基礎的知見を明らかにすることができた。

最後に第4章では、本研究の結果を踏まえて、国内におけるヒジキ養殖の方向性や、今後の展望について、総合的に考察した。

## 第2章 天然藻体のロープへの挟み込みによるヒジキ養殖

第1章で述べたように、韓国や中国では産業的規模でヒジキ養殖が行われているが、日本国内のヒジキ生産は天然藻体の採取のみである。国内での養殖の取り組み事例もほとんどなく、養殖の具体的な方法や、ヒジキの生長、収穫量なども不明な点が多い。しかし、

近年の自然食、健康食志向でヒジキの需要は増加しており、すでに国内総需要の約 8 割は養殖による生産を主体とする韓国からの輸入品で占められている<sup>22)</sup>。さらに、産地表示に対する消費者意識の変革や、2004 年 9 月の JAS 法改正に伴うヒジキを含む原料原産地表示品目の拡大に伴い<sup>23)</sup>、海藻加工流通業界からは国産ヒジキ増産への要望が急激に高まっており、国内におけるヒジキ増養殖の推進が強く求められている。

そこで、第 2 章では天然種苗のロープへの挟み込みによるヒジキ養殖の技術を、各地の海域特性に応じて広く対応できるように、2 つの異なる海域、すなわち第 1 節では、常に一定の水深のある非干出域の海面において浮き流し方式にて養殖試験を行い、第 2 節では、干満差で干出が生じる干潟域において、ノリ養殖で使用する支柱を建てての養殖方法を検討し、国内でのヒジキ養殖技術を実証した。また、第 3 節では、付着器を使用せず直立部のみを種苗とした場合や、藻体の切断と再生による栄養繁殖を利用した養殖試験を行い、それぞれの生長や生産量を比較して、最も生産量の多い種苗の利用形態を明らかにした。

## 第1節 海面における浮き流し方式による養殖

日本の沿岸域の多くを占める非干出域におけるヒジキの養殖方法として、海面にロープで外枠を組み、その枠内にヒジキを挟み込んだ養殖ロープを張り、養殖を行う方法（浮き流し方式）について検討した。ヒジキの生長経過や生産量、養殖ヒジキの形態的特徴を明らかにするとともに、商品価値に深く関与する付着生物の着生状況や収穫適期等についての検討を行った<sup>41)</sup>。

### 材料および方法

#### 種苗の採取、挟み込みおよび沖出し

大分県国東市国見町岐部沿岸 (Fig. 2.1.1)、防波堤内側の岩礁域の潮間帯に生育しているヒジキ藻体を 2000 年 11 月 25 日及び 2001 年 1 月 20 日の 2 回採取して養殖用種苗とした。採取は手で藻体の下部をつかみ、付着器ごと剥ぎ取るようにした。同地のヒジキは、年内に付着生物は見られないが、収穫時期の 4 ~ 5 月に収穫し乾燥すると著しく白化するために商品価値がなく、収穫対象とされていない。

採取後、任意の 20 個体について藻長（藻体の基部から先端まで）と湿重量（付着器部分を除く）を測定し

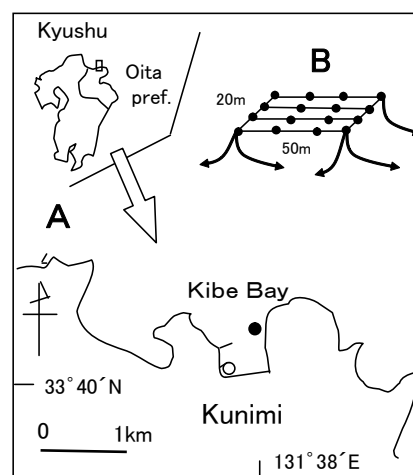


Fig. 2.1.1 Location of the natural habitat where the plants were collected (○) and the cultivation area (●) of Hiziki (*Sargassum fusiforme*) (A). Diagrammatic illustration of the cultivation system (B).

Table 2.1.1 Dates of collection and sizes of Hiziki plants that were used as seedlings

Date of collection	Length (cm±SD)	Wet weight (g±SD)
Nov.25,2000	20.7±8.8	2.0±1.3
Jan.20,2001	40.6±15.1	10.5±6.1

た (Table 2.1.1)。11 月に採取したヒジキは平均藻長 20.7cm、平均重量 2.0g、1 月採取のものは平均藻長 40.6cm、平均重量 10.5g であった。

種苗のロープへの挟み込みは採取の翌日に行った。養殖ロープは、長さ 50m、直径 12mm のポリプロピレン製（戸畑製網（株）3 本撚り 12 打ち）を使用した。両端の 5m を除いた 40m に、種苗を 5cm 間隔で挟み込むようにした。採取したヒジキは 1 株あたり 1 ~ 3 本の主枝を有していたが、挟み込み 1 ヲ所あたりのヒジキ主枝数がおよそ 5 ~ 10 本になるように数株をまとめて挟み込むようにした (Fig. 2.1.2A)。挟み込み作業は 2 名で行い、1 名がロープの撚りを戻し、他の 1 名がそこに種苗を挿入していった。ロープ 40m に対して、種苗の挟み込みに要した時間はおよそ 2 時間 30 分であった。

挟み込みを終えた養殖ロープを同日、種苗採取地と同じ湾内に張り込んだ。張り込み場所及び施設の概要を Fig. 2.1.1 に示した。水深 6m の海域に、外枠を直径 18mm ポリエチレン製ロープで縦 20m、横 50m に組み、四隅を 20kg アンカーで固定し、その中に養殖ロープを張り込んだ。外枠及び養殖ロープは水面に浮く素材であるが、ヒジキの生長や付着物増加による水没を防ぐ

ため、径 30cm のブイを 5m 間隔で取り付けた。

### 生長、形態および付着生物の観察

張り込み後、2001 年 5 月までの間、およそ月 1 回の頻度で生長の観察を行った。生長は任意の 20 株について藻長と湿重量（付着器部分を除く）を測定した。同時に、天然ヒジキとの生長を比較するため、種苗を採取した場所のヒジキについても測定をした。さらに、観察時に養殖ロープ任意の 1m 分（50cm を 2 ヶ所）のヒジキを刈り取り、湿重量（付着器部分を除く）を測定して 1m あたりの生産量を算出した。

養殖ヒジキは生長するに従い、種苗採取地の天然ヒジキと外部形態において相違が見られるようになった。そこで 2001 年 5 月中旬に、養殖ヒジキおよび天然ヒジキ各 30 株を採取して、それぞれについて藻長と重量の関係を解析した。

同時に、養殖および天然ヒジキの形態について検討するため、それぞれ任意の 5 株について、藻体のほぼ中央部分の主枝の長さ 10cm 間における太さと重量、気胞と葉の数と重量を測定した。なお、ヒジキには気胞と葉の区別が困難な形をしているものが時々みられるため<sup>19)</sup>、今回はこれらを区別せず、合計して示した。

また、養殖および天然ヒジキの気胞について、それぞれ任意の 20 個体の長さを測定した。生長測定時には、藻体上の付着生物（肉眼視できるサイズのもの）の観察もあわせて行った。

### 水温測定

養殖場所の北西約 4,000m 沖合において大分県農林水産研究センター水産試験場が毎月上旬に測定している表層水温と、過去 10 年（1997 ～ 2006）の平均値を使用した。

## 結 果

### 水温の季節変化

実験期間を含む 2000 年 10 月～2001 年 9 月、および平均水温の推移を Fig. 2.1.3 に示した。期間中の水温は、平均水温と大きな差は見られなかった。養殖を開始した 11 月には 20℃を下回り、2 月には 10℃を下回って年間最低となった。その後、4 月に入ると 10℃を超えて急激に上昇し、収穫時期となる 5 月には 17℃、6 月 21℃、7 月には 24℃となった。



Fig. 2.1.2 Photographs taken at various stages during cultivation of Hiziki, (*S. fusiforme*). A: Naturally growing plants clipped between strands of the culture rope in November 2000. B: Hiziki culture in May 2001. C: Holdfasts of Hiziki on culture ropes after the harvest. These were 3-4cm in length. D: Naturally growing (a) and cultured (b) plants taken in May 2001, showing difference in morphological characteristics. Scale bars: 5cm.

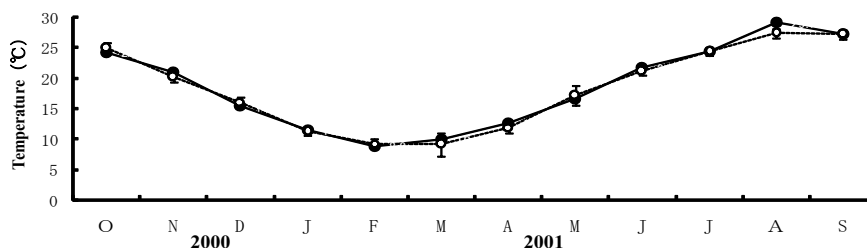


Fig. 2.1.3 Seasonal changes in surface seawater temperature at the cultivation area .Closed circles show values of seawater temperature from October 2000 to September 2001.Open circles show average values of seawater temperature from1997 through 2006. ; vertical bars, SD.

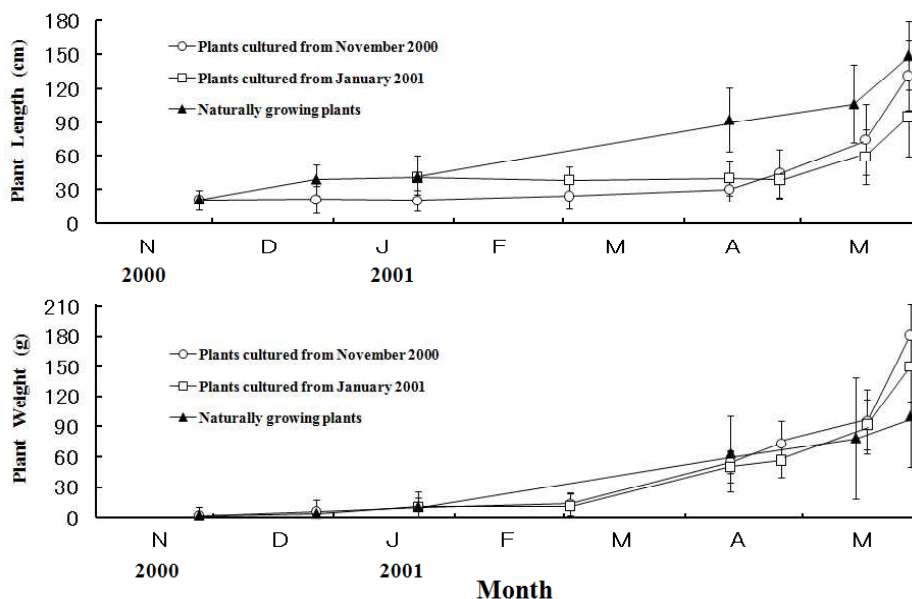


Fig. 2.1.4 Plant length and weight of Hiziki (*S. fusiforme*) cultured from naturally growing plants clipped between the strands of the culture rope. Vertical lines indicate SD.Open circles indicate plants cultured from November 2000; open squares, plants cultured from January 2001; and closed triangles, naturally growing plants.

#### 養殖および天然ヒジキの生長と形態

11月と1月に養殖を開始したヒジキおよび種苗採取地の天然ヒジキについて、平均藻長と平均重量の推移をFig. 2.1.4に示した。

平均藻長においては、冬季、養殖ヒジキの伸長は天然ヒジキと比較して緩やかで、11月開始では翌年4月中旬で44.4cmと、開始時の2倍程度であり、1月開始ではほとんど伸長が見られなかった。その後、水温の上昇に伴い急激に伸長を開始し、5月中旬には11月開始で74.7cm、1月開始で59.4cm、さらに5月下旬には11月開始で131.8cm、1月開始で95.2cmと、いずれも1m前後にまで生長した (Fig. 2.1.2B)。一方、天然ヒジキは冬季にも伸長を続け、4月中旬には92.7cmとすでに養殖ヒジキの2倍以上になっていた。その後、5月中旬には106.9cm、下旬には150.0cmに達した。

平均重量においては、11月開始、1月開始、天然と

もに3月上旬までの増加は緩やかであった。しかし、4月に入ると増加傾向を見せはじめ、中旬にはいずれも50g程度となった。その後、養殖ヒジキは天然ヒジキを上回る勢いで増加し、5月下旬にはその差はさらに広がり、11月開始で181.3g、1月開始は149.7g、天然ヒジキは100.4gであった。

Fig. 2.1.5に養殖ロープ1mあたりのヒジキの生産量を示した。Fig. 2.1.4で示した平均重量の推移と同様、11月、1月開始ともに3月上旬までの生産量の増加は緩やかで、11月開始で1.3kg、1月開始では0.7kgに過ぎなかった。しかし、4月に入ると急激に増加し、4月下旬には11月開始で9.4kg、1月開始で7.0kgになった。さらに5月中旬には11月で12.6kg、1月では8.4kg、5月下旬には11月開始で15.3kg、1月では8.7kgであった (Fig. 2.1.2B)。

養殖期間中、ロープの撚りに挟み込まれたヒジキの



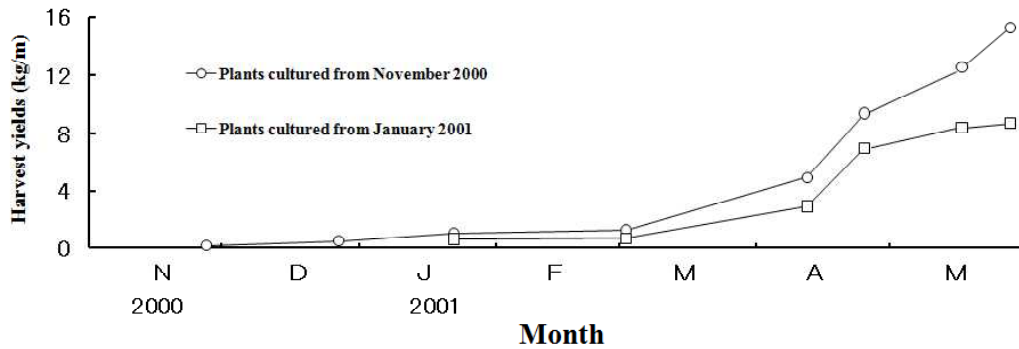


Fig. 2.1.5 Harvest yields of Hiziki (*S. fusiforme*) per 1 m of the culture rope. Open circles indicate plants cultured from November 2000; and open squares, plants cultured from January 2001.

Table 2.1.2 Comparison of morphological characteristics between cultured and naturally growing Hiziki (*S. fusiforme*)

	Plants cultured from November 2000	Naturally growing plants in the collection station
Thickness of the main stipe (mm±SD,n=5)	3.7±0.5 **	2.2±0.1
Weight of main stipe (g±SD,n=5)	1.14±0.4 *	0.54±0.1
Number of vesicles and fronds (number±SD,n=5)	479.2±252.0 *	154.6±54.8
Weight of vesicles and fronds (g±SD,n=5)	10.9±4.4 **	3.1±1.0
Length of vesicles(mm±SD,n=20)	23.2±2.1 **	18.2±3.2

Plants were collected in mid-May 2001.

Samples taken were the middle part of the main stipe and were each 10cm in length.

\*, \*\*: Significant difference between the two groups ( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ )

主枝数には、ほとんど変動は見られなかった。付着器とロープが接した部分では、繊維状根がロープにからみつくようにしっかりと伸長し、収穫時期の 5 月には直径 3～4cm の団子状になっていた (Fig. 2.1.2C)。同部分からは、挟み込み時には見られていなかった新たな藻体が、ロープの撚りを経ずに付着器から直接、数本～十数本発生していた。さらに、養殖ヒジキを一部収穫せずに残しておいたところ、6 月下旬には、観察したすべての藻体で生殖器床の形成が確認された。

2001 年 5 月中旬における、11 月開始の養殖ヒジキおよび種苗採取地の天然ヒジキの藻長と重量との関係を Fig. 2.1.6 に示した。養殖ヒジキは  $y=0.0463x^{1.7235}$  ( $R^2=0.671$ )、天然ヒジキは  $y=0.2032x^{1.2384}$  ( $R^2=0.451$ ) の回帰式で示された。藻長 25cm を超えると養殖ヒジキの重量は天然ヒジキを上回り、藻長 85cm で養殖ヒジキは天然ヒジキのほぼ 2 倍になるなど、長くなるに従い両者の差は拡大した。

養殖ヒジキおよび天然ヒジキの形態について、主枝や気胞等を測定した結果を Table 2.1.2 に示した。養殖ヒジキは天然ヒジキに比べると、主枝は 1.5mm 太く約 2

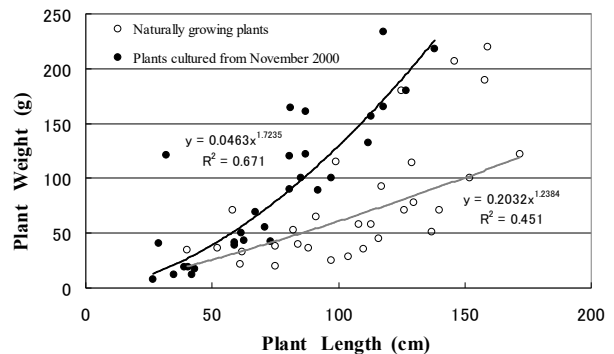


Fig. 2.1.6 Relationship between the plant length and weight of Hiziki (*S. fusiforme*). Open circles indicate plants growing under natural conditions in the collection station and closed circles indicate plants cultured from November 2000. Plants were collected in mid-May 2001.

倍の重さがあった。また、気胞と葉の合計数および重量は約 3 倍を示した。さらに、気胞の長さも 5mm 長いなどすべてにおいて有意差がみられた (t 検定,  $p < 0.05$  又は  $p < 0.01$ ) (Fig. 2.1.2D)。



付着生物の季節変化

2000年12月までは養殖ヒジキ藻体には目立った付着生物は見られなかったが、1月以降は様々な藻類や動物類が付着した (Table 2.1.3)。藻類では、1月には褐藻綱のセイヨウハバノリ *Petalonia fascia* が、2月はさらに紅藻綱のイグス目海藻が見られるようになった。3月には褐藻綱のシオミドロ属海藻が藻体の先端部分に着生し、株によっては藻体のほぼ全面を覆うほど繁茂した。同時期には、緑藻綱アオサ属や褐藻綱クロガシラ科の海藻も散見されるようになり、特に後者は主枝下部の茎の部分に多く付着する傾向が見られた。4月以降、セイヨウハバノリはほとんど見られなくなったが、他の藻類の付着は5月末まで継続し、時期が進むほどひどくなる傾向にあった。動物類では、3月にワレカラ類やヨコエビ類などの端脚目が目立つようになり、4月には藻体主枝の中央部にはヒドロ虫綱のウミシバ類が、主枝の下部には被覆性コケムシ類の付着が見られるようになった。5月中旬には殻長5～8mmのムラサキイガイ *Mytilus galloprovincialis* が藻体とロープの両方に付着しているのが確認され、特に藻体では仮根部付近に群生する傾向が認められた。6月に入るとムラサキイガイは大きいものでは殻長10mm以上となり、仮根部付近の他に、藻体主枝にも群生するようになった。

これらの付着生物は、養殖ロープが水面に保持できている場合には比較的少なかったが、ヒジキ自身の重みや付着生物の増加、アカモク *Sargassum horneri* 等の流れ藻が養殖ロープやブイにからまるなどで養殖ロープが水没すると、そこから短期間に増加していった。

また、養殖ロープを船上に引き上げると、2月以降はギンポ *Pholis nebulosa* やメバル属、アイサメ属等の魚類が藻体間に生息しているのが確認された。これらの魚類はほとんどが全長5cm未満の幼魚で、特に養殖ヒジキが最も繁茂している収穫時期の5月に多く見られた。

Table 2.1.3 Occurrence of attaching organisms on cultured Hiziki (*S. fusiforme*) during the cultivation period

Attaching organisms	Taxonomic classification (Phylum)	2001					
		January	February	March	April	May	June
algae	<i>Petalonia fascia</i>		■	■	■	■	■
	Ceramiales			■	■	■	■
	Ectocarpus			■	■	■	■
	Ulva			■	■	■	■
	Sphacelariaceae			■	■	■	■
animals	Amphipoda			■	■	■	■
	Sertulariidae			■	■	■	■
	Bryozoa			■	■	■	■
	<i>Mytilus galloprovincialis</i>			■	■	■	■

考 察

養殖期間を通じて、養殖ヒジキの藻長は天然ヒジキに比べるとやや短いままで推移した。重量においては4月中旬までは養殖、天然ともに同程度であったものの、その後は養殖ヒジキが天然を上回り、5月下旬にはその差は1株あたり約1.8倍となった。また、11月開始と翌1月開始の養殖ヒジキを比較した場合、藻長、重量、生産量ともに早めの11月に沖出ししたほうが良好であった。11月に養殖を開始した場合、およそ5ヵ月後の4月下旬～5月上旬には養殖ロープ1mあたり湿重量で約10kgの収穫を得ることができ、非干出域におけるヒジキの挟み込み養殖が可能であることが実証された。

養殖期間中、ロープの撚りに挟み込まれたヒジキの主枝数には、ほとんど変動が見られなかったことから、藻体の脱落や死亡はなかったものと推察される。また、繊維状根が伸長しロープに固着することや、そこから新たな藻体の発生も確認されたことから、付着器ごとヒジキを挟み込むことで藻体の脱落を防ぐとともに新たな藻体発生による収穫量の増加が期待できると思われる。

養殖ヒジキは生長するに従い天然ヒジキよりも重くなることが判明したが、それは養殖ヒジキの形態の特徴、すなわち、天然ヒジキに比べて有意に主枝が太く重いこと、気胞が長く気胞と葉の数も多く重いことなどに由来するものであった (Fig. 2.1.4, Fig. 2.1.6, Table 2.1.2)。ヒジキの養殖施設と種苗を採取した天然ヒジキの生育地は同じ湾内でわずか600mしか離れていないが、このような形態差が出たことは非常に興味深い。

この原因については、海面に設置された養殖施設と、天然ヒジキが生育する潮間帯との間での、主に光量、栄養塩および波浪・流動等の環境条件の違いによるものと考えられるが、伊藤<sup>44)</sup>は、ヒジキの水深別養殖試験を行い、水深2mのヒジキは、水面近くのヒジキに比べて、気胞や葉の数が極端に少なく、重量も半分以下で、細くてひ弱な形態であったことを報告している。この形態は、天然ヒジキと良く似ていることから、形態差が生じた理由の一つとして水深差による光量差が推察される。空中から海水中へ入射した光は、水、懸濁物、溶存物による光の散乱および吸収によって、水深が深くなるほど減衰するが<sup>45)</sup>、日本沿岸における測定例をみると、水深0～0.5m間での減衰が著しく、水深2mにおける水面との相対光量は30～40%にまで減

少している<sup>46)</sup>。天然ヒジキは潮間帯下部に生育するため<sup>49)</sup>、大潮干潮時以外は水没しており、常に水面に浮遊する養殖ヒジキとの積算光量の違いは大きい。したがって、光量の差が形態差の理由の一つと推察される。

なお、ヒジキを製品に加工した場合、気胞や葉を使用した「芽ひじき」と、主枝等を使用した「長ひじき」に分けられるが、消費者の嗜好面から、現在は「芽ひじき」の需要が伸びていると言われている<sup>47)</sup>。このため、今回養殖したような気胞や葉が非常に多く、しかもそれらが大型になるヒジキは、現在の需要に合致したものと云えよう。

試験中にみられた汚損生物は、海藻では紅藻のイギス類や褐藻のシオミドロ類など、動物ではムラサキイガイやウミシバ類などであった（Table 2.1.3）。これらはヒジキの順調な生長を阻害するとともに、品質を下げる原因にもなるため、難波ら<sup>48)</sup>のような積極的対策の検討も必要である。養殖の実施にあたっては、事前に対象とする海域の年間水温を把握して付着生物の種類や出現時期を推定するとともに、海中や海面にある海岸構築物、水産施設等を実際に観察するなどして、付着生物が極力少ないと予測される海域を選定することも重要である。また、養殖ロープが水没した場合には、そこから短期間に多くの生物が付着していったことから、定期的に養殖施設の観察を行い、早い段階でこれら除去し、また、ブイを追加してロープの水没を防ぐといった養殖管理が必要である。

収穫時期については、収量の面からは十分な伸長が期待できる5月の後半が良いと思われるが、この頃すでに多くの藻類やムラサキイガイが付着しており、商品価値の高いヒジキを収穫するには、その時期の判断がきわめて重要であると考えられる。ムラサキイガイは殻色が黒いため、収穫後乾燥して黒くなったヒジキとの区別が付きにくく、死後も強力な足糸でヒジキに固着するため、商品価値を大きく低下させる。

ムラサキイガイの産卵から稚貝付着までの期間は水温10～15℃では約3ヵ月、付着盛期の水温は17～25℃、水温15℃以上では付着後1ヵ月間で約3mmに成長するとされている<sup>49)</sup>。当該養殖海域の水温は5月上旬には17℃を超えるため（Fig. 2.1.3）、この時期、ムラサキイガイは付着盛期に入るとともに1ヵ月以内に肉眼でも確認できる大きさになることが推察される。以上から、本海域においてムラサキイガイの付着による商品価値の低下を回避し、かつ、多くの収穫を得るためには、水温が17℃となる5月上旬までに収穫を終えることが妥当と考えられる。

## 第2節 干潟域における支柱を利用した養殖

第2章第1節では、海面に養殖ロープを設置する方法（浮き流し方式）で、日本における天然藻体の挟み込み法によるヒジキ養殖の可能性を明らかにし、国内でもヒジキが養殖できることを確認した<sup>41)</sup>。この方法は非干出域の海面を対象にしているため、干潟域や砂浜やなど遠浅の海岸では適用しにくく、海域の特性にあった養殖方法が求められている。

ところで、干潟の主な漁業であるアサリの漁獲量は1980年代前半までは日本全国で14万トン前後であったが、近年では3万トン台にまで著しく減少し<sup>50)</sup>、ノリ養殖業も1998～2008年の10年の間に2,200経営体が廃業し4,000経営体を下回るなど<sup>51)</sup>、干潟の漁場としての利用頻度は大きく低下している。

大分県の中津市～豊後高田市にかけての「豊前海」と呼ばれる海域には、約3,000haの広大な干潟が広がっているが<sup>52)</sup>、近年はアサリ漁獲量の減少<sup>53)</sup>や乾ノリ生産枚数、ノリ養殖柵数の減少が著しい<sup>54)</sup>。当該海域の栄養塩の低下も近年著しく、沿岸域のノリ養殖漁場における2005年度以降のDIN平均値は、それまでの1/2程度の約50 μg/L ≒ 3.6 μMにまで低下し、ノリ養殖に限らず、他の漁業や養殖業への影響が懸念されている<sup>55)</sup>。このため、利用頻度の低下した干潟域における新たな漁業や、低栄養塩でも良質で生長の良好な海藻類の養殖振興が求められている。本節では、大分県中津市干潟域のノリ養殖漁場において、ノリ養殖で使用する支柱を利用してヒジキ養殖を行う手法について検討し、低栄養塩の干潟域においても、ヒジキ養殖が十分に可能であることを実証した。

なお、干潟域は干満差が大きく、設置する支柱の地盤高によって養殖ヒジキが受ける干出時間や温度、乾燥の程度等に大きな違いができ、それらが生長や生産量、付着生物の種類や量などに影響を与えることが考えられる。そこで本節では、支柱を立てる地盤高の高さ（養殖ロープの干出時間）と養殖ヒジキの生長や生産量、付着生物との関係を検討し、適切な地盤高（干出時間）を明らかにした。

### 材料および方法

#### 支柱の設置

支柱は2008年11月23日、大分県中津市干潟域のノリ養殖漁場に設置した（Fig. 2.2.1）。底質は砂泥質であ

った。支柱は長さ 5m、直径 4cm の鋼製で、水中ポンプを使用し地面にむかって垂直に立て、砂中に約 1m を入れた。支柱の間隔は 5m とし、100m 分（支柱 21 本）を 3 列、沿岸～沖合に向かって立て込んだ。3 列の支柱の間隔は 4m とした。漁場は沖合にむかって下方にゆるやかに傾斜しており、設置した地盤の高さは、最も陸側で地盤高（潮汐表基準面 Datum Line、以下 D.L. と記す）D.L.80cm、最も沖側では地盤高 D.L.0cm であった（Fig. 2.2.2）。

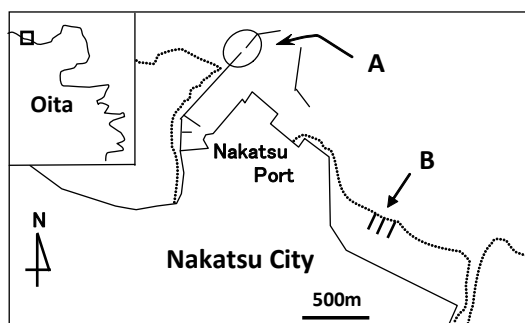


Fig. 2.2.1 Location of natural habitat where the Hiziki (*Sargassum fusiforme*) plants were collected (A), and the area where it was cultured by support pillars system (B).

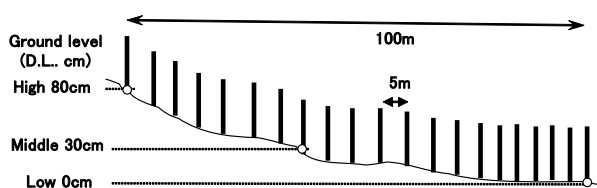


Fig. 2.2.2 Diagram of Hiziki cultivation by support pillars system. Ground levels represent collection sites of Hiziki samples.

#### 種苗の採取、挟み込みおよび沖出し

種苗のヒジキ藻体は、2008年11月25日に大分県中津市中津港内防波堤内側の護岸に自生している藻体を採取した。採取は手で藻体の下部をつかみ、付着器ごと剥ぎ取るようにした。中津市では以前からヒジキを採取する習慣がないため、漁業権は設定されておらず、ヒジキは漁獲対象とされていない<sup>56)</sup>。

採取した藻体のうち、任意の20株について藻長（藻体の基部から先端まで）と湿重量（付着器部分を除く）を測定した。平均藻長は17.4cm、平均重量1.8gであった。

種苗のロープへの挟み込みは採取の翌日に行った。養殖ロープは、長さ100m、直径12mmのポリプロピレ

ン製（戸畑製綱（株）3本撚り12打ち）を使用した。種苗は5cm間隔で挟み込むようにした。採取したヒジキは1株あたり1～3本の主枝を有していたが、挟み込み1カ所あたりのヒジキ主枝数を8～10本を目安として数株を束ねて挟み込むようにした（Fig. 2.2.3A）。挟み込みを終えた養殖ロープを同日、支柱を建てた漁場に張り込んだ。ロープの支柱への取り付けは、浮動リングを使用した（Fig. 2.2.3B）。浮動リングを支柱に通したのち、種苗を挟み込んだ養殖ロープをリングに装着した。リングは支柱を自由に上下できるため、海水がある場合には養殖ロープは水面に浮き（Fig. 2.2.3C）、潮が引いて海水がない場合には、ロープは地面に接地する仕組みとなっている（Fig. 2.2.3D）。

#### 生長と生産量、付着生物の測定

養殖開始後は月に1回以上の割合で、次の3つの地盤高（高D.L.80cm、中D.L.30cm、低D.L.0cm）にある養殖ヒジキを各10株採取し、藻長と重量を測定した。収穫時期5月12日の値についてはTukey-Kramerの多重比較検定を行った（ $p < 0.05$ ）。同日には、挟み込み1カ所あたりのヒジキ主枝数と付着器重量を測定し、さらに各区の養殖ロープの長さ50cmを4カ所採取して、1mあたりの生産量を算出した。付着生物は、5月12日に各地盤高にある養殖ヒジキ挟み込み5カ所分を採集し、その場で1mm目合いのネットに入れて実験室に持ち帰り、すぐに10%ホルマリンで固定したのち、10日後に肉眼で確認できる生物を選別して、種の同定と種別個体数、重量を測定した。値はヒジキ1kg（湿）あたりに換算した。

#### 干出時間の算出

中津港における試験期間中の各地盤高の日ごとの干出時間（分）を、市販の潮汐表ソフト（WSIO21）を用いて算出した。これらを積算して、期間中の各地盤高の積算干出時間（分）を求めた。これを干出のあった日数で除して1日あたりの平均干出時間（分）を求めた。さらに、試験期間日数に占める干出のあった日数の割合（%）を算出した。

#### 水温測定

自動水温記録計（オンセットコンピューター社ティドビットV2）をD.L.30cmにあるヒジキ養殖ロープに取り付けた。また、最も沖側のD.L.0cmの支柱地面にも設置し、それぞれ1時間ごとの温度を測定した。

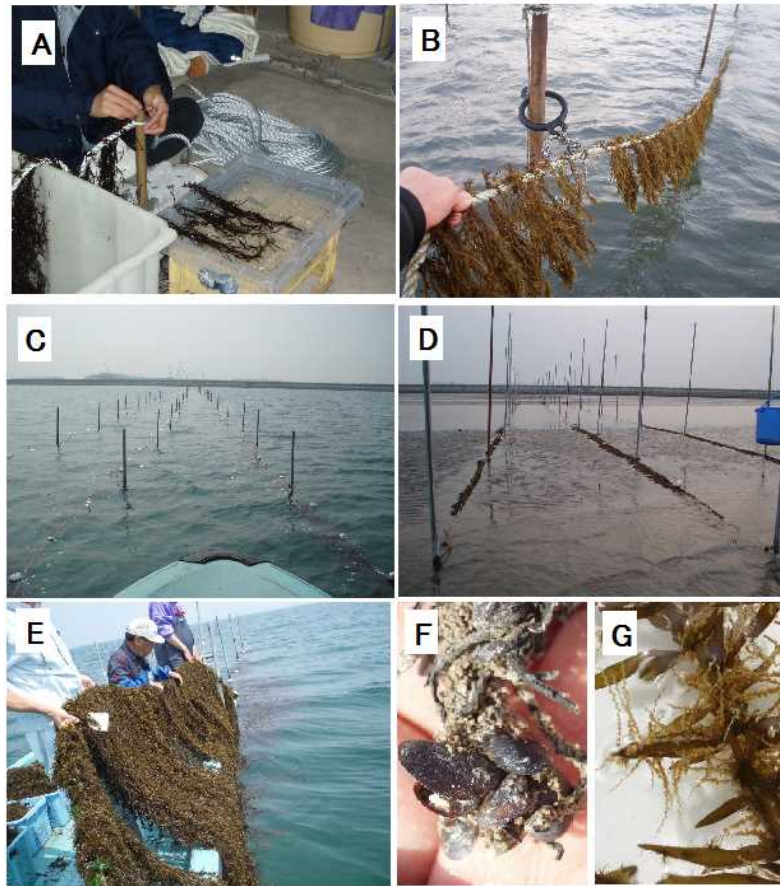


Fig. 2.2.3 Cultivation of Hiziki by support pillars system on culture ropes using naturally growing plants for seedlings. A: Seedlings were clipped between strands of the culture rope B: Floating rings were used for automatic vertical movement of the culture rope. C, D: The cultivation system during High (C) and Low (D) tides. E: Hiziki culture at D.L.30cm in May 2009. F, G: Fouling organisms *Mytilus galloprovincialis* (F) and *Sertularella miurensis* (G) Hiziki culture in Low ground levels (D.L.0cm).

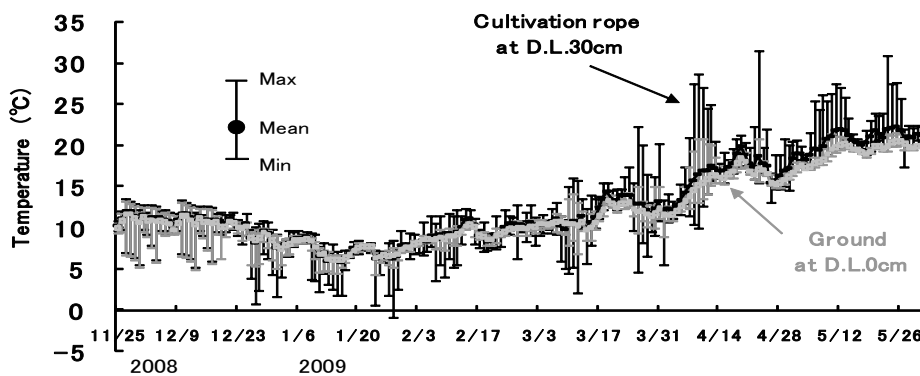


Fig. 2.2.4 Temperatures at D.L.30cm (cultivation rope) and D.L.0cm (ground).

## 結 果

### 温 度

2008年11月25日～2009年5月31日までの温度の推移を Fig. 2.2.4 に示した。両者の平均温度は、開始か

ら3月末までは大差なく、1月中旬～下旬に最低の5～6℃となったあと、2～3月はゆっくり上昇した。4月上旬には13℃台となり、以降は急激に上昇し、中旬には17℃台となった。これ以降、D.L.30cmにある養殖ロープの平均温度は、D.L.0cmよりも1℃程度高め

で推移した。D.L.30cm にある養殖ロープは、水面にあるか干潮時には空中に露出するが、D.L.0cm では、潮位がそこまで下がることは少なく、多くの場合水中にある。このため、1 日の変動幅は D.L.30cm では最大で 18.7 °C、平均で 4.4 °C であったが、D.L.0cm では最大 8.2 °C、平均 2.0 °C であった。

### 干出時間

Fig. 2.2.5 に各地盤高における日ごとの干出時間を示した。潮汐の周期にあわせてほぼ 2 週間ごとに干出期間があらわれていた。最も地盤高の高い D.L.80cm では試験期間 169 日のうちの 126 日 (74.6%) で干出が見られ、1 日の干出時間は多い日では約 300 分、平均干出時間は 234.6 分/日、D.L.30cm では 66 日 (39.1%)、干出時間は多い日で約 200 分/日、平均 121.7 分/日、もっとも低い D.L.0cm では、干出日数も干出時間も最も少なく、それぞれ 18 日 (10.7%)、約 150 分/日、平均 94.7 分/日であった (Table 2.2.1)。

### 各地盤高における養殖ヒジキの生長

各地盤高におけるヒジキの生長を Fig. 2.2.6 に示した。また、収穫期である 5 月 12 日の生長状況を Fig. 2.2.7 に示した。開始から 3 月下旬までは各地盤高とも緩慢であった。4 月に入ると D.L.0cm と D.L.30cm では急激

に生長をはじめ、D.L.0cm は 4 月 30 日、D.L.30cm は 5 月 12 日観察時にはそれぞれ藻長 1m を超えた (Fig. 2.2.3E)。対して高地盤の D.L.80cm では 4 月 30 日には 48cm、5 月 12 日でも 53cm と短いままであった。

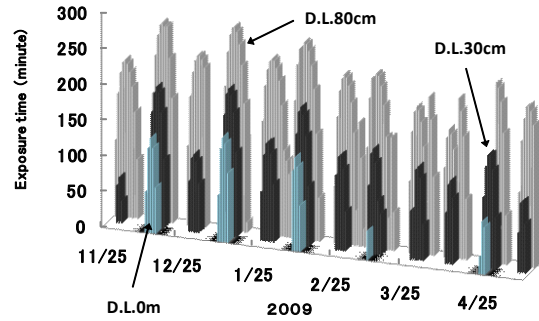


Fig. 2.2.5 Different ground levels and their respective air exposure times during the Hiziki cultivation.

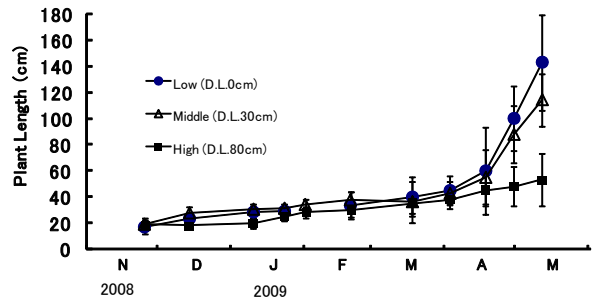


Fig. 2.2.6 Growth in plant length of Hiziki cultured by clipping naturally growing plants between the strands of the culture rope of the support pillars system. Vertical lines indicate SD. Closed circles indicate plants cultured at the Low ground level (D.L.0cm); open triangles, plants cultured at the Middle ground level (D.L.30cm); and closed squares, plants cultured at the High ground level (D.L.80cm).

Table 2.2.1 Days of cultivation and air exposure ,exposure day /cultivation day ratios, daily exposure times and integrated exposure time of the High, Middle and Low ground levels.

	High (D.L.80cm)	Middle (D.L.30cm)	Low (D.L.0cm)
Cultivation day (A)	169	169	169
Exposure day (B)	126	66	18
B/A (%)	74.6	39.1	10.7
Daily exposure time (m)	234.6	121.7	94.7
Integrated exposure time (m)	29556	8035	1705



Fig. 2.2.7 Growth of cultured Hiziki at different ground levels in May 2009. A:High (D.L.80cm) ; B:Middle (D.L.30cm) ; C:Low (D.L.0cm)



各地盤高における収穫期の養殖ヒジキの生産量

収穫日 2009 年 5 月 12 日の各地盤高におけるヒジキの藻長と重量を Fig. 2.2.8 に示した。藻長は、D.L.30cm では 120cm、D.L.0cm では 140cm に達したが、高地盤の D.L.80cm では 50cm と、前 2 者に比べて有意に短かった。重量も D.L.0cm では 80g、D.L.30cm では 83g であったが、D.L.80cm では 38g と有意に低くなった。この時の養殖ロープ 1m あたりのヒジキ生産量（湿）は、D.L.80cm では 2.1kg であったが、D.L.30cm では 13.4kg、最も地盤高の低い D.L.0cm では 15.8kg であった（Fig. 2.2.3E, Fig. 2.2.9）。

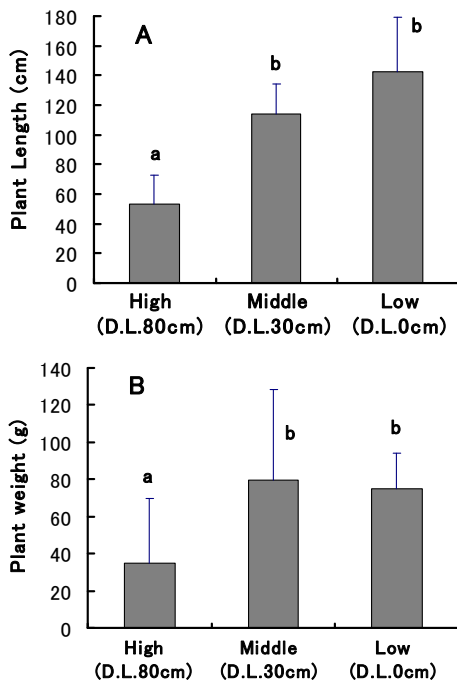


Fig. 2.2.8 Plant length (A) and weight (B) of Hiziki cultured at different ground levels by the support pillars system (early May 2009). Vertical lines indicate SD (n=10). Levels not connected by the same letter are significantly different (Tukey-Kramer test,  $p < 0.05$ ).

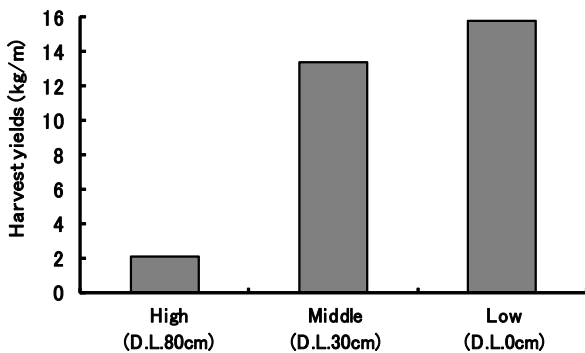


Fig. 2.2.9 Harvest yields per m of culture rope at the different ground levels.

各地盤高における収穫期の養殖ヒジキの主枝数と付着器重量

各地盤高における挟み込み 1 カ所あたりの養殖ヒジキ主枝数と、付着器重量を Fig.2.2.10 に示した。D.L.80cm における主枝数 5.0 に対して、D.L.30cm は 12.3、D.L.0cm は 13.3 と地盤高が低下するにしたがい多くなった。付着器重量も D.L.80cm では 1.5g、D.L.30cm で 4.4g、D.L.0cm 7.8g と地盤高の低下にしたがい重くなった。

各地盤高における収穫期の養殖ヒジキの付着生物

付着生物は、肉眼的に顕著であった軟体動物門二枚貝綱のムラサキイガイ (*Mytilus galloprovincialis*) と刺胞動物門ヒドロ虫綱のキイロウミシバ (*Sertularella miurensis*) について示した。各地盤高ヒジキ 1kg あたりのムラサキイガイの個数と重量を Fig. 2.2.11 に示した。ムラサキイガイは D.L.80cm で 91.8 個、D.L.30cm で 63.3 個であったが、最も低い D.L.0cm では前 2 者の約 5 倍の 436.5 個が確認された。重量では D.L.80cm 1.11g、D.L.30cm 0.57g、D.L.0cm 2.91g であった。

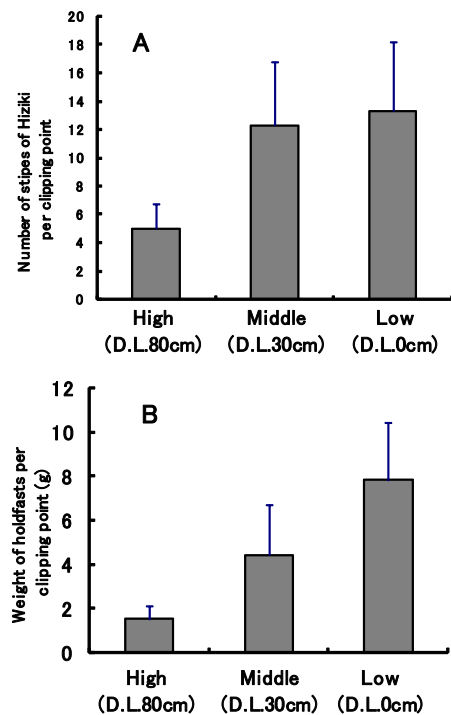


Fig. 2.2.10 Number of stipes (A) and weight of holdfasts (B) of Hiziki per clipping point during the harvesting period in early May 2009. Hiziki were cultured from naturally growing plants clipped between the strands of the culture rope by support pillars system. Vertical lines indicate SD (n=10). Levels not connected by the same letter are significantly different (Tukey-Kramer test,  $p < 0.05$ ).

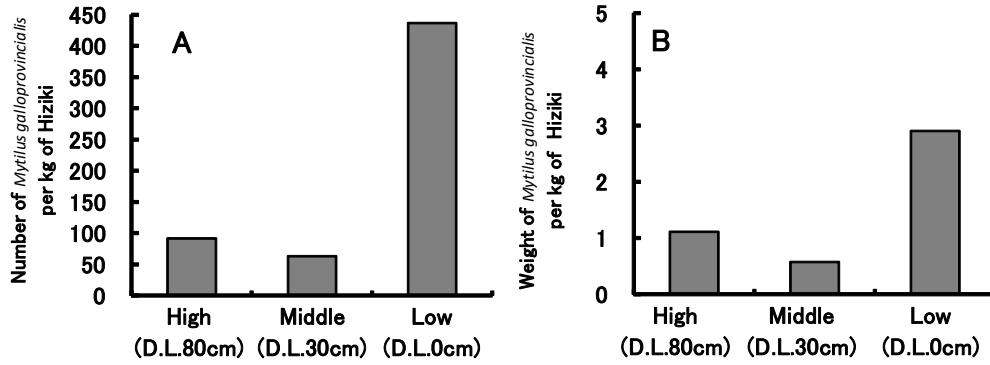


Fig. 2.2.11 The number (A) and the weight (B) of the fouling organism, *Mytilus galloprovincialis*, per kg of Hiziki from different ground levels during harvesting time, early May 2009.

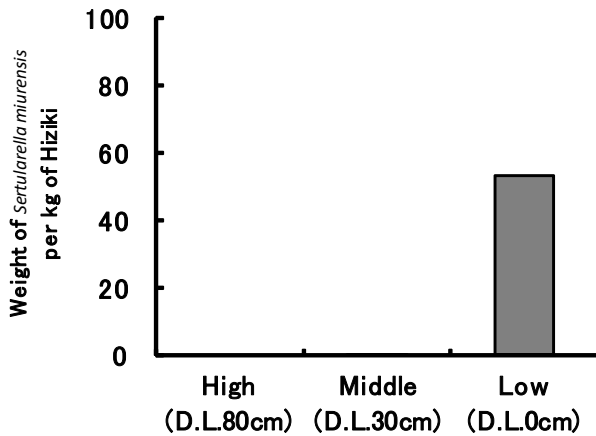


Fig. 2.2.12 Weight of the fouling organisms, *Sertularella miurensis*, per kg of Hiziki from different ground levels during the harvesting time, early May 2009.

キイロウミシバは、D.L.80cm と D.L.30cm ではまったく見られなかったが、D.L.0cm では 53.1g が確認された (Fig. 2.2.12, Fig. 2.2.3F,G)。

## 考 察

干潟域や砂質の海岸には海藻の付着基質となる安定した物体が少ないため、栄養繁殖で繁茂するオゴノリ類<sup>57)</sup>などを除いて、海藻類の分布や繁茂は非常に少ない。本県においても、干潟域に繁茂する天然のヒジキは、港内の安定した人工基質で、D.L.20 ~ 80cm の水深帯のみ限られていた<sup>56)</sup>。

しかし、今回の養殖試験から、底質が砂泥の干潟域においても、秋季にロープにヒジキ藻体を挟み込み支柱に取り付ける方法でヒジキが生長し、翌年春季には養殖ロープ 1m あたり 10kg を超える収穫が可能である

ことが判明した。試験地としたノリ養殖漁場は近年、著しい低栄養塩のため色調不良や単価低迷が起きており、ノリ漁場としては下級漁場であった。しかし、ヒジキ養殖においては良好な漁場であることが判明した。田中、木村<sup>58)</sup>は、魚類と海藻を同時に養殖し、魚類養殖場から出る窒素やリンを海藻に吸収させる複合養殖の試みとして、海藻 5 種 (ヒロメ、ヒジキ、クロメ、カジメ、アオサ) の取り込み速度を比較しているが、ヒジキの取り込み速度は窒素で 3.00 ~ 4.08  $\mu\text{g at N/dry}\cdot\text{g/hr}$ 、リンで 0.41 ~ 0.47  $\mu\text{g at P/dry}\cdot\text{g/hr}$  と非常に遅く、複合養殖には適さないとしている。言い換えれば、ヒジキの栄養塩要求量は、これらの海藻の中ではかなり低いことになり、低栄養塩の条件下でも生長が期待できる種と位置づけられる。もはや低栄養塩でノリ養殖漁場としての機能を失った海域においても、ヒジキ養殖の可能性は十分に残されており、今後の普及が期待される。

支柱を立てこむ地盤高 (D.L.) の違いによる生長を高 D.L.80cm、中 D.L.30cm、低 D.L.0cm の 3 段階で調査した結果、最も高い D.L.80cm ではヒジキの生長は極端に不良で生産量も 2.1kg に過ぎなかったが、中の D.L.30cm および低い D.L.0cm ではそれぞれ 13.4kg、15.8kg を得た (Fig. 2.2.9)。後二者の値は、海面に養殖ロープを常に浮かせる方法 (浮き流し方式) で養殖を行う際の生産量<sup>41)</sup>と遜色ないものであり、干潟域での養殖には、地盤高の選定 (干出時間) が非常に重要であることを示している。高い D.L.80cm のヒジキ生産量は極端に少なく、これは他区に比べて藻長が短いことや、ヒジキが繁茂する土台となる付着器の発達状況が不良であること、そこから形成される主枝数が少ないことに由来するが (Fig. 2.2.10)、これらの現象は、地盤高が高いことによる長期の干出時間の影響と考えられる。



付着生物については、ムラサキイガイでは低 D.L.0cm においては、中、高地盤高の約 5 倍の付着数が見られ（Fig.2.2.11）、キイロウミシバにおいても低 D.L.0cm のみ付着が見られるなど（Fig.2.2.12）、低地盤での付着生物の多さが目立っていた。これは、前述とは対照的に、地盤高が低いことによる干出不足の影響と考えられる。ムラサキイガイの産卵期は長崎県の大村湾では 10～4 月であるが、付着の盛期は日本中部以南では 4～5 月とされている<sup>59)</sup>。ムラサキイガイの干出に対する耐性は、干出時の気温、湿度、日光、風、貝の生理状態や大きさ等によって左右され、気温 0～15℃での干出耐性は非常に強いが、15℃以上では気温の上昇につれて干出耐性は弱くなり、半数致死干出時間は 20℃では 110 時間かかるが、40℃では約 1 時間となっている。今回の実験における温度変化を見ると、中の D.L.30cm では 4 月以降、最高気温 30℃を超える日が大潮の 2 週間ごとに見られていることから、この気温と 1 日 120 分を超える平均干出時間が、中 D.L.30cm と高 D.L.80cm にあるヒジキへのムラサキイガイの付着、生長を抑制したと思われる。また、キイロウミシバ幼生の付着盛期は 8 月および 11 月とされており<sup>60)</sup>、種苗を採取した 11 月には、すでに幼生が付着していた可能性が高い。しかし、今回の実験では中 D.L.30cm と高 D.L.80cm にあるヒジキにはキイロウミシバの付着はまったく見られなかったことから、ムラサキイガイと同様、養殖中に干出により除去されたと考えられる。

収穫したヒジキは乾燥してから入札され流通業者に渡されるが、付着生物の多寡は品質や価格に大きく影響する。今回、低 D.L.0cm での養殖は、藻体の生産量は増加するものの大量の付着生物のため、品質的には問題があった。以上から、今回の試験地における適正地盤高は中の D.L.30cm 程度と考えられる。潮汐や海域の異なる他の海域においても、同様の干出時間を得られる地盤高（養殖日数に占める干出があった日数約 40%、1 日の干出時間約 2 時間、Table 2.2.1）に施設を設置するか、人為的に同様の環境を施すことで本技術が応用でき、付着物の少ない高品質のヒジキ養殖が可能になるとと思われる。なお、試験地近辺の種苗採取地におけるヒジキの分布水深帯は D.L.20～80cm で、濃密分布範囲は 20～50cm であったが<sup>56)</sup>、今回の試験から得られた適正地盤高は 30cm で、天然ヒジキの濃密分布範囲とほぼ同じ値となっている。したがって、干潟域や砂質海岸で本養殖を行うにあたり、近隣にヒジキの繁茂が見られる場合には、養殖施設の地盤高をヒジキの濃密分布範囲と一致させることが望ましいと思

われる。

以上から、地盤高を選定しヒジキに適度な干出を与えることで、付着生物の少ない高品質のヒジキを生産できることがわかった。なお、何らかの理由で養殖ロープが地面に接地せず、ヒジキごと空中に暴露された場合、ヒジキは比較的短時間に枯死する現象が見られた。このことから、過度の乾燥は禁物であり、干出時でも水分を含んだ地面に養殖ロープが接地して、ヒジキが保湿されることが重要である。

また、これらの環境条件が整い、しかも施設の破損などが防げるようであれば支柱の使用にこだわる必要はない。例えば、前節の海面に枠ロープを組む浮き流し方式を今回の試験で得られた適切な地盤高に設置しても、付着生物の少ない良好なヒジキが養殖できるものと考えられる。対象海域や手持ちの漁具、資材などに応じて養殖方法を工夫、選択することで、干潟域や砂浜など遠浅の海岸においてもヒジキ養殖の普及が図れるものと期待される。

### 第3節 部位別ヒジキ種苗の生長と生産量

第 2 章第 1 節では海面におけるヒジキ養殖の可能性について、第 2 章第 2 節では干潟域における可能性について検討し、それぞれ、ヒジキ養殖が可能であることを実証した。しかし、使用する種苗は天然ものを付着器ごと採取するため、過剰な採取はヒジキ漁場の荒廃を招く懸念もある。海藻類の増養殖例を見ると、オゴノリ類 *Gracilaria* spp.の天然での大繁殖<sup>57)</sup>やキリンリンサイ類 *Eucheuma* spp.<sup>20)</sup>、クビレズタ *Caulerpa lentillifera*<sup>49)</sup>などの養殖においては、種苗とする藻体の切断と再生による栄養繁殖が生産量増大に大きな役割を果たしている。そこで、ヒジキ養殖においても直立部のみを種苗とした養殖や、藻体の切断と再生による栄養繁殖を利用した養殖が可能となれば、種苗採取量の軽減につながり、天然ヒジキ資源へのダメージもおさえられることが期待される。

本節では、通常的全藻体を種苗とした養殖と、直立部のみを種苗とした場合や、切断された藻体の部位別の養殖試験を行い、それぞれの生長や生産量を比較して、最も生産量の多い種苗の利用形態を明らかにした。

#### 材料および方法

種苗の天然ヒジキは、2002 年 11 月 17 日の干潮時に大分県国東市国見町岐部地先（Fig. 2.3.1）で、手で付

着器ごと採取した。平均藻長（藻体の基部から先端まで）±標準偏差は  $277 \pm 61\text{mm}$ 、重量は  $2.0 \pm 0.6\text{g}$ （ $N=10$ ）であった。採取した藻体には、付着器と短い茎があり、茎の先からは1～3本の主枝が出ている。そこで、付着器が付いたままの藻体全体を「全藻体区」、藻体基部の上3cmで主枝を切断し、直立体部を種苗とした区を「直立体区」、全藻体の藻長の中央をハサミで切断した上側を「上部藻体区」、付着器が付いた下側を「下部藻体区」とした（Fig. 2.3.2）。以上4区の種苗を、1区あたり養殖ロープ（径12mmPPロープ50m）の10m分に挟み込みした。各区とも挟み込み間隔は5cmとし、挟み込み1ヵ所あたりの主枝本数は、全藻体区、直立体区、上部藻体区では5本を目安にしたが、下部藻体区では主枝に側枝や葉がほとんどなかったため、のちの収穫量を考慮して10本を目安にした。

養殖試験は11月20日に大分県国東市国見町権現崎地先（Fig. 2.3.1）で開始した。養殖方法は既報<sup>43</sup>と同一とした。すなわち、養殖施設は枠ロープの長さ縦50m×横50mとし、この枠内に養殖ロープを張り込んだ。張り込みに際しては、ロープに約3m間隔でブイを付け、常にロープが水面に浮くように配慮した（Fig. 2.3.1）。その後は2003年2月17日、3月13日、5月16日、収穫日の6月5日に各区の任意の10株の藻長を測定し平均した。6月5日の値については、Tukey-Kramerの多重比較検定を行った（ $p < 0.05$ ）。また、同日、各区の養殖ロープの任意の50cm分2ヵ所を収穫して養殖ロープ1mあたりの生産量（湿重量）を算出した。さらに、試験開始日と収穫日に各試験区の養殖ロープについて、任意の挟み込みヵ所5ヵ所分の主枝本数（主枝の長さ10cm以上を対象）を計数し、1ヵ所あたりの主枝本数を算出した。

## 結 果

藻長を Fig. 2.3.3 に示した。開始3ヵ月後の2003年2月には、全藻体区、直立体区、上部藻体区の3つの試験区では、開始時よりもそれぞれ1.5、3.1、8.3cm生長し、新たな葉や気胞の形成と、全藻体区では付着器部分からの新たな主枝の形成が確認された。しかし、下部藻体区の主枝では葉や気胞の新たな形成はほとんどなく、先端が枯死した主枝もあり、藻長は開始時よりも3.4cm減少していた。3月には全藻体区、直立体区、上部藻体区では引き続いて主枝の伸長と葉や気胞の形成が見られ、下部藻体区でも切断されていた主枝先端

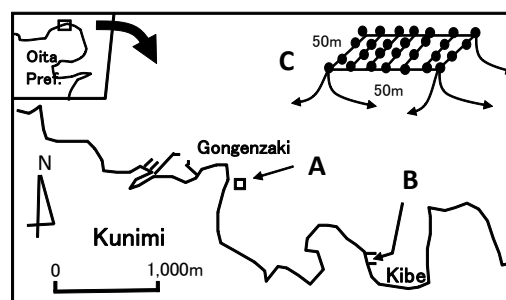


Fig. 2.3.1 The location of Hiziki natural habitat where the plants were collected (A), and the area of cultivation (B). Diagrammatic illustration of the cultivation system (C).

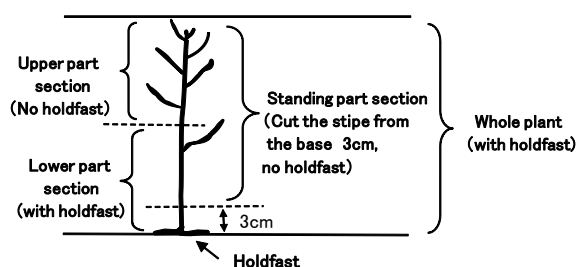


Fig. 2.3.2 Various parts of the wild seedling of Hiziki used in culture experiments.

部の再生と葉や気胞の形成、付着器からの新たな主枝の形成が見られるようになった。5月の藻長は下部藻体区以外の3区では50cmを超えた。収穫日の6月5日の藻長は、全藻体区73cm、直立体区71cm、上部藻体区62cm、下部藻体区48cmであった。前3区の間には有意差はなかったが、下部藻体区は前3区との間に有意差があった。

2003年6月5日の養殖ロープ1mあたりの生産量を Fig. 2.3.4 に、繁茂状況を Fig. 2.3.5 に示した。全藻体区が9.0kgで最も多く、次いで直立体区の7.3kg（全藻体区の81%）、上部藻体区の6.7kg（同74%）、下部藻体区の5.2kg（同58%）であった。

試験開始日と収穫日における養殖ロープ挟み込み1ヵ所あたりの主枝本数と、終了時の増減率を Table 2.3.1 に示した。開始日には、全藻体区5.3本、直立体区4.5本、上部藻体区3.8本、下部藻体区10.6本であったが、収穫日には、全藻体区7.5本、直立体区5.3本、上部藻体区3.8本、下部藻体区5.8本であった。増減率は、開始時を1とすると、それぞれ1.4、1.2、1.0、0.5であった。

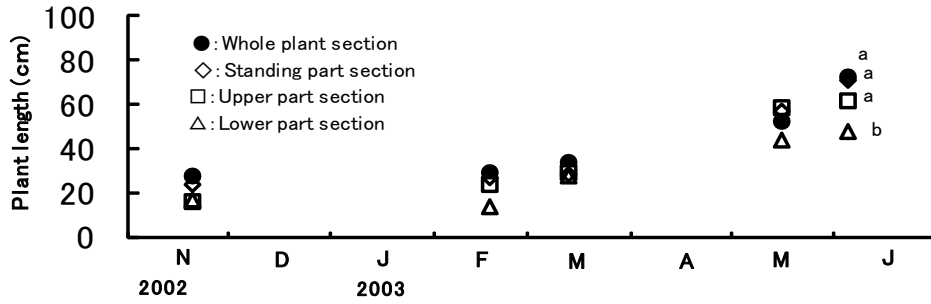


Fig. 2.3.3 Growth in plant length of the different parts of the wild Hiziki plant used as seedlings. Levels not connected by the same letter are significantly different (Tukey-Kramer test,  $p < 0.05$ ).

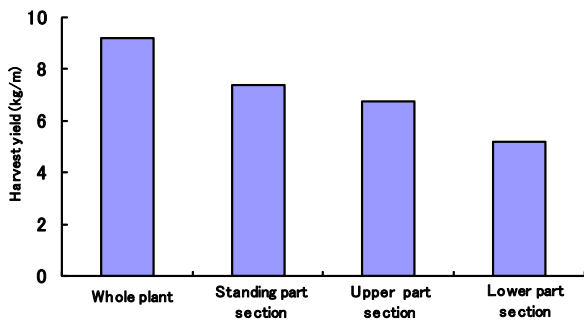


Fig. 2.3.4 Harvest yield from the different parts of the wild Hiziki plant used as seedlings.

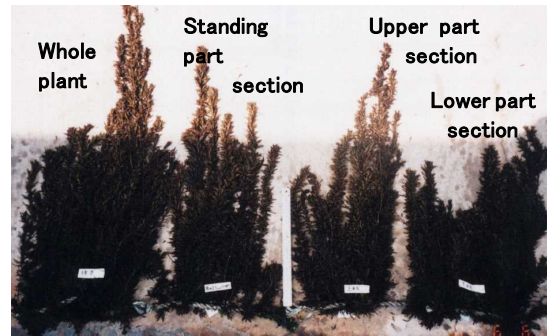


Fig. 2.3.5 Growth of the different parts of the wild Hiziki plant used as seedlings.

Table 2.3.1 Number of stipes of Hiziki per clipping point at the start and end of cultivation

	Whole plant	Standing part section	Upper part section	Lower part section
Start (20061120,A)	5.3	4.5	3.8	10.6
End (20070605,B)	7.5	5.3	3.8	5.8
B/A (%)	1.4	1.2	1.0	0.5

## 考 察

主枝先端のある全藻体区、直立体区、上部藻体区の3区では、養殖日数の経過にしたがって生長し、6月の収穫時における各区の長さは、試験開始時の藻長の差がそのまま出た結果となった (Fig. 2.3.3)。対して、主枝先端のない下部藻体区では、養殖開始3ヵ月後 (2003年2月) の測定時でも主枝は伸長せず、新たな葉や気胞の形成もなく、主枝は衰弱し枯死したものもあった。ヒジキの生長形式は頂端生長<sup>61)</sup>と言われ、伸長は主枝の頂端部に存在する断面が三角形の頂端細胞による<sup>62)</sup>。このため、主枝先端のない下部藻体区では、主枝の生長不良や衰、枯死がおこったと推定され、それは収穫日における同区の主枝数の減少にもあらわれていた (Table 2.3.1)。一方、付着器の有無でみた場合、付着器のある全藻体区と、付着器のない直立体区や上部藻

体区とでは生長速度自体には差異がないと考えられることから、藻体の生長に付着器は関係しないと考えられる。

生産量においては全藻体区が最も多く、ついで直立体区、上部藻体区、下部藻体区となり、藻体の生長に準じた結果であった (Fig. 2.3.4)。付着器のない直立体区の実産量は、全藻体区よりも約20%減少していたが、その理由として、収穫日の主枝本数の違いがあげられる (Table 2.3.1)。全藻体区では、養殖中に付着器の繊維状根がロープを取り囲むように3~4cmの団子状に繁茂し、同時に新たな主枝の形成と伸長が見られていた。直立体区でも繊維状根が主枝の下部末端から再生し繁茂する現象は見られたが、全藻体区に比べると、大きくても2cm程度に過ぎず、形成された主枝数も少なく長さも短かった。これらの違いが生産量の差となったものと思われる。さらに、直立体を種苗とする場

合には、現場での種苗刈り取り作業が煩雑で、刈り取ってバラバラになった藻体を束ねてから挟み込む必要もあるなど作業量の増加が見込まれる。生産量の減少に伴う販売金額の低下も考慮する必要があり、全藻体を使用する場合に比べて有利とは思えない。

種苗の切断と再生を利用した栄養繁殖による養殖については、全藻体を上部と下部に切断してそれぞれを養殖した場合、合計生産量は 11.9kg（上部藻体区 6.7kg + 下部藻体区 5.2kg）となり、全藻体 9.0kg の 1.2 倍に相当した。しかし、この時、下部藻体区の挟み込み本数は試験開始時 10.6 本と、他区の 2 倍以上の挟み込みをしての結果であることや（Table 2.3.1）、採取した種苗を切断して、それを束ねて挟み込む作業労力、種苗を 2 つにわけることによる張り込みロープ長の増加、それに伴う収穫作業労力の増加などを考慮すると、これも有効な方法とは思えない。栄養繁殖が産業的に利用される背景には、例えばキリンサイ養殖<sup>20)</sup>では、ロープに藻体を挟み込んで垂下する方法で、日間生長率（湿重量）1.7 ~ 4.4%（鹿児島）、1.5 ~ 5.5%（フィリピン）といった短期間に高い生長率が得られることが必要であり、今回の結果からは、ヒジキ養殖に栄養繁殖を利用するのは困難と思われる。

以上から、現状では全藻体を使用して養殖をすることが、生産量の面でも作業労力の面からも最も有効であるといえる。

なお今回、切断された主枝は養殖 3 ヶ月後でもほとんど再生しないことが確認されたが、天然の漁場においても同様の現象が生じている可能性がある。大分県では、収穫時には鎌の使用が奨励されているため<sup>63)</sup>、収穫後も漁場には長さ数 cm の主枝が残されている場合が多い。この主枝には、収穫時に基部ごと残された先端の生長点のない主枝と、収穫時にはその対象にならなかったような短い主枝の両方が混在する。大分県では 1 漁期に 2 回（12 ~ 1 月、4 ~ 5 月）、収穫を行う漁場もあるが、これらの漁場における、特に初回収穫後の漁場に残留する主枝の生長経過を詳細に観察しておくことは、今後、ヒジキ資源の持続的管理方策の策定において重要になるとと思われる。特に近年、ヒジキにおいては、天然、養殖ともに食害被害の報告<sup>64-67)</sup>が各県で見られるようになっており、主枝先端の生長点が欠損したヒジキのその後の伸長については、十分に把握しておく必要がある。

### 第 3 章 繊維状根の細断によるヒジキ人工種苗生産技術の開発

第 2 章では天然藻体を種苗とした挟み込みによるヒジキ養殖を行い、ヒジキの生長、生産量、形態的特徴および生物の付着状況や収穫適期を検討し、国内でのヒジキ養殖の可能性を実証した。今後は、国内における養殖の普及や規模拡大が予測されるが、天然藻体の過剰な採取で、ヒジキ資源の荒廃の懸念もある。すでに、韓国や中国では、養殖用の種苗とする天然藻体が減少あるいは消滅している<sup>68,69)</sup>。

そこで本章では、収穫後の養殖ロープに残存するヒジキの付着器を構成する繊維状根の茎形成能に注目し、第 1 節では、生殖細胞を用いない簡易で実用的な種苗生産の方法として、繊維状根の細断による人工種苗生産の技術を開発した。すなわち、養殖ヒジキを収穫したあとに残る大量の付着器を採取したのち、1 本ずつの繊維状根にほぐして洗浄、低温で保存し、それを沖出し時期にあわせて細断、培養して茎を多数発生させ、幼体にまで生長させる方法である。さらに第 2 節では、量産化のための細断方法として、家庭用ミキサーを使用するヒジキ繊維状根の切断とその後の培養、海域への沖出し後の生長と生産量について述べた。

#### 第 1 節 ヒジキ繊維状根の保存、細断および培養条件の検討

本節では、ヒジキ繊維状根についての洗浄方法、保存に適する光量、繊維状根からの茎形成、生長に適する温度、光量および繊維状根の適切な細断幅を明らかにし、繊維状根の細断によるヒジキ人工種苗生産技術の基礎的知見を明らかにした<sup>43)</sup>。

#### 材料および方法

##### 付着器の採取および繊維状根（根）の洗浄手法、保存に適する光量

ヒジキを収穫した養殖ロープには、種苗を挟み込んだ位置のすべてに、繊維状根（以下これを根と呼ぶ）から構成される塊（団子）状の付着器が残存する（Fig. 3.1.1A）。そこで、2006 年 11 月に大分県中津市沿岸で天然種苗を用いて挟み込み養殖を開始し、2007 年 4 月 28 日に収穫した養殖ロープから同日、10 個の付着器（養殖ロープの長さ約 50cm 分に相当）を採取し、付着器

の大きさ（長径と短径、重量）を測定した。根と根の間隙には多くの付着物があったので、これらを手で取り除きながら 1 本ずつにほどき (Fig. 3.1.1B)、根の長ささと太さを測定した。さらに、根をピンセットでつまみ、後述する培養液内で洗浄しながら、産業用ティッシュ（(株)クレシア・JK ワイパー）で根表面の微細な付着物を拭き取る作業を行った (Fig. 3.1.1C)。付着物を除去した後の根の重量は、採取時の約 50%であった。

続いて、培養液を満たした 500ml ビーカー 3 個に根を 10g (179 ~ 184 本) ずつ収容し、シャーレで蓋をした。培養条件は、冬季に研究地先の天然ヒジキ群落が経験する水温と光量を基準に設定し（温度 12 °C、光量 1, 25, 70  $\mu$  mol/m<sup>2</sup>/s の 3 区、光周期 12L:12D）、それぞれにビーカーを静置した (Fig. 3.1.1D)。そして、150 日後まで 30 日ごとに根からの茎の形成状況を観察し、収容した根の半数以上から茎が形成した場合を(++)、茎形成が半数未満を (+)、茎形成が見られなかった場

合を (-) とした。観察時には培養液を全量交換した。

#### 茎と茎葉の形成過程および生長に適する温度、光量

培養庫（温度 12 °C、光量 25  $\mu$  mol/m<sup>2</sup>/s、光周期 12L:12D）で保存中の根約 10g を保存から 60 日後に安全カミソリで幅 5mm の輪切り状に切断した。培養条件は、春から夏季にかけて研究地先の天然ヒジキ群落が経験する水温と光量を基準として、温度 17、23 °C の 2 区、光量 50、120、230  $\mu$  mol/m<sup>2</sup>/s の 3 区、光周期 12L:12D とし、これらを組み合わせて計 6 区とした。1 区あたり 12cm シャーレ 3 枚を使用し、シャーレ 1 枚には切断片 20 個を収容し、培養庫内の各条件に静置した。その後、各区における根からの茎の形成過程を 3 日ごとに観察し、培養 40 日後の切断片からの茎形成率（根の切断片数に占める茎の形成が確認された切断片数の割合、%）を求め、区ごとに平均した。また、形成された藻体の全長（茎の付け根から藻体の先端まで）を、長いものから上位 10 本について測定した。



Fig. 3.1.1 Artificial seedling production of Hiziki, *Sargassum fusiforme*, using cut filamentous roots. A: Holdfasts (arrows) consisting of filamentous roots on cultivated ropes after the harvest in April; B: Filamentous roots that were separated from holdfasts; C: Filamentous roots after washing in a culture medium and wiping on a paper towel; D: Filamentous roots stored in an incubator; E: Formation of an erect stem (a) and a cauline leaf (b) on a cut filamentous root (15days culture); F: Young thalli growing from cut filamentous roots (40 days culture).

Table 3.1.1 Erect stem formations from filamentous roots cultured under three different irradiances (12L:12D) at 12 °C

Irradiance ( $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ )	30days	60days	90days	120days	150days
1	-	-	-	-	-
25	-	-	-	+	+
70	+	++	++	++	++

++, more than 50% formation; +, less than 50%formation; -, no formation.

### 根の適切な切断幅

培養庫（温度 12 °C、光量 25  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 、光周期 12L:12D）で保存中の根約 15g を、保存から 60 日後に安全カミソリで輪切り状に、幅 1、2.5、5、10、20mm の 5 区に切断した。1 区あたり 12cm シャーレ 3 枚を使用し、シャーレ 1 枚には切断片 20 個を収容した。培養条件は、前述の実験で茎形成率 (%)、茎の全長 (mm) ともに最も値の高かった温度 23 °C、光量 120  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 、光周期 12L:12D とし、40 日間静置培養して各区の茎形成率を求めた。また、形成された藻体の全長（茎の付け根から藻体の先端まで）を、長いものから上位 10 本について測定した。さらに、各区の切断片 1 個あたりの茎形成数と、切断幅 1mm あたりの茎形成数（切断片の茎数をその切断片の幅 (mm) で除したものを求め、得られた値については一元配置分散分析を行ったあと、Tukey-Kramer の多重比較検定を行った ( $p < 0.05$ )。

### 培養液

本研究で使用した培養液は、Erd-Schreiber の培地 1  $\ell$ （ろ過海水 1  $\ell$ に  $\text{NaNO}_3$  0.1g、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  0.02g を添加）に須藤の改変 P1 溶液 1ml を添加し、加熱殺菌した補強海水とした<sup>70)</sup>。

## 結 果

### 付着器と根の大きさ

採取した付着器の大きさは、平均長径 48mm（範囲 31 ~ 66mm）、平均短径 39mm（同 31 ~ 54mm）、平均重量 17.0g（同 6.2 ~ 31.8g）であった。根は、長さ 19 ~ 47mm、太さ 1.6 ~ 2.4mm の細長い組織で、互いにかみあい、その間隙には砂や泥のほか、藻類や甲殻類、貝類、多毛類など多くの生物が付着していた。

### 根の保存中の茎形成能および保存に適する光量

各光量における根からの茎の形成状況について Table 3.1.1 に示した。最も光量の多い 70  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では、保存 30 日後には茎形成が見られ、60 日後には収容し

た根の半数以上からの茎形成が確認された。一方、25  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では、保存 90 日後までは茎の形成はなかったが、120 日後には茎形成が認められた。最も光量の少ない 1  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では、保存 150 日後でも茎形成は見られなかった。

### 茎の形成および生長に適する温度ならびに光量

培養 9 日後、23 °C の 120  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  と 230  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  に収容した切断片の切断面縁辺に、微細な突起が観察された。それらは、15 日後には全長 2mm 程度の突起物となり、茎の先端からは茎葉も形成されていた (Fig. 3.1.1E)。これに対して、最も茎形成が遅かったのは、17 °C の 50  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  で、茎形成が確認できたのは培養 30 日後であった。前述の 23 °C の 2 光量区では、培養 20 日後には全長が最大で 3mm 程度となり、茎葉を順次形成しながら伸長し、40 日後には全長 10mm を超えるものもあった (Fig. 3.1.1F)。この時、根の切断片 1 個からの茎形成数は最大 4 本であった。茎が形成される位置は、培養 21 日後までは切断片片側の切断面縁辺またはその近傍の側面からが多かったが、その後は反対側の切断面縁辺や側面中央部からも見られるようになり、40 日を過ぎる頃からは、新たな茎の形成はほとんど見られなくなった。

温度と光量の違いによる茎形成率と藻体の全長を Fig. 3.1.2 に示した。23 °C の茎形成率は、50  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では  $81.7 \pm 12.6\%$ （平均±標準偏差、以下同じ）、120  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では  $85.0\% \pm 8.7\%$ 、230  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では 80.0

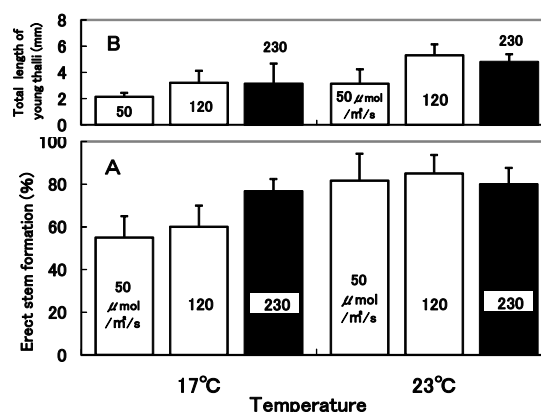


Fig. 3.1.2 Percentages of erect stem formations (A,%) and total lengths of young thalli (B,mm) from 5mm cut filamentous roots cultured at 17 °C and 23 °C under three different irradiances under (12L:12D) after 40days culture. Bars indicate mean  $\pm$  SD (A: n=20; three replicates, B: n=10).



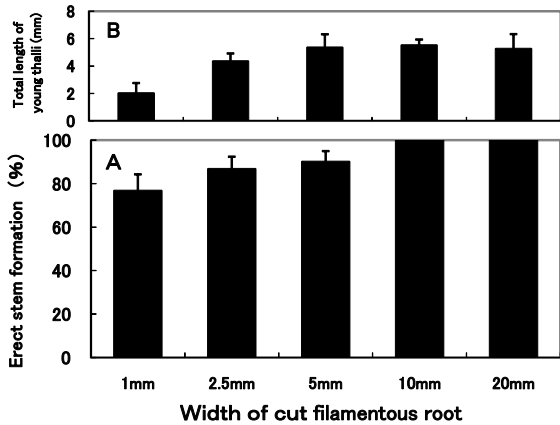


Fig. 3.1.3 Percentages of erect stem formations (A,% ) and total lengths of young thalli (B,mm) cultured from filamentous roots cut into different widths (23 °C, 120 μ mol/m<sup>2</sup>/s, 12L:12D, 40days culture) . Bars indicate mean ± SD (A: n=20; three replicates, B: n=10) .

± 8.7%といずれも 80%を超え、17 °C の 230 μ mol/m<sup>2</sup>/s も 76.7 ± 5.8%と高かった。しかし、17 °C の 50, 120 μ mol/m<sup>2</sup>/s では、それぞれ 55.0 ± 10.0%、60.0 ± 10.0% と低かった (Fig. 3.1.2A)。また、藻体の平均全長は、23 °C の 120 μ mol/m<sup>2</sup>/s と 230 μ mol/m<sup>2</sup>/s ではそれぞれ 5.3 ± 0.8mm、4.8 ± 0.6mm と長かったが、50 μ mol/m<sup>2</sup>/s では 3.1 ± 1.1mm と短かった。17 °C では、50 μ mol/m<sup>2</sup>/s で 2.1 ± 0.3mm、120 μ mol/m<sup>2</sup>/s で 3.2 ± 0.9mm、230 μ mol/m<sup>2</sup>/s では 3.1 ± 1.5mm と、いずれの光量も 2 ~ 3mm 台であった (Fig. 3.1.2B)。

#### 根の適切な切断幅

各切断幅における茎形成率、藻体の全長を Fig.3.1.3 に示した。茎形成率は切断幅 10mm 以上では 100%であったが、5mm では 89.0 ± 5.0%、2.5mm では 86.7 ± 5.8%、1mm では 76.7 ± 7.6%であった (Fig. 3.1.3A)。また、藻体の平均全長は、切断幅 2.5mm では 4.3 ± 0.6mm、5mm では 5.3 ± 1.0mm、10mm では 5.5 ± 0.4mm、20mm では 5.2mm ± 1.1mm と、切断幅 2.5mm 以上の場合には 4 ~ 5mm 台であった。しかし、切断幅 1mm では 2.0mm ± 0.8mm と短かった (Fig. 3.1.3B)。

切断幅と茎形成数との関係を Fig. 3.1.4 に示した。切断片 1 個あたりの茎形成数は、最も切断幅の広い 20mm では 5.8 ± 2.0 本、半分の 10mm では 2.8 ± 1.3 本であった。さらに細かく切断した切断幅 1, 2.5, 5mm での茎形成数は、それぞれ 1.0 ± 0.2 本、2.3 ± 0.9 本、1.4 ± 0.4 本で大差はなく、切断幅 5mm 以下と 20mm 以上

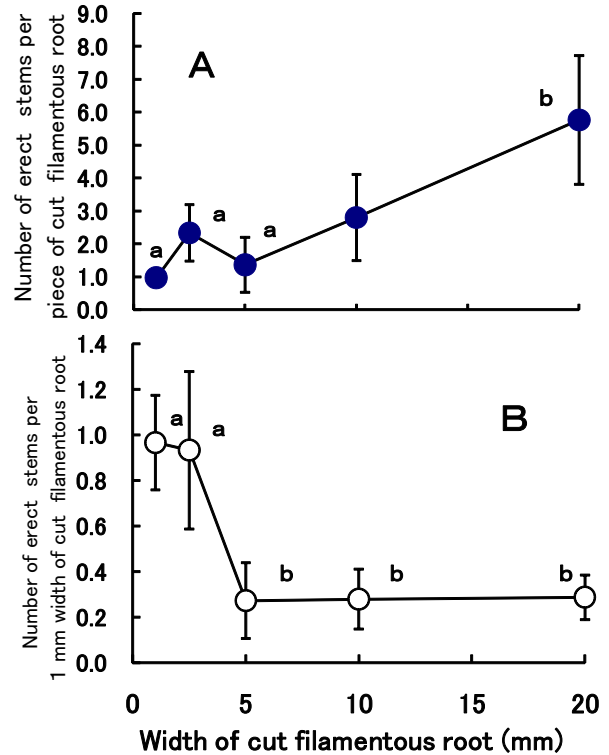


Fig. 3.1.4 Relationships of the widths of cut filamentous roots to the number of erect stems per piece (A) and per 1mm width (B) of cut filamentous roots (23 °C, 120 μ mol/m<sup>2</sup>/s, 12L:12D, 40days culture) . Bars indicate mean ± SD (n=20; three replicates) . Levels not connected by the same letter are significantly different (Tukey-Kramer test, *p*<0.05) .

とでは有意差が見られた (Fig. 3.1.4A)。切断幅 1mm あたりの茎形成数は、切断幅 5mm では 0.27 ± 0.17 本、10mm では 0.28 ± 0.13 本、20mm では 0.28 ± 0.10 本に対して、より細かく切断した切断幅 1mm および 2.5mm では、それぞれ 0.97 ± 0.21 本、0.93 ± 0.34 本と、切断幅 5mm 以上の値の約 3 倍であった。切断幅 2.5mm 以下と 5mm 以上とでは、有意差が見られた (Fig. 3.1.4B)。

#### 考 察

ヒジキについて、根を細断し培養することで茎を形成させるためには、根を細断するまで、茎形成能が維持された状態で、茎を形成させないで保存できることが最も望ましい。今回、培養庫（温度 12 °C、光周期 12L:12D）に収容した根については、光量 70 μ mol/m<sup>2</sup>/s では 30 日後には早くも茎の形成が確認されたが、25



$\mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$  では保存 90 日後までは茎主枝の形成はなかったものの、120 日以降の観察では認められるようになった。一方、 $1 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$  では 150 日後でも茎形成は見られなかった (Table 3.1.1)。ヒジキ養殖において、収穫は通常 4 月下旬～5 月上旬で、次漁期の種苗の沖出しは 11 月に行われる<sup>41)</sup>。今漁期の根を次漁期の種苗の材料として使用する場合、根の細断から沖出し用種苗完成までの培養期間を 3～4 ヶ月と仮定すれば、根の保存は最長でも 4 ヶ月 (120 日) 程度でよいと考えられる。このため、茎形成能を維持した状態で根を保存しておくには、今回の実験設定の範囲では水温  $12^\circ\text{C}$ 、光量  $25 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$ 、光周期 12L:12D の条件が好適であると判断される。

なお、ヒジキ付着器は、天然では 7～8 年生き続けると言われていることから<sup>20,29)</sup>、かなりの長期保存に耐える可能性がある。ホンダワラ類のアカモク *Sargassum horneri* 幼胚では、1 年間の暗黒条件下の冷蔵 ( $5^\circ\text{C}$ ) 後でも高い生残率と発芽能を有し、それよりやや高い温度 ( $10 \sim 17^\circ\text{C}$ ) で 5 日間ほど馴致を行って屋外で培養を開始したところ、成長・成熟することが報告されている<sup>71,72)</sup>。今回、光量  $1 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$  では保存 150 日後でも茎の形成は見られなかったが、同条件、さらに  $5^\circ\text{C}$  程度の低温や暗黒などの光条件の検討、長期保存後の切断前に行うべき馴致条件を検討することで、高い茎形成能を有した根が得られると考えられる。根の長期保存と切断前の馴致条件が解明されれば、周年、種苗生産を開始でき、形質の比較試験や優良藻体の選抜および保存も可能となる。

温度と光量の違いによる茎の形成率は、 $23^\circ\text{C}$  の全光量では 80%以上、 $17^\circ\text{C}$  の  $230 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$  でも 76.7%と高かった。しかし、 $17^\circ\text{C}$  の  $120 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$  以下では 55～60%とやや低かった。また、形成された幼体の全長は、 $23^\circ\text{C}$  の  $120$ 、 $230 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$  では 4～5mm 台に達していたのに対し、同温の  $50 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$  の弱い光量や  $17^\circ\text{C}$  の水温ではいずれの光量でも 2～3mm 台に過ぎないなど生長差が見られた (Fig. 3.1.2)。以上から、根の切断片からの早期の茎形成と生長には、 $23^\circ\text{C}$ 、 $120 \sim 230 \mu \text{ mol/m}^2/\text{s}$  の比較的高温で強い光量が適することが明らかとなった。Hwang *et al.*<sup>73)</sup>は、照度 500～15,000lx、温度  $5 \sim 20^\circ\text{C}$  の範囲で、天然藻体から切り取った付着器からの幼体形成を 28 日間観察しているが、1,000lx 以上ではすべての温度帯で幼体形成が認められたのに対して、500lx の低照度ではいずれの温度帯でも幼体がまったく見られなかったことから、幼体形成には照度が最も重要な因子であると述べている。ま

た、天然のヒジキ群落における付着器からの幼体の形成は、8 月の盛夏であり<sup>28,33)</sup>、水温、照度ともに年間で最も高い時期に相当することから、今回の結果は、天然での幼体形成の条件にも合致するものと思われる。

切断幅と茎形成率については、切断幅 5mm 以下では 10mm 以上に比べて茎形成率は 10～20%程度低下するものの大きな違いは見られなかった。しかし、藻体の全長については、最も細かい切断幅の 1mm のみが、他の切断幅よりも短かった (Fig. 3.1.3)。また、切断幅と茎形成数については、切断幅が広くなるにつれて、茎の形成数も多くなる傾向が見られ、切断幅 5mm 以下と 20mm 以上とでは有意差があった (Fig. 3.1.4A)。しかし、切断片 1mm あたりの形成数は切断幅 2.5mm 以下では 0.93～0.97 本であったのに対し、5mm 以上では 0.27～0.28 本と少なく、2.5mm 以下と 5mm 以上とでは有意差が見られた (Fig. 3.1.4B)。すなわち、同じ長さの根を切断する場合、切断幅を 2.5mm 以下にするか否かで、得られる茎の数に約 3 倍の差が出ると考えられる。根を 2.5mm 以下に細かく切断する作業は、この方法による種苗生産技術、さらには種苗の量産化技術へと発展させる重要な手段になるものと思われる。茎が形成された位置は、根の切断面縁辺またはその近傍の側面からが多かったことから、一定量の根からより多くの茎を得るためには、なるべく根の切断面の面積を増やすような切断方法、例えば、最良の切断幅を保ったままで根を輪切りにしていくような方法が効果的と言えよう。切断幅 1mm では形成された幼体の長さが他に比べて短く、極度に微細な切断は切断片自身の生存が不安定化するため、切断幅は 2～3mm 程度が妥当であると推察される。

なお、根を切断することによる茎形成率増加のメカニズムについては今後検討が必要であるが、陸上植物における植物ホルモンのような存在が推定される。陸上植物では、オーキシンやジベレリン、サイトカイニンなど各種の成長ホルモンの存在が明らかになっており<sup>74)</sup>、産業的にも利用されている。しかし、藻類の場合、その存在が明らかにされているのは、紅藻のカザシグサの仲間 (*Griffithsia* sp.) で発見されたロドモルフィンぐらいであり、今後の研究が待たれる。

本研究の結果から、養殖ヒジキを収穫したあとに残る大量の付着器を採取し、ほどいて繊維状根とし、洗浄して低温で保存しておき、沖出し時期にあわせて細断、培養してヒジキ幼体を多数形成発生させる方法は、栄養繁殖を利用した、天然ヒジキ資源へ影響を及ぼさない新たな種苗生産の手法として応用できる可能性が

高いと判断される。

今後は、本法で生産された種苗の海域での生長や形態、生産量を明らかにすることが必要である。また、産業的規模での種苗供給のためには、量産化技術の開発も必要である。

## 第2節 種苗の量産化の検討と海域での生長

前節ではヒジキ付着器を構成する繊維状根の細断と培養でヒジキ幼芽が発生し、養殖用の種苗として利用できる可能性があることを示した。そこで本節では、前節による種苗作出方法の応用として、家庭用ミキサーを用いての大量細断方法と作出した種苗の陸上での培養方法を検討した。また、人工種苗を海域に沖出しして天然種苗との生長や生産量を比較し、利用の可能性について言及した。

### 材料および方法

#### ミキサーによる付着器の大量切断と培養

前節でピーカーに保存している繊維状根を使用した（Fig. 3.2.1A）。短時間で大量の切断を目的とし、家庭用ミキサー（日立ホームテック VA-W07）を使用して繊維状根の大量切断を行った（Fig. 3.2.1B）。繊維状根をインキュベーターに保存してから 60 日後の 2007 年 6 月 26 日、ミキサーに繊維状根 30.0g と培養液を入れ、断続的にスイッチを入れて（1 秒× 10 回）、繊維状根を細かく切断した。その後、切断片を 1mm メッシュ網に通して微細な破片を取り除いたあと、任意の切断片 120 個について、切断片の幅（最も長い部分）を測定した。これらを 12cm シャーレ 20 枚に均等に収容して、温度 23℃、光量  $120 \mu \text{mol/m}^2/\text{s}$ 、光周期 12L:12D の条件下で培養し、茎や茎葉の形成経過を観察した。培養 40 日後に、全シャーレの切断片数と茎が発生している切断片数を計数し、茎形成率（%）を求めた。また、茎が発生している切断片数を、切断に使用した繊維状根の重量で割って、付着器 1g あたりの茎形成数を求めた。さらに、各シャーレ内の切断片の任意の 6 個、計 120 個の切断片の長さ（最も長い部分）をノギスで測定し、茎が形成されている場合には、茎の本数と全長（基部から先端まで）を測定した。また、茎形成が見られる切断片について、切断片の長さ（最も長い部分）と切断片 1mm あたりの茎形成数（切断片の茎数をその切断片の幅

（mm）で除したもの）との関係、切断片の長さ（最も長い部分）と茎長との関係について検討した。

培養は切断から約 3 ヶ月間行い、ほぼ 2 週間ごとに幼体の全長（藻体の基部から先端まで）を測定し、培養液を交換した。培養中のシャーレ内には、他の藻類の発生が見られることがあったので、これらは測定時にピンセットで除去した。同時に、茎形成の見込みのない切断片は、測定時に取り除くようにした。

#### 沖出し種苗サイズまでの培養

切断から約 3 ヶ月経過して、平均全長約 16mm に伸長した幼体のうち 600 個を、2007 年 9 月 22 日に屋外直射日光下の透明 500ℓポリガーボネット水槽 1 つに移して 11 月末まで培養を続けた（Fig. 3.2.1E）。海水はろ過海水を 1.5ℓ/分のかけ流しとした。ほぼ 2 週間に 1 回、幼体の全長と重量を測定し、主枝数や付着器の発生率（培養中の幼体に占める仮根の発生が認められた幼体の割合を%で示す）、屋外培養開始からの歩留まり（%）、挟み込み養殖の種苗として沖出しできるものの割合（培養中の幼体に占める、全長 100mm 以上の幼体の割合を%で示す）を算出した。培養中には、他の藻類の発生が見られることがあったので、測定時には水槽を掃除し、同時に、ヒジキ幼体への付着藻類は手で取り除いた。

#### 海域での養殖

全長 100mm 以上に達した種苗を、12mmPP ロープに 5cm 間隔で 5m 分を挟み込み（Fig. 3.2.1F）、2007 年 11 月 20 日に大分県中津市沿岸の干潟域（Fig. 2.2.1）に第 2 章第 2 節の支柱を利用した方法で張り込み、翌 2008 年 6 月末まで養殖した。挟み込み 1 ヶ所あたりの種苗の株数は 3～5 株、重量は 10～15g とした。同時に、対照として中津市中津港で採集した天然のヒジキ種苗（平均全長約 20cm）を、同一手法で同じロープに 5m 分を挟み込んで養殖した。ロープ等の資材はすべて第 2 章 2 節と同一とした。開始後、2 週間～ 1 ヶ月ごとに両区間のヒジキの全長を任意の 10 株について測定した。また、人工種苗について、付着器の発生状況や生殖器床形成を観察した。2008 年 5 月 7 日には、それぞれの養殖ロープ 4m 分の収穫を行い、生産量（湿重量）を比較した。

## 結 果

### ミキサーによる繊維状根の大量切断と培養

ミキサーで切断された切断片の長さは、1mm 前後から最大で 30mm までと幅があり、平均値は 7.3mm であった (Fig. 3.2.1C、Fig. 3.2.2)。最も多かったのは 2.5～5.0mm の範囲で、切断片数の 36.7% を占めた。ついで 5.1～7.5mm の 15.0%、0～2.5mm の 14.2% と続き、この 3 区間 (0～7.5mm) で全体の 65.9% を占めた (Fig. 3.2.2)。茎の形成は、最も早いものでは培養 14 日後に観察された。切断 40 日の観察では、各切断片から、長いもので全長 10mm 程度の茎形成が見られていたが、切断片 1 個からの茎形成数は、0～5 本と幅があり、発生の位置も切断片の片方側のみとは限らず、両側から発生する場合もあった (Fig. 3.2.1D)。また、シャーレ 1 枚あたりの切断片数は平均 169.4 個で、そのうち茎形成が見られた切断片は 69.7 個 (41.1%) であった。今回 30.0g の繊維状根を細断し、シャーレ 1 枚には約 1.5g を収容

したことから、繊維状根 1g あたりでは、 $69.7/1.5 = 46.4$  個の茎が形成された切断片を得られたことになる。

ミキサーで切断された切断片の長さとの茎形成数の関係は、 $y = 0.0754x + 0.7693$  の回帰式で示されたが、両者の間の相関は強くはなかった (Fig. 3.2.3A)。これを切断片 1mm あたりに換算すると、 $y = -0.198 \ln(x) + 0.6044$  で示され、切断片の幅が 2～3mm 程度までは、切断幅が小さいほど茎形成数が多くなる傾向にあった (Fig. 3.2.3B)。また、切断片の長さとの茎の長さとの関係は  $y = 0.1585x + 1.8103$  で示されたが、両者の間の相関は強くはなかった (Fig. 3.2.3C)。

### 沖出しサイズまでの培養

ミキサーで切断後、3 ヶ月間の室内培養と、引き続き屋外での 2 ヶ月間の培養の成長経過を Fig. 3.2.4 に示した。形成された茎は茎葉を形成しながら伸長し、室内培養 3 ヶ月の間に、藻長約 16mm に成長した。屋外での培養に移ると、ヒジキは急激に伸長した。屋外培



Fig. 3.2.1 Artificial production of Hiziki from cuts of filamentous roots and its aquaculture A:Filamentous roots stored in an incubator ; B:Cutting the filamentous roots by electric blender (June) ; C:Filamentous roots after cutting ; D:Young thalli growing from cut filamentous roots (40days culture) ; E:Outdoor tank cultivation; F:Artificial seedlings clipped between strands of the culture rope (November) ; G:Harvesting time of Hiziki cultured from artificial seedlings ; H:Holdfast formed base of artificial seedlings I:Receptacle formations on matured artificial seedlings.



Fig. 3.2.2 Size-composition of filamentous root cuts after cutting in a blender.

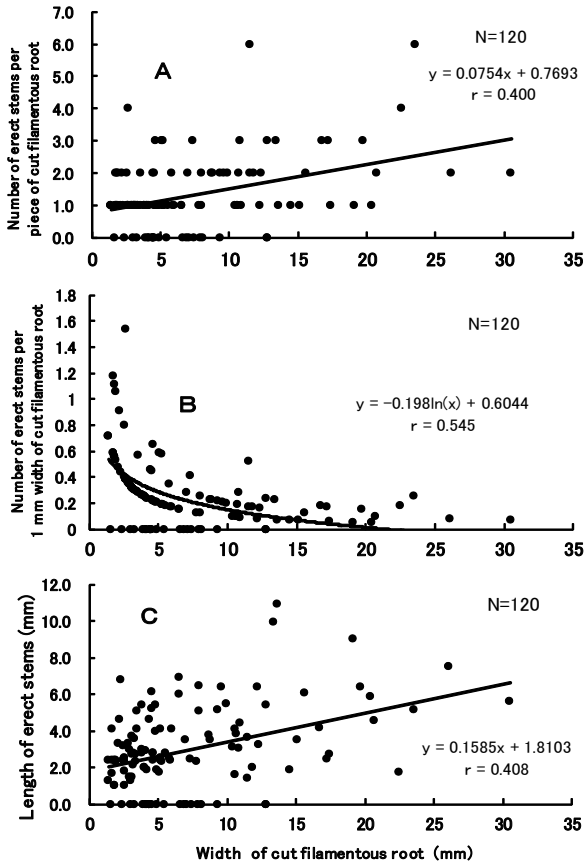


Fig. 3.2.3 Relationships of the widths of cut filamentous roots to the number of erect stems per piece (A), per 1mm width (B) of cut filamentous roots and length of erect stems (23 °C, 120 μ mol/m<sup>2</sup>/s, 12L:12D, 40days culture).

養開始1ヵ月後（切断から4ヵ月後）の10月下旬には、平均全長80mmに、11月上旬には120mm、平均重量は1.5gとなった。この時、培養中のうちの70%の株が沖出し可能なサイズの100mm以上となり、培養中の15%の株で付着器の形成が始まっていた。さらに11月下旬には、平均全長は166mm、平均重量2.2gとなり、ほぼ全数が100mmを超え、株数の20%で付着器形成が見られていた。9月に屋外水槽に移してから、ここまでの歩留まりは50%であった。

### 海域での人工種苗の生長、成熟、付着器の形成

沖出し後の生長を Fig.3.2.5 に示した。人工種苗、天然種苗ともに3月までの生長は緩慢であったが、4月以降急激に生長し、5月上旬には人工種苗で約70cm（Fig. 3.2.1G）、天然種苗で約88cmに達した。5月上旬に収穫したところ、湿重量で人工種苗11.0kg/m、天然種苗12.7kg/mであった（Fig.3.2.6）。この時、人工種苗、天然種苗ともに、種苗を挟み込んだ部分では、ロープを取り巻くように団子状の付着器が形成されていた。人工種苗の付着器は、天然種苗のものに比べると一回り小さかったが、10個体の測定で、長径30～48mm、

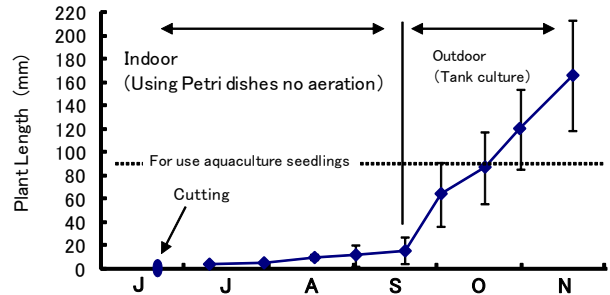


Fig. 3.2.4 Diagram of the artificial seedling production schedule of Hiziki according to its plant length after the cutting of filamentous roots.

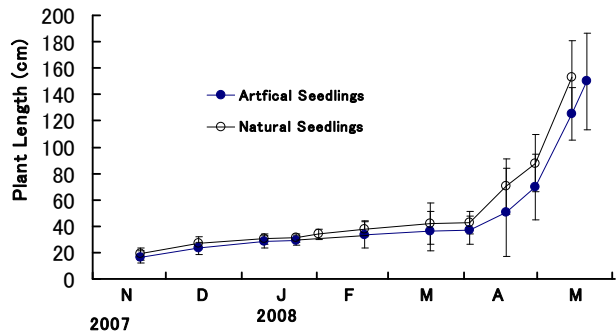


Fig. 3.2.5 Growth in plant lengths of artificial and natural seedlings of Hiziki after cultivation in the sea.

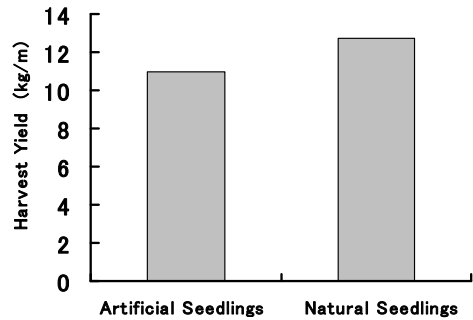


Fig. 3.2.6 Harvest yields of Hiziki per m of the culture rope in May 2008 for the artificial and natural seedlings.



平均 38mm、短径 21 ~ 31mm、平均 26mm、重量 4.4 ~ 10.9g、平均 7.2g であった (Fig. 3.2.1H)。収穫せずにそのまま養殖したヒジキは、6 月下旬観察時には、人工種苗 (Fig. 3.2.1I)、天然種苗ともに観察したすべての藻体に生殖器官が形成されていた。

## 考 察

一定量の繊維状根からより多くの茎形成を得るには、第 3 章第 1 節の基礎的実験から、根の切断幅は 2 ~ 3mm 程度が妥当とされている。今回、ミキサーで切断した切断片を用いた培養実験から、切断片が長いほど茎形成数が多い傾向 (Fig. 3.2.3A) や、形成された茎が長い傾向 (Fig. 3.2.3C) は若干見られたものの、それらの相関は強くはなく、前述の 2 ~ 3mm 幅での切断が、最も茎形成数も多くて効率的であると判断される (Fig. 3.2.3B)。実際にミキサーで細断された繊維状根の幅は、2.5 ~ 5.0mm の範囲が最も多く、全体の 36.7%であったことから (Fig. 3.2.2)、本法は比較的効率よい切断方法と考えられる。また、切断に要する作業時間も、ミキサー利用の場合、カミソリ等での切断に比べて大幅に短縮できるため、大量切断の手段としては実用であると言える。ただし、7.5mm を超える大きな繊維状根片も 34.1%あったことから (Fig. 3.2.2)、2 ~ 3mm の幅に極力揃えてムダなく切断できるような機器の選択や開発が望まれる。

シャーレ内での培養期間は、発生した茎や茎葉が大きくなるにつれて、これらの先端がシャーレの水位を超えるようになるため、3 ヶ月程度までが限界であった。9 月に屋外に出してから伸長速度は非常に速く、ほぼ 1 ヶ月後の 10 月には、平均全長は 80mm を超え、2 ヶ月後の 11 月下旬には、ほぼすべてが沖出しできるサイズの全長 100mm 以上になっていた。

沖出し後は、人工種苗、天然種苗ともにそれぞれ順調に生長したが、沖出し時の長さの差がその後の生長にもあらわれており、5 月上旬の収穫差にも影響したものであると思われる。通常、11 月下旬の天然ヒジキ群落は 20cm 程度にはなっていることから<sup>33,41)</sup>、沖出しまでの人工種苗の生長を、現状より早める手段、例えば切断作業の開始時期を早めるや、シャーレ培養から屋外培養へ早期に移動する等の対策が必要と考えられる。

今回、人工種苗と天然種苗の形態について詳細な検討はしていないが、収穫時の両者の形態は、天然に自生するヒジキに比べると、いずれも主枝が太く、気胞や葉の数が多い養殖ヒジキとしての特徴<sup>41)</sup>を示してい

た。したがって、天然種苗と同じ大きさで沖出しすることで、同程度の収穫を得られるものと推定される。

以上から、本法で作出した人工種苗は、養殖用種苗として利用可能であると判断された。また、収穫時には人工種苗のすべての株で付着器形成が見られていたことから、これらを再度採取して、再び人工種苗を作ることが可能である。さらにこの工程を繰り返すことで、天然種苗を採取することなく、人工種苗による継続的なヒジキ養殖が可能になると考えられる (Fig. 3.2.7)。著者のこれまでの研究では、前述の工程を 2 回繰り返した人工種苗を使用しても、茎発生から養殖に至るまで順調に生長したことを確認している<sup>79)</sup>。

以上の結果をもとに、一定量の種苗を得るために必要な繊維状根の重量を検討した。繊維状根 1g から 46.4 個の初期葉が形成されるが、それが人工種苗として使用できるまでの歩留まりは 50%であったことから、繊維状根 1g あたりでは、種苗生産数は 23.2 個となる。今回の養殖方法で養殖ロープ 50m を 1 本分、人工種苗でまかなうとすると、挟み込み 5cm 間隔から 1,000 ヶ所の挟み込みが必要となる。1 ヶ所あたり 3 個の人工種苗を挟み込むとすると 3,000 個の種苗が必要となり、必要な繊維状根の重量は  $3,000/23.2 = 129g$  と推定される。産業的規模での養殖では、養殖ロープの長さは数千メートルになると思われるが、その場合、収穫を終えた養殖ロープから付着器を採取し、必要量の繊維状根を確保することは困難とは思えない。しかし、その洗浄作業と、切断後の室内培養のスペースにはまだ検討の余地がある。また、一定量の繊維状根からより多くの人工種苗を得るためには、繊維状根の切断幅を 2 ~ 3mm に揃えて切断できる機器の選択や開発も重要である。種苗生産の量産化には今後、これらの課題を解決していく必要があるだろう。

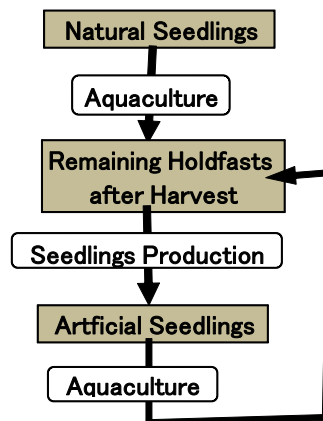


Fig. 3.2.7 A flow diagram for the reuse of holdfast and its artificial seedling production.

## 第4章 総合考察

褐藻綱ヒバマタ目ホンダワラ科のヒジキ *Sargassum fusiforme* は、北海道から沖縄、海外では朝鮮半島、中国南部に分布し、主に岩礁域の潮間帯に生育している。我が国の主な産地は、長崎県、千葉県、三重県、および大分県で、年間計 8,000 トンほどの天然藻体が採取されているが、これは国内需要の約 2 割に過ぎず、不足分は養殖を主体とする韓国などからの輸入に頼っている。近年、産地表示に対する消費者意識の変化、健康食志向などにより、国内生産の拡大が要望されている。このためには効率的な養殖の推進が求められる。韓国では、既に養殖が盛んに行われているが、その具体的な手法や生長経過などの詳細な報告はない。

研究では、天然藻体を種苗としたロープ挟み込みによる養殖を行い、生長や生産量を明らかにするとともに、汚損生物の着生状況や収穫適期などについて検討した。また、この養殖方法を本種が分布しない干潟域で試み、養殖場所の拡大の可能性を検討した。さらに、種苗を天然に依存しない方法として、繊維状根の細断による人工種苗生産の技術開発を行った。

第 1 章では、海藻類の海洋環境に果たす役割を概説すると共に、本種の利用や生産、流通の実態、さらには増養殖研究の概要をとりまとめ、養殖と人工種苗生産の必要性について言及した。

第 2 章 1 節では、天然種苗を用いたロープ挟み込み養殖（浮き流し方式）を大分県国見町の岩礁域地先にて行い、詳細な生長や生産量を調べた。秋季に藻長約 15cm で養殖を開始したところ、冬季の生長は緩慢であったが、4 月以降急速に生長し、5 月には藻長 1m となった。その生産量は 10kg/m（ロープ）となり、近傍の岩礁に生育する天然藻体に比べて、気胞や葉の数が多く、重量も 2 倍程度となった（Fig. 2.1.4, Fig. 2.1.6, Table 2.1.2）。

天然藻体にくらべて重量が増加した原因については、海面に設置された養殖施設と天然ヒジキが生育する潮間帯との間での、主に光量、栄養塩および波浪・流動等の環境条件の違いによるものと考えられるが、伊藤<sup>46)</sup>は、ヒジキの水深別養殖試験を行い、水深 2m のヒジキは、水面に近くヒジキに比べて気胞や葉の数が極端に少なく、重量も半分以下で、細くてひ弱な形態であったことを報告している。この形態は、天然ヒジキと良く似ていることから、形態差が生じた理由の一つとして水深差による光量差が推察される。空中から海中へ入射した光は、水、懸濁物、溶解物による光の散乱および吸収によって、水深が深くなるほど減衰す

るが<sup>46)</sup>、日本沿岸における測定例をみると、水深 0 ～ 0.5m 間での減衰が著しく、水深 2m における水面との相対光量は 30 ～ 40%にまで減少している<sup>46)</sup>。天然ヒジキは潮間帯下部に生育するため<sup>19)</sup>、大潮干潮時以外は水没しており、常に水面に浮遊する養殖ヒジキとの積算光量の違いは大きい。したがって、光量の差が形態差の理由の一つと推察される。

なお、ヒジキを製品に加工した場合、気胞や葉を使用した「芽ひじき」と、主枝等を使用した「長ひじき」に分けられるが、消費者の嗜好面から、現在は「芽ひじき」の需要が伸びていると言われている<sup>47)</sup>。このため、今回養殖したような気胞や葉が非常に多く、しかもそれらが大型になるヒジキは、現在の需要に合致したものであると言えよう。

養殖について、11 月開始と翌 1 月開始を比較すると、藻長、重量、生産量ともに早めの 11 月に沖出ししたほうが良好であった。11 月に養殖を開始した場合、およそ 5 ヶ月後の 4 月下旬～5 月上旬には養殖ロープ 1m あたり湿重量で約 10kg の収穫を得ることができた（Fig. 2.1.4, Fig. 2.1.5）。

養殖期間中、ロープの撚りに挟み込まれたヒジキの主枝数には、ほとんど変動が見られなかったことから、藻体の脱落や死亡はなかったものと推察される。また、繊維状根が伸長しロープに固着することや、そこから新たな藻体の発生も確認されたことから、付着器ごとヒジキを挟み込むことで藻体の脱落を防ぐとともに新たな藻体発生による収穫量の増加が期待できると思われる。

試験中にみられた汚損生物は、海藻では紅藻のイギス類や褐藻のシオミドロ類など、動物ではムラサキガイやウミシバ類などであった（Table 2.1.3）。これらは本種の生長を阻害するとともに、品質を下げる原因にもなるため、難波ら<sup>48)</sup>のような積極的対策の検討も必要である。養殖の実施にあたっては、まずは、付着生物が少ないと思われる海域を選定することが重要である。また、養殖ロープが水没した場合には、そこから短期間に多くの生物が付着していったことから、定期的に養殖施設の観察を行い、早い段階でこれらを除き、また、ブイを追加してロープの水没を防ぐといった養殖管理が必要である。

収穫時期については、十分な伸長が期待できる 5 月の後半が良いと思われるが、この頃すでに多くの藻類やムラサキガイが付着しており、商品価値の高いヒジキを収穫するには、その時期の判断がきわめて重要であると考えられる。ムラサキガイは殻色が黒いた

め、収穫後乾燥して黒くなったヒジキとの区別が付きにくく、死後も強力な足糸でヒジキに固着するため、商品価値を大きく低下させる。ムラサキイガイの産卵から稚貝付着までの期間は水温 10 ~ 15 °C では約 3 ヶ月、付着盛期の水温は 17 ~ 25 °C、水温 15 °C 以上では付着後 1 ヶ月間で約 3mm に成長するとされている<sup>49)</sup>。当該養殖海域の水温は 5 月上旬には 17 °C を超えるため (Fig. 2.1.3)、この時期、ムラサキイガイは付着盛期に入るとともに 1 ヶ月以内に肉眼でも確認できる大きさになることが推察される。以上から、本海域においてムラサキイガイの付着による商品価値の低下を回避し、かつ、多くの収穫を得るためには、水温が 17 °C となる 5 月の下旬までに収穫を終えることが妥当と考えられる。

干潟域での養殖 (第 2 章 2 節) は、大分県中津市地先のノリ養殖漁場にて行った。干潟に支柱を建て、これに養殖ロープを取り付ける方法とした。設置地盤高により、ロープの干出時間に差が生じた。干出の影響を調べたところ、干出時間が短いとヒジキの生産量は多くなるが、同時にムラサキイガイ等の汚損生物も多くなった。以上から、干潟域での養殖においては、干出時間の選定が重要になると考えられた。日平均約 2 時間 (D.L (潮汐表基準水面) 30cm に相当) の干出で、生産量は 10kg/m を超え、汚損生物はわずかであった。これより、干潟域においても十分に養殖が可能であると判断された。なお、今回試験を実施したノリ養殖漁場は、低栄養塩のために下級漁場とされていたにもかかわらず、養殖ヒジキの生長は良好であった。ヒジキの栄養塩要求量は他の海藻類に比べて低いと推察されることから<sup>58)</sup>、ノリ養殖に適さない低栄養塩海域においても、ヒジキ養殖は十分にできる可能性があり、今後の普及が期待される。

支柱を立てこむ地盤高 (D.L.) の違いによる生長を高 D.L.80cm、中 D.L.30cm、低 D.L.0cm の 3 段階で調査した結果、最も高い D.L.80cm では本種の生長は不良で生産量も 2.1kg に過ぎなかったが、中の D.L.30cm および低い D.L.0cm ではそれぞれ 13.4kg、15.8kg を得た (Fig. 2.2.9)。後二者の値は、海面に養殖ロープを常に浮かせる方法 (浮き流し方式) で養殖を行う際の生産量<sup>41)</sup>と遜色ないものであったことから、干潟域での養殖には、地盤高の選定 (干出時間) が非常に重要であることが判明した。D.L.80cm のヒジキ生産量は極端に少なく、これは他区に比べて藻長が短いことや、ヒジキが繁茂する土台となる付着器の発達状況が不良であること、そこから形成される主枝数が少ないことに由来するが (Fig. 2.2.10)、これらの現象は、地盤高が高いことに

よる長期の干出時間の影響と考えられる。

付着生物については、ムラサキイガイでは D.L.0cm においては、中、高地盤高の約 5 倍の付着数が見られ (Fig. 2.2.11)、キイロウミシバにおいても、D.L.0cm でのみ付着が見られるなど (Fig. 2.2.12)、低地盤での付着生物の多さが目立っていた。これは前述とは対照的に、地盤高が低いことによる干出不足の影響と考えられる。ムラサキイガイの産卵期は長崎県の大村湾では 10 ~ 4 月であるが、付着の盛期は日本中部以南では 4 ~ 5 月とされている<sup>59)</sup>。ムラサキイガイの干出に対する耐性は、干出時の気温、湿度、日光、風、貝の生理状態や大きさ等によって左右され、気温 0 ~ 15 °C での干出耐性は非常に強いが、15 °C 以上では気温の上昇につれて干出耐性は弱くなり、半数致死干出時間は 20 °C では 110 時間かかるが、40 °C では約 1 時間となっている。今回の実験における温度変化を見ると、D.L.30cm では 4 月以降、最高気温 30 °C を超える日が大潮の 2 週間ごとに見られていることから、この気温と 1 日 120 分を超える平均干出時間が、D.L.30cm と D.L.80cm にあるヒジキへのムラサキイガイの付着と生長を抑制したと思われる。

キイロウミシバ幼生の付着盛期は、8 月および 11 月とされており<sup>60)</sup>、種苗を採取した 11 月には、すでに幼生が付着していた可能性が高い。しかし、今回の実験では、D.L.30cm と D.L.80cm にあるヒジキにはキイロウミシバの付着はまったく見られなかったことから、ムラサキイガイと同様、養殖中に干出により除去されたと考えられる。

収穫したヒジキは乾燥してから入札され流通業者に渡されるが、付着生物の多寡は品質、価格に大きく影響する。今回、D.L.0cm での養殖は、藻体の生産量は増加するものの大量の付着生物のため、品質的には問題があった。以上から、今回の試験地における適正地盤高は、D.L.30cm 程度と考えられる。潮汐や海域の異なる他の海域においても、同様の干出時間を得られる地盤高 (養殖日数に占める干出があった日数約 40%、1 日の干出時間約 2 時間、Table 2.2.1) に施設を設置するか、人為的に同様の環境を施すことで、本技術が応用でき、付着物の少ない高品質のヒジキ養殖が可能になるとと思われる。なお、試験地近辺の種苗採取地におけるヒジキの分布水深帯は D.L.20 ~ 80cm で、濃密分布範囲は 20 ~ 50cm であったが<sup>56)</sup>、今回の試験から得られた適正地盤高は 30cm で、天然ヒジキの濃密分布範囲とほぼ同じ値となっている。したがって、干潟域や砂質海岸で本養殖を行うにあたり、近隣にヒジキの繁



茂が見られる場合には、養殖施設の地盤高をヒジキの濃密分布範囲と一致させることが望ましいと思われる。

以上から、地盤高を選定し、ヒジキに適度な干出を与えることで、付着生物の少ない高品質のヒジキを生産できることがわかった。なお、何らかの理由で養殖ロープが地面に接地せず、ヒジキごと空中に暴露された場合、ヒジキは比較的短時間に枯死する現象が見られた。このことから、過度の乾燥は禁物であり、干出時でも水分を含んだ地面に養殖ロープが接地して、ヒジキが保湿されることが重要である。

また、これらの環境条件が整い、しかも施設の破損などが防げるようであれば、支柱の使用に限定する必要はない。例えば、前節の海面に杵ロープを組む浮き流し方式を、今回の試験で得られた適切な地盤高に設置しても、付着生物の少ない良好なヒジキが養殖できるものと考えられる。海域や手持ちの漁具、資材などに応じて、養殖方法を工夫、選択することで、干潟域や砂浜など遠浅の海岸においても、ヒジキ養殖の普及が図れるものと期待される。

部位別ヒジキ種苗の生長と生産量（第 2 章第 3 節）について、主枝先端のある全藻体区、直立体区、上部藻体区の 3 区では、養殖日数の経過にしたがって生長し、6 月の収穫時における各区の長さは、試験開始時の藻長の差がそのまま出た結果となった（Fig. 2.3.3）。これに対して、主枝先端のない下部藻体区では、養殖開始 3 ヶ月後（2003 年 2 月）の測定時でも主枝は伸長せず、新たな葉や気胞の形成もなく、主枝は衰弱し枯死したものもあった。ヒジキの生長形式は頂端生長<sup>61)</sup>といわれ、伸長は主枝の頂端部に存在する断面が三角形の頂端細胞による<sup>62)</sup>。このため、主枝先端のない下部藻体区では、主枝の生長不良や衰退、枯死がおこったと推定され、それは収穫日における同区の主枝数の減少にもあらわれていた（Table 2.3.1）。一方、付着器の有無でみた場合、付着器のある全藻体区と、付着器のない直立体区や上部藻体区とでは生長速度自体には差異がないと考えられることから、藻体の生長に付着器は関係しないと考えられる。

生産量においては全藻体区が最も多く、ついで直立体区、上部藻体区、下部藻体区となり、藻体の生長に準じた結果であった（Fig. 2.3.4）。付着器のない直立体区の生産量は、全藻体区よりも約 20%減少していたが、その理由として、収穫日の主枝本数の違いがあげられる（Table 2.3.1）。全藻体区では、養殖中に付着器の繊維状根がロープを取り囲むように 3 ～ 4cm の団子状に繁茂し、同時に新たな主枝の形成と伸長が見られてい

た。直立体区でも繊維状根が主枝の下部末端から再生し繁茂する現象は見られたが、全藻体区に比べると、大きくても 2cm 程度に過ぎず、形成された主枝数も少なく、長さも短かった。これらの違いが生産量の差となったものと思われる。さらに直立体を種苗とする場合には、現場での種苗刈り取り作業が煩雑で、刈り取ってバラバラになった藻体を束ねてから挟み込む必要もあるなど、作業量の増加が見込まれる。生産量の減少に伴う販売金額の低下も考慮する必要があり、全藻体を使用する場合と比べて有利とは言えない。

種苗の切断と再生を利用した栄養繁殖による養殖については、全藻体を上部と下部に切断してそれぞれを養殖した場合、合計生産量は 11.9kg（上部藻体区 6.7kg + 下部藻体区 5.2kg）となり、全藻体 9.0kg の 1.2 倍に相当した。しかし、この時、下部藻体区の挟み込み本数は試験開始時 10.6 本と、他区の 2 倍以上の挟み込みをしての結果であることや（Table 2.3.1）、採取した種苗を切断して、それを束ねて挟み込む作業労力、種苗を 2 つにわけることによる張り込みロープ長の増加、それに伴う収穫作業労力の増加などを考慮すると、これも有効な方法とは思えない。栄養繁殖が産業的に利用される背景には、例えばキリンサイ養殖<sup>20)</sup>では、ロープに藻体を挟み込んで垂下する方法で、日間生長率（湿重量）1.7 ～ 4.4%（鹿児島）、1.5 ～ 5.5%（フィリピン）といった、短期間に高い生長率が得られることが必要であり、今回の結果からは、ヒジキ養殖に栄養繁殖を利用するのは困難と思われる。

以上から、現状では、全藻体を使用して養殖をすることが、生産量の面でも作業労力の面からも最も有効であると言える。

なお今回、切断された主枝は養殖 3 ヶ月後でもほとんど再生しないことが確認されたが、天然の漁場においても同様の現象が生じている可能性がある。大分県では、収穫時には鎌の使用が奨励されているため<sup>63)</sup>、収穫後も漁場には長さ数 cm の主枝が残されている場合が多い。この主枝には、収穫時に基部ごと残された先端の生長点のない主枝と、収穫時にはその対象にならなかったような短い主枝の両方が混在する。大分県では 1 漁期に 2 回（12 ～ 1 月、4 ～ 5 月）、収穫を行う漁場もあるが、これらの漁場における、特に初回収穫後の漁場に残存する主枝の生長経過を詳細に観察しておくことは、今後、ヒジキ資源の持続的管理方策の策定において重要になるとと思われる。特に近年、ヒジキにおいては、天然、養殖ともに食害被害の報告<sup>64-67)</sup>が見られるようになっており、主枝先端の生長点が欠損

したヒジキのその後の伸長については、十分に把握しておく必要がある。

第3章では、繊維状根の細断による人工種苗生産の技術開発を行った。これは本種の付着器を構成する繊維状根の茎形成能に注目したものであり、生殖細胞を用いない簡易で実用的な種苗生産技術と言える。養殖は5月頃に終了するが、この際に残る付着器を採取したのち1本ずつの繊維状根にほぐし、低温で保存した。これらを細断し、さらに室内培養して茎を多数発生させ、幼体にまで生長させる方法である。繊維状根の低温保存には12℃、光量25  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  が、茎形成と生長には23℃、120～230  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  が適していた。切断から40日後には、茎形成率は85%、幼体の藻長は約5mmに達した。さらに繊維状根の適切な切断幅を検討したところ、2.5mm以下に切断することが有効であった。茎発生後シャーレ内で2～3ヵ月培養したのち屋外水槽に移し、10月には藻長80mmを超え、11月には種苗となる藻長100mm以上となった。これらを養殖したところ、天然種苗と同等の生産量が得られた。

第3章第1節では、ヒジキ繊維状根の保存や細断方法と、培養に適する条件を検討した。繊維状根を細断し培養することで茎を形成させるためには、根を細断するまで、茎形成能が維持された状態で、茎を形成させないで保存できることが最も望ましい。今回、培養庫（温度12℃、光周期12L:12D）に収容した根については、光量70  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では30日後には早くも茎の形成が確認されたが、25  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では保存90日後までは茎主枝の形成はなかったものの、120日以降の観察では認められるようになった。一方、1  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では150日後でも茎形成は見られなかった（Table 3.1.1）。ヒジキ養殖において、収穫は通常4月下旬～5月上旬で、次漁期の種苗の沖出しは11月に行われる<sup>4)</sup>。今漁期の根を次漁期の種苗の材料として使用する場合、根の細断から沖出し用種苗完成までの培養期間を3～4ヵ月と仮定すれば、根の保存は最長でも4ヵ月（120日）程度でよいと考えられる。このため、茎形成能を維持した状態で根を保存しておくには、今回の実験設定の範囲では、水温12℃、光量25  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 、光周期12L:12Dの条件が好適であると判断される。

なお、ヒジキの付着器は、天然では7～8年生き続けると言われていることから<sup>20,29)</sup>、かなりの長期保存に耐える可能性がある。ホンダワラ類のアカモク *Sargassum horneri* 幼胚では、1年間の暗黒条件下の冷蔵（5℃）後でも高い生残率と発芽能を有し、それよりやや高い温度（10～17℃）で5日間ほど馴致を行っ

て屋外で培養を開始したところ、成長・成熟することが報告されている<sup>71,72)</sup>。今回、光量1  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では保存150日後でも茎の形成は見られなかったが、同条件、さらに5℃程度の低温や暗黒などの光条件の検討、長期保存後の切断前に行うべき馴致条件を検討することで、高い茎形成能を有した根が得られると考えられる。根の長期保存と切断前の馴致条件が解明できれば、周年、種苗生産を開始でき、形質の比較試験や優良藻体の選抜および保存も可能となる。

温度と光量の違いによる茎の形成率は、23℃の全光量では80%以上、17℃の230  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  でも76.7%と高かった。しかし、17℃の120  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  以下では55～60%とやや低かった。また、形成された幼体の全長は、23℃の120、230  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  では4～5mm台に達していたのに対し、同温の50  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  の弱い光量や17℃の水温ではいずれの光量でも2～3mm台に過ぎないなど生長差が見られた（Fig. 3.1.2）。以上から、根の切断片からの早期の茎形成と生長には23℃、120～230  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$  の比較的高温で強い光量が適することが明らかとなった。Hwang *et al.*<sup>73)</sup>は、照度500～15,000lx、温度5～20℃の範囲で、天然藻体から切り取った付着器からの幼体形成を28日間観察しているが、1,000lx以上ではすべての温度帯で幼体形成が認められたのに対して、500lxの低照度ではいずれの温度帯でも幼体がまったく見られなかったことから、幼体形成には照度が最も重要な因子であると述べている。また、天然のヒジキ群落における付着器からの幼体の形成は、8月の盛夏であり<sup>28,33)</sup>、水温、照度ともに年間でも最も高い時期に相当することから、今回の結果は、天然での幼体形成の条件にも合致するものと思われる。

切断幅と茎形成率については、切断幅5mm以下では10mm以上に比べて茎形成率は10～20%程度低下するものの、大きな違いは見られなかった。しかし、藻体の全長は、最も細かい切断幅1mmのみで、他の切断幅よりも短かった（Fig. 3.1.3）。また、切断幅と茎形成数については、切断幅が広くなるにつれて、茎の形成数も多くなる傾向が見られ、切断幅5mm以下と20mm以上とでは有意差があった（Fig. 3.1.4A）。しかし、切断片1mmあたりの形成数は、切断幅2.5mm以下では0.93～0.97本であったのに対し、5mm以上では0.27～0.28本と少なく、2.5mm以下と5mm以上とでは有意差が見られた（Fig. 3.1.4B）。すなわち、同じ長さの根を切断する場合、切断幅を2.5mm以下にするか否かで、得られる茎の数に約3倍の差が出ると考えられる。根を2.5mm以下に細かく切断する作業は、こ

の方法による種苗生産技術、さらには種苗の量産化技術へと発展させる重要な手段になるものと思われる。茎が形成された位置は、根の切断面縁辺またはその近傍の側面からが多かったことから、一定量の根からより多くの茎を得るためには、なるべく根の切断面の面積を増やすような切断方法、例えば、最良の切断幅を保ったままで根を輪切りにしていくような方法が効果的と言えよう。切断幅 1mm では形成された幼体の長さが他に比べて短く、極度に微細な切断は切断片自身の生存が不安定化するため、切断幅は 2～3mm 程度が妥当であると推察される。

なお、切断することによる茎形成率増加のメカニズムについては今後検討が必要であるが、陸上植物ではオーキシシンやジベレリン、サイトカイニンなど各種の成長ホルモンの存在が明らかになっており<sup>74)</sup>、産業的にも利用されている。しかし、藻類の場合、その存在が明らかにされているのは、紅藻のカザシグサの仲間 (*Griffithsia* sp.) で発見されたロドモルフィンぐらいであり、今後の研究が待たれる。

本研究の結果から、養殖ヒジキを収穫したあとに残る大量の付着器を採取し、ほどいて繊維状根とし、洗浄して低温で保存しておき、沖出し時期にあわせて細断、培養してヒジキ幼体を多数形成発生させる方法は、栄養繁殖を利用した、天然ヒジキ資源へ影響を及ぼさない新たな種苗生産の手法として応用できる可能性が高いと判断される。

第3章第2節では、種苗の量産化と海域での種苗の生長について検討した。量産化の手法としてミキサーで細断された繊維状根の幅は、2.5～5.0mm の範囲が最も多く、全体の 36.7%であった。さらに 0～7.5mm の範囲では、全体の 65.9%を占めた (Fig. 3.2.2)。繊維状根の適切な切断幅について、ミキサーで切断された切断片を用いて培養実験を行ったところ、第3章第1節と同様に 2～3mm と考えられたことから、今回使用したミキサーによる切断方法は、比較的効率のよいものと考えられる。作業時間もカミソリで切断する場合に比べると、格段に短縮が図れるため、大量切断の手段としては実用的である。ただし、7.5mm を超える大きな仮根部片も 34.1%あったことから、2～3mm の幅に極力揃えてムダなく切断できるような機器の選択や開発が望まれる。

シャーレ内での培養期間は、発生した茎や茎葉が大きくなるにつれて、これらの先端がシャーレの水位を超えるようになるため、3ヵ月程度までが限界であった。9月に屋外に出してからの伸長速度は非常に速く、

ほぼ1ヵ月後の10月には、平均全長は80mmを超え、2ヵ月後の11月下旬には、ほぼすべてが沖出しできるサイズの全長100mm以上になっていた。

沖出し後は人工種苗、天然種苗ともにそれぞれ順調に生長したが、沖出し時の長さの差が、その後の生長にもあらわれており、この差が5月上旬の収穫差に影響したものと思われる。通常、11月下旬の天然ヒジキ群落は20cm程度にはなっていることから<sup>33,41)</sup>、沖出しまでの人工種苗の生長を、現状より早める手段、例えば切断作業の開始時期を早めるや、シャーレ培養から屋外培養へ早期に移動する等の対策が必要と考えられる。

今回、人工種苗と天然種苗の形態について詳細な検討はしていないが、収穫時の両者の形態は、天然に自生するヒジキに比べると、いずれも主枝が太く、気胞や葉の数が多量な養殖ヒジキとしての特徴<sup>41)</sup>を示していた。したがって、天然種苗と同じ大きさで沖出しすることで、同程度の収穫を得られるものと推定される。

以上から、本法で作出した人工種苗は、養殖用種苗として利用可能であると判断された。また、収穫時には人工種苗のすべての株で付着器形成が見られていたことから、これらを再度採取して、再び人工種苗を作ることが可能である。さらにこの工程を繰り返すことで、天然種苗を採取することなく、人工種苗による継続的なヒジキ養殖が可能になると考えられる (Fig. 3.2.7)。著者のこれまでの研究では、前述の工程を2回繰り返した人工種苗を使用しても、茎発生から養殖に至るまで順調に生長したことを確認している<sup>75)</sup>。

以上の結果をもとに、一定量の種苗を得るために必要な繊維状根の重量を検討した。繊維状根 1g から 46.4 個の初期葉が形成されるが、それが人工種苗として使用できるまでの歩留まりは 50%であったことから、繊維状根 1g あたりでは、種苗生産数は 23.2 個となる。今回の養殖方法で養殖ロープ 50m を 1 本分、人工種苗でまかなうとすると、挟み込み 5cm 間隔から 1,000 ヲ所の挟み込みが必要となる。1 ヲ所あたり 3 個の人工種苗を挟み込むとすると、3,000 個の種苗が必要となり、必要な繊維状根の重量は  $3,000/23.2 = 129\text{g}$  と推定される。産業的規模での養殖では、養殖ロープの長さは数千メートルになると思われるが、その場合、収穫を終えた養殖ロープから付着器を採取し、必要量の繊維状根を確保することは困難とは思えない。しかし、その洗浄作業と、切断後の室内培養のスペースにはまだ検討の余地がある。また、一定量の繊維状根からより多くの人工種苗を得るためには、繊維状根の切断幅を 2

～ 3mm に揃えて切断できる機器の選択や開発も重要である。種苗生産の量産化には今後、これらの課題を解決していく必要がある。

以上のことから、岩礁域および干潟域でのロープ挟み込み挟み養殖が可能であり、生産量も高いことが明らかとなった。干潟域での養殖は、ノリにかわる新たな産業となる可能性も示された。また、人工種苗生産については、基礎研究はほぼ終了したものと考えられ、今後は種苗の量産化を検討する必要がある。

## 要 旨

褐藻綱ヒバマタ目ホンダワラ科のヒジキ *Sargassum fusiforme* は、北海道から沖縄、海外では朝鮮半島、中国南部に分布し、主に岩礁域の潮間帯に生育している。我国の主な産地は、長崎県、千葉県、三重県、および大分県で、年間計 8,000 トンほどの天然藻体が採取されているが、これは国内需要の約 2 割に過ぎず、不足分は養殖を主体とする韓国などからの輸入に頼っている。近年、産地表示に対する消費者意識の変化や健康志向などにより、国内生産の拡大が要望されている。このためには効率的な養殖の推進が求められる。韓国では、既に養殖が盛んに行われているが、その具体的な手法や生長経過などの詳細な報告はない。

本研究では、天然藻体を種苗としたロープへの挟み込み養殖を行い、生長や生産量を明らかにするとともに、汚損生物の着生状況や収穫適期等について検討した。また、この養殖方法を本種が分布しない干潟域で試み、養殖場所の拡大の可能性を検討した。また、直立部のみを種苗とした養殖や、種苗の部位別生長を調べ、栄養繁殖を利用した養殖の可能性について検討した。さらに、種苗を天然に依存しない方法として、繊維状根の細断による人工種苗生産の技術開発を行った。

第 1 章では、海藻類の海洋環境に果たす役割や現地状況の概説すると共に、本種の利用や生産、流通の実態、さらには増養殖研究の概要をとりまとめ、養殖と人工種苗生産の必要性について言及した。

第 2 章では、天然種苗を用いたロープ挟み込み養殖（浮き流し方式）を大分県国見町の岩礁域にて行い、詳細な生長や生産量を調べた。さらに、この養殖方法を干潟域で試みた。また、直立部のみを種苗とした養殖や、種苗を部位別に切断し再生による栄養繁殖を利用した養殖について検討した。岩礁域では、秋季に藻長約 15cm で養殖を開始したところ、冬季の生長は緩慢であったが、4 月以降急速に生長し、5 月には藻長 1m

となった。生産量は 10kg/m（ロープ）となり、近傍の岩礁域に生育する天然藻体に比べて、気胞や葉の数が多く重量も 2 倍程度となった。この理由としては、養殖施設（浮き流し方式）と天然ヒジキが生息する岩礁域との間での受光量の違いが考えられた。汚損生物としては、海藻では紅藻のイギス類や褐藻のシオミドロ類等がみられ、動物ではムラサキイガイやウミシバ類等が出現した。

一方、干潟域での養殖は、大分県中津市地先にて行った。干潟に支柱を建て、これに養殖ロープを取り付ける方法とした。設置地盤高により、ロープの干出時間に差が生じた。そこで干出の影響を調べたところ、干出時間が短いとヒジキの生産量は増加したが、同時にムラサキイガイなどの汚損生物も多くなった。干出時間の選定が重要であり、1 日平均約 2 時間（潮汐表基準水面 30cm に相当）の干出で、生産量は 10kg/m を超え、汚損生物も少ないとの結果が得られた。これより、干潟域においても十分に養殖が可能であると判断された。岩礁域、干潟域ともに、ムラサキイガイの汚損被害を防ぐためには、本種稚貝の成長が盛期となる以前の 5 月中に収穫するのが適当と考えられた。

種苗の部位別の生長は、主枝先端の生長点を含む部位以外はほとんど生長しなかったことから、栄養繁殖の利用は困難であると判断された。また、直立部のみを種苗として使用するより、付着器ごと使用したほうが、生産量も約 20% 多くなることが判明し、付着器を含む全藻体を種苗として養殖するのが最も有効と判断された。

第 3 章では、繊維状根の細断による人工種苗生産の技術開発を行った。これは本種の付着器を構成する繊維状根の茎形成能に注目したものであり、生殖細胞を用いない簡易で実用的な種苗生産技術といえる。養殖は 5 月頃に終了するが、この際に残る付着器を採取したのち 1 本ずつの繊維状根にほぐし、低温で保存した。これらを細断し、さらに室内培養して茎を多数発生させ、幼体にまで生長させる方法である。繊維状根の低温保存には 12℃、光量 25  $\mu$  mol/m<sup>2</sup>/s が、茎形成と生長には 23℃、120～230  $\mu$  mol/m<sup>2</sup>/s が適していた。切断から 40 日後には、茎形成率は 85%、幼体の藻長は約 5mm に達した。さらに繊維状根の適切な切断幅を検討したところ、2.5mm 以下に切断することが有効であった。茎発生後シャーレ内で 2～3 ヶ月培養したのち、屋外水槽に移し、10 月には藻長 80mm を超え、11 月には種苗サイズの藻長 100mm 以上となった。これらを養殖したところ、天然種苗と同等の生産量が得られた。

以上のことから、岩礁域および干潟域でのロープ挟み込み挟み養殖が可能であり、生産量も高いことが明らかとなった。干潟域でのヒジキ養殖は、ノリ養殖にかわる新たな産業となる可能性も示された。また、人工種苗生産については、基礎研究はほぼ終了したものと考えられ、今後は種苗の量産化を検討する必要がある。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、全般にわたって懇切丁寧なご指導とご校閲をいただいた長崎大学水産学部教授 北村 等博士に心より感謝申し上げます。また、本論文のご校閲とご助言をいただいた長崎大学教授 原研治博士、同教授 山口恭弘博士に深謝いたします。また、論文作成にあたり、貴重なご指導、ご助言、励ましをいただいた長崎大学准教授 Cyril Glenn Satuito 博士に心よりお礼申し上げます。さらに、瀬戸内海区水産研究所の寺脇利信博士には、論文の具体的ご指導と暖かい励ましをいただき、同研究所の吉田吾郎博士には、校閲と貴重なご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。

海域での養殖試験においてご指導、ご協力を頂いた大分県漁業協同組合国見支店新敷由明委員長、井上泰広前支店長、江本欽治殿、津崎征男殿、同漁協中津支店園利喜春委員長、本田哲也支店長、前田泰弘殿に感謝します。

また、本研究の機会を与えて頂くとともに、終始ご指導下さった大分県農林水産研究指導センター水産研究部田森裕茂前部長、壽 久文部長、伊島時郎元水産試験場長、小原俊行前場長、岩本郁生浅海・内水面グループ長に感謝いたします。

現地調査には大分県東部振興局富高郁朗総括、北部振興局中川彩子、水産振興課大塚猛、平川千修、農林水産研究指導センター金澤 健、田西三希子、同センター浅海チーム片野晋二郎、原 朋之（いずれも当時）の各位にご協力をいただきました。また、実験室内での作業や実験には、稲田貴子、花野富美子、後藤貞美、土谷園子、島村孝子、澤井香織の各位にご協力をお願いしました。皆様に感謝いたします。

最後に、大学時代よりの長きにわたり、小生をご指導下さった長崎大学名誉教授の右田清治博士、長崎大学環境科学部准教授の飯間雅文博士、入庁以来一貫してご指導と励ましをしてくださった石川佑司元大分県海洋水産研究センター長、そしてわたしの家族に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 山田信夫.「海藻利用の科学」成山堂書店, 東京. 2000 ; 2-136.
- 2) 千原光雄.「学研生物図鑑海藻」学習研究社, 東京. 1983 ; 1-292.
- 3) 水産庁中央水産研究所.「藻場の機能」神奈川. 1997.
- 4) 寺脇利信. 第1章 藻場.「21世紀の海藻資源」(大野正夫編著), 緑書房, 東京. 1996 ; 2-30.
- 5) 環境省自然保護局, 財団法人海中公園センター. 第4回自然環境保全基礎調査 海域生物環境調査報告書 第2巻 藻場. 1994.
- 6) 關 哲夫, 谷口和也. 磯焼けの研究と修復技術の歴史.「水産学シリーズ 160 磯焼けの科学と修復技術」(谷口和也・吾妻行雄・嵯峨直恆編), 恒星社厚生閣, 東京. 2008 ; 93-106.
- 7) 桐山隆哉, 藤井明彦, 吉村 拓, 清本節夫, 四井敏雄. 長崎県下で 1998 年秋に発生したアラメ類の葉状部欠損現象. 水産増殖 1999 ; 47 : 319-323.
- 8) 清水 博, 渡辺耕平, 新井章吾, 寺脇利信. 日向灘沿岸におけるクロメ場の立地環境条件について. 宮崎県水産試験場研究報告 1999 ; 7 : 29-41.
- 9) 清本節夫, 吉村 拓, 新井章吾, 桐山隆哉, 藤井明彦, 四井敏雄. 長崎県野母崎において 1998 年秋に発生したクロメ葉状部欠損現象の経過観察. 西水研研報 2000 ; 78 : 57-65.
- 10) 東洋航空事業株式会社. 第2回自然環境保全基礎調査 浅海調査報告書. 1980 ; 294-298.
- 11) 環境省自然環境局・生物多様性センター. 第7回自然環境保全基礎調査 浅海域生態系調査(藻場調査) 報告書. 2008 ; 358-360.
- 12) 尾上静正, 平澤敬一. 緊急磯焼け対策モデル事業. 平成 18 年度大分県農林水産研究センター水産試験場事業報告 2008 ; 35-43.
- 13) 阿南宏重, 木村聡一郎, 高田淳史, 木本圭輔, 大屋寛, 福崎寿幸. マリンエコトピア '21 計画策定事業. 平成 10 年度大分県海洋水産研究センター事業報告 2000 ; 242-249.
- 14) 尾上静正, 内海訓弘, 三浦慎一, 日高悦久, 高野英利, 寿 久文. 藻場再生緊急対策事業. 平成 13 年度大分県海洋水産研究センター事業報告 2002 ; 173-183.
- 15) 吉田吾郎, 堀 正和, 崎山一孝, 浜口昌巳, 梶田淳, 西村和雄, 小路 淳. 瀬戸内海の各灘における

- 藻場・干潟分布特性と主要魚種漁獲量との関係. 水産工学 2010 ; 47 : 19-29.
- 16) 大野正夫. 「有用海藻誌」内田老鶴圃, 東京. 2004 ; 297-329.
- 17) 能登谷正浩. 海藻バイオ燃料の有効性. ALGAL RESOURCES 2008 ; 1 : 72-73.
- 18) 農林水産省統計部. 平成 16 年漁業・養殖業生産統計年報. 農林水産省, 東京. 2006 ; 198-199.
- 19) 吉田忠生「新日本海藻誌」内田老鶴圃, 東京. 1998 ; 367-368.
- 20) 徳田 廣, 大野正夫, 小河久朗. 「海藻資源養殖学」緑書房, 東京. 1987 ; 1-354.
- 21) 大房 剛. 「海藻の栄養学」成山堂書店, 東京. 2007 ; 102-111.
- 22) 伊藤龍星. 挟み込み法によるヒジキ養殖技術の確立と種苗生産技術開発. 海洋と生物 2009 ; 185 : 667-671.
- 23) 高嶋康晴. 水産物表示に関する現状と課題. 日水誌 2007 ; 73 : 523-527.
- 24) 伊藤龍星. 海藻類の生産と利用. 1 食用 9 ホンダワラ類 (ヒジキ, ホンダワラ, アカモク, その他). 「藻類ハンドブック」エヌ・ティー・エス, 東京. 2012 ; 602-607.
- 25) 片田 実. ヒジキの増殖に関する生態研究. 水産研究誌 1940 ; 35 : 320-326.
- 26) 長谷川由雄. ヒジキの増殖に関する生態的研究. 北海道水産試験場研究報告 1949 ; 1 : 25-31.
- 27) 須藤俊造. ヒジキの卵, 精子の放出及び幼胚の離脱と着生について (海藻の胞子付けの研究第 11 報). 日水誌 1951 ; 17 : 9-12.
- 28) 須藤俊造. ヒジキの株の成長について. 日水誌 1951 ; 17 : 13-14.
- 29) 須藤俊造. 「水産増養殖叢書 9 沿岸海藻類の増殖」日本水産資源保護協会, 東京. 1965 ; 29-30.
- 30) 西川 博, 小川英雄. ヒジキの移植効果について. 水産増殖 1977 ; 24 : 123-127.
- 31) 新井朱美・新井章吾. 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 1983 ; 30 : 184-191.
- 32) 新井章吾. 新井朱美. 片田 実. 人の踏みつけによるヒジキ群落の衰退. 水産増殖 1985 ; 33 : 172-176.
- 33) 寺脇利信. 三浦半島小田和湾におけるヒジキの生長と成熟. 水産増殖 1985 ; 33 : 115-118.
- 34) 寺脇利信. お掃除フリーの海藻栽培水槽の試み 2. ヒジキの生育. 海苔と海藻 2001 ; 62 : 34-39.
- 35) 四井敏雄, 前迫信彦, 吉田 誠. 対馬におけるヒジキの胚からの成長. 日水誌 1996 ; 62 : 886-890.
- 36) 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けるヒジキの季節的消長. 日水誌 2002 ; 69 : 30-35.
- 37) 百瀬陽介, 伊藤絹子, 吾妻行雄, 谷口和也. 褐藻ヒジキの光強度, 水温, 塩分濃度に対する光合成特性. 水産増殖 2006 ; 54 : 383-390.
- 38) 寺脇利信, 伊藤龍星, 新井章吾. お掃除フリーの海藻栽培水槽の試み 14. 20%光量区でのヒジキの生育と成熟. 海苔と海藻 2008 ; 75 : 23-28.
- 39) 大野正夫. 韓国でのヒジキ養殖の現状. 海苔と海藻 1991 ; 37 : 20-23.
- 40) Sohn CH. *Porphyra*, *Undaria* and *Hizikia* Cultivation in Korea. *The Korean Journal of Phycology* 1993 ; 8 : 207-216.
- 41) 伊藤龍星, 寺脇利信, サトイト シリル グレン, 北村 等. 天然藻体のロープへの挟み込み法によるヒジキ養殖. 水産増殖 2008 ; 56 : 97-103.
- 42) 当真 武. クビレヅタ (海ぶどう). 「サンゴ礁域の増養殖」(諸喜田茂充編) 緑書房, 東京. 1988 ; 47-56.
- 43) 伊藤龍星, 寺脇利信, サトイト シリル グレン・北村 等. ヒジキ繊維状根の保存, 細断および培養条件. 水産増殖 2009 ; 57 : 579-585.
- 44) 伊藤龍星. ヒジキ養殖実用化技術開発事業. 平成 19 年度大分県農林水産研究センター水産試験場事業報告 2009 ; 175-179.
- 45) 有賀祐勝, 横浜康継. 藻類生理生態研究法 環境要因の測定 光. 「藻類研究法」(西澤一俊・千原光雄編) 共立出版株式会社, 東京. 1979 ; 436-446.
- 46) 工藤孝浩. 三浦半島, 小田和湾における海草群落の分布. 神奈川県水産総合研究所研究報告 1999 ; 4 : 51-60.
- 47) 山城繁樹, 戸高義敦, 南 元洋. ヒジキと海藻サラダ産業の現状と展望. 「有用海藻誌」(大野正夫編著) 内田老鶴圃, 東京. 2004 ; 370-379.
- 48) 難波信由, 小河久朗, 加戸隆介. ヒジキの多回収穫型養殖における汚損生物マコンブとムラサキイガイに対する温海水処理. *Sessile Organisms* 2008 ; 25 : 79-84.
- 49) 梶原 武, 浦 吉徳, 伊藤信夫. 東京湾の潮間帯におけるムラサキイガイの付着, 生長および死亡について. 日水誌 1978 ; 44 : 949-953.
- 50) アサリ資源全国協議会企画会議, 水産庁増殖推進部, 独立行政法人水産総合研究センター. 提言国産アサリの復活に向けて (平成 21 年 3 月改訂). 2009 ; 1-2.

- 51) 藤井弘治. 気になる海苔漁家の減少. 「ザ・海苔 '09,」海苔産業情報センター, 福岡. 2009 ; 17-23.
- 52) 南西海区水産研究所. 豊前海の漁場環境. 大規模砂泥域開発調査事業（豊前海域）総合報告書. 1991 ; 34-38.
- 53) 佐々木克之. 内湾および干潟における物質循環と生物生産【43】瀬戸内海漁業 2. 大分県漁業（その 2）豊後灘と豊前海. 海洋と生物 2006 ; 164 : 292-302.
- 54) 伊藤龍星, 林 亨次, 福田祐一, 田森裕茂. 浅海増養殖に関する研究 (6) ノリ養殖安定対策推進事業. 平成 20 年度大分県農林水産研究センター水産試験場事業報告 2010 ; 166-169.
- 55) 伊藤龍星. 鉄鋼スラグを利用した養殖ノリへの施肥の試み. 大分県農林水産研究指導センター研究報告（水産研究部編）2012 ; 2 : 7-12.
- 56) 伊藤龍星, 中川彩子, 富高郁朗, サトイト シルグレン, 北村 等. 大分県北部干潟域の港内防波堤に形成されたヒジキ群落. 大分県農林水産研究センター水産試験場調査研究報告 2009 ; 2 : 11-15.
- 57) 伊藤龍星. 日本の採取・増養殖の現状. 「水産学シリーズ 129 オゴノリの利用と展望」(寺田竜太・能登谷正浩・大野正夫編) 恒星社厚生閣, 東京. 2001 ; 58-74.
- 58) 田中俊充, 木村 創. 海藻類 5 種による栄養塩取り込みと複合養殖の試み. 和歌山県農林水産総合技術センター研究報告 2005 ; 6 : 195-203.
- 59) 坂口 勇. (1987) 付着生物の生態とその防除 二枚貝類. 「水産学シリーズ 64 海産付着生物と水産増養殖」(梶原 武編) 恒星社厚生閣, 東京. 1987 ; 100-107.
- 60) 西平守孝. 海藻付着性ハイドロゾアの生態学的研究. 東北大学大学院理学研究科博士学位論文要旨 1967 ; 130-135.
- 61) 広瀬弘幸. 生長点と生長線. 「藻類学総説」内田老鶴圃, 東京. 1981 ; 191-197.
- 62) Yoshida T, Majima T, Marui M. Apical organization of some genera of Fucales (Phaeophyta) from Japan. *Journ. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. V (botany)* 1983 ; 13 : 49-56.
- 63) 伊藤龍星. 大分県のヒジキ漁業と挟み込み養殖の試み. 瀬戸内海ブロック藻類研究会誌 2000 ; 2 : 13-20.
- 64) 桐山隆哉, 藤井明彦, 四井敏雄. 長崎県下で広く認められたヒジキの生育阻害の原因. 水産増殖 2002 ; 50(3) : 295-300.
- 65) 桐山隆哉, 藤井明彦, 藤田雄二. 長崎県下におけるヒジキ生育不良現象を摂食によって誘発している原因魚種. 水産増殖 2005 ; 53 : 419-423.
- 66) 伊藤龍星, 原 朋之. ヒジキ養殖定着推進事業. 平成 21 年度大分県農林水産研究センター水産試験場事業報告 2010 ; 188-190.
- 67) 中西達也. 牟岐町地先におけるヒジキの生長不良原因. 徳島県立農林水産総合技術支援センター水産研究所研究報告 2012 ; 8 : 23-26.
- 68) Hwang EK, Cho YC, Sohn CH. Reuse of holdfasts in *Hizikia* cultivation. *Korean Fish Soc.*1999 ; 32 : 112-116.
- 69) Pang SJ, Gao SQ, Sun JZ. Cultivation of the brown alga *Hizikia fusiformis* (Harvey) Okamura: controlled fertilization and early development of seedling in raceway tanks in ambient light and temperature. *J.Appl.Phycol.* 2006 ; 18: 723-731.
- 70) 田宮 博, 渡辺 篤. 「藻類実験法」南江堂, 東京. 1971 ; 88-104.
- 71) 吉田吾郎, 吉川浩二, 寺脇利信. 低温保存したアカモク幼胚の発芽率と成長. 日水誌 2000 ; 66 : 739-740.
- 72) 吉田吾郎, 吉川浩二, 内村真之, 寺脇利信. 一年生ホンダワラ類アカモク冷蔵種苗の成長と成熟. 藻類 2001 ; 49 : 177-184.
- 73) Hwang EK, Park CS, Sohn CH. Effects of light intensity and temperature on regeneration, differentiation and receptacle formation of *Hizikia fusiformis* (Harvey) Okamura. *Korean J. Phycol.*1994 ; 9 : 85-93.
- 74) 佐藤重平, 木村陽二郎, 宝月欣二, 八巻敏雄. 「現代植物学」裳華房, 東京. 1965 ; 144-149.
- 75) 伊藤龍星. ヒジキ養殖実用化技術開発事業. 平成 20 年度大分県農林水産研究センター水産試験場事業報告 2010 ; 183-188.