

海洋深層水による褐藻類とアワビの 集約的タンク養殖システムに関する研究

岡 直宏

愛媛大学連合農学研究科 790-8566 松山市樽味3-5-7

Study of Polyculture System of Brown Kelp (Phaeophyceae) and the Abalone Using Deep Seawater

Naohiro Oka

United Graduate School of Agricultural Science, Ehime University.,
3-5-7 Tarumi, Ehime 790-8566, Japan

Abstract: Deep seawater (DSW) is natural resources of little value compared with fossil fuels, but it was unlimited resources. DSW is expected to make efficient use of infinite natural resources. DSW has been pumped up from a depth of 320m and 340m off Kochi Prefectural Deep Seawater Laboratory in Muroto, Japan. The characteristic of DSW is that its temperature (ca 12°C) is lower than surface seawater throughout the year. The nutrient contents of DSW such as, dissolved inorganic nitrogen (DIN) (12.1-26.0 μ M) and dissolved inorganic phosphates (DIP) (1.1-2.0 μ M) were higher than surface seawater (DIN:0-5.4 μ M, DIP:0-0.5 μ M) in Muroto. The concentrations of pathogenic microorganisms in DSW are also much lower than surface seawater (Yamaguchi *et al.* 1994). Because of these characteristics, DSW consider to be a valuable source for mariculture of seaweed and shellfish (Roels *et al.* 1975).

A large amount of seaweeds is needed for abalone, *Haliotis sieboldii*, culture. However, the seaweed as food for abalone can't be collected from the natural sources anytime and anywhere and artificial foods for abalone are very expensive. Therefore, new method of seaweed cultivation in the tank is necessary. In this study, a new method of seaweed cultivation is designed with free living form "germling cluster" of brown kelp in the laboratory and outdoor tank using DSW. As the sporophytic germlings were connected by holdfast in this method, free floating form can be cultured in the tank.

The present thesis deals with, 1) establishment of the mass tank culture systems of brown kelps (the "wakame" *Undaria pinnatifida* and the "hosonomekonbu" *Laminaria religiosa*) using DSW, 2) examination of the growth of abalone fed on *Undaria pinnatifida* and *Laminaria religiosa*, 3) discussion of the polyculture system between the abalone and brown kelp using DSW.

1. Establishment of the mass culture systems of brown kelps using DSW

The growth and maturation of gametophytes and the growth of juvenile sporophytes dependence on showed that the physical factors (water temperature, irradiance and photoperiod) and chemical factors (nutrient condition). The optimal conditions of growth and maturation of gametophytes were strongly associated with the natural habitat under optimal conditions, it takes one month for the laboratory production of juvenile sporophytes.

It is possible to culture the brown kelp using DSW in outdoor tank throughout the year. The daily growth rate of *U. pinnatifida* was 20% in spring and autumn, 15% in summer and winter. The daily growth rate of *L. religiosa* was 20% from mid autumn to early spring, 7% in summer. The daily growth rate was correlated with ambient water temperature. *U. pinnatifida* and *L. religiosa* cultivated in DSW produced larger amount of protein in comparison with its cultivation in surface seawater.

2. Abalone culture fed on brown kelp

Abalones were cultured with continuous aeration in DSW, and fed on brown kelps cultivated in DSW. Daily intake of food per abalone (shell length at 60 mm) in optimal water temperature are 1.7 g at *U. pinnatifida* and 0.9 g at *L. religiosa*. It has been found that *L. religiosa* is better than *U. pinnatifida* as suitable food for abalone with respect to the efficiency of its food conversion. In this study, the survival rate of abalone was over 90%. Moreover, the chemical compositions of abalone fed on *U. pinnatifida* and *L. religiosa* cultivated in DSW has larger amount of protein compared with its fed on natural grown and boiled *U. pinnatifida*. Glutamic acid and glycine were found to be limiting as for abalone.

3. Polyculture system of the abalone and brown kelps

Polyculture system using the abalone and brown kelps in DSW was developed. *U. pinnatifida* was cultivated from mid spring to early autumn. *L. religiosa* was cultivated from mid autumn to early spring. Stocks of juvenile sporophytes of *U. pinnatifida* were transplanted to two 1t tank every 4 days using four tanks. After 8 days, production increased from 200g to 860g. After 8 days, sporophytes were transferred from first and second 1t tanks to first and second 7t tanks. In next 4 days, sporophytes were transferred from third and fourth 1t tanks to third and fourth 7t tanks. After 16 days, production increased from 1720g to 32000g in first and second 7t tanks. 32kg of food for abalone of 4000 shells was supplied in every 4 days.

Additionally, brown kelps made for multistage culture (using abalone cultured seawater) has large amount of protein.

4. General discussion

Finally, the production cost of traditional abalone culture system was compared with polyculture system. Excluding plant cost, running cost of traditional system and polyculture system in a year were 920 million yen and 546 million yen, respectively. Additionally, the daily food cost of traditional system and polyculture system were 8,000 yen (artificial diet) and 3,750 yen (fresh thalli), respectively. Another benefit of polyculture system was that it can prevent food from decaying. Through the polyculture system of Phaeophyceae and the abalone by efficient use of

DSW, it was possible to reduce costs. Moreover, it is possible to adapt polyculture system for the culture of seaweed-eating animals like the sea urchin and the top shell.

Key words: deep seawater (DSW), germling cluster, brown kelps, abalone, polyculture system

緒 言

本論文で扱う海洋深層水（以下、深層水）とは、海洋深層水利用研究会の定義による「深層水資源利用を意図した呼称」であり、有光層もしくは真光層以深の海水と定義し、海洋学的な定義とは異なる（高橋, 1999; 深見ら, 2000）。深層水は表層水と比較して、低温安定性、富無機栄養塩性、清浄性という特徴を持つ。このような深層水の特徴は、有効利用することで資源として捉えることができる。近年、深層水と表層水の温度差を利用した発電や、農業、水産、食品利用等がされている。深層水は海水であるので、資源性を有効利用し海に還すと深層水として再生することができ、循環する無尽蔵の資源として注目されている。深層水は日本各地で盛んに揚水が行われており、現在では北海道から沖縄県までに 13 箇所の揚水施設が存在する。日本での深層水利用は、これまでミネラルウォーターや食用加工品での利用が多くなされている。また水産試験場等では、深層水を魚類や貝類、海藻などの水産物の養殖に利用するなどの試験研究が行われている。

本研究では、高知県室戸市にある海洋深層水研究所で水深 320 及び 344 m からの揚水されている深層水を利用した。深層水の水温と無機栄養塩濃度の年変動は、水温が周年 12℃、溶存無機態栄養塩では硝酸塩が表層水の約 5-10 倍の 25 μ M、リン酸塩が同様に約 10 倍の 2 μ M、ケイ酸塩も約 10 倍の 60 μ M を含有していることが分かった（隅田ら, 2001; 岡, 2002）。またクロロフィル a 量は痕跡程度にしか見られず、総生菌数においても 10² CFU \cdot ml⁻¹ であり、表層水よりも一桁から二桁も少ない（山口ら, 1994）。これらのことから、深層水は非常に清浄であることが分かる。

ところで、アワビ類は日本において古来縄文時代より食されている巻貝類であり、現在は高級食材として利用されている（大場, 2000）。その採捕は、漁業者や海女による素潜り漁が主で

あったが、近年、採捕器具や潜水漁法の発展などから、乱獲を招いた(境, 2000)。また磯やけによるアワビの餌(ワカメやコンブ、カジメなどの褐藻類)などの消失から、その漁獲量は世界的に減少傾向にある(谷口, 1998)。

このような背景から、現在アワビ養殖事業が多く行われるようになった。一般的にアワビ養殖は、天然資源回復を視野に入れた種苗放流事業、種苗から出荷できる大きさまでに育成する中間育成事業に大別される。また養殖手法として海面養殖と陸上養殖があり、種苗放流事業は陸上養殖で、中間育成事業は海中もしくは陸上養殖によって行われる。海面養殖は、区画漁業権を設定して水面の一定区域を占有して行うことから、漁民による養殖が中心となる。また陸上養殖は、地元漁協と給排水の協定などを結び、知事の許可を得て養殖施設を建設し、その水域で水産生物を育成し、資源の完全管理、収穫までを図る養殖であり、漁民ではなく一般企業でも参入できる。

このことから一般企業によるアワビ陸上養殖が盛んに行われた。しかし多くの企業は、アワビ養殖技術の未熟さ、または諸設備費などの負担が大きく、赤字が続くことで倒産する企業が相次いだ(境, 2000)。具体的には、陸上養殖タンク及び海水濾過施設(海中には砂や泥、微小生物などの混入がみられ、養殖に使用する海水は常に濾過が必要)等の施設費、またアワビは他の巻貝類と比較して成長が遅いため、人工餌料費(500円/kg)及び濾過フィルターの交換費、電気代等のランニングコストが大きくなウエイトを占める。また人工飼料や乾燥海藻の給餌では、一昼夜で溶解、腐敗するために水質悪化が早く(古田ら, 1968)、一度疾病によるアワビ大量斃死が起こると、養殖業を復帰するまでには多くの時間と資金が必要になる。したがって、養殖にかかるコストをいかに削減できるか、アワビを健全に育成できるかがアワビ養殖の最大の課題となっている。

養殖コストの削減として、アワビ餌料に着目した。海中でのアワビ餌料は主に海藻であり、特にワカメやコンブ、カジメ等の褐藻類を主食とする(猪野, 1952; 谷口, 1998)。その餌料価値が高いことは、これまで多くの知見が見られる(酒井, 1962; 菊池ら, 1967; 浮, 1981; 前迫ら, 1984; Robert & Peter, 1995)。しかし、これらの褐藻類は磯やけの対象海藻類であることや、アワビ餌料になる形態で周年海中に存在するわけではない。これらワカメやコンブは、我々の食用

海藻として利用とされており、盛んに養殖も行われている。その様式は専ら海中養殖である。天然海域での養殖は、海水温や栄養塩濃度等の影響から、晩春から初夏にかけての一時期にしか収穫されない(大野, 1993; Critchley & Ohno 1998; 大野, 2000)。したがって、生海藻を常に確保することはできない。またこれまで、陸上タンクを用いた海藻の大量養殖技術は確立されていない。

このような背景から、深層水資源性を有効利用し、深層水という無機物を有機物である褐藻類へ、また褐藻類をアワビという有機物へ転換することを考えた。また深層水をアワビ養殖海水として用いることで従来のアワビ養殖の弊害を払拭でき、褐藻類の周年養殖も可能であると思われる。

以下、養殖に用いた褐藻類及びアワビの種について詳述する。

1. *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringer (和名: ワカメ)

ワカメは、褐藻類のコンブ目(Laminariales)アイヌワカメ科(Alariaceae)に属する一年生の海藻であり(吉田, 1998)、我々日本人にとって先史時代から、食用として利用されている最も馴染み深い海藻の一つである(大野, 2000)。日本では北海道東北部、四国、九州の南端などの一部を除いた各地の内湾から外海に面した海岸の、低潮線から水深十数メートルの亜潮間帯にかけて生育している。日本以外では韓国、中国の東シナ海に面した海岸などの東アジア、ロシアの沿海州の一部の海岸にも生育する特産種である(Akiyama & Kurogi, 1982; Skriptsova *et al.*, 2004)。この20年以内にニュージーランド、フランス、イギリス、アルゼンチン、オーストラリアからワカメの生育が報告されている(Hay & Luckens, 1987; Sanderson, 1990; Floch *et al.*, 1991; Fletcher & Manfredi, 1995; Casas & Piriz, 1996)。

ワカメの生活史は異型世代交代型である(広瀬, 1981; 吉田, 1998)。これは有性世代(配偶体期)と無性世代(胞子体期)の形態が異なる二つの世代を繰り返す世代交代のことで、ワカメの場合、前者は微視的な糸状藻体であるのに対し、後者は巨視的ないわゆるワカメ藻体である(Fig.1)。春から夏にかけて成熟したワカメ藻体は、基部に形成された胞子葉(成実葉: めかぶ)から遊走子を放出して夏季には枯れてしまう。遊走子は短時間で基質に付着し、直ちに発

芽して雌雄配偶体になり、夏季の高水温期を休眠状態で過ごす。秋になると、雌雄配偶体はそれぞれ生卵器、造精器を形成し、成熟した造精器から精虫が放出されて受精が行われる。受精卵の発芽、葉状の幼芽への生長は速く、1ヶ月で肉眼視できるまでになり、3ヶ月もすると胞子葉を持つ成体となる。

ワカメ養殖について、1950年代までは利用されるワカメの殆どが天然産であったが、1955年頃から宮城、岩手、愛知、兵庫、徳島県の各水産試験場や国立水産研究所、大学などを中心としたワカメ養殖の事業化試験が本格化し、生活史・生態条件の解明とともに、種苗の生産管理技術が確立した(黒木・秋山, 1957; Saito, 1962)。1960年代後半では、日本各地で人工採苗による本格的なワカメ養殖が始まり、数年もすると養殖ワカメの割合が天然産を上回り、全国のワカメ生産量の88%を養殖ワカメが占めている(大野, 2004)。ワカメ養殖は胞子葉から放出させた遊走子をロープなどの基質に付着させ、幼胞子体まで生長させたものを海中に沖だしし、成体になったところで収穫するという方式である(大野, 1993)。収穫時期は主に3月下旬から4月中旬であり、夏季や秋季では海中に成体は存在しない。

2. *Laminaria religiosa* Miyabe (和名: ホソメコンブ)

ホソメコンブは、褐藻類のコンブ目(Laminariales)コンブ科(Laminariaceae)に属する一年性の海藻であり(吉田, 1998)、食用に使われるマコンブと近縁種である。ホソメコンブは、マコンブやリシリコンブよりもはるかに小型の長さ40-150 cm、幅5-12 cmであり、ワカメと同様、水深十数メートルの水深に分布する。マコンブと比べ、品質も劣るために食用としての利用価値は低い。しかし海中のホソメコンブ群落は、アワビやウニなどの藻食性動物の餌場として重要な働きをもつ。分布は日本の寒海域に限定され、北海道の日本海中部、南部沿岸、また本州では三陸沿岸から茨城県北部である(大野, 2004)。

ホソメコンブの生活史はワカメと同様、異型世代交代型である(広瀬, 1981; 吉田, 1998)。肉眼的大きさの胞子体世代(無性世代)と顕微鏡的な大きさの配偶体世代(有性世代)の2世代がある。胞子体の成熟は、ワカメとは異なり、春から夏において葉面に子嚢斑(遊走子嚢)を形成し、遊走子が放出され、藻体は流失する。遊走子は直ちに雌雄配偶体になり、秋になると、

雌雄配偶体はそれぞれ生卵器、造精器を形成し、成熟した造精器から精虫が放出されて受精が行われる。受精卵から発芽した芽胞体は春に急激に伸長し成体となる(Fig. 2)。

ホソメコンブはその利用価値の低さから養殖は行われていないが、天然資源の枯渇(磯やけ)対策として、投石やキタムラサキウニなどの藻食性動物の駆除により藻場造成が行われている(谷口, 1998)。

ホソメコンブもワカメと同様、秋から冬にかけて海中に成体は存在しない。

3. *Hariotis sieboldii* Reeve (和名: メガイアワビ)

アワビは、軟体動物門腹足綱ミミガイ科に属する岩礁性の巻貝類のうち、食用となる大型種の総称であり、種数は世界で約100種、日本では10種がある。日本では南方系のクロアワビ、メガイアワビ、マダカアワビと北方系のエゾアワビが産業的に重要であり、また小型種としてはトコブシ、フクトコブシが利用される。本試験で取り扱ったメガイアワビは本州以南から九州に分布し、殻はアワビの中でも丸みを帯び、殻高が低く、扁平で放射状の筋が多く、色は茶褐色を呈する。棲息する水深はクロアワビとマダカアワビの中間の20 m内外で、岩礁に住む(猪野, 1952)。天然漁場での本邦産アワビ属の消化管内容物の調査から、暖流域(南方系)に棲息するメガイアワビ、マダカアワビ(*Hariotis gigantia*)、クロアワビ(*Hariotis discus*)の主餌料は、褐藻類のアラメ(*Eisenia bicyclis*)・ホンダワラ類(*Sargassum*)・タバコグサ(*Desmarestia tabacoidis*) (殖田・岡田, 1941)、カジメ(*Ecklonia cava*) (野中・岩橋, 1969)であることが報告されている。また藤井ら(1986)は、暖海性のクロアワビに対する20種に渡る海藻類の餌料効果を調査し、上記の海藻よりも、ワカメが最もよく増重したことを報告している。さらに北方系のエゾアワビの餌料としても、ワカメ、ホソメコンブは他の緑藻、紅藻類と比較して餌料価値が高いことが分かっている(酒井, 1962; 菊池ら, 1967; 浮, 1981)。メガイアワビに関する知見は見当たらない。

酒井(1962)は、同時に褐藻類、緑藻類、紅藻類をエゾアワビに給餌した場合、褐藻類を選択的に摂餌することを明らかにし、褐藻類に対する嗜好性を持つことを考察している。これまでのアワビの嗜好性に関する研究からは、特にワカメのメタノール抽出物より得られたC14C22の飽和及び

不飽和脂肪酸を構成脂肪酸とする複合脂質 digalactosyldiacylglycerol (DGDG) や phosphatidylcholine (PC) が摂餌誘引物質として同定されている (Sakata *et al.*, 1984; Sakata & Ina 1985; 坂田, 1985; Sakata *et al.*, 1988). しかし DGDG や PC は、緑藻であるアナアオサ (*Ulva pertusa*) から単離されており、アナアオサはクロアワビに対し高い餌料価値を持つ (藤井ら, 1986). また DGDG は餌料価値の低い紅藻のイバラノリ (*Hypnea charoides*) やマクサ (*Gelidium amansii*) (Fujita *et al.*, 1990), 全く餌料価値を持たない無節サンゴモ類にも含有されている (Fujita *et al.*, 1992).

これらのことから、アワビに対する海藻類の餌料価値は、科学的因子 (摂餌誘引・忌避などの摂餌刺激物質) だけでなく、生物的因子 (藻体の生活形・形状などの摂餌のしやすさに関わる)、物理的因子 (藻体の硬さ) を総合して判断すべきと考えられている.

本試験では深層水連続注水による褐藻類の周年を通じた陸上タンク養殖技術を確認し、褐藻類の生長に対する深層水の影響及び深層水で養殖された褐藻類の給餌によるアワビ成長への影響について検討する. それらの試験結果より、新鮮な生海藻を周年連続的にアワビに給餌するという従来にはない集約的タンク養殖システムを構築することを目的とし、深層水資源性の有効利用可否について検討した.

第1章では海藻の大量培養に必要な配偶体及び胞子体の最適生長、成熟条件、深層水の連続注水による周年養殖の可否及び養殖時季の差異による生長率を明らかにした. 第2章では、深層水で養殖された褐藻類の給餌によるアワビの養殖を行い、アワビの成長量や日間摂餌量、生残率、一般成分について確認した. 第3章では第1章、第2章で明らかとした海藻養殖とアワビ養殖に関し、経時的、集約的な養殖システムを構築する. 論文の最後では、各章の結果の総括及び従来のアワビ養殖と本試験でのアワビ養殖とのコスト面の検討を行った.

1. 褐藻類の大量培養法の確立

Fig. 1, 2 にワカメ、ホソメコンブの生活史を图示した (堀, 1993). このような生活史の一部を管理することで、計画的に配偶体や胞子体を生産することが可能となる. 多量の幼胞子体を生産するためには、雌雄配偶体を大量に確保し、

人為的に配偶体を成熟させることが必須となる. これまでに配偶体、胞子体の生長、成熟条件に

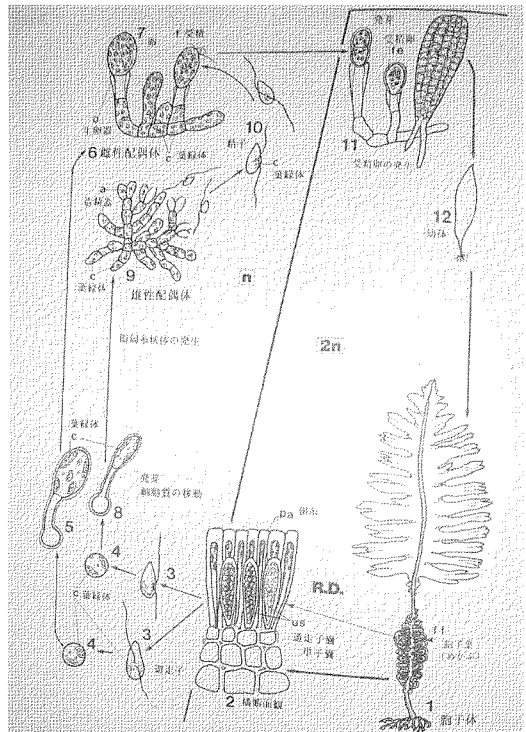


Fig. 1. Life history of *Undaria pinnatifida* (堀, 1993).

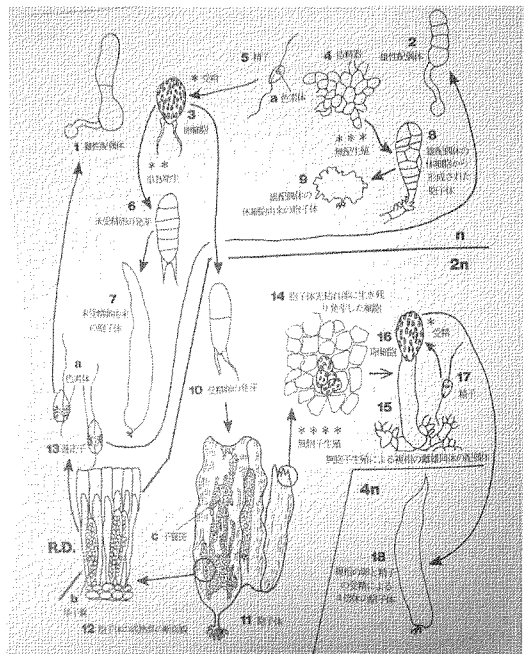


Fig. 2. Life history of *Laminaria religiosa* (堀, 1993).

ついて物理化学的な知見は多く得られているが、海藻は同種でもその生育環境が異なることで、生長特性が変わることが知られている (Breedman & Pakker, 1994). 本試験にて扱う海藻についても、生長特性の確認が必要である。

本章では、ワカメ及びホソメコンブの配偶体及び胞子体の生長、成熟条件に対する物理的(水温, 光量, 光周期)及び科学的要因(栄養塩)の影響、深層水を用いた周年タンク養殖の可否について検討する。またそれぞれの試験にて表層水と深層水との比較を行い、配偶体や胞子体の生長への影響について知見を得ることを目的とした。得られた結果は、養殖システム構成に関する因子とし、第三章にて両海藻種の経時的、集約的な海藻養殖法を検討した。

1. 褐藻類配偶体の生長条件

胞子体を大量に生産するためには、その“種苗”となる雌雄配偶体を大量に生産することが必須となる。効率的よく配偶体を生長させるためには、厳密に飼育環境を管理し、好適条件で培養を行う必要がある。本節では、ワカメ、ホソメコンブのそれぞれ雌雄配偶体の生長に対する物理的因子(水温, 光量, 光周期)や科学的因子(栄養供給量), 表層水と深層水を培養水として用いた場合の差異について試験調査し、至適生長及び培養条件を明らかにすることを目的とした。

材 料 と 方 法

1) 物理的条件の影響

ワカメの雌雄配偶体は、1999年徳島水産試験場から分与されたものを使用した。またホソメコンブの雌雄配偶体は、1999年北海道岩内町産のホソメコンブ成熟藻体から遊走子を分離し(西澤・千原, 1979), 生長させたものを使用した。実験に用いるまで、それぞれの配偶体は個別のフラスコに入れ、鉄分を削除した PES 培養液(以下 Fe-free PES)中で保存した(Provasori 1968)。保存条件は、ワカメが水温 20°C, 光量 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期 12L:12D (Light:Dark), ホソメコンブが 15°C, 光量 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期 12L:12D とした。光量子量は LI-250 (LI-COR, inc.) を用い、計測した。培養液の交換は 1 ヶ月に 1 回とし、同時に生長した配偶体を裁断し、個体数を増やした。

配偶体の生長活性を高めるための予備培養と

して、各配偶体 10 ml を Fe-free PES を満たした 500 ml フラスコで 3 日間培養した。その後、配偶体をミルサーで粉碎し、100 μm と 50 μm メッシュのプランクトンネットで濾過し、100-50 μm の大きさに揃えた。その配偶体を Fe-free PES 培養液で 5 倍量に希釈し、5 μL を 30 ml の Petri dish (Fe-free PES-10ml) に入れた。Petri dish には蓋を被せパラフィルムで密閉し、各実験条件下に供した。

試験区は、水温 30, 25, 20, 15, 10, 5°C の 6 試験区、光量 200, 150, 100, 50, 25, 0 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 6 試験区、光周期 16L:8D の長日条件, 12L:12D の半日条件, 8L:16D の短日条件の 3 試験区を設定した。試験対象要因以外の基本培養条件として、ワカメで水温 20°C, 光量 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期 12L:12D, ホソメコンブでは水温 10°C, 光量 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期 12L:12D に統一した。それぞれの試験は 3 本立てで行い、試験期間は両海藻種共に 9 日間とした。

測定は、固体識別した 20 個体の配偶体の試験開始時と終了時の写真を撮影し、画像解析ソフト (Scion image software) を用いて面積を測定し、面積増加分から培養 10 日間の日間生長率を算出した。Fig. 3 に測定の概要を図示した。日間生長率 (Daily growth rate) の算出式を下記する。

Daily growth rate (%)

$$= [(Wt/W0)^{1/t}] \times 100 \text{ (Penniman et al. 1986)}$$

Wt: t 日後の面積 W0: 培養開始時の面積

t: 培養日数

また日間生長率の t 検定により、各試験区間の有意差を確かめた (Sokal & Rohlf, 1981)。

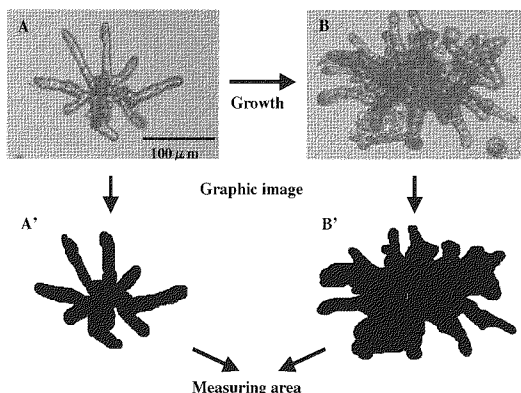


Fig. 3. Growth of the same gametophyte filament (A, B) of *U. pinnatifida*. A' and B' shows the graphic images of the gametophytes for measuring area using image analysis software.

2) 表層水と深層水の影響

個体識別したワカメ、ホソメコンブ雌雄配偶体を表層水、深層水がそれぞれ 200 ml 入れられた細胞培養用フラスコに投入した。ワカメ実験は、表層水、深層水共に高知県室戸市のものを、ホソメコンブを用いた実験では、北海道小樽市の表層水、深層水を使用した。培養条件はワカメで 20°C, 20 μmol photon m⁻²s⁻¹, 12L:12D, ホソメコンブで 10°C, 20 μmol photon m⁻²s⁻¹, 12L:12D とし、培養液は週に 1-2 回の交換を行った。

測定は、雌雄それぞれ 6 個体ずつの細胞数を 7 日毎に顕微鏡下で目視、計数を行い、培養期間は Mizuta *et al.* (2001) を参考に、約 1 ヶ月間とした。

結 果

1) 水温の影響

各水温に対するワカメ雌雄配偶体の生長率を、Fig. 4 に示した。雌性配偶体の平均日間生長率は 20-25°C で高い値を示し、15°C 以下の条件と比較して有意差が見られた (p<0.05)。また水温が減少するにつれ、生長率は低下する傾向がみられた。雄性配偶体の平均日間生長率は 20°C で最高値を示し、他の条件と比較して有意差が見られた (p<0.001)。それ以上、以下の水温にて生長率は減少した。ワカメ配偶体は雌雄に関らず、水温 30°C では配偶体は枯死し、25°C では雌性配偶体の細胞形状が球形化が見られた (Fig. 5)。

各水温に対するホソメコンブ雌雄配偶体の生長率を、Fig. 6 に示した。雌性配偶体の日間生長率は 15°C で最も高く、低水温区での 5°C、高水温区での 20、25°C と比較して有意差がみられた

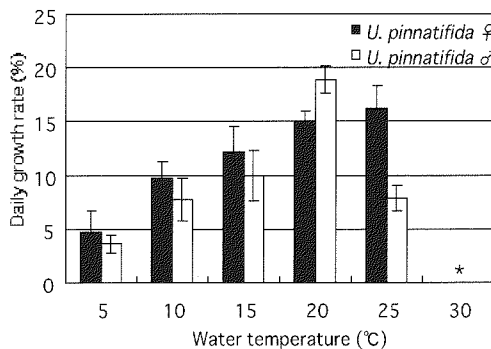


Fig. 4. Daily growth rates of female and male gametophytes of *U. pinnatifida* in the range 5–30°C. *: Female and male gametophytes were breached at 30°C. Other condition were 20°C and 100 μmol photon m⁻²s⁻¹. Mean ± SD (n=10).

(p<0.05)。雄性配偶体の日間生長率は 15-20°C で高く、それ以外の試験区と比較し、有意差が見られた (p<0.05)。また雄性配偶体では、水温低下に伴い生長率の減少傾向がみられ、25°C では生長が確認されなかった。雌性配偶体では 25°C 区であっても 5% と生長率は低いものの、生長が確認された。配偶体の雌雄に関らず、水温 30°C では配偶体は枯死 (白化) し、特に 20°C では雌性配偶体の細胞形状が球形化 (休眠細胞) した (Fig. 7)。最も生長率の高い 15°C 区において、雌性配偶体では 15%、雄性配偶体では 10% となり、雌雄で最適生長率は大きく異なっていた。

ワカメは 20°C 以上の高水温域で、ホソメコンブでは 15°C 以下の低水温域での生長率が高くなり、ワカメでは 15-20%、ホソメコンブでは 10-15% に達し、ホソメコンブよりもワカメの生長率が高くなる傾向が見られた。また両海藻種を通して、雄性配偶体よりも雌性配偶体の生長率が高くなる傾向が見られ、ホソメコンブでは雌

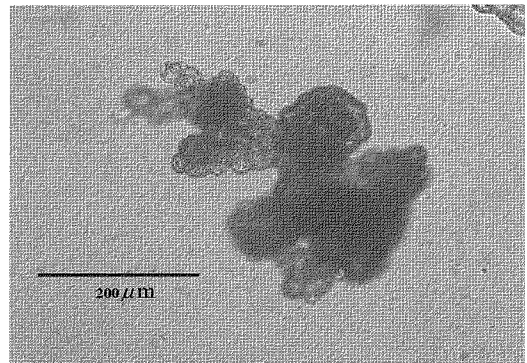


Fig. 5. Gametophytes of *U. pinnatifida* in the “resting stage” at 25°C.

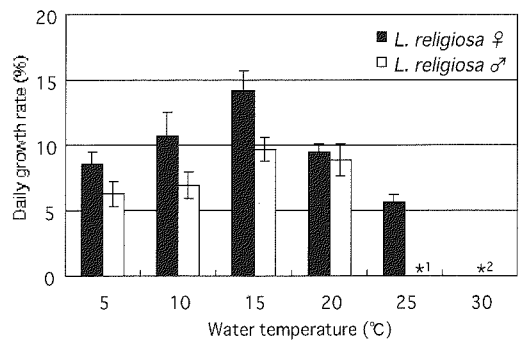


Fig. 6. Daily growth rates of female and male gametophytes of *L. religiosa* in the range 5–30°C. *: Male gametophytes were not grown at 2°C. **: Female and male gametophytes were breached at 30°C. Other condition were 10°C and 100 μmol photon m⁻²s⁻¹. Mean ± SD (n=10).

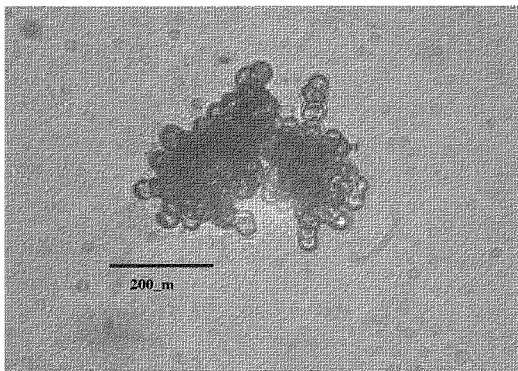


Fig. 7. Gametophytes of *L. religiosa* in the "resting stage" at 20°C.

性配偶体の水温耐性は雄性配偶体よりも広いことが確認された。

2) 光量の影響

各光量に対するワカメ雌雄配偶体の生長率を、Fig. 8A に示した。雌雄配偶体の平均日間生長率は 25-100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の低光量時に 15-20% の値を示し、高光量 (150, 200 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$) 時の 10% よりも高い ($p < 0.05$)。また雌雄配偶体を通して、0 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 時では全く生長が見られなかったが、枯死することはなかった。

同様に、ホソメコンブの雌雄配偶体への影響について、Fig. 8B に示す。雌性配偶体では 25-50 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ でもっとも生長率が高く、それ以上の光量になるにつれ減少した。また 200 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ では配偶体は枯死した。雄性配偶体についても、25-50 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で高い生長率を示し、高光量になるにつれ減少した。しかし雌性配偶体と異なり、200 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ でも 10% の生長率を示した。さらに雌雄配偶体を通して、0 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ では全く生長がみられなかったが、枯死することはなかった。

両海藻種共に、弱光下において生長率が高くなり、また全体的に雄性配偶体よりも雌性配偶体の生長率が高くなる傾向がみられた。

3) 光周期の影響

各光周期に対するワカメ雌雄配偶体の生長率を Fig. 9A に示した。雌雄配偶体共に、生長率は短日条件 (8L:16D) で約 5% と最も低く ($p < 0.001$)、続いて長日条件 (16L:8D) の 5-10%、半日条件 (12L:12D) の 15-20% という順に、高くなる傾向が見られた。また雌雄の生長率の相違について、短日及び長日条件では有意差が見られなかったが、半日条件において雄性配偶体での生長率が雌性配

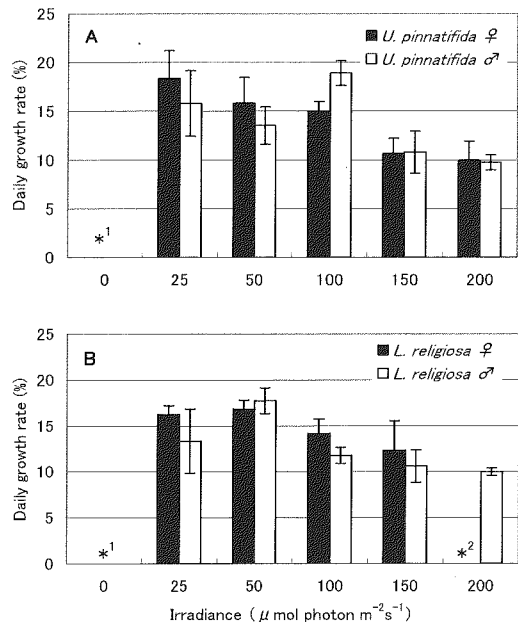


Fig. 8. Daily growth rates of female and male gametophytes of (A) *U. pinnatifida* and (B) *L. religiosa* in the range 0–200 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$. *¹: Female and male gametophytes were not grown at 0 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$. *²: Female gametophytes were breached at 200 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Other conditions were 20°C and 12L:12D in *U. pinnatifida* and 10°C and 12L:12D in *L. religiosa*. Mean \pm SD (n=10).

偶体よりも高いという結果が見られた ($p < 0.05$)。

同様に、ホソメコンブ雌雄配偶体の生長率を Fig. 9B に示した。雌性配偶体は、ワカメの場合と同様、短日条件 (8L:16D) で生長率が約 5% と最低値を示し、長日条件 (16L:8D) で約 10%、半日条件 (12L:12D) で 10-15% という順に、高くなる傾向が見られた。雄性配偶体では 12L:12D と 16L:8D には有意差が見られず、雌性配偶体については両条件間に顕著な差が見られた ($p < 0.001$)。雌雄配偶体間での生長率の相違については、短日条件を除いて、雌性配偶体での生長率が雄性配偶体より高いことが分かった。

ワカメ、ホソメコンブ共に半日条件 (12L:12D) での生長率が最も高くなり、短日条件では極端に生長率が低くなることが確かめられた。また全体的にワカメよりホソメコンブの生長率が低くなる傾向が見られた。

4) 表層水と深層水の影響

深層水で培養したワカメ配偶体の平均細胞数は、表層水で培養した配偶体の細胞数を上回って推移した (Fig. 10)。また培養最終日の平均細

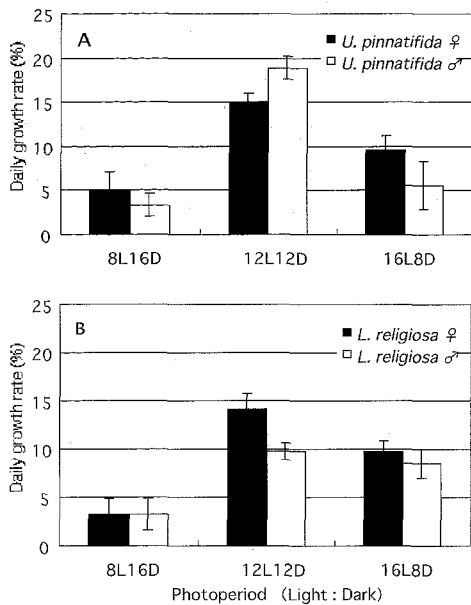


Fig. 9. Daily growth rates of female and male gametophytes of (A) *U. pinnatifida* and (B) *L. religiosa* in the range 8L:16D–16L:8D. Other condition were 20°C and 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in *U. pinnatifida* and 10°C and 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in *L. religiosa*. Mean \pm SD (n=10).

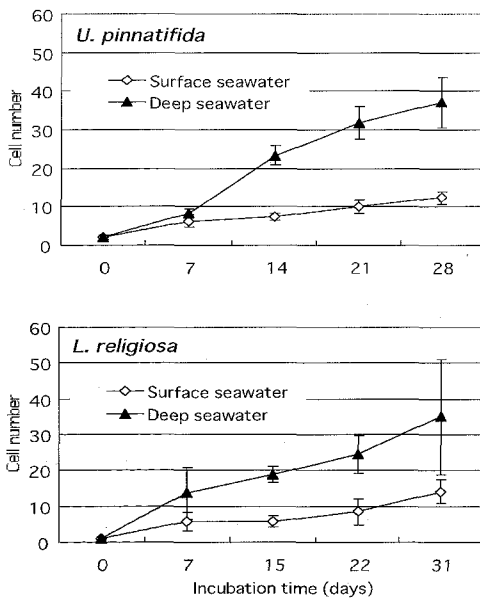


Fig. 10. Cell numbers of female and male gametophytes of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* when cultivated using surface seawater and deep seawater. Incubation conditions were 20°C, 20 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and 12L:12D in *U. pinnatifida* and 10°C, 20 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ and 12L:12D in *L. religiosa*. Mean \pm SD (n=12).

胞数は表層水区が 12.4 (± 1.4), 深層水区が 37.1 (± 6.5) であり, 後者は前者の 3.0 倍であった.

深層水で培養したホソメコンブ配偶体の平均細胞数は, 表層水で培養した配偶体の細胞数を上回って推移した (Fig. 10). また培養最終日の平均細胞数は表層水区が 14.1 (± 3.3), 深層水区が 35.0 (± 16.1) であり, 後者は前者の 2.6 倍であった.

考 察

配偶体生長試験では, 配偶体の成熟を抑制するために, 栄養補強海水である PES 培養液に鉄分を加えなかったもの (Fe-free PES) を使用した. Motomura & Sakai (1984) は, 培養液への鉄の添加及びホウ素の除去により, *L. angustata* 雌性配偶体の成熟率が高くなることを報告している. 配偶体の生長試験では, どの物理的条件下においても成熟した配偶体は観察されなかった. したがって, 配偶体を未成熟のまま維持し大量に培養する為には, 鉄分を添加しない培養液を用いることが望ましいと考えられた. 次節では PES 培養液から鉄分を加えないことにより, ワカメ, ホソメコンブ両海藻種の配偶体成熟が抑制されるかどうか実証試験を行う.

本節では, ワカメ雌雄配偶体では水温 20°C, 光量 25-100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期 12L:12D, ホソメコンブ雌雄配偶体では水温 15°C, 光量 25-50 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期 12L:12D で最適生長が確認された. ワカメの最適生長水温に関し, 日本の東北や中部に繁茂するワカメでは 15-20°C という報告が幾つか見られるが (斉藤, 1962; 秋山, 1965; Morita *et al.*, 2003b), 本試験での水温とは若干の差が生じた. しかし Pang & Wu (1996) は, 中国に繁茂するワカメでは 22-25°C が最適であると報告している. 本試験に用いたワカメは徳島県鳴門産のものを供試した. 配偶体の生長時季にあたる夏季の徳島県鳴門市の平均水温 (1969-1999) は, 21.4-26.4°C であり, 本試験での最適生長水温と一致していると考えられる (徳島水産試験場, 2000). またホソメコンブの最適生長水温について, 水温 20°C までは生長が良く (岡田・三本菅, 1980), 雌性配偶体の光合成活性は, 15-20°C において高いことが報告されている (Iizumi & Sakanishi, 1994). ホソメコンブの繁茂する北海道及び東北の水温について, 配偶体の生長する夏季 (7-9月) の水温は 15-17°C となり, 年変動からみても最高水温期にあたる (Kawashima, 1984). これは, 本試験の最適生長

水温 (15°C) と概ね一致する。雌雄配偶体の致死水温に関して、ワカメでは -1°C 以下、28-30°C 以上 (秋山, 1965; Morita *et al.*, 2003a), ホソメコンブでは -1.5°C 以下、25°C 以上 (Dieck, 1993) であり、特に 25°C 以上という条件は、本試験結果と同様であった。さらに水温 24-25°C において、ワカメ配偶体細胞が球形化し休眠状態となり生長が滞ることが報告されており (斉藤, 1962), またホソメコンブでは同様に 20°C で細胞が球形化するとの報告がある (岡田・三本菅, 1980)。この現象は本試験でも同条件下で観察された。これらは、高水温に対する配偶体の防衛反応であると考えられた。

光量, 光周期に関しては, ワカメでは 80 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 長日条件で生長が良いこと (秋山, 1965), ホソメコンブでは, 光量 18 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ までは高いほど生長が良いという知見しかみられない (Mizuta *et al.*, 2001)。本試験では, ワカメは 25-100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲では, 配偶体の生長率に有意差は見られなかったが, それ以上の光量で生長率は減少した。同様にホソメコンブでは 25-50 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上の光量で, 生長率に減少傾向が見られた。ワカメ, ホソメコンブは共に水深約 5-6 m に繁茂する海藻であり, 配偶体はその着生基質上に這うようにして成長する。したがって, より低光量に適應しているものと考えられる。光周期に関しては, 半日条件の 12L:12D での生長が最適であり, これはワカメの秋山 (1965) の長日条件で生長が最適であるという報告とは異なった。秋山は実験の光量を低めの 80 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ に設定している。本試験では 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で行っていることから, 光周期に関しては, 積算光量等と関連しているのではないかと推察された。

以上のことから, 配偶体の生長や生残に対する生長特性は, 分布海域の生態学的環境条件とより厳密に対応していると考えられた。ワカメについては, 既報の最適生長水温と異なる結果であったが, ホソメコンブについて生長条件は概ね一致した。本節試験により, 実際に養殖に使用する褐藻類配偶体の最適生長条件が明らかになり, その条件を効率よく応用することで, 配偶体の大量培養が可能であると考えられた。

また, 深層水で培養したワカメ及びホソメコンブ配偶体の生長は表層水のそれを上回った。ホソメコンブ配偶体の生長に最低限必要な硝酸塩量について, 3.1-4.0 μM という低濃度の結果を著者らは得ており (川井ら, 2004), 硝酸塩濃度は, 室戸深層水で 27.4 μM , 小樽深層水で

15.8 μM であった。この深層水で生長が良い理由の一つとしては, 深層水が豊富に栄養塩類 (特に硝酸塩) を含有しているためと考えられる。これまでに深層水を用いた配偶体の生長に関する報告はなく, 本節試験から初めて配偶体という一部の生活史に対する深層水の影響を明らかにした。次節以降は, 配偶体の成熟, 胞子体の生長に対する深層水, 表層水の影響を明らかにし, 褐藻類の生長に対する深層水の有効性を検討するための基礎知見を得ることとする。

2. 褐藻類配偶体の成熟条件

胞子体の生産のためには, 雌雄配偶体の成熟, 受精が不可欠であり, 効率的にまた断続的に成熟させることは, 胞子体を大量に作出するためには必須な作業である。本節では雌性配偶体の卵形成に対する物理的因子 (水温, 光量, 光周期) 及び科学的因子 (栄養塩供給量), 表層水, 深層水の相違による影響について検討した。

雄性配偶体は成熟すると造精器を形成する。造精器からの精虫の放出は, 雌性配偶体の卵形成時に細胞から放出されるラモキシレン (放精誘導物質) により誘発されることが知られている (Müller *et al.*, 1985; Müller, 1989)。雄性配偶体は常に富栄養な培養条件下で維持培養し, 造精器を形成した状態を保つことで, 雌性配偶体の卵形成時に何時でも精虫の放出が行える状態にしておける。雌性配偶体の卵形成間際に雄性配偶体を添加することで, 容易に受精, 幼胞子体を生産することが可能である。このようなことから, 本節では雌性配偶体の成熟のみの調査で, 雄性配偶体の成熟については行わないことにする。

材 料 と 方 法

使用した配偶体, 保存条件及び前培養条件は, 第一節と同様とした。

前培養後の配偶体は, 100-50 μm の大きさに揃え, その配偶体は PES 培養液で5倍量に希釈し, 5 μl を PES 培養液 10 ml が入れられた Petri dish に入れ, 各試験区に供した。試験区は, 両海藻種共に水温 30, 25, 20, 15, 10, 5°C の6試験区, 光量はワカメでは 200, 150, 100, 75, 25, 10, 0 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の7試験区, ホソメコンブでは 150, 100, 50, 25, 0 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の5試験区, 光周期 (Light:Dark) は両海藻種共に 14L:10D の長日条件, 12L:12D の半日条件, 10L:14D

の短日条件の3試験区を設定した。また、栄養塩濃度の影響を検討するため、PES培養液を121℃20 min 滅菌した深層水で1/2, 1/4, 1/8に希釈した培養液及び鉄分を添加しないPES培養液(Fe-free PES)を作成し試験に供した。また表層水、深層水を培養液としたときの、配偶体成熟の有無を確認した。試験区以外の基本培養条件は、ワカメで水温20℃、光量100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光周期12L:12D、ホソメコンブでは水温10℃、光量100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光周期12L:12Dとし、培養液はPESとした。それぞれの試験は3本立てで行い、試験期間は両海藻種共に約7日間行った。

測定は、1-2日毎に顕微鏡観察を行い、ランダムに選択した200個体の配偶体のうち、成熟(卵形成)している配偶体の数から成熟率を算出した(Fig. 11)。成熟率(Maturation rate)の算出式は下記の通りである。

$$\text{Maturation rate(\%)} = \frac{\text{卵形成した配偶体数}}{200} \times 100$$

また成熟率のt検定により、各試験区での有意差を確認した。

結 果

1) 水温の影響

両海藻種の配偶体の成熟率遷移をFig. 12に示す。ワカメでは水温20, 15, 10℃区で培養2日目から成熟する配偶体が見られ、培養日数の増加と共に成熟率は高くなった。ホソメコンブでは、水温5, 10, 15℃において培養4日目から

成熟が見られ、10℃では培養5日目に急激に成熟率が上昇し、それに続いて15, 5℃での成熟が上昇する傾向が見られた。またホソメコンブよりもワカメが早熟であった。

両海藻種について各水温区での成熟率の有意差を調べるため、培養7日目の成熟率を比較した(Fig. 13)。ワカメの最大成熟率は20℃で99%となり、続いて15℃の21%、10℃の12%、5℃で1%となった。また25℃では成熟は見られず、30℃では枯死(白化)した。20℃において他の試験区と有意差が見られた($p < 0.001$)。ホソメコンブでは30, 25℃において培養開始直後から配偶体は白化し、枯死が確認された。成熟率の各試験区での有意差を検討するため、培養7日目の成熟率を比較した。培養7日目で最大成熟率であったのは10℃で、99%となり、続いて5℃の94%、15℃の72%となった。5, 10℃において他の試験区と比べ、有意差が見られた($p < 0.001$)。

ワカメ、ホソメコンブの成熟に対する水温の影響を比較すると、ワカメはより高水温域(水温20℃)での成熟率が高く、逆にホソメコンブでは低水温域(水温5-10℃)で高くなる傾向があった。また両海藻種ともに水温が高くなると成熟する配偶体はみられず、未生長のままであるが、枯死していない状態であった。それ以上の水温になると、配偶体は白化し枯死した。

2) 光量の影響

ワカメとホソメコンブの配偶体の光量に対する成熟率の遷移をFig. 14に示す。観察は実験の都合上、培養4日目からとなったが、無光の

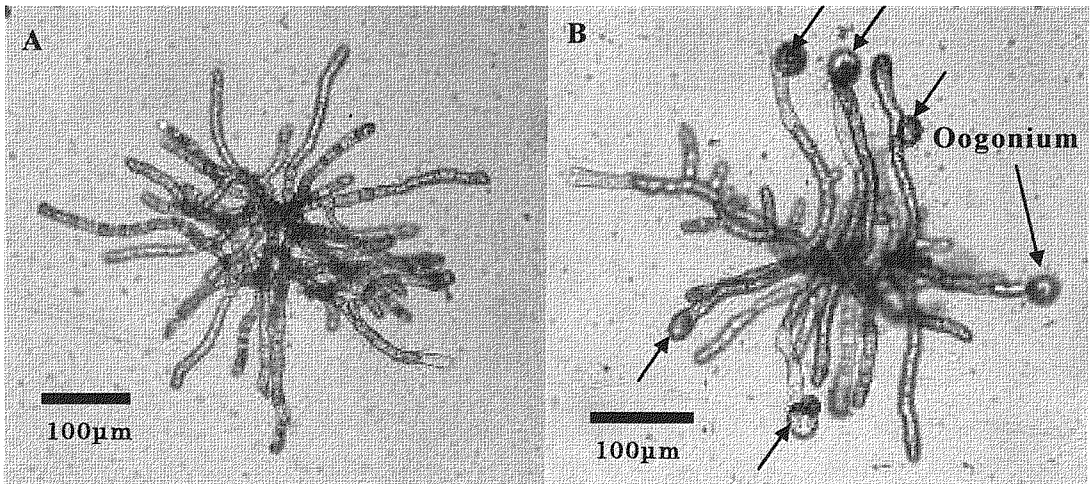


Fig. 11. (A) Immature and (B) mature of female gametophyte of *U. pinnatifida*. Oogoniums were formed in the apical parts of mature gametophyte.

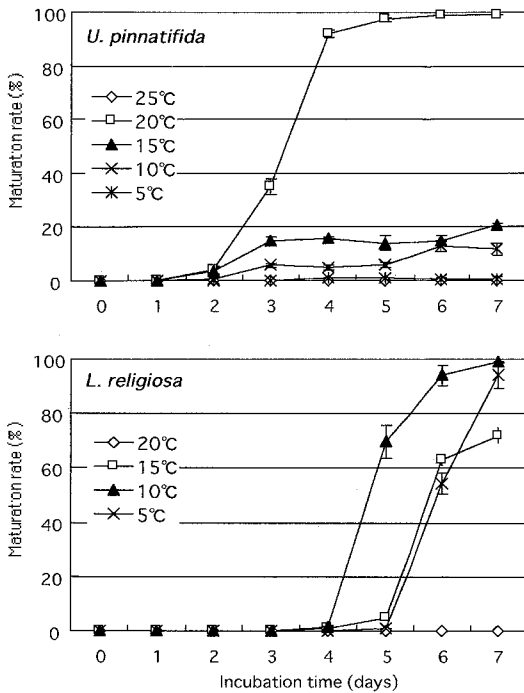


Fig. 12. Changes of maturation rate in *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in the range of 5–25°C. Maturation rate was randomly counted by oogonium formation in 200 gametophytes. Mean \pm SD (n=3).

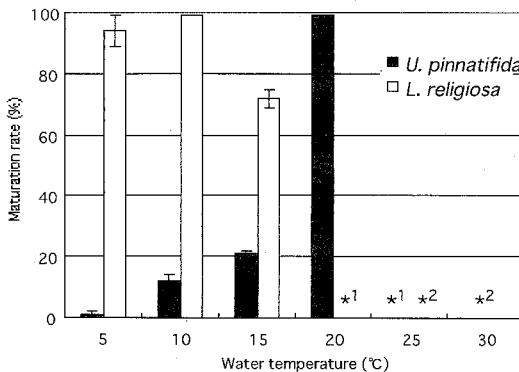


Fig. 13. Maturation rate of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in the range of 5–30°C after 7 days. *1: Female gametophytes of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* were in resting stage at 25 and 20°C, respectively. *2: Female gametophytes of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* were breached at 25 and 30°C, respectively. Other conditions were 100 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ and 12L:12D.

0 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ 試験区を除いて、全ての光量試験区において成熟が見られた。成熟率は培養5日目まで急激に増加したが、その後は緩やかに増加する傾向が見られた。0 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ 試験区では、成熟した配偶体は全く観察されな

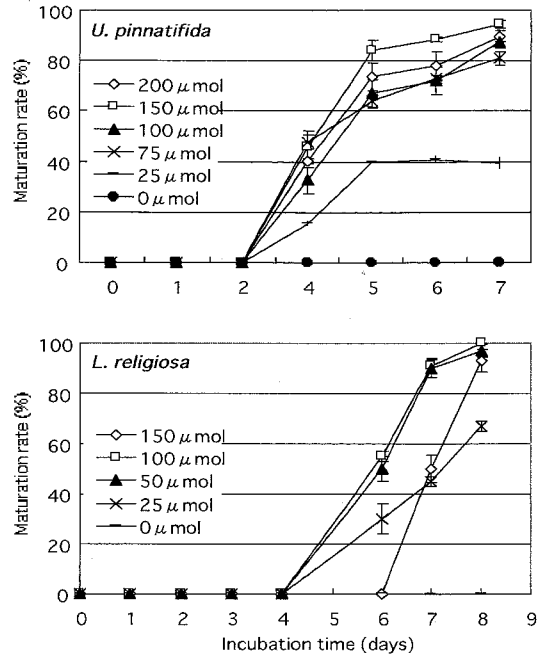


Fig. 14. Changes of maturation rate in *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in the range of 0–200 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$. Maturation rate was randomly counted by oogonium formation in 200 gametophytes. Mean \pm SD (n=3).

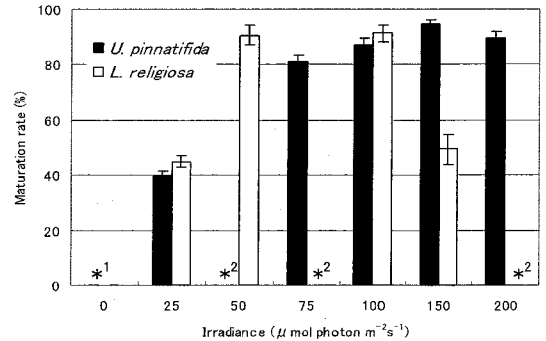


Fig. 15. Maturation rates of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in the range 0–200 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ after 7 days. *1: Female gametophytes of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* were not matured at 0°C. *2: no data. Other conditions were 20°C and 12L:12D in *U. pinnatifida* and was 10°C and 12L:12D in *L. religiosa*.

ったが、枯死することはなかった。ホソメコンブでは、成熟は 100, 50, 25 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ に続き、一日遅れて 150 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ で成熟が確認された。またワカメと同様、無光の 0 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ では成熟した配偶体は全く確認されなかったが、枯死することはなかった。

各試験区間での成熟率の有意差を検討するため、ワカメ、ホソメコンブの培養 7 日目の成熟

率を比較した (Fig. 15). ワカメの最大成熟率は $150 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 95% となり, 続いて $200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 90%, $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 87%, $75 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 81%, $25 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 40% となった. 200, $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ と $75 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 間には有意差が確認された ($p < 0.05$). したがって, 最適な光条件は $100\text{--}200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とした. 同様にホソメコンブでは, 最大成熟率は $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 及び $50 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 91%, $150 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 49%, $25 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の 45% となった. 検定の結果, $100, 50 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ と他の試験区間には有意差が確認された ($p < 0.05$). ホソメコンブの最適成熟光量は $50\text{--}100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ とした.

3) 光周期の影響

両海藻種の雌性配偶体の光周期による成熟率遷移を Fig. 16 に示す. 光周期、海藻種に関らず, 同様な傾向が見られ, 培養 7 日後では成熟率はほぼ 100% に達した (Fig. 17). 水温試験と同様に, ワカメはホソメコンブよりも早熟であり, 培養 2 日目には卵形成した配偶体を確認された. 本試験区で設定した光周期間では, 成熟率の有意差は見られなかった.

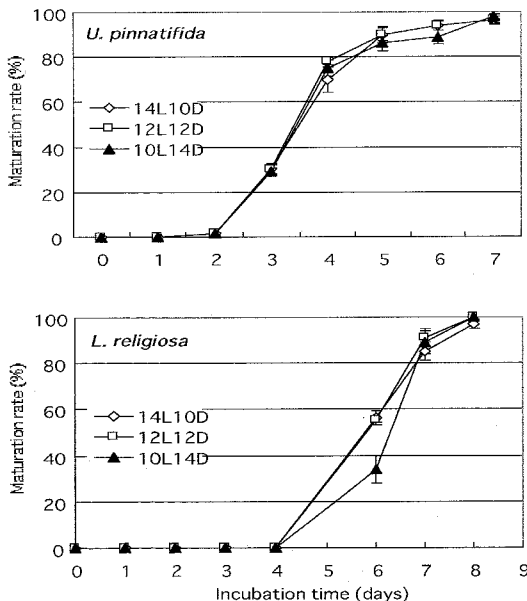


Fig. 16. Changes of maturation rate in *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in the range of 10L:14D - 14L:10D. Maturation rate was randomly counted by oogonium formation in 200 gametophytes. Mean \pm SD (n=3).

4) 栄養塩濃度の影響

両海藻種での配偶体の PES 希釈培養液による成熟率の遷移を Fig. 18 に示す. ワカメでは, PES 培養液が未希釈及び 1/2 希釈の場合, 約 100% の成熟率を得た. それ以上の希釈率 1/4, 1/8 の場合はそれより劣り, 約 70% であった. また鉄分を除いた培養液中の成熟は培養終了時で約 70% と, 1/4, 1/8 希釈の場合と同様な結果となった. ホソメコンブ配偶体の成熟の遷移は, ワカメと同様な傾向ではあるが, 未希釈の PES で他の試験区よりも早熟であった.

ワカメ, ホソメコンブの培養終了時での成熟率を Fig. 19 に示した. ワカメの場合では 1, 1/2 希釈区が他の試験区よりも有意に成熟率が高く ($p < 0.05$), ホソメコンブでは鉄分を除いた PES 培養液の試験区以外において, 約 100% の成熟率を得た. 培養終了時の成熟率を比較すると Fe-free PES 試験区以外では有意差は見られなかった. また, 培養液から鉄分を取り除いた Fe-free PES 培養液での両海藻種の成熟は, ワカメにおいては鉄分の影響は殆どみられないのに対し, ホソメコンブにおいては, 鉄分の除去により成熟は殆ど観察されなかった. 両海藻種とも栄養塩が希釈されることで, 成熟率が減少する傾向がある.

表層水 (SSW), 深層水 (DSW) を用いた試験では, 両海藻種の配偶体は生長しているものの, 成熟は全く観察されなかった (Fig. 18).

考 察

両海藻種の至適成熟条件は, ワカメでは水温 20°C , 光量 $100\text{--}200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, ホソメコ

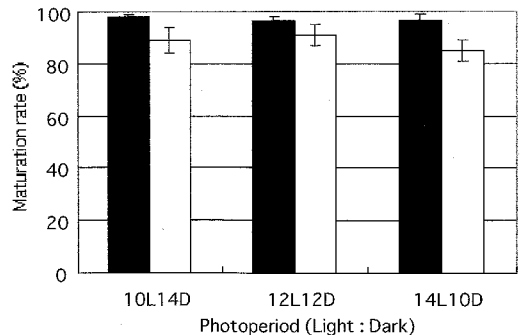


Fig. 17. Maturation rate of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in the range of 10L:14D - 14L:10D after 7 days. Other conditions were 20°C and $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in *U. pinnatifida* and was 10°C and $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in *L. religiosa* (■ : *U. pinnatifida* □ : *L. religiosa*).

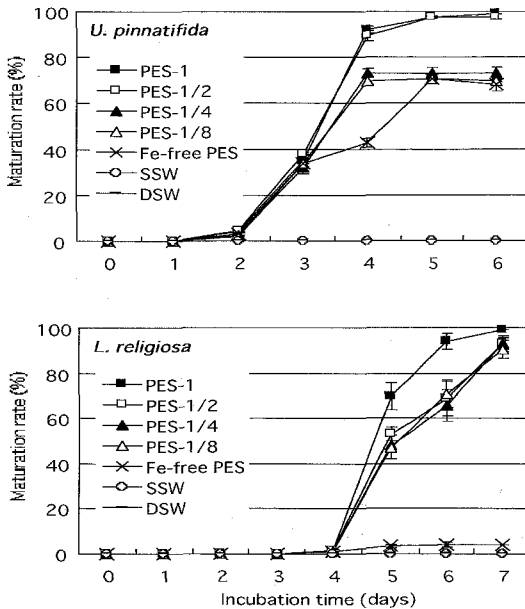


Fig. 18. Changes of maturation rate in *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in various media. Maturation rate was randomly counted by oogonium formation in 200 gametophytes. Mean \pm SD (n=3).

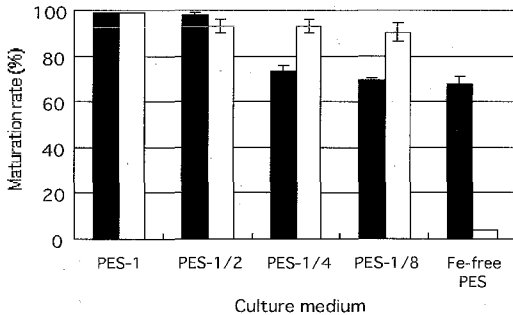


Fig. 19. Maturation rate of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in various media after 7 days. Other conditions were 20°C, 100 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ and 12L:12D in *U. pinnatifida* and 10°C, 100 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ and 12L:12D in *L. religiosa* (■: *U. pinnatifida* □: *L. religiosa*).

ンプでは水温 5-10°C, 光量 50-100 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ であった。光周期については両海藻種共に顕著な差がみられず同様な成熟傾向を示し、全試験区で高い成熟率が得られた。

水温に関して、本試験で得られたワカメの至適成熟条件である 20°C は、各地に分布するワカメの水温と比較すると高いことが伺える。北海道に分布するワカメで 12-17°C (木下・渋谷, 1944), 愛知県で 17-20°C (齊藤, 1956a,b), 三重

県で 10-15°C (Morita *et al.*, 2003b), 京都府で 8-15°C (Kohata, 1964), また外国では韓国で 17°C (Kim & Nam, 1997) との報告がみられる。配偶体の成熟期にあたる 11 月では、徳島県鳴門での水温は平均 18-20°C であり (徳島水産試験場, 2000), 本試験との結果と合致し、他地域のワカメよりも高水温域が最適成熟水温になると考えられた。ホソメコンブに関し、岡田・三本菅 (1980) は 8-13°C で、Mizuta *et al.* (2001) は 10°C で雌性配偶体は早熟し、また高成熟率を得られると言及している。これらの報告と本試験結果とは概ね一致した。また他種ではいずれも水温 10°C 前後であった (Lüning & Neushul, 1978; Lüning, 1981; Lee & Brinkhuis, 1988)。コンブ目藻類は冷水性の海藻であり、分布域は寒流域に限られる。低水温下での高成熟率は、コンブ目藻類の重要な生理特性であると考えられる。

光量に関し、ワカメで 100-200 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ の高光量, ホソメコンブで 50-100 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ の低光量での成熟率が高く、両海藻種間に違いがみられた。齊藤 (1965) は、ワカメでは光量が減少する (10-25 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$) と成熟率が低下することや、Kim & Nam (1997) は、極端な低水温時 (5°C 以下) もしくは高水温時 (25°C 以上) では、強光量下では成熟率が低下し、至適成熟水温下では 20-100 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ と強光量下でも成熟率は変わらないと言及している。ホソメコンブでも、低光量 (7 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ 以下) では成熟率が低くなることが知られており (Mizuta *et al.*, 2001), 一般的に他種においても低光量下 (50 μ mol photon $m^{-2}s^{-1}$ 以下) では成熟率は低下する (Hasio & Druehl, 1971; Lüning & Neushul, 1978; Lüning, 1980; Hoffman & Santerices, 1982; Lee & Brinkhuis, 1988)。しかし、ある種のコンブでは水温の上昇と共に成熟に必要とされる光量が増加することが知られている (Lüning, 1980)。これらのことから、両海藻種共に水温環境が最適状態下では、配偶体の成熟に対し、低光量ではなく高光量に対する適応性が高くなることが考えられる。本試験では両海藻種ともに至適成熟水温下で培養することで、より高光量での成熟が可能になったのではないかと推察された。さらに本試験では光源として蛍光灯を用いたが、ワカメやコンブ目藻類の成熟に対し、光質の影響が大きいことが報告されている。ワカメについては、橙色光よりも青色光で高い成熟率が得られること (酒井 1962), コンブ目藻類も同様に、緑色及び赤色光下では成熟せず、青色及び近紫外線下で

成熟が促進されることが報告されており (Lüning & Dring, 1972; Lüning & Dring, 1975; Lüning, 1981), この特性を応用することでさらに両海藻種の配偶体を早熟させられる可能性がある。

光周期試験区間では, 成熟率に差異はみられず, 全ての試験区で 100% 近い成熟率を示した。Kim & Nam (1997) は, ワカメの至適成熟光周期を 12L:12D であると言及している。他のコンブ目藻類については 18L:6D-12L:12D での成熟率が高いとの報告がなされている (Hasio & Druehl, 1971)。本節にて光周期に対し有意な差異が見られなかったことに関しては, 設定した光周期条件の範囲が狭いこと及び高光量下での試験であったため, 配偶体の成熟に必要な光量が十分供給されていたためではないかと推察された。

本試験で用いた高栄養補強培養液である PES 培養液は, 深層水に PES 原液を添加したもので, $\text{NO}_3\text{-N}$ は約 $200 \mu\text{M}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ が約 $20 \mu\text{M}$ で, 鉄を含む微量元素類やビタミン類を含有する。PES 培養液の希釈液及び Fe-free PES 液, 表層水, 深層水と多種の培養液を用いた成熟試験では, PES 培養液を基本とする試験区のみ配偶体の成熟が確認された。Fe-free PES 液で成熟が確認されなかったことは, 言い換えれば鉄分添加により成熟が促進されると考えられ, これは Motomura & Sakai (1984) による培養液への鉄分添加により成熟が促進されるという報告を支持する結果となった。栄養塩類 (硝酸塩, リン酸塩濃度) に対する配偶体の成熟に関してはホソメコンブに知見がみられ, 成熟の閾値は $\text{NO}_3\text{-N}$ では $5 \mu\text{M}$ 以上, $\text{PO}_4\text{-P}$ では $1 \mu\text{M}$ とされている (Mizuta *et al.*, 2001)。また他種では, 窒素欠乏状態で配偶体は枯死し, リン欠乏状態では未生長・未成熟で停滞することや (Hoffman & Santerices, 1982), 高栄養塩濃度下では成熟が抑制されることが知られている (Hasio & Druehl, 1973; Motomura & Sakai, 1981)。本試験では, 硝酸塩やリン酸塩を多く含む深層水であっても成熟が見られず, また高栄養塩濃度である PES 培養液下であっても, 成熟抑制は見られなかった (Fig. 18)。これらの理由については試験条件が異なるので一概には言えないが, もっとも大きな違いは海水交換の有無であり, 本報では行っていない。したがって, 栄養塩の絶対量が配偶体の成熟に対し影響を与えたものと推察される。また本試験では目視により, 密度分布が比較的低い位置にある配偶体から成熟が促進されることを確認している。これは本節のどの試験においても, 配偶体が一

斉に成熟するのではなく, 培養日数を追うごとに徐々に高くなっていく過程からも伺える。これらのことは, 密度が低いことは, 密集して分布している部分よりも, 栄養塩の吸収が円滑に行えるだけでなく, 受光量等も増加するなどの相乗効果により成熟が促進されるものと推察された。

大量の胞子体を生産するためには, 配偶体を限られたスペースで高密度に早熟させる必要がある。このような条件下にて高成熟率を得るためには, 対象となる海藻の分布域環境の再現, 配偶体量に対する栄養塩量, また海水に含まれる微量元素含有量を詳細に設定, 管理することが特に重要であることが明らかとなった。

3. 褐藻類胞子体の生長条件

配偶体の成熟誘導により得られた幼胞子体は, 屋外のタンク養殖に移植するまで, 培養室で生長させる必要がある。屋外への移植時間を短縮することは, より短期間での収穫を可能にし, 大量培養の効率化を図れる。これまで胞子体の生長条件についての報告はコンブ目藻類で幾つかかなされているが, その多くは海面養殖に関連したものであり, 対象とする藻体は葉長 10 cm 以上のものを扱っている。したがって幼胞子体 (約 1-5 cm) を試験藻とした報告は少ない。またワカメについて, 幼胞子体と成体では, 同種でも生長特性の異なることが報告されている (Saito, 1975)。そこで本節では, 大量培養の際に生産される種苗サイズの幼胞子体の最適生長条件を明らかにすることを目的とし, 様々な物理的条件下にて培養試験を行う。また褐藻類の生長特性に対する表層水, 深層水への影響について検討する。

材 料 と 方 法

実験に用いたワカメ, ホソメコンブの幼胞子体は, 雌雄配偶体の成熟誘導より得られた葉長約 1 cm の藻体とした。培養液として, 滅菌深層水及び滅菌表層水 (121°C, 20 min) を使用し, 培養液 200 ml 当たり藻体1枚を供し, 水温 30, 25, 20, 15, 10, 5°C, 光量 0, 25, 50, 100, 150, $200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期 16L:8D, 12L:12D, 8L:16D の条件下で通気培養を行った。調査試験区以外の基本培養条件は, ワカメで水温 15°C, 光量 $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期

12L:12D, ホソメコンブでは水温 10°C, 光量 $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 光周期 12L:12D とした. それぞれの試験は 3 本立てで行い, 培養は 9 日間とし, 培養液交換は 3 日毎に行った.

測定は, 3 日間毎に藻体をフラスコから取り出し, キムタオルで挟み込むようにして吸湿し, 湿重量を計測した. 3 日毎の増重量から日間生長率を算出した. 日間生長率の算出方法は, 第 1 節と同様である. 各試験区間の日間生長率を比較し, 有意差を確認した.

結 果

1) 水温の影響

ワカメ試験において, 培養終了後の重量から算出した平均日間生長率を各試験区で比較した (Fig. 20). 水温区別による生長率は, 15°C において約 24% と最高値を示し, 続いて 10°C, 20°C 区での 15%, さらに低水温, 高水温時の 5°C, 25°C 区では約 5% と, 15°C を境に水温が増減すると生長率は減少する傾向がみられた. 水温区間の有意差は特に 15°C 区と 5, 20, 25°C 区間に見られた ($p < 0.001$). 30°C 区では, 培養 3 日以内に孢子体が白化し, 枯死が確認された. 表層水, 深層水区間での有意差は, 20°C のみにみられ ($p < 0.05$), 深層水での生長率が表層水よりも高くなることが分かった.

ホソメコンブ試験も同様に, 培養終了時の日間生長率を各試験区間で比較した (Fig. 20). 各水温区での生長率は, 最も高い 10°C での 30-35%, 続いて 5, 15°C での 20% 前後, 20°C での 10-15% と, 10°C を境に高水温, 低水温になるにつれて生長率の減少する傾向がみられた. また水温 25, 30°C 区では, 培養開始後 3 日以内に藻体が白化し, 枯死が確認された. ホソメコンブはワカメと異なり, 10, 15°C 水温区では表層水が, 5, 20°C 区では深層水で生長率が高くなることが確認された.

両海藻種の最適生長水温は, ワカメで 10-15°C, ホソメコンブでは 10°C であると判断し, 最大生長率にはワカメとホソメコンブ間に 5-10% 差があり, ホソメコンブはワカメよりも生長速度が速いことが明らかとなった.

2) 光量の影響

ワカメ試験において, 培養終了後の重量から算出した平均日間生長率を各試験区で比較した (Fig. 21). 光量区別による生長率は表層水, 深層水に関らず $100-200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で高い値を

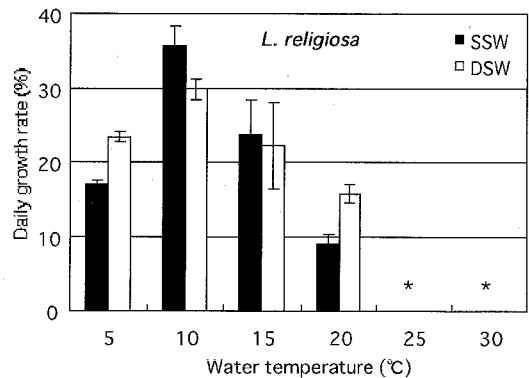
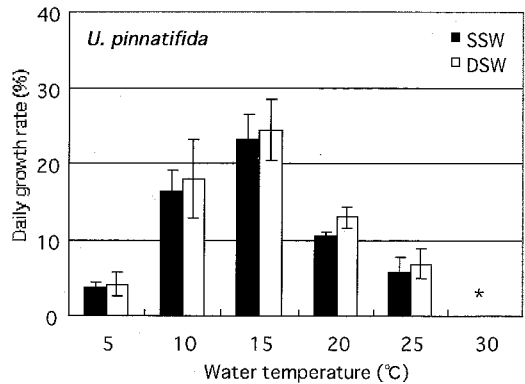


Fig. 20. Daily growth rates of juvenile sporophytes of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in surface seawater (SSW) and deep seawater (DSW) at the range of 5-30°C. Mean \pm SD ($n=3$). *: Juvenile sporophytes were breached at 25 and 30°C.

示した. それ以下の光量では急激に生長率は減少し, $25, 50 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ で 10% 前後の生長率となり, $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上の光量試験区と有意差がみられた ($p < 0.001$). さらに, 25 及び $50 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 間にも有意差が確認された ($p < 0.05$). また暗所 ($0 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$) では, 全く生長は見られなかったが, 藻体の白化現象はみられず, 培養終了時においても生存していた. 生長率の平均値は, 各試験区において常に深層水が表層水を上回った.

ホソメコンブ試験においても, ワカメと同様な傾向がみられ, 表層水, 深層水に関わらず $100-200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下の光量区で, 生長率が減少することが確認された (Fig. 21). 生長率の高い $100-200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ では, 日間生長率は約 30%, $50 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ での約 20%, $25 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ での約 13% となった. 日間生長率の有意差は, $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上と, それ以下の光量試験区 ($p < 0.001$), $50 \mu\text{mol}$

photon $m^{-2}s^{-1}$ と $25 \mu mol$ photon $m^{-2}s^{-1}$ 間にみられた ($p < 0.05$). またワカメと同様, 暗所 ($0 \mu mol$ photon $m^{-2}s^{-1}$) では, 全く生長は見られなかったが, 藻体の白化現象はみられず, 培養終了時も生存していた. また日間生長率の平均値は, 常に表層水が深層水を上回った.

ワカメとホソメコンブの生長率を比較すると, 全ての光量試験区にて, ワカメよりもホソメコンブの値が高くなることが確認された. また両海藻種ともに最適生長光量は $100 \mu mol$ photon $m^{-2}s^{-1}$ とした.

3) 光周期の影響

各試験区におけるワカメの平均日間生長率を Fig. 22 に示す. 平均日間生長率は, 光周期が長くなるほど高くなる傾向があり, 8L:16D, 12L:12D, 16L:8D の順に, 表層水区で 14.3, 23.5, 25.3%, 深層水区で 15.5, 24.5, 28.3% であり, 生長率は深層水で高くなる傾向があった. 有意差が確認されたのは, 短周期である 8L:16D が他の試験区よ

りも生長率が低いことのみであり ($p < 0.05$), 表層水, 深層水間には有意差はみられなかった.

各試験区におけるホソメコンブの平均日間生長率を Fig. 22 に示す. ホソメコンブの平均日間生長率は, ワカメと同様, 光周期が長くなるほど高くなる傾向が確認された. 生長率の値は 8L:16D, 12L:12D, 16L:8D の順に, 表層水区で 17.6, 35.8, 37.7%, 深層水区で 14.9, 29.8, 33.3% であり, 生長率は表層水で高くなる傾向があった. 有意差が確認されたのは, 短周期である 8L:16D が他の試験区よりも生長率が低いことのみであり ($p < 0.05$), 表層水, 深層水間には有意差はみられなかった.

両海藻種ともに最適生長をみせる光周期条件は, 長日の 16L:8D であった.

考 察

ワカメ幼胞子体の生長がみられる晩秋から初冬において, 本藻が分布する徳島県鳴門の平均

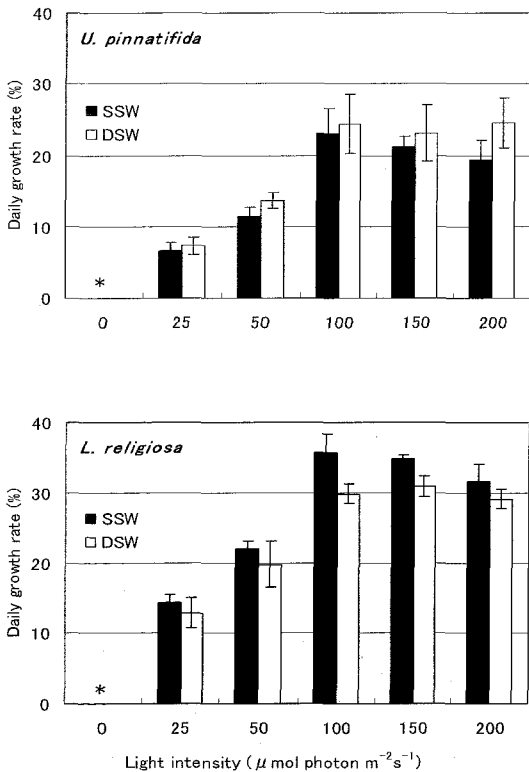


Fig. 21. Daily growth rates of juvenile sporophytes of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in surface seawater (SSW) and deep seawater (DSW) at the range of 0–200 μmol photon $m^{-2}s^{-1}$. Mean \pm SD ($n=3$). *: no growth.

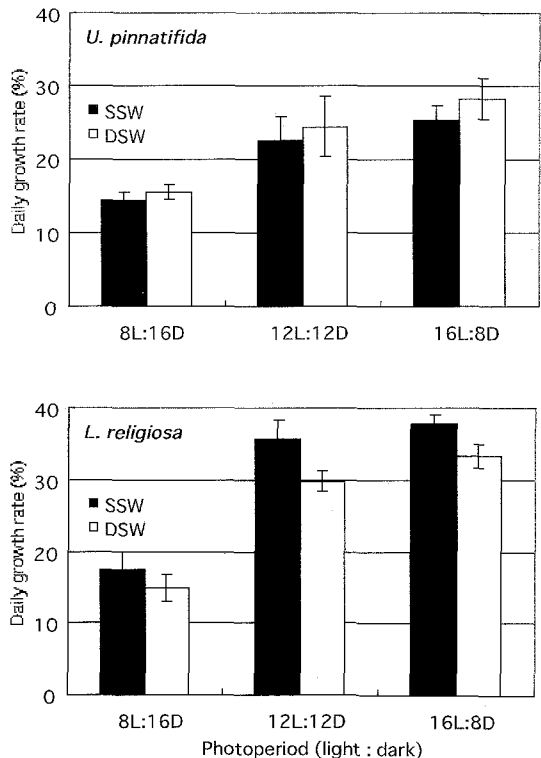


Fig. 22. Daily growth rates of juvenile sporophytes of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in surface seawater (SSW) and deep seawater (DSW) at the range of 8L:16D–16L:8D. Mean \pm SD ($n=3$).

水温は、11月下旬の17.8℃から12月の13.5℃と急激に水温が低下する時季にあたる。本試験で確認された最適生長水温とは、概ね一致していた。またホソメコンブ幼胞子体の生長も晩秋から初冬にかけてみられ、ホソメコンブが繁茂する北海道忍路湾の水温は10℃から5℃へと急激に水温が低下する時季にあたり(松山1985)、本試験結果の最適生長水温と天然環境下での生長時季水温と一致した。さらに両海藻種の致死水温はワカメでは30℃、ホソメコンブでは25℃以上であった。Morita *et al.* (2003b) は、25℃から水温を1℃ずつの勾配で培養比較し、ワカメの致死水温を28℃であることを確かめている。また同じコンブ類での致死水温については、22-25℃であることが報告されている(Botton & Lüning, 1982; 桐原ら, 2003)。本試験でも同様な傾向がみられ、養殖をする上で、これら致死水温にまで水温を上昇させないよう厳密にコントロールする必要があると考えられた。

最適生長光量は両海藻種ともに100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上となり、それ以下の光量で生長率は低下した。斉藤(1962)は、ワカメの分布する愛媛県知多半島の水深3-5 m付近の光量を調査し、晴天時には約15000 lux ($\approx 300 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$)の光量が到達することを確かめている。また、ワカメ、ホソメコンブの藻体を用いた光合成活性の測定からは、両海藻種ともに100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上で飽和状態となり、ワカメでは500 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上、ホソメコンブでは1000 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上でも強光阻害が見られないことが報告されている(松山, 1985; Oh & Koh, 1996)。したがって、両海藻種の光要求は100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上あれば良いことから、本試験との結果とも合致した。光周期に関しては、両海藻種ともに長日条件での生長率が高かった。しかし、幼胞子体が生長する時季では日長は短日条件側であり、天然海域においても光が不足している状況下にあるのではないかと考えられた。本試験からは、光周期はよほど短日条件でない限り、日間生長率に大きく影響を与える因子ではないと推察される。これまで、配偶体の生長、成熟条件を検討し、それらの条件はそれぞれの配偶体が生育している天然海域環境と高い相関があることを報告した。幼胞子体の最適生長条件も同様な傾向があると思われる。

本試験では培養液として表層水と深層水を用いたが、特にホソメコンブにおいて、水温が異なると表層水、深層水での生長が逆転するとい

う現象がみられ、特に生長率が高い水温10-15℃にて、顕著に確認された。これらの要因の一つとして、水温変動と海水中の成分の違いによる、海藻の代謝経路への影響が考えられる。代謝経路といえども数多く存在し、光合成活性や呼吸、酵素活性など様々である。これまでに *L. hyperborea* というコンブにおいて、RuBisCO活性が、水温や培養液中の栄養塩濃度によって高低することや(Küppers & Weidner, 1980)、*L. saccharina* では最適生長水温下で glutamine synthetase 活性や nitrate reductase 活性が上昇することが確認されている(Davison & Davison, 1987)。ホソメコンブにおいても同様な代謝経路が存在することで、生長への影響として現れたのではないかと推察された。今後は培養液中の栄養塩濃度や水温を変化させたときの生長を確認し、さらに詳細に検討していく必要がある。

4. 褐藻類の屋外タンク養殖

アワビ養殖に用いられる餌料には、塩蔵、乾燥させた海藻や魚粉などの成分で調整された人工飼料等がある。それらの飼料はコスト的に、また給餌後の残餌回収など作業効率的に多くの負担がかかるという問題点がある。生海藻の給餌は、海藻が生育しているため、残餌の腐敗が緩やかであり、毎日の給餌や掃除が必要なく、水質の悪化も防げるというメリットがある。しかし生海藻を常に給仕することは、餌となる褐藻類が周年存在しないことから難しい。そこで著者らは、アワビに断続的に生海藻を給餌するために、周年水温が安定し富栄養な深層水を利用して、屋外タンクによる褐藻類の周年養殖を検討した。深層水を利用した海藻養殖の報告は数少ないが、ワカメでは深層水の利用によって、オフシーズンでも培養できることが確認されており(大野ら, 2000)、またマコンブにおいても表層水よりも深層水での生長が良好であるという報告がなされている(藤田, 1990; 山口ら, 1994)。また著者らは、緑藻ではアオノリ、紅藻ではトゲキリンサイ、トサカノリ、アマノリ類、褐藻ではカヤモノリについての深層水培養に関し、深層水での培養時の生長が優れているという知見を得ている(大野ら, 2001; Hiraoka *et al.*, 2004)。本節では、深層水をタンクに連続注水する方法で養殖を行い、周年養殖の可否及び時季(特に水温、光量の変動等)による褐藻類の生長への影響について検討した。また表層水と深層

水を用いて同時に養殖を行い、両海水での褐藻類（成体）の生長特性について新たな知見を得ることとした。

材 料 と 方 法

屋外養殖に用いる褐藻類の種苗は、予め培養室内で成熟誘導により生産した種苗を用いた。本節試験では、種苗を水槽内で浮遊させて生長させるため、“孢子集塊化法”という技術を用いた（Oka *et al.*, 2004）。これは、幼孢子体生産時に褐藻類の附着根の部位を数個体から数十個体、互いに連結させ、花卉のような形状の海藻種苗を生産するものである（Fig. 23）。この種苗を用いることで、タンク内を3次元的に利用でき、高密度な培養が可能となる（Fig. 24）。

1) 深層水連続注水による周年養殖試験

ワカメは2002年4月3日から2003年2月13日まで、ホソメコンブは2002年2月25日から2003年

の2月1日までに7期に分けて養殖を行った。養殖は、100 L容量の水槽、1 t容量の水槽、7 t容量の水槽を用い、海藻の増重に伴い、より大きな容量の水槽に移植する方法で行った。水槽内の海藻密度を考慮に入れ、100 L水槽では100 g、1 t水槽では1 kgに達すると規模の大きな水槽へ移植した。1期の養殖期間は、約1ヶ月とした。

水槽への注水量はワカメで3t/day、ホソメコンブで6t/dayとした。ホソメコンブは寒流域に分布する海藻で高水温耐性が低く、特に夏季において外気温の上昇によって水温が上昇し、ホソメコンブの養殖が不可能となるおそれがあり、ホソメコンブでの注水量はワカメ養殖時の倍量にした。タンク内水温及び光量子量をMDSデータロガー（Arec electronics Co., Ltd.）で連続計測し（10 min / count）、養殖期間中の平均水温、日照時の平均光量を算出した。海藻の重量測定は3-5日間毎にタンクから海藻を袋状の網に回収し、家庭用洗濯機の脱水槽で3分脱水したものを測定した。測定間隔の増重量から日間生長率を

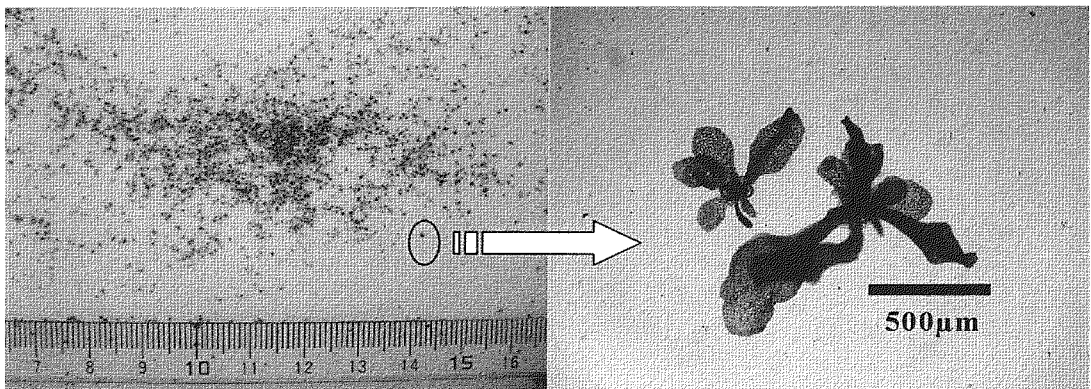


Fig. 23. “Germling clusters” produced from germling aggregation.

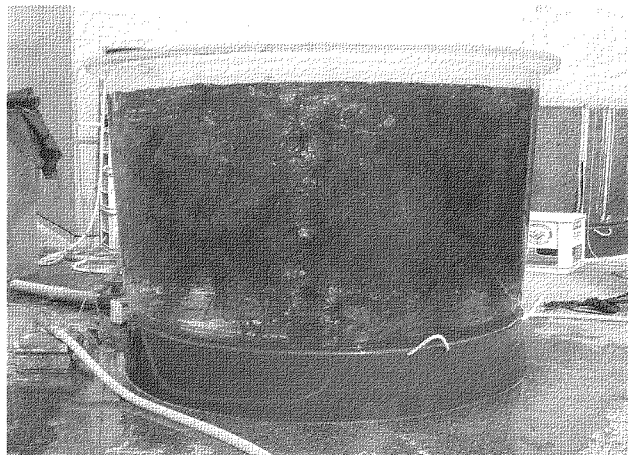


Fig. 24. *L. religiosa* cultivated as free living form “germling cluster” in 1t tank with deep seawater.

算出し、各海藻の年変動を確かめた。日間生長率の算出方法は、第1節と同様とする。

2) 表層水と深層水によるタンク養殖試験

ワカメは2004年1月22日から3月13日まで、ホソメコンブは2003年2月5日から3月11日までを養殖期間とした。養殖を冬季に行ったのは、晩冬から初春にかけて表層水の水温が最も低下することから、海藻が枯死することなく養殖が行えると予想されたためである。養殖には、100 L水槽及び1 t水槽を用い、100 L水槽で100 g以上になると、1 t水槽へ移植した。水槽への注水量は両海藻種ともに3 t/dayとした。水温、光量、湿重量の測定及び日間生長率の算出については、深層水連続注水による周年養殖試験と同様とした。また、ホソメコンブ養殖試験において、測定日以外の正午と真夜中に深層水、表層水水槽の注水と排水をサンプリングし、栄養塩の分析を行った。ワカメ養殖試験ではサンプルの損失により、解析ができなかった。栄養塩の分析までは、サンプルは孔径0.45 μm のメンブレンフィルターで濾過後、 -20°C で凍結保存した。栄養塩の分析はTRACCS800を用い、海洋観測指針に準拠し、溶存無機三態窒素及びオルトリン酸塩の濃度を測定した。注水と排水の栄養塩濃度差から、昼夜の栄養塩吸収について、また海藻の増重量と栄養塩吸収量との関係を調べた。

栄養塩吸収量は下記の式により算出した。

$$\text{栄養塩吸収量 (g)} = ((2\text{日分の昼夜の栄養塩濃度差} (\mu\text{M})/4) \times \text{分子量}(\text{NO}_3:62, \text{PO}_4:95) \times \text{注水量}(9000\text{L}))/1000$$

養殖後の藻体は一般成分分析を行い、表層水、深層水それぞれの培養藻体間の成分差を確認した。海藻の成分分析を行うことは、アワビ餌料としての優劣を判断する指標となる。分析を行

った一般成分とは、水分、粗タンパク質、粗灰分、粗脂質、炭水化物である。それぞれの分析は定法に従い、水分は常圧加熱乾燥法(120°C)、粗タンパク質はケルダール法、粗灰分は 550°C 常圧灰化法、粗脂質はクロロホルム-メタノール抽出(クロロホルム:メタノール=2:1)、炭水化物は100%から上記の割合を差し引いて求めた。成分分析用のサンプルは、乾燥させたワカメ、ホソメコンブを用い、分析は3本立てで行った。得られた値は試験区間で有意差検定を行った。

結 果

1) 深層水連続注水による周年養殖試験

ワカメ養殖期間中のタンク内水温、光量、注水量及び日間生長率をTable 1に示した。年間の水温変動は、冬季が 9.1°C で夏季が 22.2°C と幅広く、深層水の水温は常に 12°C 前後であるため、外気温の影響により強く変動することが分かった。平均水温についても、1-2月の冬季では最低水温 11.5°C となり、8月の夏季では 21.3°C を示した。また養殖期間中の平均光量は約 $1,000\text{--}1,500 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ となり、冬季よりも夏季において強くなる傾向がある。平均日間成長率を比較すると、春季や秋季での日間生長率が20%と高く、夏季や冬季では15%前後と減少した。生長率には季節的な変動があるが、周年養殖は十分に可能であった。

またホソメコンブ養殖期間中のタンク内水温、光量、注水量及び日間生長率をTable 2に示した。年間の水温変動は、ワカメと同様、冬季の 10.7°C -夏季の 20.0°C と幅広く、平均水温についても1-2月の冬季では最低水温 12.6°C となり8月の夏季では 17.4°C を示し、時季で大きく異なった。しかしワカメ水槽と比較して、注水量の増加によって水温変動の幅は狭くなることが確認された。また養殖期間中の平均光量は約900-

Table 1. Seasonal changes of average daily growth rates of *U. pinnatifida* with environmental factors in the culture tank

Incubation period	Temperature range ($^{\circ}\text{C}$)	Average temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Average irradiance ($\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Deep seawater supply (tonne/day)	Average daily growth rate (%)
3-27 Apr. 2002	14.2-16.2	14.9	972	3.0	19.9
10 June-16 May	15.4-20.9	17.4	1176	3.1	19.6
15-26 Aug.	19.8-22.2	21.3	1493	3.2	17.5
10 Sep.-6 Oct.	16.4-19.3	17.6	1424	3.0	20.5
16 Sep.-18 Oct.	17.4-19.0	18.3	1350	2.9	19.4
25 Dec.-24 Jan. 2003	11.1-14.9	12.7	1440	3.0	14.9
28 Jan.-13 Feb.	9.1-12.4	11.5	1247	3.0	16.0

1500 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であり、時季的な強弱は明確ではなかった。平均日間成長率を比較すると、晩秋から初春での日間成長率が20%以上と高く、夏季では7.3%と極端に低い値となった。ホソメコンブもワカメと同様、成長率に季節変動があるが、周年養殖は可能であることが確かめられた。

2) 表層水と深層水によるタンク養殖試験

ワカメ、ホソメコンブそれぞれの養殖における湿重量の遷移と水温変動を Fig. 25 に示した。ワカメでは表層水区よりも深層水区での生長が早く、最終的な収量は深層水区が表層水区の約2倍量となった。しかしホソメコンブにおいては、ワカメとは逆の傾向がみられ、深層水区よりも表層水区での生長が早くみられた。ホソメコンブ培養終了後の収量は、表層水区が深層水区1.5倍量多いことが確かめられた。ワカメ、ホソメコンブ両水槽内の水温に関しては、表層水では常に水温は20℃以下となったが、日によって大きく変動することが分かった。また深層水は常に表層水よりも低温であり、変動の幅も小さく、安定していた。さらにワカメよりもホソメコンブの培養期間が短く、ワカメよりも生長率が高いことが確認された。

また両海藻種の養殖期間中の水温範囲、平均水温、平均光量、平均日間生長率を Table 3 に示した。水温は、ワカメ水槽では表層水区で12.7-16.6℃、深層水区で11.3-13.4℃、ホソメコンブ水槽では表層水区で14.4-17.8℃、深層水区で11.9-13.7℃の間で変動が見られた。冬季でも表層水を注水した水槽内では最高でも17℃前後に達すること、また深層水が注水された水槽内水温は約12℃前後で一定していることが確認された。平均水温はワカメ水槽では表層水区で14.8℃、深層水区で12.4℃、同様にホソメコンブ水槽ではそれぞれ16.1℃、13.1℃であり、両試験区間には2-3℃差がある。平均光量は試験区間に差はなく、全て900 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 前後であった。平均日間生長率は、ワカメにおいて表層水区で

14.3%、深層水区で16.3%、同様にホソメコンブではそれぞれ24.2%、22.5%と試験区間に約2%の差が確認された。また生長率はワカメよりもホソメコンブで高く、ホソメコンブは冬季での養殖が適していることが再確認された。

海藻の栄養塩吸収について、水槽の注水と排水の硝酸塩、オルトリン酸塩濃度差の変動を Fig. 26 に示した。栄養塩濃度差は、培養日数が長くなるほど大きくなり、深層水培養水槽で顕著であった。表層水養殖水槽では注水される表層水自

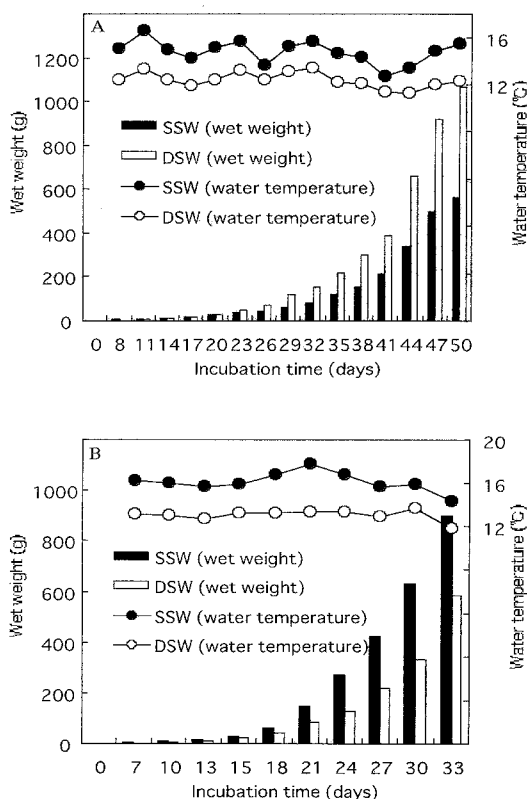


Fig. 25. Changes of wet weight and water temperature in the culture of *U. pinnatifida* and *L. religiosus* using surface seawater (SSW) and deep seawater (DSW) in outdoor tank (A: *U. pinnatifida*, B: *L. religiosus*).

Table 2. Seasonal changes of average daily growth rates of *L. religiosus* with environmental factors in the culture tank

Incubation period	Temperature range (°C)	Average temperature (°C)	Average irradiance ($\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Deep seawater supply (tonne/day)	Average daily growth rate (%)
25 Feb.-9 Apr. 2002	11.7-16.5	13.7	1285	6.0	22.7
26 Apr.-27 June	13.7-17.5	15.4	880	5.4	14.1
7 June-8 July	16.0-17.6	16.8	865	5.0	13.3
17 Aug.-11 Sep.	16.9-20.0	17.4	1292	5.0	7.3
17 Sep.-15 Oct.	15.4-17.4	16.2	1309	6.3	16.6
29 Oct.-25 Nov.	13.4-14.6	14.3	994	6.3	23.3
6 Jan.-1 Feb. 2003	10.7-13.4	12.6	1445	6.5	21.7

Table 3. The average daily growth rates of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* using surface seawater (SSW) and deep seawater (DSW) and the environmental factors in the culture tank

Incubation period and species	Culture medium	Temperature range (°C)	Average temperature (°C)	Average irradiance ($\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Average daily growth rate (%)
22 Jan.-13 Mar. 2004 <i>U. pinnatifida</i>	SSW	12.7-16.6	14.8	865	14.3
	DSW	11.3-13.4	12.4	888	16.3
5 Feb.-11 Mar. 2003 <i>L. religiosa</i>	SSW	14.4-17.8	16.1	927	24.2
	DSW	11.9-13.7	13.1	903	22.5

体に栄養塩が少ないため、栄養塩濃度差は殆どみられなかった。また深層水養殖水槽では、昼夜を問わず栄養塩濃度に差があり、常にホソメコブは栄養塩を吸収していた。

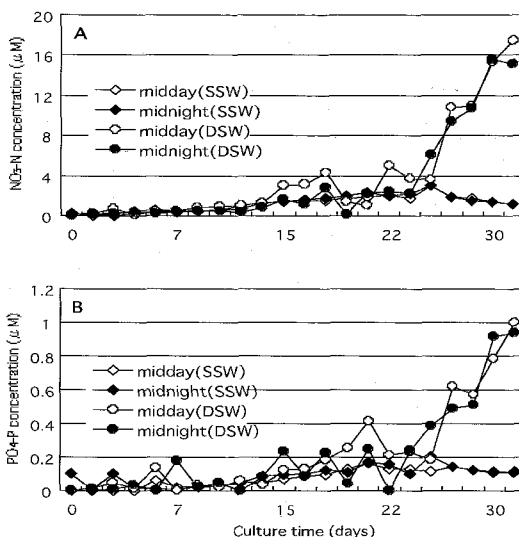
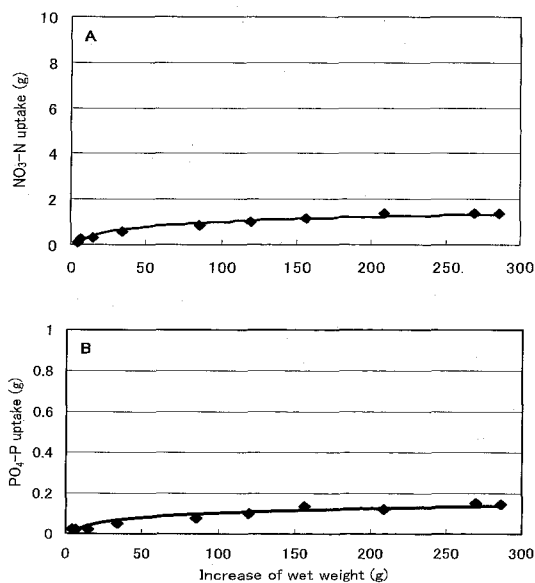
養殖3日毎の栄養塩吸収量と増重量との関係を確かめた。表層水では養殖初期に栄養塩の吸収は頭打ちしており、過度の栄養塩欠乏状態であった (Fig. 27)。

逆に深層水では、増重量と栄養塩の吸収量には顕著な相関がみられ、本養殖試験の注水量において増重量に伴う栄養塩の欠乏はないことが明らかとなった (Fig. 28)。この相関図の近似線からは、養殖期間中に予想される増重量から栄養塩要求量を算出でき、それに見合った深層水を注水することで深層水を無駄なく利用できる。硝酸塩では増重量の約 1/20、リン酸塩では約 1/200を吸収することが分かった。

表層水、深層水で養殖したそれぞれの海藻の一般成分を Table 4 に示す。水分含有量は11.14%に統一し、全ての項目を換算して表記した。

ワカメでは、両試験区間での有意差はタンパク質と炭水化物にみられた ($p < 0.001$)。タンパク質含量は、深層水培養藻体 (20.55%) が表層水培養藻体 (10.11%) よりも約 2 倍量含有し、逆に炭水化物含有量は表層水培養藻体 (37.93%) よりも深層水培養藻体 (31.44%) で少なくなった。他の成分については両試験区間で有意差はみられなかった。ホソメコブでもワカメと同様な傾向が確認され、タンパク質と炭水化物含量についてのみ、表層水と深層水の試験区間で有意差がみられた ($p < 0.001$)。タンパク質含量は、深層水区 (22.24%) が表層水区 (10.49%) よりも約 2 倍量を含有し、炭水化物含量は表層水区 (45.47%) よりも深層水区 (31.40%) で少なくなった。

海藻種類別での成分差について、特に目立っているのが脂質含量であり、ワカメ (1.32-1.84%) はホソメコブ (0.04%) よりも多くの脂質を含有していたことが分かった ($p < 0.001$)。

**Fig. 26.** Balance of poured seawater and drain seawater in (A) $\text{NO}_3\text{-N}$ and (B) $\text{PO}_4\text{-P}$ at midday and midnight.**Fig. 27.** Correlation of nutrient uptake ((A) nitrate and (B) phosphate) and increase of wet weight in surface seawater.

考 察

深層水の連続注水による屋外タンク養殖において、海藻の日間生長率を決定する主要因は、水温、積算光量であると考えられる。そこで、水温と光量の季節変動と各種海藻の日間生長率の変動との相関を検討した結果、光量は顕著な季節変動がなく、生長率の変動と水温変動とに相関が見られた (Fig. 29)。

Fig. 29 からは、各種海藻の平均日間生長率が、ワカメにおいては約 18℃、ホソメコンブでは 13.5℃ において最高値になると推察された。ワカメに関し、18℃ という水温は、Pang & Wu (1996) の報告する 17-22℃, Morita (2003b) の

20℃ と近い値であった。ホソメコンブに関しては、14.4℃ にて高い光合成活性がみられることが分かっている (松山, 1985)。したがって、屋外にて海藻養殖を行う場合、特に養殖水温が日間生長率と密に関連していることが推察された。また第三節での幼孢子体の最適生長水温は、ワカメで 10-15℃、ホソメコンブでは 10℃ と、成体の最適生長水温と差異が生じた。特にワカメにおいて、成体が高水温に適応していると考えられる。齊藤 (1962) は、ワカメ藻体の老幼によって生長水温が異なり、幼体は高水温 (15℃ 以上) での生長が、成体ではそれよりも低水温での生長が良いこと、さらに養殖環境の相違によって高水温での生長速度が異なることを報告している。最適生長水温に関しては、本試験とは逆の傾向であった。齊藤 (1962) の試験は、ワカメ養殖を天然海域で行っており、本試験の陸上養殖とは光量等の環境が大きく異なる。養殖海水も、表層水と深層水という異質な海水である。これら環境の相違が、ワカメ藻体の老幼の最適生長水温の相違として現れたのではないと思われる。

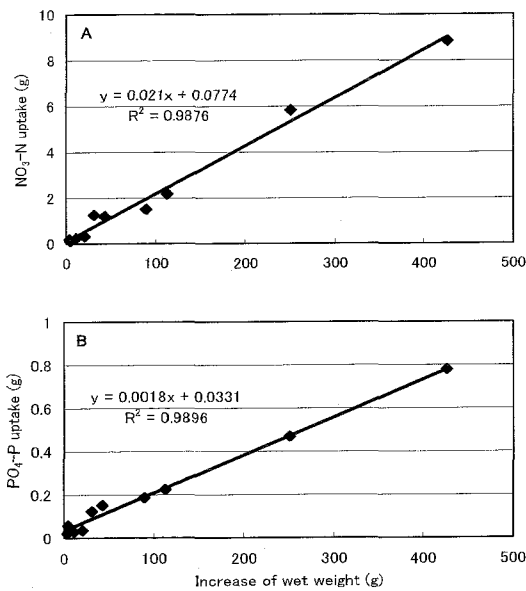


Fig. 28. Correlation of nutrient uptake ((A) nitrate and (B) phosphate) and increase of wet weight in deep seawater.

Table 4. Analytical data of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in the culture using surface seawater (SSW) and deep seawater (DSW)

Species (Culture medium)	(g/100g)			
	Ash	Lipid	Protein	Carbohydrate
<i>U. pinnatifida</i>				
(SSW)	44.45	1.48	11.37	42.68
(DSW)	38.84	2.07	23.12	35.38
<i>L. religiosa</i>				
(SSW)	36.97	0.05	11.80	51.17
(DSW)	39.71	0.05	25.03	35.34

(n=3)

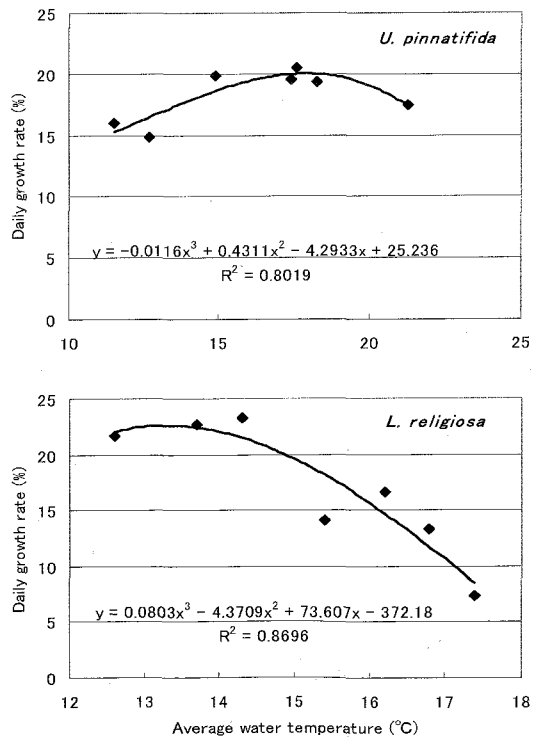


Fig. 29. Distribution of daily growth rate in *U. pinnatifida* and *L. religiosa* as a function of seawater temperature in outdoor tank.

表層水、深層水での両海藻種の養殖結果について、ワカメでは常に深層水で生長が良く、ホソメコンブでは特に表層水での生長が早いという傾向がみられた。これらの現象は、第三節での様々な水温条件での胞子体培養結果でも観察され、ワカメはどの水温区でも深層水での生長が早いのに対し、ホソメコンブでは水温 10-15℃の培養区において深層水よりも表層水での生長が良いという逆の傾向がある (Fig. 20)。これまで、厳密に表層水と深層水を用いた培養比較はされておらず、そのような知見はみられない。今後は水温等の物理的条件だけでなく、海水成分による両海藻種の生長特性の詳細を明らかにすることが、今後の課題として残された。

藻体成分に関して、深層水で培養した藻体は、表層水で培養した藻体と比較し、有意にタンパク質含量が多くなっていた (Table 4)。科学技術庁資源調査会発表による五訂日本食品成分表では、それぞれタンパク質、炭水化物含量について、乾燥ワカメでは 13.6, 41.3%, 乾燥ホソメコンブでは 6.9, 62.9% と記されている (山田, 2001)。これは深層水で養殖された海藻のタンパク質含量の約半分であり、表層水で養殖された海藻成分と近似していた。一般的に海藻成分は、窒素制限下における培養でタンパク質含量が減少し、炭水化物含量が増加することが知られている (Lobban & Harrion, 1994)。深層水培養藻体は栄養塩が十分に吸収され、栄養塩が十分ある環境下では、硝酸塩では増重量の約 1/20, リン酸塩では約 1/200 を吸収することが分かった (Fig. 28)。このことから、表層水培養藻体は培養初期において栄養塩欠乏状態に陥っていると考えられる (Fig. 27)。これらの栄養塩吸収量の差異が、藻体に含有されるタンパク質や炭水化物量に影響を及ぼしたものと考えられた。またアワビ餌料にとって、タンパク質含量の多い海藻は、餌料価値が高いとされている (Shpigel *et al.*, 1998, 2000)。したがって、深層水で養殖することにより高タンパク質含量の海藻を生産でき、アワビ餌料として用いる際は、深層水の有効性が非常に高いと思われる。

本節での深層水を用いた養殖試験では、両海藻種での最も高い日間生長率は約 20% であった。この 20% という値は、培養約 1 ヶ月で 10 g の海藻が 10 kg になることを示す。周年養殖する際、時季別に生長率の高い海藻を養殖することを考えると、晩春から初秋にかけてワカメを (平均日間生長率 17.5-20.5%)、初秋から初春にかけてホソメコンブを (平均日間生長率 21.7-

23.3%) 養殖することで、収穫量を常に多く保つことができると考えられる。

一般的に、世界中で行われる海藻養殖というのは海面養殖が主流であり、海藻の生長を天然環境に委ねる。ワカメ、ホソメコンブの養殖は、ロープや網などの附着基盤に幼胞子体を定着させたものを海面に沖だしし、初春～初夏にかけて生長した成体を取獲するという方式をとる (Ohno & Matsuoka, 1993; Critchley & Ohno, 1998)。アワビに連続的に生海藻を給餌するという養殖を行うのであれば、この収穫時季が制限されることは、最大のデメリットとなる。タンク養殖においてもロープや附着基盤を水槽底部に設置し、藻体を生長させることは可能であろう。しかし基盤設置等は平面的な広がりにとどまり、水槽内を効率的に利用することができない。また水温や栄養塩濃度が季節的に変動し海藻の生長にとっては雑物である生物が多く生息する表層水での海藻培養は、陸上養殖には適していない。本節では、“胞子集塊化法”及び“深層水”を用いることで、水槽内を 3 次元的に利用し、海藻を高密度にまた周年養殖することが可能であることを実証した。従来にはなかったこの養殖方法は、集約的タンク養殖を確立するために必須な養殖方法であり、アワビに断続的に海藻を給餌するためには適したものであると考えられる (Oka *et al.*, 2004)。

II. 褐藻類給餌によるアワビ養殖

著者らは前章において、深層水を用いた褐藻類の大量培養法を確立し、経時的にどれだけの褐藻類が生産可能かを明らかにし、アワビ餌料の確保を可能とした。またアワビ養殖に深層水を利用することで、海水の濾過も必要なく、施設コストや水質管理等を削減できる。本章では、アワビ養殖水としての深層水の評価を検討すると共に、生産した褐藻類のアワビ給餌により、成長量や成長速度、日間摂餌量、一般成分を比較、分析した。また給餌した褐藻類の種類別により、アワビの成長や一般成分に差異がみられるかどうかを明らかにし、ワカメ及びホソメコンブの餌料価値を比較した。さらに天然アワビや人工飼料等を給餌させたアワビと深層水養殖海藻を給仕したアワビの成分比較を行うことで、深層水養殖海藻のアワビ成分への影響について検討した。本章の試験に用いるアワビは、徳島県牟岐町水産資源栽培センターから譲与された、

暖海性のアワビ *Hariotis seiboldii* (和名：メガイアワビ) とした。

1. 褐藻類給餌によるアワビ中規模養殖

メガイアワビは、日本でも古くから分布する南方種である(猪野, 1952)。メガイアワビの養殖は、漁協や水産試験場などによる種苗生産事業が殆どであり、メガイアワビを成体(70 mm 以上)に成長させ販売しているような施設は少なく、専ら種苗放流事業である。したがって、種苗を40 mm 以上のアワビ成長の知見は乏しい。本節では深層水の連続注水及び深層水で養殖したワカメの連続給餌によるメガイアワビ(殻長 30 mm-) 養殖を行い、養殖期間中の水温変動に伴うメガイアワビ一個体当たりの日間摂餌量及び月毎の成長速度、また養殖終了時の生残率を明らかにし、深層水を養殖水として利用した場合の有効性について検討した。ここで得られたアワビの日間摂餌量や成長速度の知見は、第三章でのアワビ養殖システムの構築因子として利用する。

材 料 と 方 法

養殖試験は、2001年11月1日から2002年6月4日までの216日間とした。養殖水槽は1t水槽を用い、水槽底部にはアワビ用の波型シェルター(45×35×20 cm)を4基設置し、アワビが密に飼育されないよう基盤面積を十分にとった(Fig. 30)。またシェルターには数箇所ほど直径5 cmの穴を開け、アワビが移動できるようにした。1t水槽に収容したアワビは、徳島県牟岐漁協から分与され、一定期間、深層水で養殖された殻長約30-50 mmのものを156個体とした(Fig. 31)。水槽には深層水を3t/dayになるように注水し、水槽底部の端からエアレーションを施した。水槽内の水温は、正午の水温を養殖期間中測定した。

深層水で養殖したワカメは、葉状部位のみを2-4日毎の毎夕に十分量給餌し、残餌の回収量から月当たり摂餌量(Monthly food intake)を計算した。またその値から、アワビ一個体当たりの日間摂餌量を算出した。水槽内の珪藻繁茂を抑えるために、給餌日と同日に水槽を掃除した。アワビの総重量測定は約1ヶ月毎に行い、写真撮影と共に、10個体の殻長を記録し、増重量からは月当たりの増重率(Monthly rate of weight gain)を算出した。月当たりの増重率及び摂餌量の算出式は浮(1981)を参考とした。

Monthly rate of weight gain (%)

$$= [(W_{30} - W_0) / W_0] \times 100$$

W_{30} = 培養30日後のアワビ重量

W_0 = 培養初期重量

Monthly food intake (g)

$$= \text{月当たりの海藻給餌量} - \text{月当たりの残餌量}$$

結 果

アワビ総重量の推移を Fig. 32 に示した。培養開始時の約1 kgのアワビは、培養約200日後に倍量の2 kg となった。本実験の養殖期間中斃死したアワビは、誤って水槽掃除時にシェルターの下敷きにしてしまったことによる。それ以外でアワビは斃死することなく、健全に成育した。

培養終了後のアワビは最大のもので75 mmに達したが(Fig. 33)、アワビの大きさにはばらつきがみられ、約50-70 mmの間であった。養殖期間中の水温は、冬場の2月で最低12.5℃から6月の18.6℃の間で変動した。水温変動と増重量

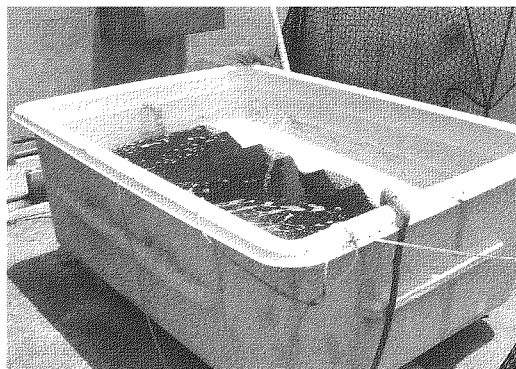


Fig. 30. One ton tank for abalone, *H. seiboldii*, together with four cases of corrugated plates.

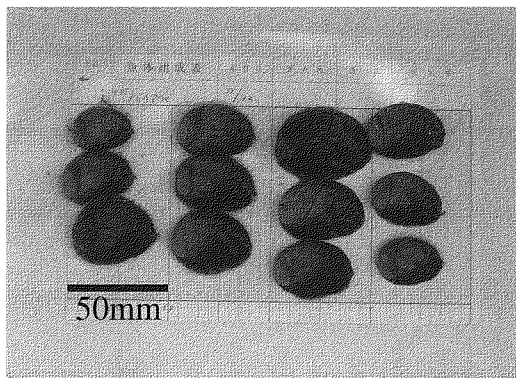


Fig. 31. Size range from 30 to 50mm of shell length, *H. seiboldii*.

の変動には同様な傾向がみられ、水温が最も低下した2月に増重量も最低となり、その後水温の上昇と共に増重した (Fig. 34).

本試験中、アワビによるワカメの総摂餌量は約 9.2 kg であり、アワビ一個体の平均摂餌量は斃死したものを除くと、61.7 g にあたる。また月当たりの増重量と海藻の摂餌量とは相関はみられなかった (Fig. 35)。養殖期間中で最も多い月間摂餌量は11月の 1.7 kg であり、アワビ 1 個体の日間摂餌量は、0.39 g/日であった。

考 察

深層水の連続注水によるアワビ養殖は、水温の低下とともにアワビの摂餌量、成長量の低下を引き起こした。一般的に暖海性であるメガイアワビの最適成育水温は 18℃ とされており、本試験では大幅な水温低下が、アワビの成長を滞らせたと考えられる。アワビの日間摂餌量について、最も多い11月において 0.39g であった。これは酒井 (1962) や浮 (1981) による好適培養条件で行われた約 25 mm サイズのエゾアワビ養殖試験における、ワカメの日間摂餌量 (約 0.3g) と同程度の量である。しかしエゾアワビの

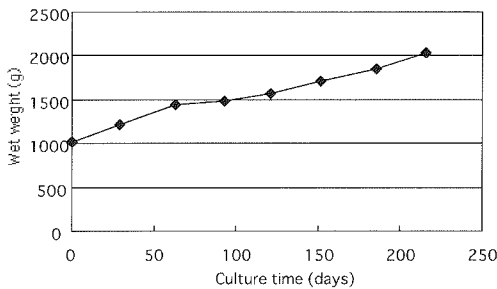


Fig. 32. Growth curve of *H. seiboldii* cultured for 216 days in 1t tank.



Fig. 33. Growth of abalone cultivated on 4th June. After 7 months, abalone grew from 30-50mm of initial length in November reaching 70-75mm in June.

場合、月間増重率は 40% であるのに対し、本試験では 20% に留まったことから、アワビの種類や大きさの違いによって、餌料転換効率が大きく異なることが示唆された。したがって、本試験ではアワビ成長は低水準で推移したものと考えられる。今回は実験の都合上、メガイアワビを使用したのが、より低水温で高成長をみせるエゾアワビなどを養殖することが、深層水養殖には適していると思われる。またメガイアワビを養殖する場合、水温の高い表層水との混合、もしくは表層水との簡易式熱交換を行い、深層水の水温を上昇させることで、成長量の改善は行えるのではないかと推察された。

一般的にアワビは、1 kg の増重に約 15 kg の生海藻の摂餌が必要であるとされている (猪野, 1952)。本試験ではワカメを断続的に摂餌させることで、1 kg の増重に 9.3 kg の海藻量のみで達成された。アワビ餌料としては、タンパク質含量が多いほど、飼料価値が高いことが報告されている (Shpigel *et al.*, 1998; Shpigel *et al.*, 2000)。第一章、第五節にて深層水で養殖されたワカメ及びホソメコンブでは、表層水の培養藻体と比べ、タンパク質含量が約 1.5-2 倍と多く含まれていた。これは一般的に成分表記されている値よりも多い (山田, 2001)。このようなことから、

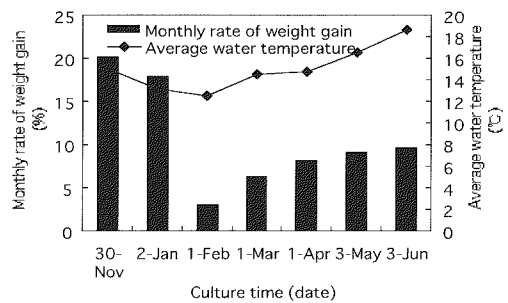


Fig. 34. Changes in average water temperature in one tank with deep seawater and monthly rates of weight gain by abalone.

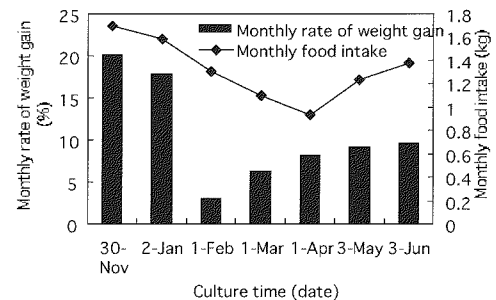


Fig. 35. Changes in monthly rates of weight gain and monthly food intake by abalone.

タンパク質含量が多いことでアワビの餌料転換効率が高くなり、それに伴い少ない摂餌量でより早い増重が見られたのではないかと考えられた。

また本試験では、ワカメの葉状部位のみを給餌した。附着器や茎部は人食用のワカメ養殖においても産業廃棄物となり、アワビも摂餌しない。しかし近年、Kawashima *et al.* (2002) は、茎部を茹でることによりアワビが摂餌し、その摂餌量は葉状部位よりも多く、高い餌料効果を持つことを報告している。このような産業廃棄物となる部分をアワビ餌料として転化することは、アワビ養殖にとってコスト面から非常に有効であり、本試験においても養殖したワカメを無駄なく有効利用するために茎部を利用する必要があると思われた。

また深層水を利用したアワビ養殖に関する知見としては、これまでに深層水中の珪藻のみをアワビに給餌させた試験が報告されており、Fujita (2000) は深層水を加温して、繁茂してきた附着珪藻のみをエゾアワビに摂餌させ、60 mmのアワビまで成長させることに成功している。また Fukami *et al.* (1998) は、筒型リアクターに深層水を通水して繁茂してきた附着珪藻 (*Nitzschia sp.*) をメガイアワビに摂餌させ、健全な育成がみられたことを報告している。しかし、これらの珪藻は主に稚貝の初期餌料として用いられており (浮ら, 1979), 珪藻だけを摂餌させたアワビ成長量よりも、本試験での成長量が大きい。近年、松村 (2004) は、大型海藻であるマコンブと附着珪藻との混合給餌により、マコンブ単独給餌よりもエゾアワビの成長が優れていることを報告している。今後はこれらの知見を応用したアワビ養殖について検討を行う必要がある。

本試験では、人為的なものを除きアワビは斃死することなく、健全に育成された。アワビの斃死原因に関しては幾つか報告があり、動物による影響として、イワムシ (*Morphysa iwamushi*) による足部の食害や、寄生虫としては海綿・二枚貝類のイシマテ (*Lithophaga sp.*)、消化管内に寄生するトウキョク類の一種 (*Penaeus haliotis*) が知られている (猪野, 1952)。また水質の影響としては、高密度養殖による酸素欠乏や高濃度のアンモニア窒素の毒性による斃死、成長の沈滞等がみられる (石田, 1993; 瀬川, 1995)。このような疾病や大量斃死が見られなかったことについて、表層水に比べ、深層水は微小動物や細菌数が少ないことや (山口ら, 1994)、本試験

での養殖密度が適正に保たれていたと考えられた。疾病がみられないという点において、深層水でのアワビ養殖は有効であると考えられた。

2. 褐藻類の単一種及び交互給餌によるアワビ養殖

アワビ餌料としては、緑藻、紅藻類よりも褐藻類の餌料価値が高いことが知られている (酒井, 1962; 菊池ら, 1967; 藤井ら, 1986)。本試験で大量培養に用いた海藻は、褐藻類の中でも特に餌料効果が高いとされるワカメとホソメコンブである。ワカメとホソメコンブの餌料効果について、浮 (1981) は餌料転換効率がホソメコンブ (4.0%) よりもワカメ (8.4%) で高く、また酒井 (1962) は逆にワカメ (3.9%) よりもホソメコンブ (6.8%) で高いこと、また2種を混合給餌させると単一種給餌よりも成長が沈滞することを報告している。しかし、これらの試験に用いられた海藻は、天然海域から採取されたものであり、深層水で養殖された海藻とは、成分が大きく異なると考えられる。そこで本節では、深層水で養殖したワカメ及びホソメコンブを単独でアワビに摂餌させた。また、ワカメ及びホソメコンブを交互に給餌させることで、アワビの成長にどのような影響が見られるのかを検討した。

材料と方法

養殖期間は2002年10月7日から2003年3月7日の5ヶ月間とした。アクリル片に番号を記入したものをアワビの殻 (成長しない部位) に接着剤で貼り付け、15個体の個体識別を行った。個体識別したアワビのうち5個体ずつを、ワカメ単独給餌区、ホソメコンブ単独給餌区、ワカメ及びホソメコンブの混合給餌区の3試験区に供試した。それぞれのアワビは、直径25 cmの塩化ビニールパイプを半分に切断し、アーチ状にしたもの (長さ40 cm) をシェルターとし3段に分かれたアワビ育成籠に入れた。アワビ育成籠は200 L容量の黒いパンライト水槽に吊るし、水槽へはエアレーションを施した。水槽への注水は、深層水と表層水を混合し、常に水温を18-20°Cに保つようにした。アワビへはそれぞれの海藻種を日量200 g給餌し、次の測定日に残餌回収を行った。ワカメ及びホソメコンブ混合給餌区では、5日毎に与える海藻を変えた。

注水量及び水温の確認は、毎日正午に確認し

た。アワビの摂餌量は、5日毎の給餌量と残餌量の差とし、試験期間中の総摂餌量を算出した。毎月、個体別に殻長及び重量を計測し、増重量及び伸長量を記録した。また試験開始時と終了後の増重量及び伸長量を算出し、有意差検定(t検定)を行った。実験後のアワビは一般成分分析を行い、各試験区間の有意差の有無を調査した。さらに高知県室戸市高岡産の天然メガイアワビ及び徳島県牟岐漁協の人工飼料摂餌メガイアワビ、塩蔵ワカメ摂餌メガイアワビの成分分析を行い、深層水養殖海藻を摂餌させたメガイアワビとの成分差を比較した。一般成分分析は、海藻の一般成分分析と同様の方法で行った。

結 果

本試験期間中、アワビは一個体も斃死することにはなかった。月平均水温は17.4℃-22.9℃で推移し、期間中平均19.3℃に保たれ、また各試験区での月毎の増重量推移は同様な傾向を示した(Fig. 36)。アワビの摂餌量は与える種類によって異なり、全期間を通してワカメを多く摂餌しており(Fig. 37)、また混合給餌でも同様の傾向が見られた(Fig. 38)。混合給餌区は、ホソメコンブ給餌区よりも増重量が劣り、また摂餌量はワカメ給餌区よりも劣ることが分かった。各試験区間の増重、伸長には有意差は見られなかった。

実験開始後と終了後での各試験区のアワビ重量と殻長をTable 5に示した。増重量、伸長量を各試験区間で比較を行ったが、どの試験区間にも有意差はみられなかった。またアワビ雌雄間に増重や伸長で有意差はみられなかった。しかし、実験期間中に各試験区で摂餌された海藻量は、ワカメがホソメコンブの1.8倍量も多かった。また混合給餌区でも同様な傾向がみられワカメがホソメコンブの2.2倍量も多く摂餌された。培養150日間での摂餌量から、各試験区の1個体当たりの日間摂餌量を計算すると、ワカメ区では1.7g、ホソメコンブ区では0.9g、交互給餌区では1.2gとなった。

供試後のアワビの一般成分分析結果を、Table 6に示した。試験区間に各成分について有意差は見られなかった。アワビ成分としては、水分が最も多く約75%、続いてタンパク質の約21%、灰分が約2%、脂質が約0.5%の割合で含まれていることが分かった。

また天然、人工飼料及び塩蔵ワカメ摂餌アワビと本養殖試験でのアワビ一般成分をTable 7に

示す。天然、人工飼料、塩蔵ワカメ摂餌アワビ共に、顕著な違いがみられたのはタンパク質含量であり、特に天然、塩蔵ワカメ摂餌アワビではそれぞれ $17.1 \pm 0.5\%$ 、 $14.1 \pm 0.8\%$ と含有量は少なかった。

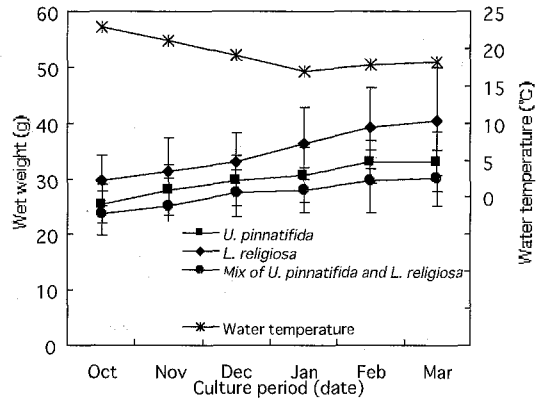


Fig. 36. Changes of water temperature and growth of abalone fed on mono and mix of *U. pinnatifida* and *L. religiosa*.

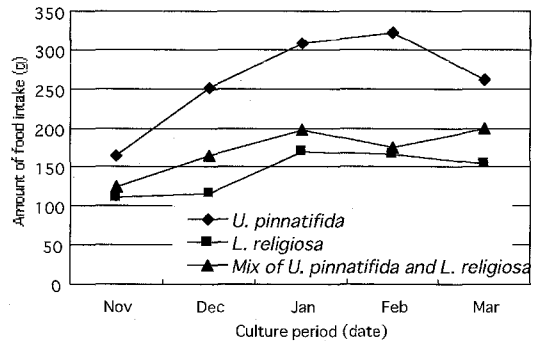


Fig. 37. Changes in the amount of food intakes of abalone fed on mono and mix of *U. pinnatifida* and *L. religiosa*.

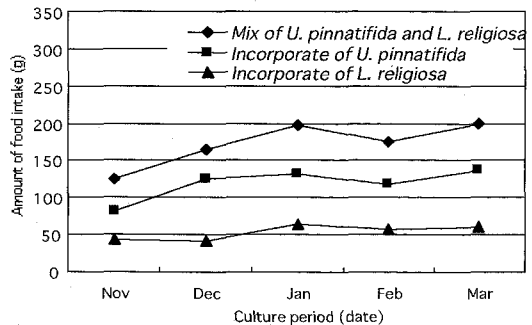


Fig. 38. Changes in the amount of food intakes of abalone fed on mix of *U. pinnatifida* and *L. religiosa*.

Table 5. Body weight and shell length of abalones fed on *U. pinnatifida* and *L. religiosa* cultivated in deep seawater

Food	Individual		Body weight (g)			Shell length (mm)			Amount of food intake (g)
	No.	Sex	Initial	Final	Increase in weight (g)	Initial	Final	Increase in length (mm)	
<i>U. pinnatifida</i>	1	m	21.2	24.7	3.5	58	63	5	1306.5
	2	f	27.5	35.5	8.0	62	65	3	
	3	f	30.5	38.0	7.5	66	68	2	
	4	m	26.0	32.9	6.9	62	67	5	
	5	m	22.0	32.1	10.1	57	65	8	
		Average	25.4	32.6	7.2	61.0	65.6	4.6	
		SD	3.9	5.0	2.4	3.6	1.9	2.3	
<i>L. religiosa</i>	6	f	25.2	30.3	5.1	60	64	4	715.5
	7	m	29.8	47.0	17.2	65	74	9	
	8	m	25.4	30.5	5.1	62	65	3	
	9	m	36.0	51.3	15.3	68	75	7	
	10	f	32.1	42.3	10.2	67	72	5	
		Average	29.7	40.3	10.6	64.4	70.0	5.6	
		SD	4.6	9.6	5.6	3.4	5.1	2.4	
Mix of <i>U. pinnatifida</i> and <i>L. religiosa</i>	11	m	28.4	36.0	7.6	62	68	6	<i>U. pinnatifida</i> =592.5 <i>L. religiosa</i> =267.3
	12	f	19.9	26.6	6.7	54	62	8	
	13	m	23.2	27.7	4.5	58	63	5	
	14	m	26.2	35.5	9.3	61	67	6	
	15	f	21.0	24.3	3.3	57	58	1	
		Average	23.7	30.0	6.3	58.4	63.6	5.2	
		SD	3.5	5.4	2.4	3.2	4.0	2.6	

SD: standard deviation

Table 6. Chemical compositions of abalone fed on *U. pinnatifida* and *L. religiosa* cultivated in deep seawater

Food	No.	Moisture (%)	Ash (%)	Lipid (%)	Protein (%)
<i>U. pinnatifida</i>	1	76.2	2.5	0.4	21.8
	2	78.4	2.7	0.4	21.4
	3	74.2	2.5	0.5	22.7
	4	76.0	2.3	0.4	22.6
	5	75.5	1.9	0.5	20.1
	Average	76.1	2.4	0.4	21.7
	SD	1.5	0.3	0.1	1.1
<i>L. religiosa</i>	6	74.1	1.7	0.4	20.8
	7	72.0	1.7	0.7	20.5
	8	79.9	2.1	0.6	19.3
	9	74.0	1.5	0.5	21.6
	10	75.8	1.7	0.6	20.5
	Average	75.2	1.7	0.6	20.5
	SD	3.0	0.2	0.1	0.8
Mix of <i>U. pinnatifida</i> and <i>L. religiosa</i>	11	75.5	1.9	0.5	21.3
	12	76.0	2.0	0.5	20.5
	13	76.0	1.8	0.6	20.8
	14	76.3	2.0	0.4	22.2
	15	77.0	2.4	0.4	21.0
	Average	76.2	2.0	0.5	21.2
	SD	0.6	0.2	0.1	0.7

SD: standard deviation

考 察

本養殖での試験区間には、増重量、伸長量とも有意差はみられなかった。しかし、海藻の

摂餌量を比較すると、ワカメよりもホソメコンブの摂餌量が少なかった。言い換えれば、少ない摂餌量でワカメと同様な増重、伸長を達成したということになる。これは、ワカメよりもホソメコンブの餌料価値が高いと考えられた。こ

Table 7. Chemical compositions of abalone fed on various foods

Food	Moisture (%)	Ash (%)	Lipid (%)	Protein (%)
<i>U. pinnatifida</i>	76.1±1.5	2.4±0.3	0.4±0.1	21.7±1.1
<i>L. religiosa</i>	75.2±3.0	1.7±0.2	0.6±0.1	20.5±0.8
Mix of <i>U. pinnatifida</i> and <i>L. religiosa</i>	76.2±0.6	2.0±0.2	0.5±0.1	21.2±0.7
Natural source	79.6±0.8	2.7±0.1	0.4±0.1	17.1±0.5
Artificial diet	75.0±1.1	2.4±0.1	0.5±0.1	20.9±0.3
Boiled <i>U. pinnatifida</i>	80.7±0.1	2.3±0.1	0.5±0.1	14.1±0.8

Average ± standard deviation (n=3)

れは酒井 (1962) による、ホソメコンブよりもワカメの摂餌量が多いにも関わらず、増重率はホソメコンブで高いという報告を支持する結果となった。しかし浮 (1981) は、ホソメコンブよりもワカメの餌料効果が高いと言及しており、また餌料効果は海藻の含有するタンパク質含量と相関があることを報告している。浮が給餌したワカメのタンパク質含量は約 20%、ホソメコンブは約 8% であり、これらの差異がアワビの成長量に影響を与えたと考察している。深層水で養殖されたワカメ及びホソメコンブは約 20% のタンパク質を有する。したがって、摂餌したアワビの成長量に違いはみられなかったのではないかと推察された。

両海藻の摂餌量は、ワカメ区において日量 1.7 g、ホソメコンブ区で 0.9 g であった。ワカメに関しては、第一節で得られた日間摂餌量よりも約 4 倍量も多い。本試験での水槽内水温は、深層水と表層水を混合し、平均 20℃ に保たれた。メガイアワビは暖海性のアワビであり、水温 18-20℃ にて良好な成長を示す (猪野, 1952)。第一節の試験との水温差が、アワビの摂餌量差としてあらわれたものと考えられた。また猪野 (1952) は、天然海域での 10-11 月はアワビの成熟期にあたり、殆ど摂餌をしないことを報告している。しかし、本試験では同時期に成熟がみられたにも関わらず、他の期間よりも僅かに摂餌量が減少するに留まった。天然海域では時季により水温が変動するが、本試験では 20℃ 一定である。このことが、アワビが成熟しても常に摂餌をする要因の一つと推察された。この事実を応用して、水温を一定に保つことで常にアワビに摂餌させ、成長させることができるのではないかと期待された。

混合給餌区でのアワビ養殖について、摂餌量はワカメ単独給餌区に劣り、ホソメコンブ単独給餌区よりも勝った (Fig. 37)。混合給餌での両海藻種の摂餌量の内分けも、ホソメコンブよりもワカメが多い (Fig. 38)。また増重量、伸長量、一般成分も他の試験区と変わらなかった。本試

験では、一般的に言われている混合給餌よりも単独種給餌での摂餌量や成長量が多くなる、という一般的な報告とは異なる結果が得られた。このことについては、対象とした海藻種が、アワビ餌料効果が高いとされる海藻 2 種を交互に給餌しているため、それ以上の増重や伸長には効果が得られないのではないかと考えられた。

本試験で養殖されたアワビは、天然アワビや、塩蔵ワカメを摂餌したアワビの一般成分と比べ、タンパク質含量に最も違いが見られる ($p < 0.05$)。四訂日本食品標準成分表によるアワビの一般成分は、水分 83.9%、タンパク質 13.0%、灰分 2.1%、脂質 0.4% の割合で含有されており (野村 1995)、本試験のアワビがタンパク質を多く含有していることが分かった。これは養殖環境によるものではなく、第 1 章、第 5 節において深層水で養殖された褐藻類でタンパク質含量が多くなっていたことから、摂餌された海藻の成分が反映された結果であると予想される。人工飼料を摂餌したアワビは、深層水養殖褐藻類を摂餌したアワビとほぼ同様な一般成分を示した。徳島県牟岐漁協にて種苗生産されているアワビに給餌される人工飼料成分は、水分 14% 以下、粗タンパク質 31% 以下、粗脂質 4% 以下と表記されており、タンパク質含量が多い。これらの成分調整に関する研究は盛んに行われ、代表的なものとして一般成分及びビタミンやミネラルの含有量の検討や、特にタンパク質成分を調整する物質の種類についての研究がみられる (浮ら, 1985a, b)。それらの報告によると、脂質を 5%、ミネラル (カルシウムやマグネシウム等) を 8% の割合で飼料に添加することや、飼料中からセルロースを削除することでアワビ成長効果がみられ、またタンパク質でも大豆粕や緑葉タンパク質などの植物性タンパク質がアワビの成長に適していることが明らかにされている。さらに Lee *et al.* (1999) は、そのような人工飼料とワカメのアワビ餌料効果について比較検討しており、人工飼料を摂餌させたアワビは、ワカメを摂餌させたものよりも生長率や生残率が高

く、また一般成分ではタンパク質含量が多いことを報告している。深層水で養殖した海藻を摂餌したアワビも同様に高いタンパク質含量を示したということからも、深層水で養殖された海藻は、アワビにとって優良な飼料であることが明らかとなった。アワビは、アミノ酸の中でもグリシンやグルタミン酸、アルギニン含量が多いほど美味と言われており、アミノ酸組成中においてもグルタミン酸を含有している割合が最も大きい(野村, 1995)。したがって、深層水養殖海藻を摂餌したアワビのタンパク質含量が多いということは、これら旨味成分の含有量が多く、アワビの資質としては優れているのではないかと推察された。

III. 褐藻類とアワビの集約的タンク養殖システムの検討

これまで、深層水を用いた海藻の大量培養とアワビ養殖について試験し、経時的な生産や成長量についての知見を得た。計画的に、断続的に餌を給餌するアワビ養殖を実行するには、屋内での配偶体成熟誘導から幼胞子体の生長、屋外に移植するまでに必要とされる期間、屋外での大型海藻の生長速度、生産した海藻を給餌させるアワビの個体数等を厳密に検討する必要がある。特に海藻の生長については、時季によって生長率が大きく異なる種もあり、システムは単一ではなく、海藻の生長率によって変化させることが必要と考えられる。

そこで本章では、第1, 2章で得られた海藻養殖に関する知見、特に日間生長率及びアワビの日間摂餌量(30 mm 殻長のアワビ1個体当たりの日間摂餌量: ワカメ 1.7 g, ホソメコンブ 0.9 g)や成長速度を参考にして、各種海藻単独給餌による集約的タンク養殖方式及び複合給餌による集約的タンク養殖方式、また海藻養殖排水をアワビ養殖排水に、アワビ養殖排水を海藻養殖に利用し、深層水を有効利用するための多段養殖システムを構築する。

今後構築する全てのタンク養殖システムは、研究を行った高知県室戸市で養殖を行う場合を想定して構成している。室戸市では特に夏季は気温が30℃以上となり、外気温により深層水が昇温されやすく、また光量が強いうる環境下にある。

1. ワカメ給餌によるアワビ養殖システム

第1章にて、ワカメ配偶体の成熟誘導から幼胞子体の生長までの経時的、量的な知見及び深層水の周年養殖によるワカメの時季的な生長率について確かめた。また第2章の第1節及び第2節では、ワカメ給餌によるアワビ養殖を行い、アワビ1個体あたりの日間摂餌量を明らかにした。これらの知見を踏まえ、本節ではワカメとアワビの集約的タンク養殖システムの構築を行い、養殖工程図を作成した。

材 料 と 方 法

1) 方法

養殖システム構築に必要な因子として以下に挙げる。

(1) 配偶体成熟誘導

雌雄配偶体の前培養から高成熟率を得られるまでの日数

(2) 幼胞子体の生長

受精後の卵から種苗サイズまでの生長に必要とされる日数

(3) タンク養殖での生長

タンク内でのワカメ日間生長率の把握及びアワビに給餌可能となるまでの生産に必要とされる日数。

(4) アワビの日間摂餌量

約4 cm 大のアワビ1個体当たりの日間摂餌量。

アワビは付着基盤や養殖密度を考え、1 t 水槽当たりに1,000個体収容する。春季から秋季までは直接深層水を、冬季では表層水との簡易式熱交換により昇温した深層水を注水することで、水温を約20℃に保持した深層水を日量3 t 供給する。

これらの因子に必要とされる期間及び生産される海藻量から、ワカメを断続的に給餌するアワビ養殖システムを構築する。

2) システム構成

ワカメ配偶体の成熟誘導は、水温20℃、光量 $100\text{--}200 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光周期12L:12D、PES培養液下にて行い、前培養の3日間も合わせ1週間後に100%近い成熟率が得られ、受精、卵が発芽する。幼胞子体の生長は水温15℃、光量 $100 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光周期16L:8D、PES培養液下にて生長率25%で、種苗サイズ(直径5 mm)までは3週間の培養を行う。屋内ではワカメ種

苗の生産に 4 週間の期間を要し、その後屋外の水槽へと移植する。屋内で生産する種苗量は 200 g とする。

屋外水槽では、水槽容量の 3 回転/日の深層水を連続注水する養殖を行う。ワカメの生長は周年通して約 20% であった (Table 1)。1 t 水槽は 2 基用意し、200 g を 4 日毎に交互に移植する。1 t 水槽に 200 g の種苗を投入すると、8 日後には 860 g へと生長する。1 t 水槽の工程では、4 日毎に 860 g のワカメが生産される。その種苗を 7 t 水槽 4 基に順に移植する。7 t 水槽に移植された 860 g のワカメは、16 日後には 16 kg に生長する。7 t 水槽は 4 基あるので、4 日毎に 16 kg のワカメが収穫されることになる。日量 1.7 g を摂餌するアワビに 4 日間隔で 16 kg の海藻を給餌するので、養殖可能なアワビ個体数は、供給量に余裕をもたせ、約 2,000 個体とした。これらの養殖概要を Fig. 39 に示す。

考 察

本節の養殖システム編成のためには、屋内作業において、ワカメ種苗を 4 日毎に 200 g 生産しなくてはならない。つまり屋内の成熟誘導から幼孢子体の培養という一連の作業は、常に 4 日毎に行う必要がある。成熟誘導が行われる 50 ml 容量の Petri dish からは、5 mm サイズの種苗が約 20 g 生産可能である。屋外への種苗投入量は 200 g なので、一回の成熟誘導作業は Petri dish 10 枚分が必要となる。これは作業的にも難しくなく、また配偶体の使用量も十分供給できるものであり、屋内という培養環境は厳密な管理が行える

ので、非常に正確に種苗生産が行えるものと考えられる。

屋外でのワカメ養殖において、本節では周年 20% の日間生長率で一定とし、養殖システムを構築した。屋外環境は、天候や時季により、供給される光や気温が常に変化する。第 1 章第 4 節においても、養殖時季によって生長率に変動がみられた。これらのことから、養殖される海藻量の変動に対処するために、養殖するアワビ個体数を給餌量と摂餌量から算出された値 (2,235 個体) よりも少なくする (約 2,000 個体) ことで、養殖に必要な海藻を十分量確保できると考えられる。また 1 t 水槽中に 1,000 個体のアワビを収容することは、アワビの付着面積の観点から、十分に適正な養殖密度と思われる (石田, 1993)。

アワビ成長と共に摂餌量は増加するが、本養殖システムは殻長 50-60 mm のアワビの摂餌量から構築している。これまでに殻長 15-30 mm のアワビ稚貝を用いた小規模、短期間のワカメ給餌養殖試験は多く行われているが (酒井, 1962; 菊池ら, 1967; 古田ら, 1968; 浮, 1981; 藤井ら, 1986)、殻長 60 mm までの生長という長期間の生海藻の給餌試験は見られない。しかし、出荷サイズの約 70 mm までの養殖を行う場合、本養殖システムの運用で、養殖期間を通したワカメ給餌は十分行えるものと推察された。

2. ホソメコンブ給餌によるアワビ養殖システム

第 1 節では、ワカメとアワビの集約的タンク

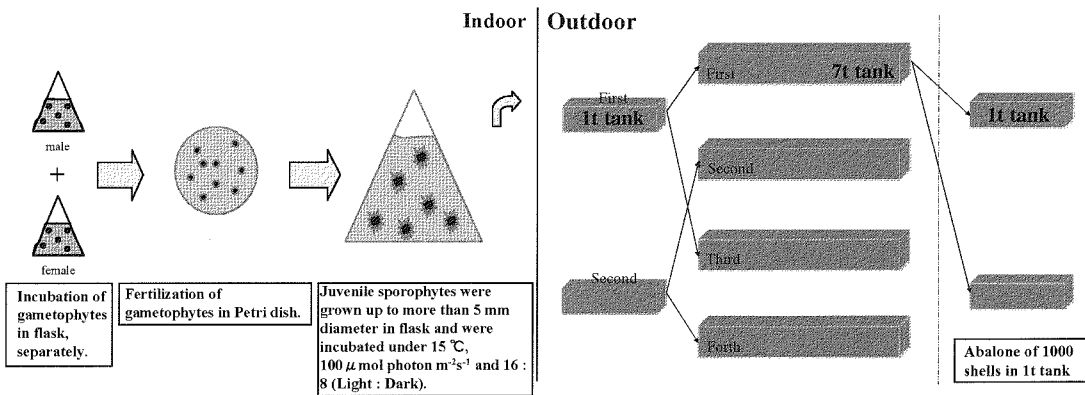


Fig. 39. Polyculture system between the abalone and *U. pinnatifida* using deep seawater in summer. Stocks of juvenile sporophytes were transplanted to 1t tank in every 4 days using two (first and second) tanks. After 8 days, production increased from 200g to 860g. After 8 days, sporophytes were transferred from first 1t to first 7t tank. After next 4 days, sporophytes were transferred from second 1t to second 7t tank. After 16 days, production increased from 860g to 16,000g in the first 7t tank. 16,000g of food for abalone of 2,000 shells was supplied in every 4 days.

養殖システムについて論じたが、本節ではホソメコンブを用いたタンク養殖システムについて論じる。第1章にて、ホソメコンブ配偶体の成熟誘導から幼孢子体の生長までの経時的、量的な知見及び深層水の周年養殖によるホソメコンブの季節的な生長率について確かめた。また第2章第2節において、ホソメコンブ給餌によるアワビ養殖を行い、アワビ一頭あたりの日間摂餌量を0.9gであることが明らかにされた。これらの知見を踏まえ、本節ではホソメコンブとアワビの集約的タンク養殖システムの構築を行い、養殖工程図を作成する。

材 料 と 方 法

1) 方法

システム構築に必要な因子及びアワビ養殖に関する方法は、第一節と同様とする。

2) システム構成

ホソメコンブ配偶体の成熟誘導は、水温 15℃、光量 25-50 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光周期 12L:12D、PES 培養液下にて行い、前培養の3日間も合わせ11日後に100%近い成熟率が得られ、受精、卵が発芽する。幼孢子体の生長は水温 10℃、光量 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光周期 16L:8D、PES 培養液下にて日間生長率 30% で、種苗サイズ (直径 5 mm) までは 3 週間の培養が必要となる。したがって、屋内ではワカメと同様に、種苗の生産に約4週間の期間を要し、その後屋外の水槽へと移植する。屋内で生産する種苗量は 200 g とする。

屋外水槽では、水槽容量の 6 回転/日の深層水

を連続注水する養殖を行う。ホソメコンブの生長率は季節変動が大きく、冬季で 20% 以上、春季、秋季で 15%、夏季では 10% 以下であった (Table 2)。周年生長率が安定しているワカメと比較して、ホソメコンブでは、養殖時季によって生産工程の変更が必須となる。すなわち、冬季では、海藻の生産工程は第一節のワカメと同様であり、アワビの日間摂餌量は 0.9 g であるため、少なく見積もることをしても 4,000 個体の養殖が可能となる (Fig. 40)。

春季、秋季では日間生長率が 15% である。1 t 水槽を 3 基用意し、200 g の種苗を 3 日毎に順に移植する。1 t 水槽に 200 g の種苗を投入すると、9 日後に 700 g へと生長する。したがって、1 t 水槽の工程では、3 日毎に 700 g のホソメコンブが生産される。その種苗を 7 t 水槽7基に順に移植する。7 t 水槽に移植された 700 g のホソメコンブは、培養 21 日後には 13 kg に生長する。7 t 水槽は 7 基あるので、3 日毎に 13 kg のホソメコンブが収穫されることになる。この養殖システムで、4,000 個体のアワビの養殖を維持することができる (Fig. 41)。

夏季では日間生長率が 10% 以下となり、Fig. 40 の工程を 3 セット準備することで対応可能である。

考 察

ホソメコンブの日間生長率を 20% とした場合、第一節でのワカメ養殖システムと同様なものとなる。しかし、アワビのホソメコンブの日間摂餌量は、ワカメを給餌した場合と比較して

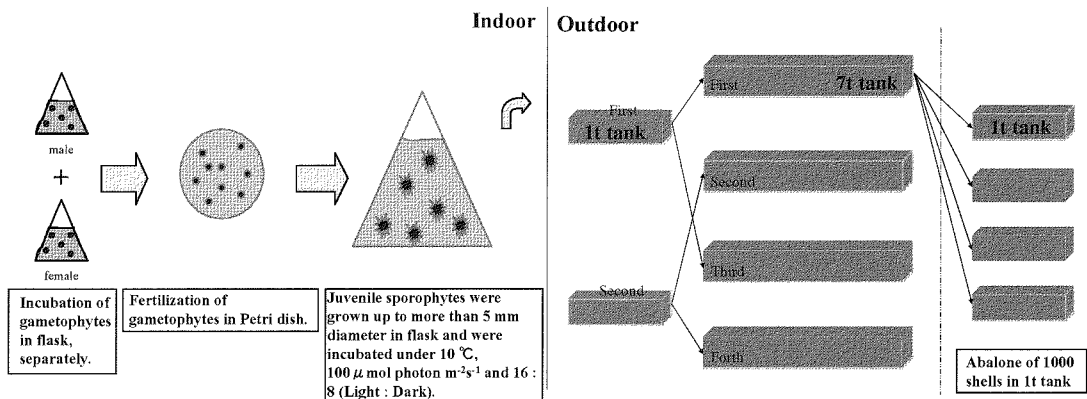


Fig. 40. Polyculture system between the abalone and *L. religiosa* using deep seawater in winter. Stocks of juvenile sporophytes were transplanted to 1t tank in every 4 days using two (first and second) tanks. After 8 days, production increased from 200g to 860g. After 8 days, sporophytes were transferred from first 1t to first 7t tank. After next 4 days, sporophytes were transferred from second 1t to second 7t tank. After 16 days, production increased from 860g at the start to 16,000g at the end in first 7t tank. 16,000g of Food for abalone of 4,000 shells was supplied in every 4 days.

少量であるため、養殖個体数を少なく見積ることをしても、約 4,000 個体の養殖が十分可能である。ホソメコンブは時季により生長率が大きく異なる。このことから、生長率の違いによってシステムを再編成したが、夏季での生長率低下により養殖期間が長く、必要とされる水槽の数も増加することは、養殖の運営上、労力や水槽設置等に多くのコストがかかり効率が悪い。したがって、各時季に高生長率を示す褐藻類を選択的に養殖することで、効率よくアワビ餌料を生産、給餌可能であると考えられた。

第一節と同様、ホソメコンブにおいても、種苗生産は厳密に管理された培養条件の下で行われるので安定すると考えられる。またアワビ成長に伴う摂餌量の増加への対処は、本試験でも約 60 mm アワビの日間摂餌量からシステムを構築しているので、許容範囲として処理できると考えられる。ホソメコンブ（生海藻）を用いた養殖試験も、ワカメと同様、殻長 15-30 mm のアワビを用いた給餌試験が殆どであり（酒井, 1962; 菊池ら, 1967; 浮, 1981; 藤井ら, 1986）、生海藻の連続給餌による大型アワビの養殖試験の報告は見られない。本試験から褐藻類の周年養殖が可能になったことから、今後は大型アワビの連続給餌試験を行い、より詳細なシステムの構成について検討したい。

3. 褐藻類とアワビの集約的タンク養殖システム

第 1, 2 節において各種褐藻類の単独種のみ

を断続的に給餌する養殖システムについて構築した。しかし、ワカメ、ホソメコンブには生長率が減少する時季が存在し、単独種のための養殖では効率的ではないと思われる。そこで本節では、両海藻種の最適生長時季に養殖された海藻をアワビに給餌する養殖システムについて検討した。晩春から初秋にかけて生長率の高いワカメを（平均日間生長率 17.5-20.5%）、同様に初秋から初春にかけてはホソメコンブを（平均日間生長率 21.7-23.3%）養殖することとする。

材料と方法

1) 方法

システム構築に必要な因子は、第 1 節と同様とする。

アワビ養殖は、30 mm 稚貝から約 70 mm の大きさまで行い、養殖個体数は約 4,000 個とした。養殖期間は第 3 章第 1 節の試験結果を踏まえて約 1 年間とする。アワビは養殖密度を考え、1 t 水槽当たりに 1,000 個体収容し、春季から秋季までは直接深層水を、冬季では表層水と簡易式熱交換により加温した深層水を注水することで、水温が約 20℃ に保たれた深層水を日量 3 t 供給する。

2) システム構成

アワビ 4,000 個体へ給餌を行う養殖システムについて、晩春から初秋のワカメ養殖は、第一節で構築したシステムを 2 セット稼働させることで可能となる。すなわち、4 日毎に 32 kg のワカ

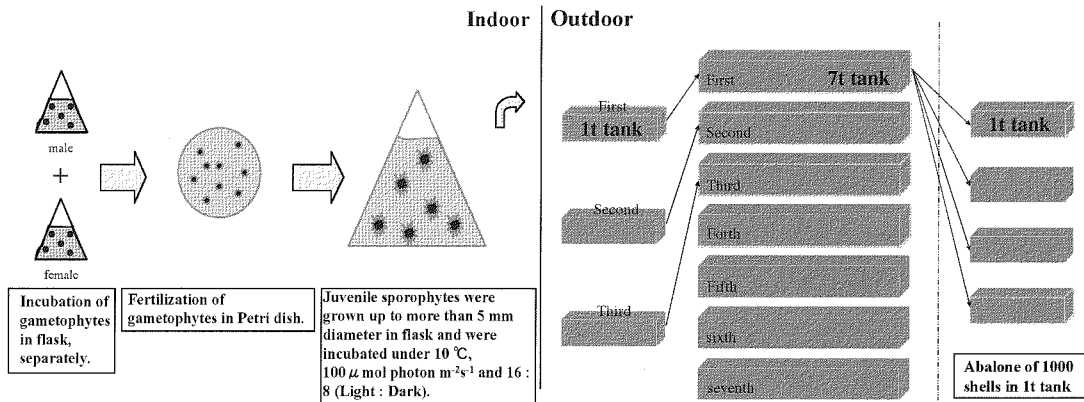


Fig. 41. Polyculture system between the abalone and *L. religiosa* using deep seawater in spring and autumn. Stocks of juvenile sporophytes were transplanted to 1t tank in every 3 days using three (first, second and third) tanks. After 9 days, production increased from 200g to 700g. After 9 days, sporophytes were transferred from first 1t to first 7t tank. After next 3 days, sporophytes were transferred from second 1t to second 7t tank. After 21 days, production increased from 700g at the start to 13,000g at the end in first 7t tank. 13,000g of food for abalone of 4,000 shells was supplied in every 3 days.

メが生産され、アワビ 1,000 個体当りに 8 kg を給餌する。また晩秋から初春のホソメコンブ養殖は第 2 節のシステムをそのまま運用し、4 日毎に 16 kg のホソメコンブが生産され、アワビ 1,000 個体当たり 4 kg を給餌する。これらの養殖工程図を Fig. 42 に示した。

考 察

第 2 章のアワビ養殖試験において、ワカメよりもホソメコンブの餌料価値が摂餌量の観点から優れていると考察された。本来はホソメコンブを周年養殖することがアワビ餌料として供給するのが妥当である。しかし夏季において、ワカメ養殖の倍量の深層水を注水しているにもかかわらず、水温は 20℃ まで上昇し、ホソメコンブの生長率は 7% と極端に減少した (Table 2)。またホソメコンブは水温 13.5℃ が最適生長水温であると推察されている (Fig.29)。高知県海洋深層水研究所では水深 320 及び 344 m から深層水を揚水しており、その水温は周年 12℃ である (岡, 2002)。高知県は“南国土佐”と言われる暖かい土地であり、夏季は気温が 30℃ 以上に達する。したがって、外気温により深層水は昇温され易く、また光量も強い。このような環境下では、冷水性のホソメコンブは養殖し難い。故に餌料価値は劣るが、夏季に 17.5-20.5% と高生長率を示すワカメを養殖することで、海藻の収穫量を減らすことなくアワビへの海藻給餌を周

年計画的に行え、さらに深層水は水槽容量の日量 3 回転という少量の利用に抑えることができると考えられる。

海藻養殖に関し、配偶体の成熟誘導から屋外へ移植するまでに 1 ヶ月、屋外養殖からアワビに給餌できるまでに 1 ヶ月の合計 2 ヶ月が必要とされる。本養殖システムでは、配偶体の成熟誘導からの作業を考えた場合、予想される収穫日を常に意識して、養殖種を季節により変える必要がある。即ち、晩春 (6 月) からワカメを収穫することを考えると、2 ヶ月前の 4 月にはワカメの種苗生産 (配偶体の成熟誘導) を、また同様に初秋 (11 月) からのホソメコンブ収穫に合わせ、9 月から種苗生産を行う必要がある。

本養殖試験は、日間摂餌量の観点から 4,000 個体のアワビ養殖を検討した。しかし、参考にした日間摂餌量は出荷できる大きさのアワビ (殻長約 60 mm) のものであり、さらに小さな稚貝の養殖には、十分量の海藻を供給できると考えられる。このような養殖システムを組み合わせることで、様々な大きさのアワビを段階的に養殖し、年中アワビを出荷することができる。

4. 褐藻類とアワビの多段養殖システム

第 1-3 節で、褐藻類とアワビの集約的タンク養殖システムを構築し、その有効性について検討した。前節までは褐藻類養殖とアワビ養殖に

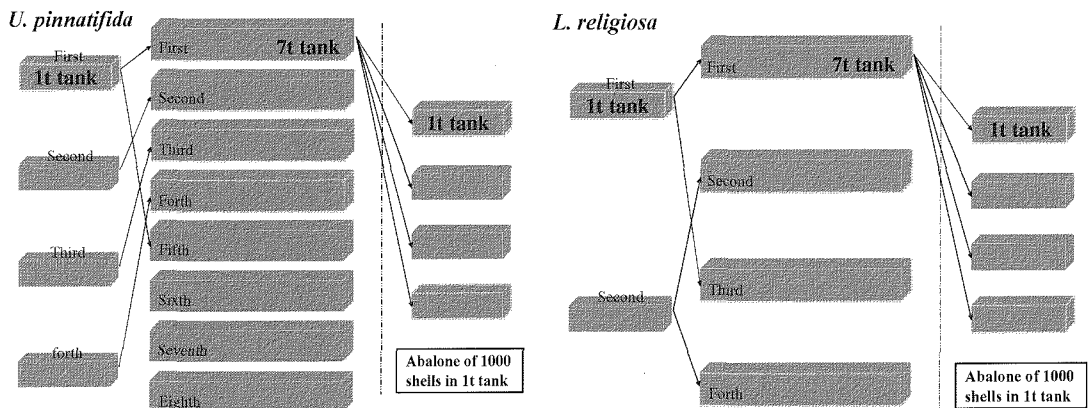


Fig. 42. Polyculture system using the abalone and *U. pinnatifida* and *L. religiosa* using deep seawater. *U. pinnatifida* were cultivated from mid spring to early autumn. *L. religiosa* were cultivated from mid autumn to early spring. Stocks of juvenile sporophytes of *U. pinnatifida* were transplanted to two 1t tank in every 4 days using four (first, second, third and forth) tanks. After 8 days, production increased from 200g to 860g. After 8 days, sporophytes were transferred from first and second 1t tanks to first and second 7t tanks. After next 4 days, sporophytes were transferred from third and forth 1t tanks to third and forth 7t tanks. After 16 days, production increased from 1,720g at the start to 32,000g at the end in first and second 7t tanks. 32,000g of food for abalone of 4,000 shells was supplied in every 4 days. Polyculture system using *L. religiosa* was similar to Fig.40.

はそれぞれ独立した深層水を注水しており、仮にアワビ養殖排水を海藻養殖に、また海藻養殖排水をアワビ養殖に利用できれば、深層水使用量を大きく削減でき、コスト性や深層水の清浄性を有効に活用することができる。

そこで本節では多段養殖の小規模試験を行い、海藻養殖排水を用いたアワビ養殖の可否、アワビ養殖排水を用いた海藻養殖の可否を確かめることを目的に、アワビの成長、生残率及び海藻の生長率等の確認、また各水槽の溶存無機栄養塩の分析、さらにアワビ養殖排水で養殖された海藻と深層水のみで養殖した海藻の成分分析から、両者の差異について比較を行った。これらの結果から、深層水による褐藻類とアワビの多段養殖システムの有効性を検討した。

材 料 と 方 法

屋外タンクにて、海藻養殖水槽（以下：第1水槽）⇒アワビ養殖水槽⇒海藻養殖水槽（以下：第2水槽）へと段階的に深層水を流水する工程を設計した（Fig. 43）。養殖に用いる海藻はワカメ及びホソメコンブとし、アワビはメガイアワビとする。注水は深層水のみで、初めの海藻養殖水槽へ3t/dayの流量を設定した。全ての水槽には十分なエアレーションを施した。

ワカメの養殖期間は2003年10月27日-11月16日の20日間、ホソメコンブの養殖期間は2004年2月10日-3月1日の20日間とした。注水、排水水槽へそれぞれ約10gの海藻種苗を投入して養殖を開始した。各海藻の質重量の測定を4日毎に行い、日間生長率を算出した。日間生長率の算出式は、第1章第1節と同様とする。養殖終了後の海藻は、乾燥後に一般成分の分析を行った。

アワビ養殖はワカメ養殖と同時に開始し、殻長30-40mmのアワビを125個体、総重量約500gを用いた（Fig. 44）。別水槽にて深層水で養殖したホソメコンブを、3日毎に100gと十分量給餌し、同時に残餌の回収を行った。給餌量から残餌量を差し引くことで摂餌量を算出した。海藻養殖を行わない期間（12-1月）においても、アワビへの給餌は継続した。アワビ重量の測定は2週間から1ヶ月間隔で行った。

各水槽内水温は、MDS データロガー（Arec electronics Ltd.）により連続計測し、4日毎の平均水温を算出した。また注水する深層水及び各水槽の排水を、正午において4日毎にサンプリングし、孔径0.45 μ mのメンブランフィルターで濾過後、溶存無機栄養塩濃度測定用に-20 $^{\circ}$ Cの凍結保存をした。測定時に解凍し、TRACCS800を用いてアンモニウム塩、硝酸塩、亜硝酸塩濃度及びリン酸塩濃度を測定した。測定方法は、海洋観測指針に準拠し行った。

結 果

深層水注水水槽（以下、第1水槽）及びアワ

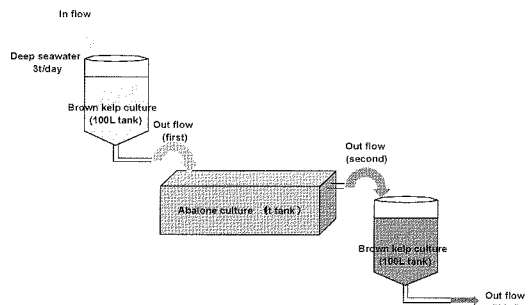


Fig. 43. Diagram showing the culture tanks of multistage culture method.

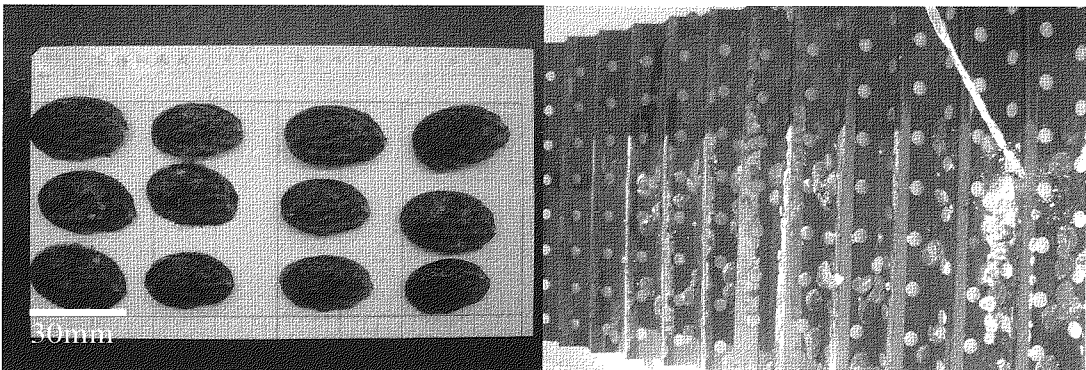


Fig. 44. Photo showing 125 juvenile shells (size range from 30 to 40 mm of shell length) (left), *H. sieboldii*, were grown in the outdoor 1t tank, together with corrugated plates (right).

び排水水槽（以下、第2水槽）でのワカメ及びホソメコンブの湿重量と水温の遷移を、Fig. 45に示す。

ワカメの養殖期間中における平均日間生長率は、第1水槽で14.7%、第2水槽で12.9%と約2%の差異が、また養殖期間中の水温も第1水槽で14.9℃、第2水槽で16.9℃と2℃の差異が確認された。ホソメコンブの平均日間生長率は第1水槽で22.0%、第2水槽で20.3%であり、ワカメと同様、水槽間には約2%の生長率の差異が、また平均水温は、第1水槽で12.3℃、第2水槽で12.1℃と大差はなかった。第1水槽と第2水槽の増重には、常に第1水槽での生長が良かったが、第2水槽でも劣らず海藻の生長がみられた。このことから、アワビ養殖排水でも十分に海藻が養殖できることが分かった。

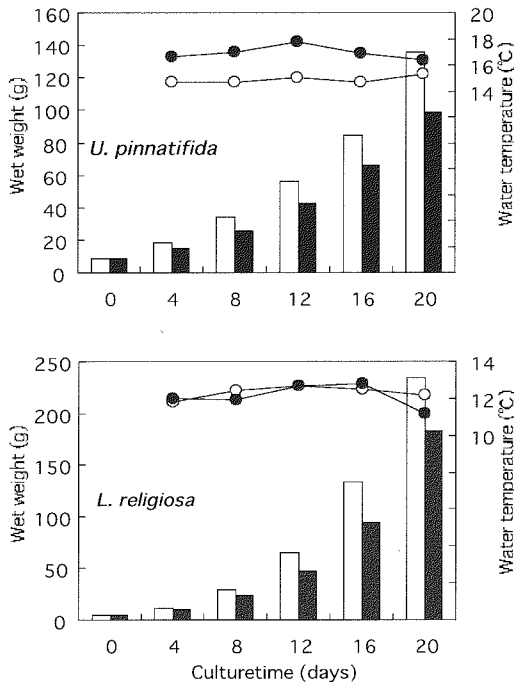


Fig. 45. Changes of the average water temperature (line) and the wet weight (bars) for *U. pinnatifida* and *L. religiosa*. Unshaded symbol are first tank and shaded symbol are second tank.

試験終了後の海藻成分について、Table 8に示す。ワカメ、ホソメコンブ共に、タンパク質含量が20%と多く、第1章第4節 (Table 4)と同様な傾向を示した。また海藻種間及び同種における水槽間での各成分の検定を行ったが、有意差はみられなかった。また海藻の形態は、特にワカメにおいて水槽間に違いが見られ、第1水槽では第2水槽よりも側葉が多分枝する傾向があった (Fig. 46)。

各水槽の栄養塩濃度について、アンモニウム塩及び亜硝酸塩については1μM以下の濃度で推移したため、本試験では影響がないものとした。両海藻種の養殖時において、硝酸塩、リン酸塩濃度は、養殖日数を追うごとに減少し、培養終了時で最も少なくなる傾向があった (Table 9)。また海藻養殖水槽での栄養塩の減少だけではなく、アワビ水槽での栄養塩の減少がみられた。

本試験でのアワビは、試験終了時までには一頭も斃死することなく、健全に育成され、殻長は60mmに成長した (Fig. 47)。養殖期間133日でのアワビ重量の推移を Fig. 48に示す。養殖期間中のアワビのホソメコンブ摂餌量は4680.7gであり、500gのアワビは1500g以上に成長した。一般的には、1kgの増重には15kgの海藻が必要とされているが、本試験では約5kgの摂餌量で達成された。

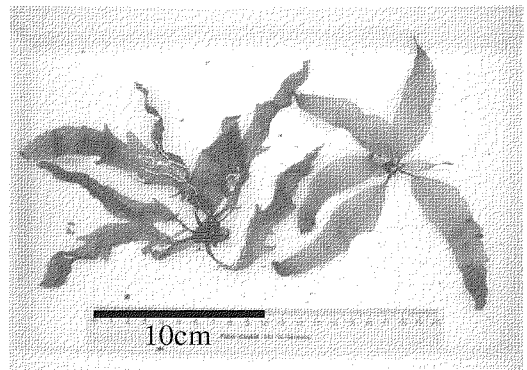


Fig. 46. *U. pinnatifida* cultivated in first tank (left) and second tank (right).

Table 8. Analytical data of *U. pinnatifida* and *L. religiosa* in the culture using deep seawater (first tank) and abalone drain seawater (second tank)

Sample	Moisture (%)	Ash (%)	Lipid (%)	Protein (%)	Carbohydrate (%)
<i>U. pinnatifida</i> (first tank)	9.0 ± 0.2	38.6 ± 0.3	0.4 ± 0.01	20.1 ± 0.2	31.9 ± 0.1
<i>U. pinnatifida</i> (second tank)	9.8 ± 0.1	45.0 ± 4.4	0.7 ± 0.3	17.9 ± 0.6	26.6 ± 4.4
<i>L. religiosa</i> (first tank)	9.6 ± 0.1	40.0 ± 1.5	1.0 ± 0.2	18.1 ± 0.5	31.3 ± 2.2
<i>L. religiosa</i> (second tank)	10.7 ± 0.2	35.3 ± 3.4	1.0 ± 0.2	18.1 ± 0.4	35.0 ± 2.1

Average ± Standard Deviation (n=3)

考 察

ワカメとアワビの多段養殖試験において、2つのワカメ養殖水槽の水温には、平均で2℃の差異がみられた (Fig. 45)。ワカメの養殖期間は10月から11月であり、外気温は約15-20℃であった。ホソメコンブの養殖期間は2月から3月であり、外気温は深層水の水温(約12℃)よりも低かった。これら外気温による影響から、ワカメ養殖水槽では水温が上昇し、ホソメコンブ養殖水槽では水温差がみられなかったものと考えられる。また両海藻種の生長量は深層水の注水水槽がアワビ排水水槽よりも多く、生長率も高かった。本試験での海藻の生長に与える主要因として考えられるのは、養殖水温と溶存無機栄養塩量である。ワカメにおいては、平均水温が約2℃異なるが、栄養塩の減少量は少なく、十分に栄養塩は海水中に含まれている (Table 9)。したがって、養殖水温の差が生長差として現れたのではないかと推察される。逆にホソメコンブでは、養殖水温には差異が見られず、栄養塩の減少量がワカメと比較して甚だしい。養殖水中の栄養塩濃度が希薄になると、それだけ吸収する効率は悪くなる。ホソメコンブに関しては栄養塩濃度が生長差に影響しているのではないかと考えられる。さらにワカメにおいて、藻体の形態が深層水注水水槽とアワビ排水水槽で大きく異なっていた。海藻の形態は、水温や水の対流によ

って変化することが報告されている (Rhodes, 1970; Gerard & Mann, 1979; van den Hoek, 1981)。ホソメコンブでは形態に顕著な差意はみられなかったことから、水温の差異がワカメの形態の違いとして現れたのではないかと想像できる。海藻成分に関しては、両海藻種共に、水槽による差異はみられなかった。またタンパク質含量は20%前後と高く、第1章第4節と同様な傾向がみられ (Table 4)、深層水の富栄養によるものと考えられた。

本試験においてアワビは1個体も斃死することなく健全に育成され、1kgの増重にホソメコンブが約5kgの摂餌であり、一般的に言われる量と比較しても極少量であった。第2章第1節において、1kgの増重に摂餌されたワカメは9.3kgであった。このことから、ワカメよりもホソメコンブの餌料価値が優れていると考えられる。また、アワビ水槽には若干の珪藻が繁茂していた。海藻と珪藻との混合摂餌によって、アワビの生長が良くなるという報告もみられる (松村, 2004)。このことがより少ない摂餌量で高成長をみせた可能性も否定できない。さらにこの珪藻繁茂は、アワビ養殖において懸念されたアンモニウム塩の付加がみられないことやアワビ水槽を通過することで硝酸塩やリン酸塩が減少することについても、影響を与えているものと推察される (Table 9)。

これまで魚類の養殖排水の浄化を目的に、海藻をバイオフィルターとして使用する例が多く

Table 9. Nutrient (PO₄-P and NO₃-N) concentration of the poured deep seawater (DSW) and the all tanks drain seawater at the end of culture

	<i>U. pinnatifida</i>				<i>L. religiosa</i>			
	DSW	First tank	Abalone tank	Second tank	DSW	First tank	Abalone tank	Second tank
PO ₄ -P (μM)	1.94	1.80	1.58	1.47	1.85	1.25	1.30	0.85
NO ₃ -N (μM)	25.65	24.44	19.21	19.05	24.80	18.50	10.50	6.60

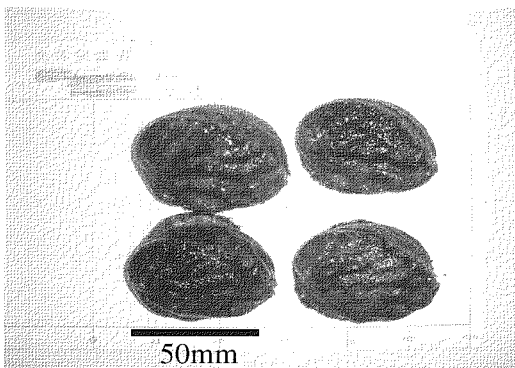


Fig. 47. Photo showing the abalone, *H. seiboldii*, at the end of culture.

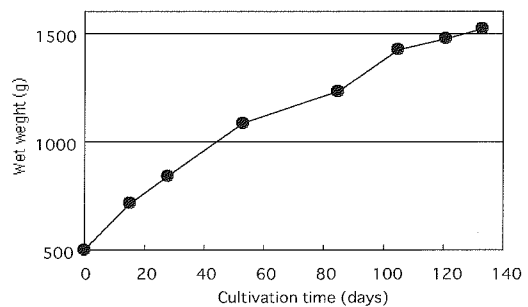


Fig. 48. Growth curve of *H. seiboldii* cultured for 133 days in 1t tank. 125 juvenile shells were grown from 500g (shell length 30mm) to 1517g (shell length 60mm).

報告されている (Cohen & Neori, 1991; Neori, 1996; Neori *et al.*, 1996; Neori & Shpigel, 1999). また近年, バイオフィルターで浄化された海水を再度魚類養殖に利用し, バイオフィルターとして用いた海藻をアワビに給餌するという養殖システムを実証し, 良好な結果が得られている (Neori *et al.*, 2000; Schuenhoff *et al.*, 2003). 本試験においても, 海藻の養殖排水を用いたアワビ養殖には全く問題がなく, 有効であると考えられる. またアワビ養殖排水による海藻養殖も, 種によっては海藻の形態変異や, 生長率の減少はみられるが, アワビ餌料としてはタンパク質含量の多い有用な海藻として利用可能であろう. 海藻とアワビの多段養殖システムを利用することで, 深層水の富無機栄養塩性及び清浄性を有効に利用でき, また環境水中へは栄養塩類が削減された深層水が放水されることになるので, 環境負荷が軽減されるものと推察される.

IV. 総合考察

現在の陸上アワビ養殖は, 厳密に水質を管理するための海水濾過施設, 人工飼料の給餌, 毎日の残餌回収等の労力等, 大変コストがかかる養殖事業である. それは他の水産物の養殖事業と比較しても, アワビが出荷可能な商品サイズになるまでには多くの時間が必要となることや, 大量死が起ると復帰までに時間とコストがかかるなど, アワビ養殖のリスクは大きい (境, 2000). 表層海水では, 水温上昇等により, アワビ餌料となる褐藻類を周年養殖することができない. 本研究は, それらアワビ養殖に関わる様々な問題の解消を検討した際, 清浄な養殖水として深層水を利用したことによって, アワビ餌料となる褐藻類の大量培養を可能とし, 断続的にアワビに給餌することができた.

褐藻類をアワビに給餌できる大きさに生長させるためには, 本養殖対象種としたワカメ及びホソメコンブの物理化学的因子に対する生長特性を明らかにする必要があった. 海藻の発育段階, すなわち配偶体, 幼孢子体, 成体の各段階において, 配偶体では至適生長・成熟条件, 幼孢子体の至適生長条件, 成体の深層水連続注水により生長特性を把握した. ワカメは徳島産の暖海域, ホソメコンブは寒海域に繁茂する. 各海藻の発育段階に対する生長特性は, それらの繁茂する海域環境と強い相関がみられた. この両海藻種の生長特性の相違は, 養殖する海藻を

時季によって代替することができ, 深層水を利用することで一年を通して常に高い生産量を保つことが可能となった.

さらに本試験では海藻の生長に対する深層水の影響について, 表層水との比較を行い検討した. 深層水と表層水では, 深層水の富無機栄養塩性の影響から配偶体の生長やワカメにおいては幼孢子体の生長, 成体の生長等, 常に深層水での培養時に良い結果をもたらした. しかしホソメコンブにおいては, 幼孢子体の生長, 成体の生長に関し, 深層水よりも表層水での培養時に良い結果をもたらすといった非常に興味深い現象がみられた. すなわち, ホソメコンブ培養水温が5℃より高く, また20℃未満の水温時において, 特に10℃近辺での条件では, 表層水の生長率が深層水よりも高くなった. 屋外での成体の生長に関しても, 栄養塩吸収が表層水では強く制限されているにも関わらず (Fig. 27), その生長は深層水よりも早い (Fig. 25). しかしその養殖された藻体成分を比較すると, 深層水養殖藻体とタンパク質, 炭水化物含量に大きな差異がある (Table 4). これらのことから, 養殖水温とその海水中的栄養塩濃度によって, ホソメコンブの生長が早遅するのではないかと考えられる. Küppers & Weidner (1980) は, 同じコンブ類の酵素活性が, 培養水温及び培養液中の栄養塩濃度の高低によって様々に変化することを報告している. ホソメコンブの酵素活性に関する知見はない. これらの生長特性の解明に関し, 今後の研究に期待する結果となった. またアワビ餌料の観点から, 表層水及び深層水の培養藻体を成分的に比較すると, 表層水培養藻体はタンパク質含量が深層水培養藻体よりも少なく, 劣っていることが分かった. アワビ餌料としては, タンパク質が35%の含有までが多い方が優れているとの報告が見られる (Shpigel *et al.*, 1998, 2000). したがってアワビ餌料となる海藻養殖は, 常に深層水を使用する必要があると考えられた.

メガイアワビ養殖において, 養殖水温を好適条件 (約20℃) に保った場合, アワビの摂餌量は低水温時 (10℃前後) よりも大きく増加した (Figs. 34, 37). このことから, アワビの好適成長を維持するためには, 特に冬季において深層水の水温を人為的に上昇させることが必要となる. 筆者は, 表層水との簡易熱交換器を用い, 冬季において深層水の11℃-16℃前後まで昇温可能であることを確認している. 第3章第4節での多段養殖において, 海藻養殖排水をアワビ養殖に

用いる際、海藻養殖排水を熱交換することで、効率の良いアワビ養殖が可能であると考えられた。

褐藻類とアワビの集約的タンク養殖システムについて、これらは実証試験から得られた科学的データを基に構築されている。システムを構築するには、海藻生産等の経時的、量的なものを総合的に組み込むことが必要であった。本試験の結果から、各種海藻の配偶体の成熟誘導から約2ヶ月後に、アワビ餌料となる大きさまで生産可能であること、また4日毎に15 kg前後の海藻が収穫できることが示された。以上のことから、養殖した海藻はアワビに連続的に給餌し、アワビ1個体の日間摂餌量から約4,000個体が健全に養殖されるシステムを構築した。近年、松村(2004)は富山深層水を用いて、陸上水槽で養殖したマコンブを先端部位から剪定し、それをエゾアワビに給餌する自給型アワビ養殖システムを提唱している。その養殖水は周年4℃と低く、冬季では加温して使用しており、また海藻をロープに固着して水槽に沈めている。本試験では使用する海藻を変えることで、水温調整することなく安定した海藻の生産が可能であること、また水槽内を立体的に利用し、高密度に養殖できる点で大きく異なる。また本試験では“孢子集塊化法”による海藻養殖を行っており、剪定するといった作業は必要ない。

最後に、従来の陸上養殖事業と本試験で検討した集約的タンク養殖システムの運営にかかるコストについて比較した。アワビ養殖は、本養殖システムに倣い、1 t水槽で70 mmのアワビ4,000個体を日量10 tの注水で行うことにする。“a”の項目は従来のアワビ養殖、“b”の項目は本養殖システムとする。

1. 設備費

- a. 1 t水槽4基の100万円と濾過施設費の約5,000万円(合計5,100万円)。
- b. 1 t水槽8基の200万円と7 t水槽8基の400万円、種苗生産に必要な培養施設2,000万円、またインキュベーター2基100万円、オートクレーブ2基50万円(合計2,750万円)。

2. 人件費

- a. 毎日の給餌、残餌回収、水槽掃除等でパート雇用者を2人とし、1人当たり年間120万円(合計240万円/年)。
- b. 海藻種苗生産の技術者1人(300万円/年)、水槽掃除等のパート雇用者1人(合計420万円/年)。

3. 運営費(電気費、海水費、餌料費)

1) 電気費

- a. 海水1 tの濾過費が年間で10万円であるので(境, 2000), 1 t水槽4基でそれぞれ日量10 tの海水が必要となる(400万円/年)。また水槽への酸素供給のためのエアレーション費として20万円/年(合計420万円)。
- b. 海水の濾過は必要ないが、インキュベーターやオートクレーブ機器、エアレーションの電気費が必要となる(合計80万円/年)。

2) 海水費

- a. 表層水を用いるため海水費は必要ないが、濾過によるフィルターの交換費が必要(20万円/年)。
- b. アワビ水槽への注水は海藻養殖排水を使用するため、海藻養殖海水費が必要となる。ワカメ、ホソメコンブの養殖システム(Fig. 42)では、ワカメが日量水槽容量の3回転の深層水を、ホソメコンブが同様に6回転の深層水を使用することから、使用する水槽の数は異なるが、海水量は同量になる。深層水費は室戸市では1 tが7円であり、日量180 tの深層水を使用する(46万円/年)。

3) 餌料費

- a. 人工餌料費として500円/kgが必要である。アワビ1個体(殻長70 mm: 40 g)の日間摂餌量は体重の10%であり、アワビ4,000個体の給餌量は日量16 kgである。したがって、日間餌料費は8,000円になる(292万円/年)。
- b. 餌料を購入することはない。海藻15 kgが生産されるのに必要な期間は、1 t水槽で8日間、7 t水槽で16日間であり、使用される海水量は360 tであるので7円/tから2,520円になる。また電気費が年間80万円から養殖24日間に使用される電気費は1万3千円であり、海水費と合計で1万5千円になる。しかし15 kgという海藻は、アワビ4日分の餌料であることから、日間餌料費は3,750円になる。

以上のことから、設備費を除いたランニングコストを比較すると、従来の養殖では年間920万円、本養殖では546万円と大幅に減額されることが分かった。また、日間餌料費を比較しても、人工餌料給餌では8,000円、生海藻給餌では

3,750 円となる。さらに本養殖では、餌料が腐敗することもなく、餌料が生海藻であるので腐敗せず水質は清浄のままであり、残餌回収も半月に1回程度で良い。このように、深層水を利用した海藻とアワビ養殖システムは従来の養殖での弊害やコストを大きく削減でき、これまでのアワビ養殖から深層水養殖に代替する可能性を秘めている。このような集約的タンク養殖システムを応用することで、アワビに限らず、ウニやサザエなどの藻食性の海産動物の養殖も可能であろう。

現在、深層水揚水施設は増加傾向にある。しかし、水産物養殖に関して、本格的に行われている施設は殆どない。今後はこのような施設が増えることで、本養殖システムの利用が期待される。

深層水という、低資源ではあるが循環再生する資源、を有効利用できるという点で、本研究の成果が今後幅広く応用されることを祈る。

要 約

海洋深層水（以下、深層水）は化石燃料と比較して低資源であるが、利用次第では無尽蔵の資源になりうることから、現在注目されている。表層海水と比較した深層水の清浄性、富無機栄養塩性、低温安定性という特徴は、温度差発電や水産物の養殖に関して有効である。ところで近年、アワビの生産高は年々減少し、養殖には多大な経費（海水濾過施設とその維持、人工飼料費）、アワビ餌料（生海藻）の供給不足または人工飼料給餌による水質悪化からの大量斃死等の問題が尽きず、廃業に追い込まれる業者も少なくない。アワビ餌料となる海藻は、繁茂が局所的・局時的であり、天然からの採集には限界がある。本研究では深層水の資源性を利用して、アワビ好適餌料となる褐藻類（ワカメ、ホソメコンブ）の周年生産及びその褐藻類をアワビに連続的に給餌する集約的タンク養殖システムについて検討した。また深層水の影響を検討するため、深層水と表層水を用いて培養比較を行った。

1. 褐藻類の大量培養法の確立

1) 褐藻類配偶体の生長条件

配偶体の至適生長条件を検討した。ワカメ雌雄配偶体は水温 20℃、光量 25-100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$

$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光周期 12L:12D、ホソメコンブ雌雄配偶体は水温 15℃、光量 25-50 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、光周期 12L:12D で最適生長が確認された。表層水と深層水での配偶体生長は、深層水を用いた場合、細胞数が顕著に増加した。さらに生長を促進し成熟を抑制するためには、鉄分を添加しない培養液を使うことが有効であると考えられた。

2) 褐藻類配偶体の成熟条件

配偶体の至適成熟条件を検討した。ワカメでは水温 20℃、光量 100-200 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、ホソメコンブでは水温 5-10℃、光量 50-100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ であった。光周期は試験区間に顕著な差がみられなかった。また栄養塩補強海水である PES 培養液は、栄養過多による成熟阻害がなく、健全な成熟がみられた。表層水、深層水では、本試験方法では全く成熟しない。成熟誘導から幼胞子体の形成までの必要日数は、前培養期間も含めてワカメで 7 日、ホソメコンブで 11 日であった。

3) 褐藻類胞子体の生長条件

幼胞子体の至適生長条件を検討した。ワカメで水温 10-15℃、ホソメコンブで水温 10℃、両海藻種ともに光量 100 $\mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、長日条件 (16L:8D) が最適であった。種苗サイズ（集塊種苗の直径が 5 mm）の生産には、両海藻種ともに 3 週間を要する。また表層水、深層水での培養比較を行うと、ワカメは常に深層水での生長が早く、ホソメコンブでは培養する水温の違いによって、表層水と深層水での生長が逆転した。

4) 褐藻類の屋外タンク養殖

屋外陸上タンクを用いて、両海藻種の大量培養を周年行い、環境要因の変動と日間生長率との関係を明らかにした。両海藻種ともに生長率の変動はあるが、周年養殖は可能であった。ワカメは晩春から初秋にかけて生長率 17.5-20.5% と高く、同様にホソメコンブでは晩秋から初春にかけて 21.7-23.3% と高い値を示した。また生長率は光量よりも水温に依存し、ワカメは約 18℃、ホソメコンブは 13.5℃ において最適生長率が得られると推察された。ホソメコンブの栄養塩吸収量は、硝酸塩で増重量の約 1/20、リン酸塩で約 1/200 を吸収し、富栄養な深層水は養殖水として適していると思われる。また、深層水で養殖した藻体はタンパク質含量が多く、アワビ餌料価値が高いと考えられた。

2. 褐藻類給餌によるアワビ養殖

深層水養殖褐藻類の給餌及び深層水連続注水によるアワビ養殖を行い、アワビの中規模養殖での成長量や摂餌量、また給餌海藻種別による成長量や摂餌量を確認した。本章での試験から、深層水を養殖水に用いた有効性、また深層水で養殖された海藻給餌によるアワビ成長への影響を明らかにした。これらの結果は、第三章での養殖システム構築のためのアワビ養殖に関する因子として利用する。

1) 褐藻類給餌によるアワビ中規模養殖

深層水で養殖したワカメ給餌によるアワビ中規模養殖試験を行い、アワビの日間摂餌量や成長量を確認した。11月において、アワビの月間生長率は20%と最も高く、月間摂餌量も最多1.7kgであり、アワビ1個体の日間摂餌量は、0.39g/日であった。しかし、低水温時の養殖では、アワビの成長自体は低水準にあると考えられた。また試験期間を通して、アワビ1kgの増重に必要な海藻量は9.3kgであり、深層水養殖ワカメの餌料効果が高いことが推察された。また、人為的ミスを除いて、アワビは斃死することなく、健全に成長した。

2) 褐藻類の単一種及び交互給餌によるアワビ養殖

深層水と表層水を混合し、アワビにとって適水温下(約20℃)で試験を行った。深層水で養殖されたワカメ、ホソメコンブを単独、もしくは交互に給餌することにより、両海藻種の餌料効果の違い及びアワビ成分への影響を確認した。また天然アワビ、人工飼料及び塩蔵ワカメ給餌アワビの一般成分分析との比較を行い、深層水養殖褐藻類のアワビ餌料として有効性について検討した。

アワビの成長量はどの試験区においても有意差は見られず、また性による差異もなかった。しかし、摂餌量の多少により、ワカメよりもホソメコンブが高い餌料効果を持つことが分かった。殻長約60mmのアワビ1個体あたりの日間摂餌量は、ワカメ区で1.7g、ホソメコンブ区で0.9g、交互給餌区で1.2gであった。ワカメについては、第一節よりも日間摂餌量が多く、この原因として養殖水温による差異が考えられた。

また一般成分について、深層水養殖褐藻類を摂餌したアワビは、天然、塩蔵ワカメ摂餌アワ

ビよりもタンパク質含量が多いことから、グルタミン酸等の旨味成分の含有量が多く、アワビの資質としては優れているのではないかと推察された。

3. 褐藻類とアワビの集約的タンク養殖システムの検討

1) ワカメ給餌によるアワビ養殖システム

ワカメ給餌によるアワビ養殖システムについて検討した。ワカメの日間生長率は周年を通して約20%であり、4日毎に16kgのワカメを給餌するシステムを構築することで、アワビ2000個体の養殖が可能となったことが明らかとなった。

2) ホソメコンブ給餌によるアワビ養殖システム

ホソメコンブ給餌によるアワビ養殖システムについて検討した。室戸の場合、ホソメコンブの日間生長率は、養殖時季により大きく変動し、晩秋から初春にかけて生長率が平均20%であり、4日毎に16kgのホソメコンブを給餌するシステムを構築することで、アワビ4,000個体の養殖が可能となったことが示された。

3) 褐藻類とアワビの集約的タンク養殖システム

各時季でより生長率の高い種を養殖することで、周年を通して安定した生産量を確保し、アワビに断続的に給餌するという養殖システムについて検討した。晩春から初秋においてワカメの生産を、晩秋から初春にかけてホソメコンブの生産を行い、約1年間で、4,000個体のアワビが種苗サイズの30mmから出荷サイズの70mmに成長させることが可能となったことが明らかとなった。

4) 褐藻類とアワビの多段養殖システム

深層水の有効利用を検討し、褐藻類の養殖排水をアワビ養殖に、アワビ養殖排水を再度褐藻類養殖に使用するという多段養殖システムを構築し、小規模な実証試験を行った。ワカメ、ホソメコンブ両褐藻類ともに、アワビ養殖排水で生長し、成分はタンパク質含量の多い、アワビ餌料としては有用な藻体を生産できた。また海藻養殖排水でのアワビ成長も健全であり、ホソメコンブの給餌により、約5kgという少量で1kg

のアワビ増重がみられた。これらを総合的に判断して、海藻とアワビの多段養殖システムは有効に機能すると考えられた。

褐藻類とアワビの集約的養殖システムを構築した。本システムは、アワビに必要なとされる海藻量を十分に供給でき、さらに深層水で養殖された餌料価値の高い生海藻が常に給餌可能である。また、海藻の養殖排水をアワビ養殖水に二次利用することで、深層水の富無機栄養塩性という資源性の有効利用が可能であり、その結果大幅な養殖コストの削減が期待される。コスト計算については総括で述べる。深層水の利用及び、褐藻類の周年養殖を行うことで、従来は不可能であった生海藻の連続給餌アワビ養殖が可能となった。

謝 辞

本研究は高知大学農学部・西島敏隆教授の御指導の下に行われたものであり、同教官に心より感謝致します。

本研究を進めるにあたり、高知大学農学部水族栄養学研究室・細川秀毅氏、同大学黒潮圏海洋科学研究科・高橋正征氏、深見公雄氏、同大学農学部水族環境学研究室・足立真佐雄氏には多大なる援助、指導をいただいた。同大学海洋生物教育研究センター海洋植物学研究室・平岡雅規氏、大野正夫氏には研究活動を支え、援助していただいた。高知大学・野村明氏、香川大学・山内高円氏には副指導教官として指導をいただいた。ワカメを送ってくださった徳島県水産試験場・團昭紀氏、ホソメコンブを送ってくださった北海道大学北方生物圏フィールド科学センター室蘭臨海実験所・四ツ倉典滋氏、北海道原子力環境センター・川井唯史氏、メガイアワビを譲渡及びアワビ養殖指導をしていただいた徳島県牟岐町水産資源栽培センター・久米匡章氏、小磯順一氏、試験補助をしていただいた高知県室戸市高岡漁協・山下文子氏に感謝致します。博士課程進学のお機会を与えて下さいました皆様に、また在学中に様々なご協力を賜りました皆様に厚くお礼を申し上げます。最後に研究活動の場を提供して下さいました高知県海洋深層水研究所の所長ならびに職員の皆様に、心より感謝を申し上げます。

引用文献

秋山和夫. 1965. ワカメの生態及び養殖に関する

研究 第2報 配偶体の生長・成熟条件. 東北水産研究報告, 25: 143-170.

Akiyama, K. & M. Kurogi. 1982. Cultivation of *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar, the decrease in crops from natural plants following crop increase from cultivation. Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab., 44: 91-100.

Bolton, J.J. & K. Lüning. 1982. Optimal growth and maximal survival temperature of Atlantic *Laminaria* species (Phaeophyta) in culture. Mar. Biol., 66: 89-94.

Breeman, A.M. & H. Pakker. 1994. Temperature ecotypes in seaweed: Adaptive significance and biogeographic implications. Bot. Mar., 37: 171-180

Casas, G.N. & M.L. Piriz. 1996. Surveys on *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyta) in Golfo Nuevo, Argentina. Hydrobiologia, 326/327: 213-215.

Cohen, I. & A. Neori. 1991. *Ulva lactuca* biofilters for marine fishpond effluents : I. Ammonia uptake kinetics and nitrogen content. Bot. Mar., 34: 475-482.

Critchley, A.T. & M. Ohno. 1998. *Seaweed resources of the world*. JICA. Yokosuka, 431pp.

Davison, I.R. & J.O. Davison. 1987. The effect of growth temperature on enzyme activities in the brown alga *Laminaria saccharina*. Br. Phycol. J., 22: 77-87.

Dieck, I.T. 1993. Temperature tolerance and survival in darkness of kelp gametophytes (Laminariales, Phaeophyta): ecological and biogeographical implications. Mar. Ecol. Prog. Ser., 100: 253-264.

Floc'h, J.Y., R. Pajot & I. Wallentinus. 1991. The Japanese brown alga *Undaria pinnatifida* on the coast of France and its possible establishment in European waters. J. Cons. Int. Expl. Mer., 47: 379-390.

Fletcher, R.L. & C. Manfredi. 1995. The occurrence of *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae, Laminariales) on the south coast of England. Bot. Mar., 38: 355-358.

Fukami, K., A. Kawai, M. Asada, M. Okabe, T. Hotta, T. Moriyama, S. Doi, T. Nishijima, M. Yamaguchi, & M. Taniguchi. 1998. Continuous and simultaneous cultivation of benthic food diatom *Nitzschia* sp. and abalone *Haliotis sieboldii* by using deep seawater. J. Mar. Biotechnol., 6: 237-240.

深見公雄・高橋正征 2000. 用語解説 第4回 真光層 (euphotic layer) と補償深度 (compensation

- depth) 海洋深層水利用研究会ニュース, 4 (1):16.
- 藤井明彦・小川七朗・四井敏雄. 1986. クロアワビ稚貝に対する各種海藻の餌料効果. 長崎水試研報, 12: 19-25.
- 藤田大介. 1990. 富山湾の深層水で培養したマコンブの生長. 藻類, 38: 189-191.
- Fujita, D., H. Okada & K. Sakata. 1990. The importance of some marine red algae inhabiting fishing port waterbreak vertical surface as natural food for juvenile horned turban *Turbo (Batillus) cornutus*. Bull. Toyama Pref. Fish. Exp. St., 2: 41-51.
- Fujita, D., Y. Iwase & K. Sakata. 1992. Coralline algae also contain feeding stimulant glycerolipids for marine gastropods. Bull. Toyama Pref. Fish. Exp. St., 3: 1-6.
- Fujita, D. 2000. Abalone of a mouthful size reared with attached diatoms in seawater pumped from the deep water of Toyama Bay. Bull. Toyama Pref. Res. Inst., 12: 43-46.
- Gerard, V.A. & K.H. Mann. 1979. Growth and production of *Laminaria longicuris* (Phaeophyta) populations exposed to different intensities of water movement. J. Phycol., 15: 33-41.
- Hasio, S.I.C. & L.D. Druehl. 1971. Environmental control of gametogenesis in *Laminaria saccharina*. I. The effects of light and culture media. Can. J. Bot., 49: 1503-1508.
- Hasio, S.I.C. & L.D. Druehl. 1973. Environmental control of gametogenesis in *Laminaria saccharina*. II. Correlation of nitrate and phosphate concentrations with gametogenesis and selected metabolites. Can. J. Bot., 51: 829-839.
- Hay, C.H. & P.A. Luckens. 1987. The Asian kelp *Undaria pinnatifida* (Phaeophyta: Laminariales) found in a New Zealand harbour. N. Z. J. Bot., 25: 329-332.
- Hiraoka, M., M. Ohno, A. Dan & N. Oka. 2004. Utilization of deep seawater for the mariculture of seaweeds in Japan. Jap. J. Phycol., 52 (Supplement): 215-219.
- 広瀬弘幸. 1981. 藻類学総説. 内田老鶴圃, 東京, 506pp.
- 古田昭喜知・土屋文人・金山慧子. 1968. 生海藻12種類及び乾燥海藻8種類のクロアワビ稚貝に対する餌料効果. 新潟県水誌 村上支場, 2: 1-8.
- Hoffman, A.J. & B. Santerices. 1982. Effects of light intensity and nutrients on gametophytes and gametogenesis of *Lessonia nigrescens* Bory (Phaeophyta). J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 66: 77-89.
- 堀輝三. 1993. 藻類の生活史集成 第二巻 紅藻・褐藻類. 内田老鶴圃, 東京, 345pp.
- Iizumi, H. & Y. Sakanishi. 1994. Temperature dependence of photosynthesis-irradiation (P-I) relationship of gametophytes of *Laminaria religiosa* Miyabe. Bull. Hokkaido Natl. Fish. Res. Inst., 58: 45-51.
- 猪野峻. 1952. 邦産アワビ属の増殖に関する生物学的研究. 東海水研 研究報告, 5: 1-102.
- 石田修. 1993. クロアワビの成長に及ぼす飼育密度の影響. 水産増殖, 41: 431-433.
- 川井唯史・岡直宏・平岡雅規・四ツ倉典滋・中明幸広. 2004. ホソメコンブ配偶体の生長に及ぼす硝酸塩の影響. 水産工学, 41: 35-38.
- Kawashima, S. 1984. Kombu cultivation in Japan for human foodstuff. Jap. J. Phycol., 32: 379-394.
- Kawashima, A., Y. Agatsuma & K. Taniguchi. 2002. Dietary evaluation of the boiled stipe of Wakame, *Undaria pinnatifida*, for growth of the Ezo abalone, *Hariotis discus hannai*. Suisanzoshoku, 50: 97-102.
- 菊池省吾・桜井保雄・佐々木実・伊藤富夫. 1967. 海藻20種のアワビ稚貝に対する餌料効果. 東北水研 研究報告, 27: 93-100.
- Kim, Y.-S. and K.-W. Nam. 1997. Temperature and light responses on the growth and maturation of gametophytes of *Unaria pinnatifida* (Harvey) Suringar in Korea. J. Korean Fish. Soc., 30: 505-510. (in Korea)
- 木下虎一郎・渋谷三五郎. 1944. ワカメの発生適温試験. 北水誌月報, 100: 369-373.
- 桐原慎二・藤井義一・能登谷正浩. 2003. 褐藻ガゴメの配偶体の成熟及び幼孢子体の生長に及ぼす温度, 光量の影響. 水産増殖, 51: 281-286.
- Kohara, K. 1964. Fundamental studies of *Undaria pinnatifida* for mariculture. Bull. Fish. Exp. Stn. Kyoto Pref., 17: 1-19.
- 黒木宗尚・秋山和夫. 1957. ワカメの生態及び養殖に関する研究. 東北水研 研究報告, 10: 95-117.
- Küppers, U. & M. Weidner. 1980. Seasonal variation of enzyme activities in *Laminaria hyperborea*. Planta, 148: 222-230.
- Lee, J.A. & B.H. Brinkhuis. 1998. Seasonal light and temperature interaction effects on development of *Laminaria saccharina* (Phaeophyta) gametophytes and juvenile sporophytes. J. Phycol., 24: 181-191.
- Lee, S.-M., C.-S. Park & T.S. Go. 1999. Effects of formulated diet or macroalgae (*Undaria pinnatifida*) on the growth and body composition of juvenile

- abalone (*Hariotis discus hannai*) cultured in different water temperature. J. Korean Fish. Soc., 32: 284-289. (in Korea)
- Lobban, C.S. and P.J. Harrion. 1994. *Seaweed ecology and physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, 366 pp.
- Lüning, K. & M.J. Dring. 1972. Reproduction induced by blue light in female gametophytes of *Laminaria saccharina*. *Planta*, 104: 252-256.
- Lüning, K. & M.J. Dring. 1975. Reproduction, growth and photosynthesis of gametophytes of *Laminaria saccharina* grow in blue and red light. *Mar. Biol.*, 29: 195-200.
- Lüning, K. & M. Neushul. 1978. Light and temperature demands for growth and reproduction of *Laminaria* gametophytes in southern and central California. *Mar. Biol.*, 45: 293-309.
- Lüning, K. 1980. Critical levels of light and temperature regulating the gametogenesis of three *Laminaria* species (Phaeophyceae). *J. Phycol.*, 16: 1-15.
- Lüning, K. 1981. Egg release in gametophytes of *Laminaria saccharina*: induction by darkness and inhibition by blue light and UV. *Br. Phycol. J.*, 16: 379-393.
- 前迫信彦・中村伸司・四井敏雄. 1984. 数種の褐藻, 緑藻発芽体ならびに藍藻のクロアワビ稚貝に対する餌料効果. 長崎水試研報, 10: 53-56.
- 松村航. 2004. 自給型アワビ養殖システムによるマコンブとエゾアワビの成長. 第8回 海洋深層水利用研究会全国大会 講演要旨集. 25-26pp
- 松山恵二. 1985. ホソメコンブの生産量推定における光合成速度の季節変化. 北水誌報, 27: 91-99.
- Mizuta, H., H. Narumi & H. Yamamoto. 2001. Effects of nitrate and phosphate on the growth and maturation of gametophytes of *Laminaria religiosa* Miyabe (Phaeophyceae). *Suisanzoshoku*, 49: 175-180
- Morita, T., A. Kurashima & M. Maegawa. 2003a. Temperature requirements for the growth and maturation of the gametophytes of *Undaria pinnatifida* and *U. undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol. Res.*, 51: 154-160.
- Morita, T., A. Kurashima & M. Maegawa. 2003b. Temperature requirements for the growth of young sporophytes of *Undaria pinnatifida* and *Undaria undarioides* (Laminariales, Phaeophyceae). *Phycol. Res.*, 51: 266-270
- Motomura, T. & Y. Sakai. 1981. Effect of chelated iron in culture media on oogenesis in *Laminaria angustata*. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 47: 1535-1540.
- Motomura, T. & Y. Sakai. 1984. Regulation of gametogenesis of *Laminaria* and *Desmarestia* (Phaeophyta) by iron and boron. *Jap. J. Phycol.*, 32: 209-215
- Müller, D.G., I. Maier & G. Gassmann. 1985. Survey on sexual pheromone specificity in Laminariales (Phaeophyceae). *Phycologia*, 24: 457-467.
- Müller, D.G. 1989. The role of pheromones in sexual reproduction of brown algae. pp.201-213 in A.W. Coleman *et al.* eds. *Algae as Experimental Systems*, Alan R. Liss, New York.
- Neori, A. 1996. The type of N-supply (ammonia or nitrate) determines the performance of seaweed biofilters integrated with intensive fish culture. *Isr. J. Aquac.-Bamidgeh*, 48: 19-27.
- Neori, A., M.D. Krom, S.P. Ellner, C.E. Boyd, D. Popper, R. Rabinovitch, P.J. Davidson, O. Dvir, D. Zuber, M. Ucko, D. Angel & H. Gordin. 1996. Seaweed biofilters as regulators of water quality in integrated fish-seaweed culture units. *Aquaculture*, 141: 183-199.
- Neori, A. & M. Shpigel. 1999. Using algae to treat effluents and feed invertebrates in sustainable integrated mariculture. *World Aquac. Mag.*, 30(2): 46-51.
- Neori, A., M. Shpigel & D. Ben-Ezra. 2000. A sustainable integrated system for culture of fish, seaweed and abalone. *Aquaculture*, 186: 279-291.
- 野中忠・岩橋義人. 1969. 静岡県沿岸の磯根資源に関する研究 - アラメ・カジメ群落内でのアワビの餌料. 静岡水試研究報告, 2: 37-39.
- 西澤一俊・千原光雄. 1979. 藻類研究法. 共立出版, 東京, 735 pp.
- 野村正. 1995. カキ・ホタテガイ・アワビ生産技術と関連研究領域 - 恒星社厚生閣, 東京, 267 pp.
- Oh, S.-H. & C.-H. Koh. 1996. Growth and photosynthesis of *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyta) on a cultivation ground in Korea. *Bot. Mar.*, 39: 389-393.
- Ohno, M. & M. Matsuoka. 1993. *Undaria cultivation "wakame"*. pp.41-49 in M. Ohno *et al.* eds. *Seaweed Cultivation and Marine Ranching*. JICA, Yokosuka.
- 大野正夫・團昭紀・平岡雅規・鍋島浩. 2000. 海洋深層水と表層水を用いたオフシーズンのワカメの屋内タンク培養. 日水誌, 66: 737-738.
- 大野正夫・矢野誠・平岡雅規・岡直宏・谷口道子. 2001. 海洋深層水を用いた紅藻トゲキリン

- サイとトサカノリのタンク培養. 高知大学海洋生物教育研究センター研究報告, 20: 35-40.
- 大野正夫. 2004. 有用海藻誌. 内田老鶴圃, 東京, 575 pp.
- 岡直宏. 2002. 海洋深層水が海藻の繁茂, 生長に与える影響. 高知大農学研究科修論, 73 pp.
- Oka, N., M. Hiraoka & T. Nishijima. 2004. Growth of abalone fed on *Undaria pinnatifida* (Alariaceae, Phaeophyceae) cultivated as free living form "germling cluster" in deep seawater. *Jpn. J. Phycol.*, 52(Suppl.): 225-230.
- 岡田行親・三本善普昭. 1980. コンブ類の雌性配偶体の生長と成熟に及ぼす温度の影響. 北水研報, 45: 51-56.
- 大場俊雄. 2000. あわび文化と日本人. 成山堂, 東京, 176 pp.
- Pang, S.-J. & C.-Y. Wu. 1966. Study on gametophyte vegetative growth of *Undaria pinnatifida* and its applications. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 14: 205-210.
- Penniman, C.A., A.C. Mathieson & C.E. Penniman. 1986. Reproductive phenology and growth of *Gracilaria tikvahiae* MacLachlan (Gigartinales, Rhodophyta) in the Great Bay Estuary, New Hampshire. *Bot. Mar.*, 29: 147-154
- Provasoli, L. 1968. Media and prospects for the cultivation of marine algae. pp.63-75 in A. Watanabe & A. Hattori, eds. *Cultures and Collection of Algae. Proceedings of the U.S.-Japan Conference, Hakone, September, 1966*. Japanese Society of Plant Physiologists, Tokyo.
- Rhodes, R.G. 1970. Relation of temperature to development of the macrothallus of *Desmotrichum undulatum*. *J. Phycol.*, 6: 312-314.
- Roels, O.A., K.C. Haines & J.B. Sunderlin. 1975. The potential yield of artificial upwelling mariculture. 10th European Symposium on Marine Biology, Ostend, Belgium, 1: 381-390.
- Robert, W.D. and Peter, C. 1995. Bias towards brown algae in determining diet and food preferences: the south African abalone *Haliotis midae*. *Mar. Freshwater Res.*, 46: 623-627.
- 斉藤雄之助. 1956a. ワカメの生態に関する研究 I. 配偶体の発芽, 生長について. 日水誌, 22: 229-234.
- 斉藤雄之助. 1956b. ワカメの生態に関する研究 II. 配偶体の成熟と芽胞体の発芽, 生長について. 日水誌, 22: 235-239.
- 斉藤雄之助. 1962. ワカメの増殖に関する基礎的研究. 東大水産実験所業績, 3: 1-102.
- Saito, Y. 1975. Practical significance of algae in Japan: *Undaria*. pp.304-320 in J. Tokida & H. Hirose, eds. *Advance of Phycology in Japan*. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena.
- 境一郎. 2000. 一個52万円のアワビ文化 - 環境立国日本をめざす海からの提言 -. 成山堂, 東京, 225 pp.
- 酒井誠一. 1962. エゾアワビの生態学的研究 - I. 食性に関する実験的研究. 日水誌, 28: 766-779.
- Sakata, K., T. Itoh & K. Ina. 1984. A new bioassay method for phagostimulants for a young abalone, *Haliotis discus* Reeve. *Agric. Biol. Chem.*, 48: 425-429.
- 坂田完三. 1985. アワビなど藻食性巻貝の摂餌刺激物質としての複合脂質. 科学と生物, 23: 557-559.
- Sakata, K. & K. Ina. 1985. Digalactosyldiacylglycerols and Phosphatidylcholines isolated from a brown alga as effective phagostimulants for a young abalone. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 51: 659-665.
- Sakata, K., T. Sakura & K. Ina. 1988. Algal phagostimulants for marine herbivorous gastropods. *J. Chem. Ecol.*, 14: 1405-1416.
- Sanderson, J.C. 1990. A preliminary survey of the distribution of the introduced macroalga, *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringer on the east coast of Tasmania, Australia. *Bot. Mar.*, 33: 153-157.
- Schuenhoff, A., M. Shpigel, I. Lupatsch, A. Ashkenazi, F.E. Msuya & A. Neori. 2003. A semi-recirculating, integrated system for the culture of fish and seaweed. *Aquaculture*, 221: 167-181.
- 瀬川進. 1995. クロアワビの酸素消費量およびアンモニア態窒素排泄量に及ぼす水温の影響に関する予報的研究. 水産増殖, 43: 219-224.
- Shpigel, M., A. Neori & E.D. Ben. 1998. *Ulva lactuca* as food source for abalone in a land-based integrated system. *J. Shell. Res.*, 17: 362-363.
- Shpigel, M., N.L.C. Ragg, I. Lupatsch & A. Neori. 2000. Protein content determines the nutritional value of the seaweed *Ulva lactuca* for the abalone *Haliotis tuberculata*, *H. discus hannai*, and *H. fulgens*. *J. Shell. Res.*, 19: 534.
- Skriptsova, A., V. Khomenko & V. Isakov. 2004. Seasonal changes in growth rate, morphology and alginate content in *Undaria pinnatifida* at the northern limit in the sea of Japan (Russia). *J. Appl. Phycol.*, 16: 17-21.
- Sokal, R.R. & F.J. Rohlf. 1981. *Biometry. The*

- principles and practice of statistics in biological research*, 2nd ed. W.H. Freedman & Co., New York, 859 pp.
- 隅田隆・田村愛理・川北浩久. 2001. 室戸海洋深層水の特性. 日本海水学会誌, 55: 158-65.
- 殖田三郎・岡田喜一. 1941. 巻貝類の天然餌料に関する研究 II - 鮑. 日水誌, 10: 139-42.
- 高橋正征. 1999. 用語解説 第1回 海洋深層水 (Deep Ocean Water). 海洋深層水利用研究会ニュース, 3 (1):14.
- 谷口和也. 1998. 磯焼けを海中林へ - 岩礁生態系の世界 -. 裳華房, 東京, 196 pp.
- 徳島水産試験場. 2000. 新しいワカメの種苗生産マニュアル - フリー配偶体を使った種苗生産 -. 徳島水産試験場, 徳島, 42 pp.
- 浮永久・菊池省吾. 1979. 付着性微小藻類6種のエゾアワビ稚貝に対する餌料効果. 東北水研 研究報告, 40: 47-52.
- 浮永久. 1981. エゾアワビに対するコンブ目海藻の餌料価値. 東北水研 研究報告, 42: 19-29.
- 浮永久・煙山彰・渡辺武. 1985a. アワビ用試験餌料の基本組成の検討. 日水誌, 51: 1825-1833.
- 浮永久・煙山彰・渡辺武. 1985b. エゾアワビに対する数種餌料タンパク質の栄養価. 日水誌, 51: 1835-1839.
- van den Hoek, C. 1981. Chlorophyta: morphology and classification. pp.86-132 in C. S. Lobban & M. J. Wynne eds. *The Biology of Seaweeds*.
- 山田信夫. 2001. 海藻利用の科学. 成山堂, 東京, 269 pp.
- 山口光明・田島健司・山中弘雄・岡村雄吾. 1994. 海洋深層水による大型海藻類の培養. 月刊海洋, 285: 156-158.
- 吉田忠生. 1998. 新日本海藻誌. 内田老鶴圃, 東京, 1222 pp.