

亜熱帯性ホンダワラ類キレバモクの再生産過程における海洋深層水の利用

Use of Deep Ocean Water to Control Reproductive Processes
of a Subtropical *Sargassum alternato-pinnatum*

池部 廣太

Keita IKEBE

Abstract

The aims of this study were to investigate the ecology of reproductive processes of *Sargassum alternato-pinnatum*, and to develop a method to induce the release of embryos from this species using deep ocean water. The effects of water temperature and air exposure on the number of embryos released from mature thalli of *S. alternato-pinnatum* were examined. The main findings were as follows: more embryos were released into surface ocean water (from a depth of approx. 1 m) when the temperature was decreased by heat exchange with deep ocean water (from a depth of approx. 320–340 m). When the release of embryos was delayed, there was also a delay in withering of the algal thalli. Fewer embryos were released from the thalli after they were exposed to air, but the thalli were able to recover their embryo-releasing capacity. These results suggested that environmental changes such as shifts in water temperature, depth, etc. will greatly influence algal reproductive processes. There were at least three separate embryo-release events in *S. alternato-pinnatum*. In conclusion, it is possible to obtain many embryos from this alga by lowering the temperature of surface ocean water by heat exchange with colder deep ocean water.

Key Words: *Sargassum alternato-pinnatum*, embryo, temperature, air exposure, deep ocean water, synchronicity, periodicity

要 旨

本研究の目的はキレバモクの再生産に関する生態学的知見を得ることおよび深層水を利用して本種の幼胚の放出を促進させる幼胚採集方法を確立することである。生殖器床を形成したキレバモクの幼胚の放出に及ぼす水温・干出条件などの効果を培養水槽を用いて調べた。その結果、深層水（水深約320–340mから取水）との熱交換により低温化させた表層水（水深約1mから取水）を使用することで放出される幼胚数が増加し、幼胚放出の周期および枯死が遅れることが明らかとなった。また、放出される幼胚数は干出により抑制されるが、回復能力があることが認められた。これらのことから、水温・水深などの環境条件の変化はキレバモクの再生産に大きな影響を与えることが示唆された。また、キレバモクはほぼ同時に周期的に（少なくとも3回）幼胚を放出することが確認された。以上のことから、深層水の低温特性を利用して表層水の温度を低下させることで、キレバモクから多くの幼胚を獲得できることが明らかとなった。

キーワード：キレバモク、幼胚、温度、干出、深層水、周期性

1. 緒 言

ホンダワラ類が形成する藻場はガラモ場と呼ばれ、一次生産、水質浄化、水生生物の育成場等の機能を持つため、沿岸域の持続的生産にとって重要な場となっている。最近の瀬戸内海における調査では、ガラモ場の面積とヒラメ、マダイ、クロダイ、ウニ類、サザエ類の漁獲量が有意な正の相関を示すことが明らかとなり、沿岸漁業におけるガラモ場の重要性が示唆された（吉田ら、2010）。しかし、近年、日本沿岸域において藻場の衰退が問題となり、また、高知県沿岸域においても、ガラモ場面積は大きく減少し（1997年の479 haから2006～2010年の64 haへ）、約300 haはウニ類の食害による磯焼け域であることが明らかとなっている（田井野ら、2009）。

九州西岸域の野母半島の北岸域では、1996年頃からしばしば亜熱帯性ホンダワラ類（キレバモク *S. alternato-pinnatum*、マジリモク *S. carpophyllum*）が観察されるようになり、2000年以降は同地で小規模な群落の形成が観察された（吉村ら、2006）。高知県沿岸域においては、1997年の調査時に存在が確認されていなかった亜熱帯性ホンダワラ類（キレバモク、マジリモク、シマウラモク *S. incanum*）が、2009年の調査で新たに存在が確認された（田井野ら、2009）。以上のように、環境変化が、藻場の衰退と種組成の変化を招いていると推察される。

一般に、ホンダワラ類は成熟期に生殖器床と呼ばれる器官を形成し、その中に卵と精子を形成する（難波、2003）。生卵器から排出され、生殖器床上に保持された卵は受精し幼胚となり、一定の発生段階に達した後に放出される（難波、2003）。本研究の題材である亜熱帯性ホンダワラ類キレバモクは、雄性生殖器巣と雌性生殖器巣が同一の生殖器床に存在する雌雄同株であり、日本列島の南西部に分布する（野呂、1993）。

本研究では、キレバモクの生殖器床に卵と精子が形成され、排出された卵が受精し幼胚となり、一定の発生段階に達した後に放出されるまでの間に水温や干出等の条件が及ぼす影響を放出幼胚数を経時的に把握することにより明らかにし、キレバモクの再

生産に関する生態学的知見を得ることおよび深層水を利用した幼胚採集方法を確立することを目的とした。これまでに他のホンダワラ類においても、様々な条件が放出幼胚数へ与える影響を実験的に調べた例はなく、放出幼胚数に及ぼす水温・干出・塩分濃度・pHの影響を調べることは、キレバモクの再生産の観点から重要である。

2. 材料と方法

2.1 生殖器床を形成したキレバモクの採取

土佐湾東部に位置する加領郷漁港内のドックに群生するキレバモクの藻場（約28 m × 40 m）から成熟期のキレバモクを採取した。平成20年7月25日および平成21年9月4日に採取した藻体は、それぞれ実験1（水温・干出の影響）および実験2（干出の影響）に供した。両採取日のキレバモクは枯死・流失する様子もなく繁茂し、生殖器床を形成していた。平成22年8月30日に採取した藻体は実験3（水温・塩分濃度・pHの影響）に供した。この時は実験1、2と異なり、藻体の枯死・流失が進んでおり、藻体は生殖器床を形成していたが藻場には藻体がまばらに存在する状態であった。

2.2 実験1（水温・干出の影響）の設定

水温・干出実験においては、表層水を使用したA区とプレート式熱交換器（M3-FG、アルファ・ラバル社製）により低水温化させた表層水を使用したB区を設けた。成熟藻体を採取してから実験に供するまで、数時間空气中に曝した。100 Lのアルテミア培養水槽2基に藻場全体から無作為に採取した多数の枝を分配し、それぞれ約1 kgとなるように収容した。換水率は約20回転／日に設定し、両区ともエアレーションを行った。

培養温度はデータロガー（Tidbitv2、HOBO製）で測定し、光量子束密度は光量子計（MDS MKV/L、JFE アドバンテック社製）で測定した。取水時の表層水と深層水の水温と塩分濃度とpHは、取水設備に備え付けてある水温計（R900-32、チノー製）、塩分計（MDM-310(S)、東亜 DKK製）pH計（HBM-

100A、東亜 DKK 製)で測定した。

2.3 実験2(干出の影響)の設定

干出実験においては、約3時間干出させた成熟藻体を用いたC区と干出させてない成熟藻体を用いたD区を設けた。100Lのアルテミア水槽2基に藻場全体から無作為に採取した約170本の枝を分配し、それぞれ約1kgとなるように収容した。換水率は約43回転/日に設定し、両区ともエアレーションを行った。培養温度・光量子息密度・塩分濃度・pHの測定方法は実験1と同じである。

2.4 実験3(水温・塩分濃度・pHの影響)の設定

水温・塩分濃度・pH実験においては、表層水を使用したE1、E2区と前述の熱交換器により低水温化させた表層水を使用したF区と熱交換により高水温化させた深層水を使用したG区を設けた。50Lのアルテミア水槽4基に藻場全体から無作為に採取した約250本の枝を分配し、それぞれ約650gとなるように収容した。換水率はそれぞれ約86回転/日に設定し、各水槽に6L/分のエアレーションを行った。培養温度・光量子息密度・塩分濃度・pHの測定方法は実験1と同じである。

2.5 幼胚の採集・計数

水槽の排水口に50μmの網目のプランクトンネットを取りつけて、水槽の底面に落下した幼胚を洗い流し、2~11日の間隔で採集した。

採集した幼胚は100mLの海水に加え静かに混合することにより浮遊させた。浮遊液から一部の海水(実験1では60μL~400μL、実験2、3では200μL)を抜き取り、液中の幼胚数を計数し、その数値を基に全量を算出した。

3. 結 果

3.1 実験1(水温・干出の影響)

実験期間64日間に採集された放出幼胚数は、表層水を使用したA区が約45万粒、低水温化させた表層水を使用したB区が約76万粒であり、合計放

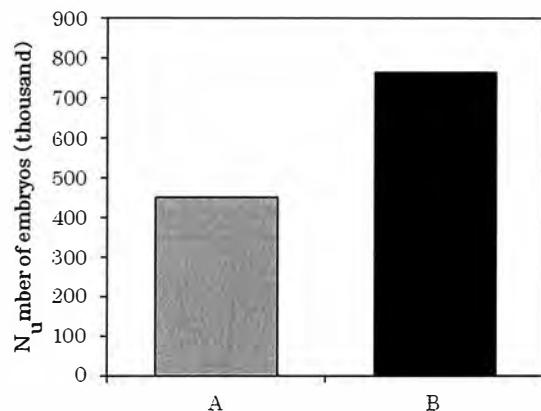


Fig. 1. Number of embryos released in each treatment in experiment 1.
A; Surface ocean water. B; Surface ocean water with temperature lowered via heat exchange.

出幼胚数はB区がA区の約1.7倍となった(Fig. 1)。A区とB区の累積値の間には有意差が認められた(Mann WhitneyのU検定(正規化検定): $p < 0.01$)。

放出幼胚数の推移はA区では15日目まで低く推移した後、16~18日目に多量に採集され、その後は低かった(Fig. 2)。B区では、A区と同じく15日目まで低く推移した後、16~18日目にA区以上に多量に採集され、低下しながら3つのピークを形成した(Fig. 2)。B区は概してA区を上回って推移していた(Fig. 2)。B区の幼胚放出回数は大きく分けて3回であった(Fig. 2)。

実験期間中の日平均水温はA区では約26.3~29.7°C、B区では約20.1~26.6°Cであり、両区の平均温度差は4.7°Cであった(Fig. 2)。取水時の表層水は約26.5~29.2°Cであり、A区は取水時表層水より0.28°C高かった(Fig. 2)。幼胚採集日間の平均光量子束密度は約98.1~362.2 μmol m⁻² s⁻¹、日平均塩分濃度は約32.8~34.1‰および日平均pHは約8.1~8.2の範囲で推移していた(Fig. 2)。

3.2 実験2(干出の影響)

実験期間4週間で採集された放出幼胚数はC区が約123万粒、D区が約104万粒であり、C区はD区の約1.2倍となったが、両区の間の累積値に有意差はなかった(Fig. 3)。実験開始後11日間では、C区の放出幼胚数が抑制されていた。しかし、12~15日目にはC区はD区を上回り、実験期間を通じ

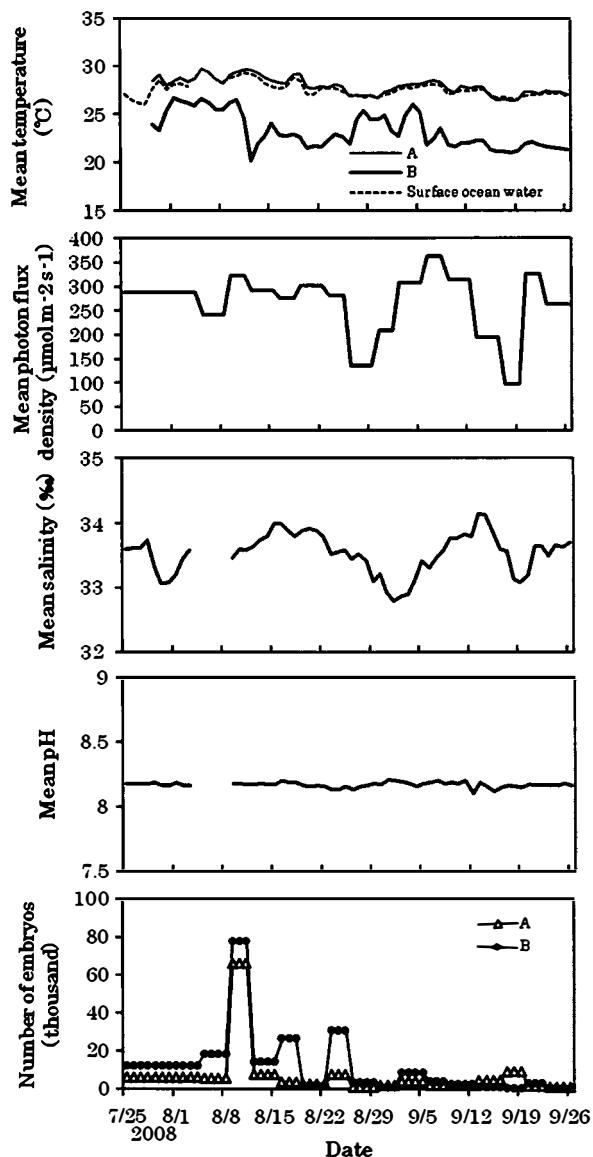


Fig. 2. Number of embryos released over time in experiment 1: effects of temperature, photon flux density, salt concentration, and pH.

A; Surface ocean water. B; Surface ocean water with temperature lowered via heat exchange.

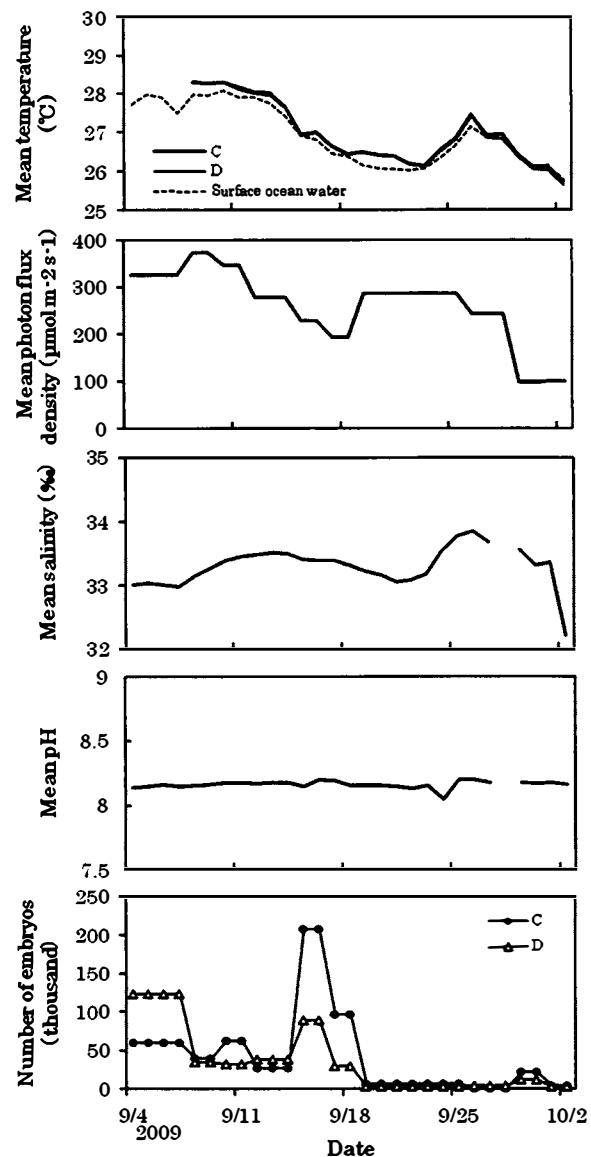


Fig. 4. Number of embryos released over time in experiment 2: effects of temperature, photon flux density, salt concentration, and pH.

C; Algae exposed to air for 3 h. D; Control.

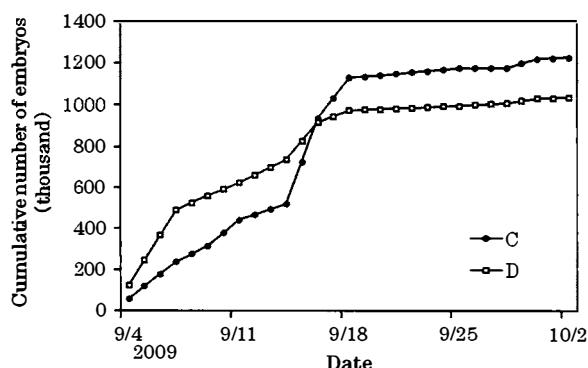


Fig. 3. Cumulative number of embryos released in each treatment in experiment 2.

C; Algae exposed to air for 3 h. D; Control.

た合計放出幼胚数はD区より若干多かった(Fig. 3, Fig. 4)。

実験期間中の日平均水温はC区が約25.7~28.3°C, D区が約25.6~28.3°Cの範囲で変動し、取水時の表層水は約25.8~28.1°Cで、実験水槽内の方が約0.17°C高かった(Fig. 4)。幼胚採集日間の平均光量子束密度は約97.7~372.2 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、日平均塩分濃度は約32.2~33.9%および日平均pHは約8.0~8.2の範囲で推移していた(Fig. 4)。

藻体の湿重量は両区とも直線的減少を示したが、C区の方が速く減少した(Fig. 5)。

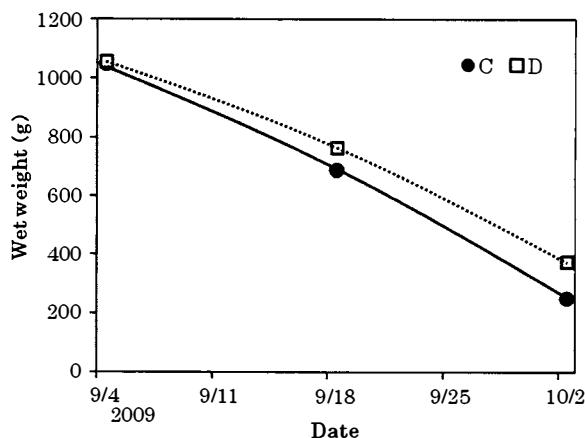


Fig. 5. Change in wet weight of algae over time in experiment 2.

C; Algae exposed to air for 3 h. D; Control.

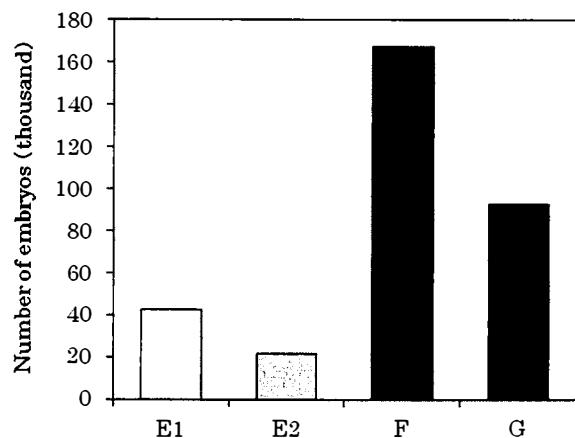


Fig. 6. Number of embryos released in each treatment in experiment 3.

E1; Surface ocean water. E2; Surface ocean water. F; Surface ocean water with temperature lowered via heat exchange. G; Heat-exchanged deep ocean water.

3.3 実験3（水温・塩分濃度・pHの影響）

実験期間4週間で採集された放出幼胚数は、E1区が約4.4万粒、E2区が約2.3万粒、F区が約16.8万粒、G区が約9.3万粒であり、F区とG区はそれぞれE1、E2区の平均値の約5.1倍、約2.8倍となつた(Fig. 6)。E1区とF区およびE2区とF、G区の累積値の間に有意差が認められた(Kruskal Wallis検定およびScheffeの多重比較： $p < 0.01$)。

F区とG区は同期して二つのピークを形成し、E1、E2区のピークより遅れて生じていた(Fig. 7)。F、G区の幼胚放出回数は大きく分けて2回であつた(Fig. 7)。

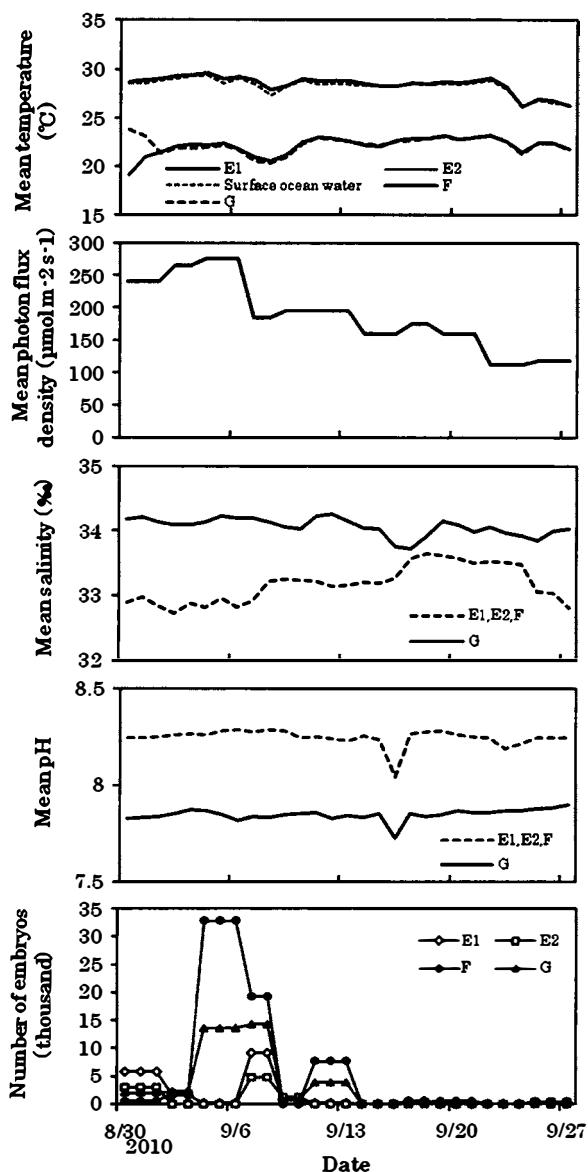


Fig. 7. Number of embryos released in each treatment in experiment 3: effects of temperature, photon flux density, salt concentration, and pH.

E1; Surface ocean water. E2; Surface ocean water. F; Surface ocean water with temperature lowered via heat exchange. G; Heat-exchanged deep ocean water.

実験期間中の日平均水温はE1区が約26.1～29.6°C、E2区が約26.2～29.7°C、F区が約19.1～23.2°CおよびG区が約20.3～23.9°Cで、取水時の表層水は約26.2～29.3°Cであった。取水時の表層水よりE1、E2区の方が約0.21°C高く(Fig. 7)、F区とG区の温度差は0.14°Cで、大きな差はなかった(Fig. 7)。幼胚採集日間の平均光量子束密度は約112.4～275.8 μmol m⁻² s⁻¹、日平均塩分濃度は表層水が約32.7～

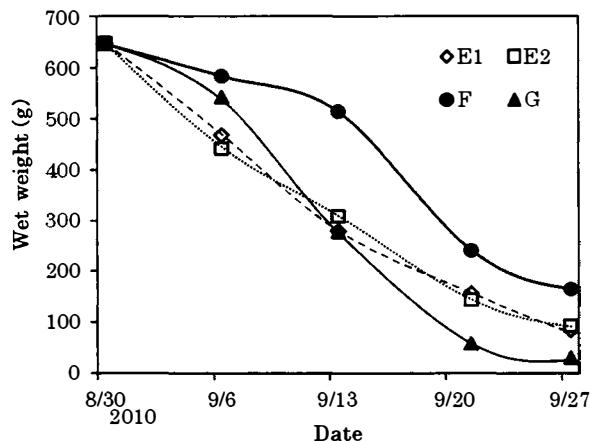


Fig. 8. Change in wet weight of algae over time in experiment 3.

E1; Surface ocean water. E2; Surface ocean water. F; Surface ocean water with temperature lowered via heat exchange. G; Heat-exchanged deep ocean water.

33.7%，深層水が約33.7~34.3%および日平均pHは表層水が約8.0~8.3，深層水が約7.7~7.9の範囲で推移していた（Fig. 7）。

藻体の湿重量は、E1, E2区は直線的な減少を示し、F区とG区は逆S字状曲線を描きながら減少した（Fig. 8）。F区はG区より減少が遅かったが、両区は並行するような動きを見せた（Fig. 8）。藻体重量は1週間後にはF区が最も多く、次いでG区、E1, E2区であったが、2週間後にはF区が最も多く、G区、E1, E2区がほぼ同量になった。さらに3週間以降は、F区が最大、G区が最少、E1, E2区はF区とG区の中間的な量となった（Fig. 8）。

4. 考 察

4.1 放出幼胚数

深層水を利用した藻場回復の方法として、1. 藻場衰退域の水温低下による植食動物の侵入防止や活力低下、2. 陸上施設における母藻の成熟促進や種苗育成および3. 藻場衰退域への栄養塩の供給、の3点が挙げられる（藤田、2006）。

2については、これまでにコンブの成熟を促進した例があり（松村・藤田、2002），本研究は項目2および海藻の生態の把握に関係している。

実験1では、放出幼胚数に及ぼす水温と干出の影響を調べた。その結果、放出幼胚数は温度低下により増加したが、光量子束密度、塩分濃度、pHの影響は特に見られなかった。日長は成熟に影響を与える重要な因子である（吉田、2003）が、短期的な光量子束密度の変動と放出幼胚数の間には関連性は認められなかった。実験3では放出幼胚数に及ぼす水温と水質の影響を調べた。放出幼胚数は熱交換により低水温化させた表層水実験区が表層水そのものを使用した実験区よりも多くなった。光量子束密度は強い影響を及ぼさなかった。これらのこととは、表層水より水温が低い方が、幼胚の採取に適していることを示唆している。温度が表層水より低くなることで枯死が遅れ、その結果として幼胚数が増加するものと考えられる。また、実験1と実験3の水温を参考にし、インキュベーターの温度を22°Cと28°C、光量子束密度を約47.5 μmol m⁻² s⁻¹、光周期を明期：暗期=14時間：10時間の2実験区を設定し、キレバモク1個体の近隣部分から採取した各区12個の同等の重量の生殖器床の放出幼胚数を比較したところ、温度の低い実験区で放出幼胚数が増加することの再現性が得られた（池部、2011）。また、この実験の放出幼胚数の累積値に有意差が認められた（Mann WhitneyのU検定（正規化検定）： $p < 0.01$ ）。この実験結果は、水温が低い方が幼胚の採取に適しているという上記の示唆を支持している。

実験2では放出幼胚数に及ぼす干出の影響を調べた。干出実験区の放出幼胚数は非干出実験区より若干多くなったが、光量子束密度、塩分濃度、pHは強い影響を及ぼさなかった。干出実験区では、実験開始後11日間、放出幼胚数は少なかったが、12~15日目には非干出区の放出幼胚数を上回り、合計の放出幼胚数は干出実験区より若干多かった。

実験2の放出幼胚数が最も多く、次いで実験1、3の順であった。放出幼胚数は藻体を採取する際の藻場の成熟段階に依存していると思われる。特に実験3の放出幼胚数が少ないのは実験3に供した藻体が、枯死・流失の進んだ藻場からの採取であったことによると思われる。

4.2 幼胚放出周期・同時性

実験1の幼胚数の推移において、表層水を使用した実験区では1つのピークが形成され、低水温化させた実験区では、3つのピークが形成された。低水温化させた実験区の幼胚放出回数は大きく分けて3回であった。両実験区において幼胚放出の同時性が観察された。

実験2では放出幼胚数に及ぼす干出の影響を調べた。実験開始後11日間、藻体を干出させた実験区では放出幼胚数が抑制されていた。また、実験1の際も開始から15日目まで放出幼胚数が抑制されていた。これらのことから、干出は放出幼胚数を抑制すると考えられた。干出とは藻体を空気中にさらすことであり、通常、キレバモクは空気中にさらされることはないと想定される。しかしながら、12～15日目に藻体を干出させた実験区は対照区の放出幼胚数を上回って推移した。このことから、数時間の干出は放出幼胚数を抑制するが、抑制後は、急速に放出幼胚数を増加させ、回復するものと考えられた。

実験3において、熱交換表層水を使用した実験区の放出幼胚数は熱交換深層水を使用した実験区の放出幼胚数を上回っていたが、両区とも同期して二つのピークを形成していた。また、両区のピークは表層水を使用した実験区のピークより遅れて生じていた。このことは、幼胚放出の周期の遅延は水温の低下により生じることを示唆している。

ノコギリモク *S.macrocarpum*、アキヨレモク *S.autumnale*、ヤナギモク *S.ringgoldianum* ssp. *coreanum*、ジョロモク *Myagropsis myagroides*、ヨレモク *S.siliquastrum* の生殖器床上に卵や幼胚が保持されるタイミングには同時性があり、潮汐周期と同期する種や同期しない種があることが報告されている（難波・奥田、1992）。卵や幼胚の保持の同時性は、密度効果により初期発生段階の個体の減耗を少なくする戦略である可能性との指摘もある（難波、2003）。また、タマハハキモク *S.muticum* の幼胚の放出は潮汐周期に同期するが、水深等が異なる環境

においてタイミングに若干の差異があることが報告されている（Monteiro *et al.*, 2009）。本研究においてはキレバモクの幼胚の放出に同時性が観察され、水温や干出により周期の差異が生じることが明らかとなった。

また、実験1と実験3においては放出幼胚数にそれぞれ3回と2回のピークが観察された。これらのことから、キレバモクには少なくとも3回の同時的かつ周期的な幼胚の放出が起こるものと考えられる。

4.3 枯死過程と放出幼胚数

実験2において、藻体の湿重量は藻体を干出させた実験区の方が若干少なかったため、干出が藻体の枯死を速めていると推察された。干出による影響で放出幼胚数が抑制された後、放出幼胚数が回復するとともに、枯死が若干速まったものと思われる。実験3において、表層水を使用した実験区の藻体の湿重量は実験2と同様に直線的に減少し、熱交換表層水と熱交換深層水の使用実験区における藻体湿重量は並行するような逆S字状曲線を描きながら減少した。逆S字状曲線を描くのは温度による影響であり、並行しつつ熱交換深層水を使用した実験区の方が速く減少することは塩分濃度・pH等の水質の差異による影響と考えられる。

西部北太平洋中層水の起源は、主にオホーツク海で沈み込んだ海水と考えられており（淡路、2006）、高知県海洋深層水研究所で取水される海洋深層水利用学上の深層水はこれに属すと考えられる。上記施設における表層水と深層水の観測によると、月平均塩分濃度の変動は表層水の方が深層水より大きく、深層水は約34%に安定的であることや、月平均pHは表層水が平均約8.2、深層水が平均約7.9で、安定的差異があることが認められている。窒素、リン、ケイ素の栄養塩類に関しても両海水に明らかな差異があることが報告されている（窪田ら、1990；川北ら、1995）。塩分濃度やpH等の水質の差異が成熟藻体にどのように作用しているかは不明であるが、2週間以降は通常の表層水や熱交換によって低水温化させた表層水より、熱交換表層水と同様の温度の深層水で培養した成熟藻体の枯死が速く進行するこ

とから (Fig. 8), 2週間以上培養する場合, 枯死状況の側面からは, 深層水よりも表層水の方がキレバモクに適している可能性も考えられる。

5. まとめ

本研究では, 生殖器床を形成したキレバモクについて, 水温および干出等の条件の差異による幼胚放出の特徴を明らかにし, キレバモクの再生産に関する生態学的知見を得ることおよび深層水を利用した幼胚採集方法を確立することを目的とした。結論として, キレバモクの幼胚の放出に同時性が観察され, 水温や干出により周期の差異が生じることおよび深層水の低温特性を利用して表層水を低水温化させることで, キレバモクからより多くの幼胚を獲得することが可能であることが明らかとなった。

参考文献

- 淡路敏之 (2006) 日本列島周辺の海洋深層水・海洋深層水利用学, (藤田大介・高橋正征編), 成山堂書店, 東京, 10-14.
- 藤田大介 (2006) 藻場造成・海洋深層水の多面的利用, (伊藤慶明・高橋正征・深見公雄編), 恒星社厚生閣, 東京, 79-90.
- 池部慶太 (2011) キレバモク1個体に由来する生殖器床の幼胚放出に対する温度の影響, 平成23年度瀬戸内海ブロック水産業関係研究開発推進会議生産環境部会・増養殖部会合同部会 議事要録関連資料, 42-45.
- 川北浩久・田村光政・澤村淳二・上野愛理・山口光明・上野幸徳・岡村雄吾 (1995) 海洋深層水利用のための基礎調査(第2報), 高知県工業技術センター研究報告, 26, 8-12.
- 窪田敏文・村田宏・森山貴光・田島健司・山重政則・明神寿彦・宮本猛 (1990) 深層水の物理的環境の解明に関する研究・海洋深層資源の有効利用技術の開発に関する研究(第I期)成果報告書, 71-81.
- 松村航・藤田大介 (2002) 海洋深層水培養コンプの介生生长に基づく自給型アワビ養殖の提案, 海深研, 3, 53-63.
- Monteiro, C., Engelen, A. H., Serrão, E. A. and Santos, R. (2009) Habitat differences in the timing of reproduction of the invasive alga *Sargassum muticum* (Phaeophyta, Sargassaceae) over tidal and lunar cycles. Journal of phycology, 45, 1-7.
- 難波信由・奥田武男 (1992) 福岡県津屋崎に生育するホンダワラ類5種の卵放出, 日本国水産学会誌, 58, 659-663.
- 難波信由 (2003) 生殖細胞, 発芽体の特性, 藻場の海藻と造成技術, (能登谷正浩編), 成山堂書店, 東京, 1-9.
- 野呂忠秀 (1993) *Sargassum alternato-pinnatum* Yamada (キレバモク), 藻類生活史集成 第2巻 褐藻・紅藻類, (堀輝三編), 内田老鶴園, 東京, 154-155.
- 田井野誠也・田中幸記・平岡雅規 (2009) 高知県沿岸域藻場分布調査, 高知県水産試験場報告書, 158-178.
- 吉田吾郎 (2003) ホンダワラ類の成長・成熟の季節性と環境要因, 藻場の海藻と造成技術, (能登谷正浩編), 成山堂書店, 東京, 180-189.
- 吉田吾郎・堀正和・崎山一孝・浜口昌巳・梶田淳・西村和雄・小路淳 (2010) 濑戸内海の各灘における藻場・干潟分布特性と主要魚種漁獲量との関係, 水産工学, 47, 19-29.
- 吉村拓・桐山隆哉・清本節夫 (2006) 変わりゆく九州西岸域の藻場, 海藻を食べる魚たち, (藤田大介・野田幹雄・桑原久実編), 成山堂書店, 東京, 33-47.

(2012年8月14日受付; 2013年2月3日受理)