

# ホンダワラ類増殖方法の確立による藻場再生支援

池部 慶太

## 1 背景と目的

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479haから2006~2010年の64haへ)、約300ha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年頃からは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等の条件が及ぼす影響を把握するとともに、キレバモク1個体由来する生殖器床の幼胚放出に及ぼす温度の影響およびキレバモクの雌雄性と年齢について調べた。これらの研究において、キレバモク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・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。雌雄性については、キレバモクは雌雄同株であるという既知の知見を確かめることとし、キレバモクの年齢については、筆者が調べた限りでは、既知の知見は見当たらなかったため、新たな知見になるものと思われる。

## 2 キレバモクの再生産過程における温度・水質の影響

### 2.1 材料と方法

#### 2.1.1 生殖器床を形成したキレバモクの採取

平成22年8月30日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28m×40m)(写真1)から成熟期のキレバモクを採取し、実験(水温・塩分濃度・pHの影響)に供した。この時は、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。

#### 2.1.2 実験設定(水温・塩分濃度・pHの影響)

水温・塩分濃度・pH実験においては、表層水を使用したE1、E2区とプレート式熱交換器(M3-FG、アルファ・ラバル社製)により温度

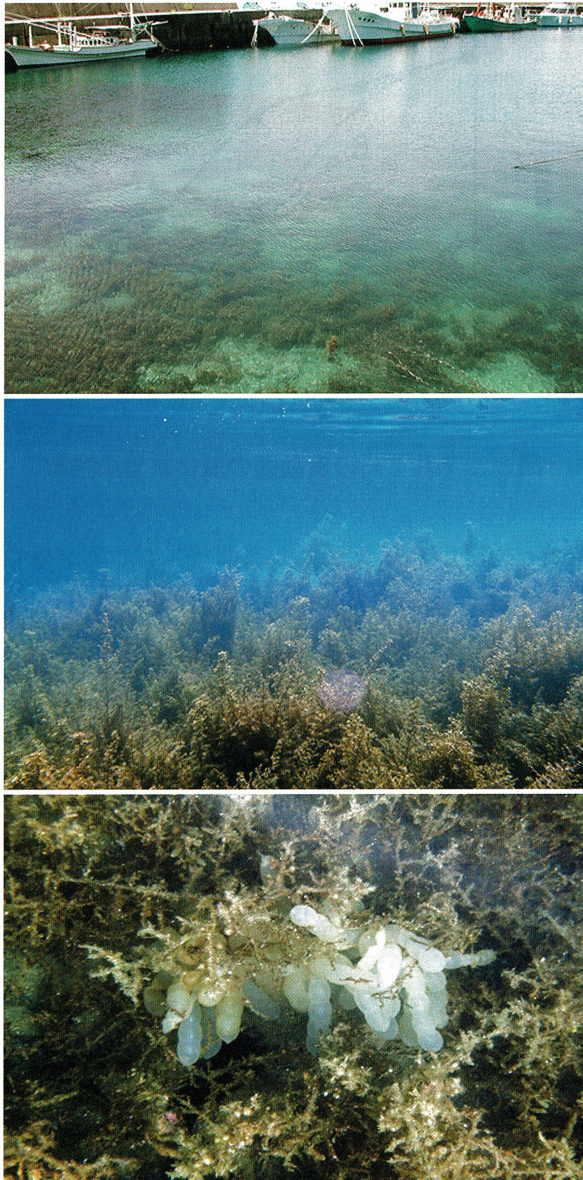


写真1 加領郷漁港のキレバモク藻場

3段目の写真：藻場に産み付けられたアオリイカの卵

を低下させた表層水を使用したF区と熱交換により温度を上昇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。

飼育水の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

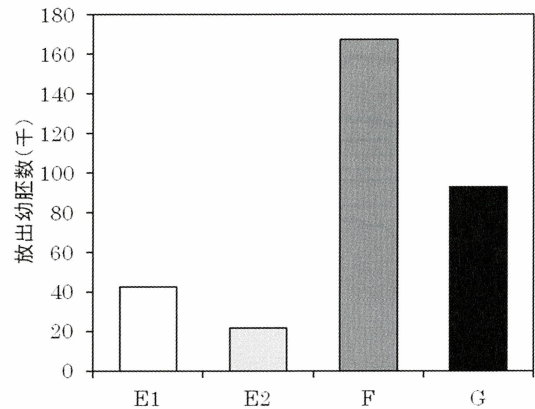


図1 それぞれの実験区の放出幼胚数

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。

### 2.1.3 幼胚の採集・計数

水槽の排水口に50 $\mu$ m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60 $\mu$ L～400 $\mu$ L、実験2、3では200 $\mu$ L）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。

## 2.2 結果

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倍となった（図1）。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（図2）。F、G区の幼胚放出回数は大きく分けて2回であった（図2）。

実験期間中の日平均水温はE1区が約26.1～29.6 $^{\circ}$ C、E2区が約26.2～29.7 $^{\circ}$ C、F区が約19.1～

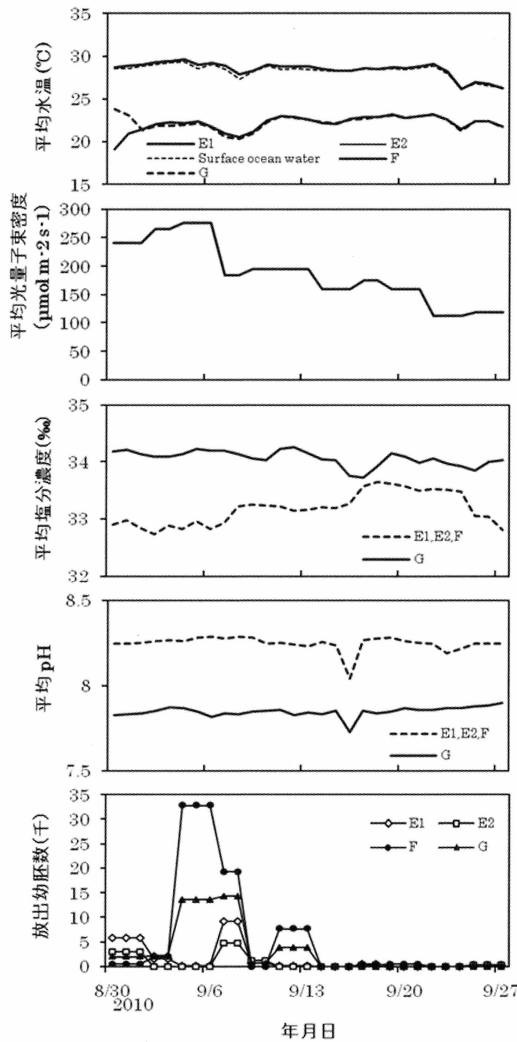


図2 それぞれの実験区の放出幼胚数の推移と水温、塩分濃度、pHの推移

23.2℃およびG区が約20.3~23.9℃で、取水時の表層水は約26.2~29.3℃であった(図2)。取水時の表層水よりE1、E2区の方が約0.21℃高く、F区とG区の温度差は0.14℃で、大きな差はなかった(図2)。幼胚採集日間の平均光量子束密度は約112.4~275.8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、日平均塩分濃度は表層水が約32.7~33.7%、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(図2)。

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(図3)。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(図3)。藻体重量は1週間後にはF区が最も多く、次いでG区、

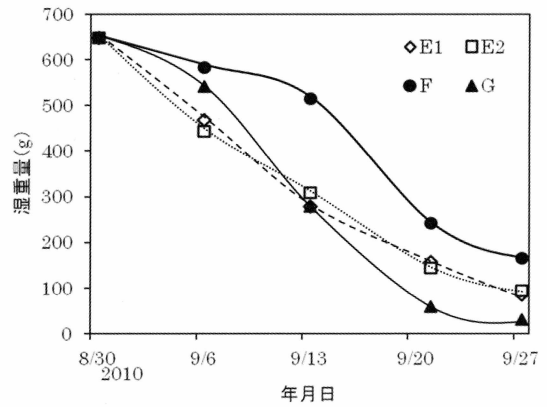


図3 それぞれの実験区の藻体重量の推移

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(図3)。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(図3)。

## 2.3 考察

### 2.3.1 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。

実験では放出幼胚数に及ぼす水温と水質の影響を調べ、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。日長は成熟に影響を与える重要因子である(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。これらのことは、表層水より水温が低い方が、幼胚の採集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。

### 2.3.2 幼胚放出周期・同時性

実験において、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、水温により周期の差異が生じることが明らかとなった。

また、先の実験（池部、2011）と今回の実験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。

### 2.3.3 枯死過程

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、安定的の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で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（図3）、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。

## 3 キレバモク1個体に由来する生殖器床の幼胚放出に及ぼす温度の影響

### 3.1 材料と方法

#### 3.1.1 生殖器床を形成したキレバモクの採取

平成23年8月12日に、上記のキレバモクの藻場（約28m×40m）から成熟期のキレバモクを採取した。

#### 3.1.2 生殖器床の採取

1個体の成熟藻体の上部の枝に形成された生殖器床を採取した。近隣に形成され、大きさが類似した生殖器床を対で切り取った。両実験区に供試した生殖器床の重さの平均値は22℃区が0.0181g、28℃区が0.0190gである。

#### 3.1.3 実験設定

先の報告における実験（池部、2011）と上記の実験の水温を参考にし、インキュベーターの温度を22℃と28℃に、光量子束密度を約47.5  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ に、光周期を明期：暗期＝14時間：10時間に設定し、温度差のある2つの条件を整えた。24wellプレートに1.5mLellで滅菌深層水を分注し、各実験区において、各wellに1つずつ合計12個の生殖器床を収容した。プレートをそれぞれの実験区に設置し、120rpm、振幅幅約3.0cmで振と



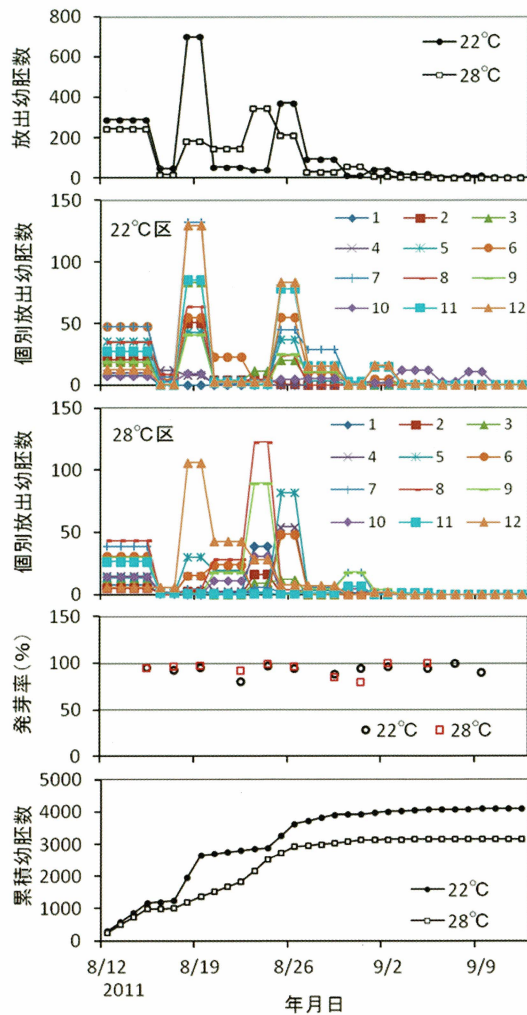


図4 それぞれの実験区の放出幼胚数・個別放出幼胚数発芽率(%)・累積幼胚数の推移

うした。

### 3.1.4 幼胚と不伸長胚の計数

2～3日ごとに生殖器床を新たなwellに移し、2～3日間に生殖器床から放出された幼胚を計数した。それとともに、放出後、1～2週間が経過してから不伸長胚を計数した。

### 3.2 結果と考察

合計放出幼胚数は22℃区が4102粒、28℃区が3149粒であり、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(図4)。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

の採集に適しているという先の実験(池部, 2011)と上記の実験から得られた示唆を支持している。生殖器床に付着したままの胚は22℃区で689個、28℃区で739個であった。

22℃区においては比較的明瞭な二つのピークが形成され、28℃区においてはピークが形成される場所はまばらであった(図4)。従って、28℃区より22℃区の方が、同時性がより強いと考えられた。

両実験区とも、発芽率((幼胚数-不伸長胚数)/幼胚数)は、概ね95%付近で推移した(図4)。平均発芽率は、22℃区が94.6%、28℃区が95.2%であり、両実験区には、ほとんど差がなかった。従って、シャーレ内では、今回の実験で設定した温度差は発芽率に影響を与えないと考えられた。また、発芽率が高いことから受精率も高いと判断されるため、実験に供試した成熟藻体は雌雄同株であり、一つの生殖器床に造精器と生卵器が存在すると考えられた。

## 4 キレバモクの雌雄性

### 4.1 材料と方法

平成22年7月28日に、上記のキレバモクの藻場(約28m×40m)から無作為に63本の枝を採取した。それぞれの枝から2～3個の生殖器床を切り取り、10%ホルマリン海水の中へ保存した。実体顕微鏡下で雌雄性を観察した。

### 4.2 結果と考察

63本の枝から切り取った生殖器床のすべては、生殖器床上と内部もしくは内部のみに卵を保有していた(写真1、2)。63個体すべての生殖器床が内部に卵を保有し、生殖器床上に卵の付着があったものは49個体、卵の付着がなかったものは14個体であった。雄性のみを示す株は存在しないか、極めて少ないものと思われた。従って、この藻場のキレバモクも雌雄同株である可能性が高い。

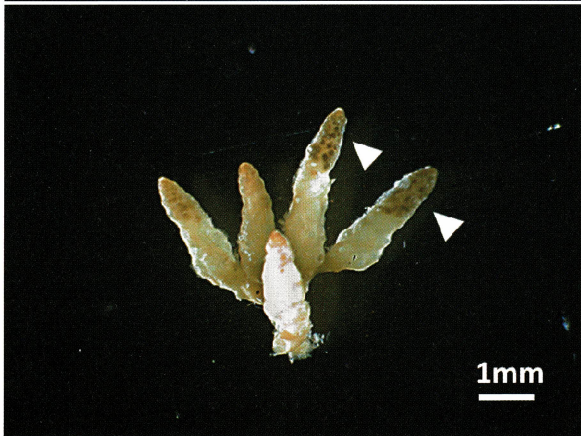
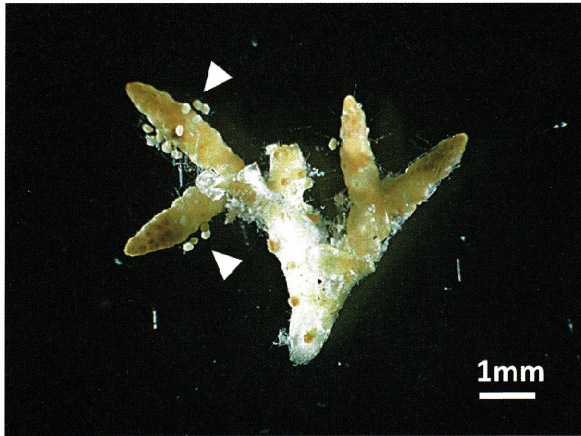


写真2 キレバモクの生殖器床

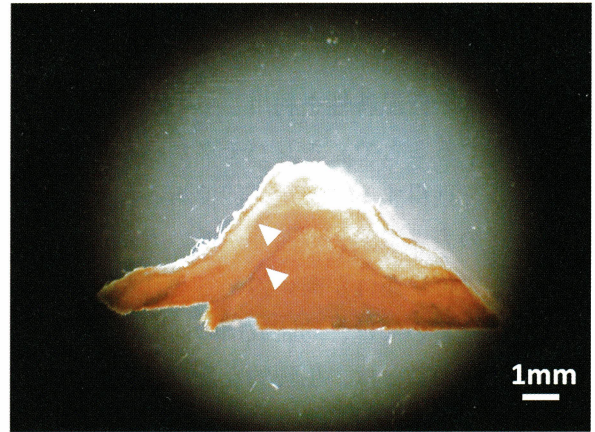


写真3 キレバモクの假根部の切片

## 5 キレバモクの年齢

### 5.1 材料と方法

#### 5.1.1 假根輪の計数

平成22年7月27日に上記の藻場で9個体のキレバモクを採取し、表層水をかけ流した100Lアルテミア水槽内で飼育した。平成22年12月22日と12月28日に假根部を切り出して切片を得るとともに、10%ホルマリン海水中に保存した。その後、実体顕微鏡下で假根輪を計数した。

#### 5.1.2 飼育試験

熱交換深層水をかけ流した熱交換深層水区と熱交換表層水をかけ流した熱交換表層水区と表層水をかけ流した表層水区を設け、各区で30Lの円形水槽1基を使用し、エアレーションを行った。平成22年6月に、上記の藻場で採取したキレバモクを3個体ずつ各区に収容し、飼育を開始した。

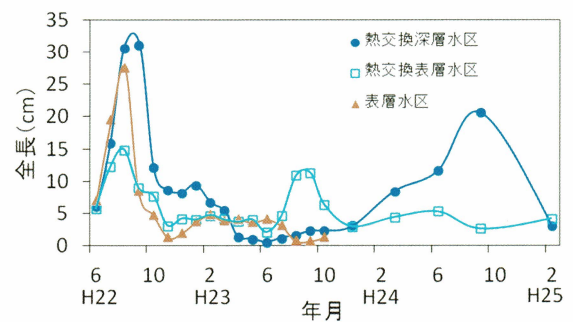


図5 それぞれの実験区における生存期間最長個体の全長の推移

### 5.2 結果と考察

9個体の假根部の切片を観察したところ、假根輪の数は、0～2であり、1年目が3個体、2年目が4個体、3年目が2個体であった。従って、1年から3年までの藻体が存在すると判断された。例として、写真3に假根輪が二つある個体を示した。また、飼育試験では、熱交換深層水区と熱交換表層水区では平成25年2月時点で生存は3年目であり、表層水区では最長で2年目まで生存した(図5)。これらのことからキレバモクは多年生であると考えられた。

## 6 まとめ

- ・ 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。
- ・ 現在の表層水温より温度が低い方が、キレバモクの再生産性が高いのかもしれない。
- ・ 28℃においては、幼胚放出の同時性が減少した。このことは、生理的な変調が生じたことを意味するかもしれない。
- ・ キレバモクの幼胚の放出に同時性が観察された。
- ・ 水温により幼胚放出周期の差異が生じた。
- ・ 発芽率と受精率は両実験区とも高く、これらに22℃と28℃の間の温度差による大きな影響はないと考えられた。
- ・ 高知県加須郷漁港に群生するキレバモクも雌雄同株である可能性が高い。
- ・ キレバモクは多年生である。

## 7 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) 藻場再生を目指したホンダワラ類の大量種苗生産・蓄養手法の開発. 平成23年度 高知県海洋深層水研究所報 第9号, 35-42
- 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ブの介生生長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., Serrao, 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), 内田老鶴圃, 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) 瀬戸内海の各灘における藻場・干潟分布特性と主要魚種漁獲量との関係. 水産工学, 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