

外洋性岩礁域の主要介類の成熟、産卵、着底加入過程に及ぼす温暖化の影響評価に関する研究

独立行政法人水産総合研究センター

日本海区水産研究所	海区水産業研究部	海区産業研究室	林 育夫
西海区水産研究所	海区水産業研究部	沿岸資源研究室	吉村 拓

(研究委託先)

長崎大学水産学部

中田英昭

秋田県水産振興センター

中林信康

平成16～17年度合計予算額

20,953千円

(うち、平成17年度当初予算額

8,980千円)

[要旨] 本研究は、対馬暖流の影響下にある東シナ海の一部と日本海全体において、水温環境に強く反応する、成熟、産卵、着底加入という生命活動を、主要介類で時空間的に解析し、温暖化の影響評価と将来のモニタリング手法の開発に貢献することを目的としている。対象動物として、サザエ、オオコシダカガンガラ、ウラウズガイの潮下帯に優占する貝類を用い、東シナ海沿岸と日本海の西部、中北部、北部において、生殖腺の季節変化により成熟、産卵過程を調べた。加入過程では対馬暖流域の南部でサザエ、イセエビ、日本海中北部でサザエ、オオコシダカガンガラを対象とした。これらの調査地に補足的な地点を加えて、連続的な水温観測体制を確立し、水温の変動傾向を解析した。その結果として、季節的成熟過程と産卵時期のパターンは、3種の巻貝とも地理的には変化するが、同一地域では種間の差は少なく、同じような傾向を示した。北部海域では成熟は水温の上昇と連動して進行し、極めて短期間に集中的な産卵が行われ、南部海域では一度の産卵の規模は小さくなり産卵の早期化と長期化が認められた。地理的な成熟過程の変化から、冬季の最低水温の10～13℃の間で成熟パターンが大きく変わる可能性が示唆された。しかし、特に南部の産卵パターンは複雑で経年変動も大きく、成熟過程での水温変化も関与していることが推定された。サザエの加入では、南部と北部では成熟と産卵のパターンが異なるにも拘わらず、同じ時期に着底加入が行われたことが推測された。オオコシダカガンガラは、2005年には産卵期が比較的長いにもかかわらず、短期間の加入による稚貝の出現が見られたので、特定の時期に産卵されたものだけが加入したものと判断された。イセエビでは、水温18～20℃に達した時期に加入が始まり、通常は加入期ではない12月でも、水温の再上昇に伴って小規模ながら加入が見られた。これらのことから、温暖化によって春から夏、あるいは秋から冬の水温が上昇するならば、加入期間が長期化する可能性が示唆された。2003年と2004年の6調査点のデータに基づき、日本海の水温の時空間的変動を調べたところ、季節的な水温の時空間変動の状況が両年で大きく相違していることが分かった。断片的で短期間のデータではあるが、このような水温環境の大きな違いは、今後、岩礁生物の成熟、産卵、着底加入過程などの比較を行う場合に極めて重要なことと考えられた。また、比較的長期のデータがあり、近接しているが島と本土沿岸に位置する新潟県粟島と山形沿岸の由良について水温の時系列解析を行い、水温上昇のトレンドの有無を調べたところ、経年的な水温の変動傾向はほぼ類似していたが、本土側では季節的な変動幅が大きく、産卵・成熟過程を調べるための島嶼、半島先端といった場所選定が的確であった

ことを裏付けた。これらの解析から、生物情報とともに水温データも、まだ短期間のものでし
かなく、長期の収集の必要性が認識された。

[キーワード] 対馬暖流域、日本海、浅海岩礁域、主要介類の成熟・産卵・加入、時空間的変動

1. はじめに

成熟、産卵は生物の存続にとって最も重要で、基本的な営みの一つである。また、加入は、生
まれた個体が親と同じような生息場所で生息し始める出発点である。特に底生性の海産無脊椎動
物には、卵から孵化した個体が一定の浮遊期をもち、その後変態・着底し底生生活に移行する生
活史を持つ種類が多く、初期加入と呼ばれる重要な時期がある。この時期は劇的に生活が変化す
るため後の生き残りに大きく作用し、水産的には将来の漁獲量に大きな影響を与える。一般に、
成熟という過程は、生殖器官の化学変化であるため、その発達が水温変動に極めて直接的に支配
され、水温の上昇に伴い促進をもたらす。産卵は水温上昇により時期の早期化、期間の延長など、
パターン変化をもたらす。着底加入は成熟、産卵ほど直接的な水温の影響は受けないが、その時
期と加入個体数の変化により、食害、餌の供給量、季節的環境変化などへの耐性が異なり、結果
として資源への添加に重大な影響を与える。

一方、対馬暖流は九州西岸から日本海に入り、日本海の西部と北部の本州沿岸を流れて北海道
に達する。この対馬暖流は太平洋側の黒潮と比べて勢力は弱いものの、東シナ海から対馬海峡の
日本側の東水道を通った沿岸分枝と呼ばれる流れは、日本海での対馬暖流の主軸として極めて安
定した流れとなっている。この沿岸分枝は、日本海では沿岸水が発達しないため、日本海沿岸域
の表層から水深 100m までを直接的な影響下におき、北上するにつれて僅かずつ水温が低下する
という環境傾度を有していることが明らかにされている。さらに、日本海沿岸は自然環境が比較
的安定して保たれた場所が多く、とりわけ外洋にある浅海岩礁域の磯根漁場は人間活動による影
響が少ない場所にあり、長い期間にわたり安定した生物影響調査を遂行するのに適している。ま
た、伝統的に自然と調和した個人による採捕漁業が行われており、環境の保全が強く望まれる場
所でもある。しかし、今までこのような一般的な海産無脊椎動物の生命活動とグローバルな地理
的特性に注目して、温暖化や水温変動による影響について調査研究された事例はない。

2. 研究目的

本研究では、海産動物に生じている、または今後生じる可能性のある地球温暖化の影響評価を
目的として、対馬暖流の影響下にある東シナ海の一部と日本海の沿岸域を、生物・物理的環境条
件の野外実験施設とみなし、特に水温という環境要因に強く反応する、成熟、産卵、着底加入と
いった海産動物の重要な生命活動の時期・過程に係る科学的情報を、主要介類について個体群レ
ベルで時空間的に解析する。対象生物として、外洋に面して、環境が保護され安定している浅海
岩礁域に多数生息し、産卵してから一定の浮遊期を経た後に変態・着底し、底生生活に移行する
複数種をとりあげる。一部は水産的な漁獲生物となっている種も含めるので、水産資源変動の基
礎的情報ともなり、多数出現する種を選ぶことによるサンプリングの利便性と継続性を考慮に入
れている。また、これらの外洋性浅海岩礁域の生物調査海域において連続的な水温観測を実施し、
成熟、産卵、着底加入時期の水温環境を知るとともに、時空間的変動様式を明らかにする。

本研究により、温暖化という物理的な海洋環境変化が海洋生物の生存に重要な時期におけるインパクトについて、科学的な基準が得られ評価が可能となり、さらに海洋生物に対する温暖化の影響の予測および簡便かつ有効な生物モニタリング手法として、日本海のみならずグローバルな温暖化の進行監視手法の一つとして将来の発展・貢献が期待できる。

3. 研究方法

本研究は、北上するにつれて水温が低下するという環境傾度を持つ対馬暖流の沿岸岩礁域において、水温変化と主要介類の成熟、産卵、着底加入過程の変動を時空間的に調べることにより、地球温暖化が海産動物に与える影響を評価しようとするものである。そのため、調査の利便性も考慮に入れ対馬暖流の流域に沿って南から北へ横断的に配置することとし、沿岸水の影響を比較

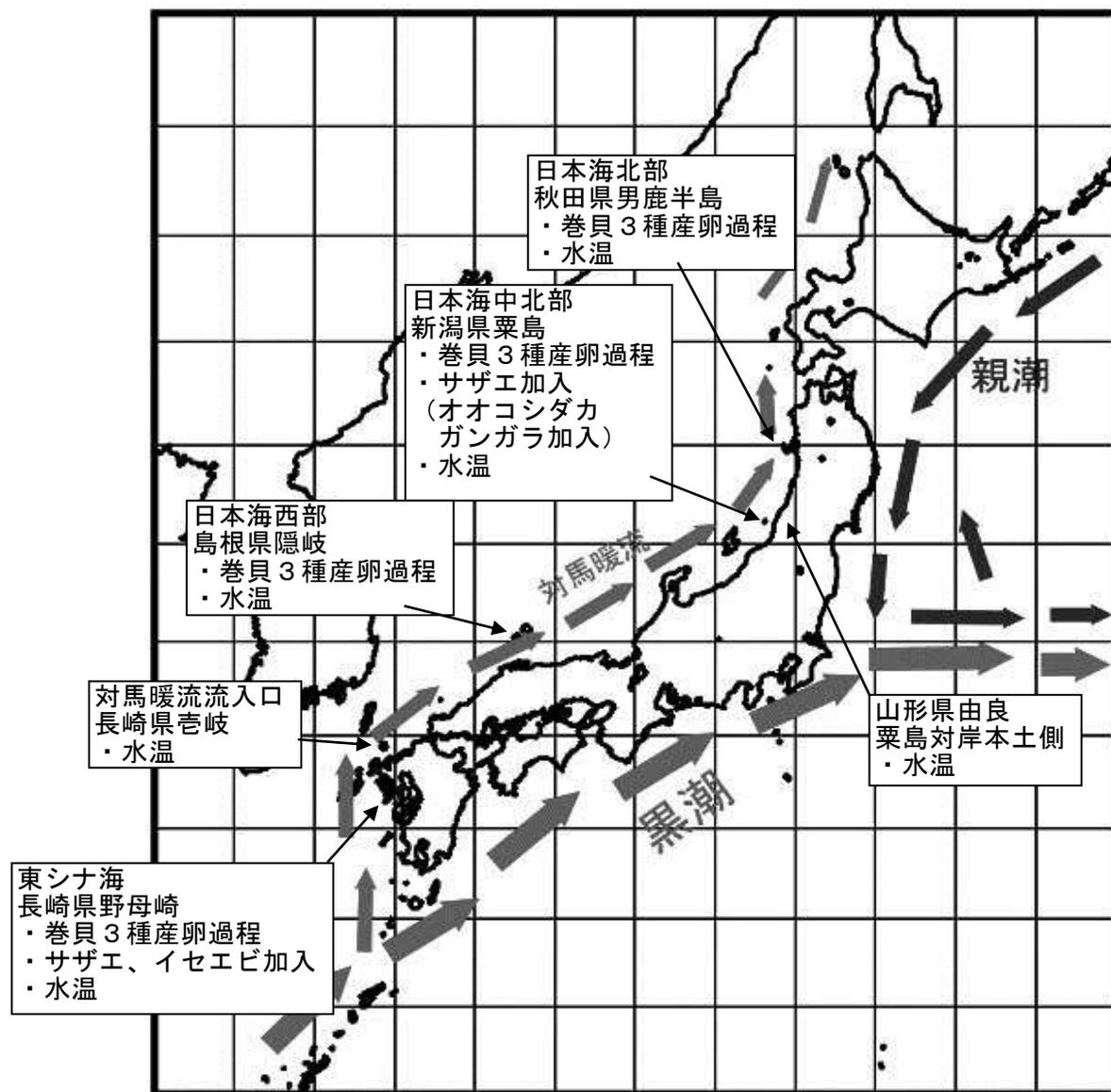


図1 調査地と調査項目

的受けにくい半島先端や日本海の沖合に点在する島嶼を調査地として選んだ。調査場所、調査項目、対象動物を図1に示した。

(1) 成熟、産卵過程

①採集地と方法

大きく変動する気温に直接晒されない潮下帯（干潮時にも露出しない水深帯）に豊富に生息する磯根動物の中から植食性巻貝3種（サザエ、オオコシダカガンガラ、ウラウズガイ）を選び調査対象動物とした。これらの巻貝は日本海に広く分布し、岩礁域に優占するので、同一の狭い採集域で長期間にわたり定期的かつ多数のサンプル採集が可能である。採集地は、東シナ海の九州沿岸（長崎県野母崎）、日本海西部（島根県隠岐島）、中北部（新潟県粟島）、北部（秋田県男鹿半島）の4地点で、成熟期～産卵期～回復初期と推定される4月から10月までを重点的に調べることにした。2004年には毎月中旬のできるだけ同時期に、潜水により水深3～7mの範囲内で3種の巻貝を採集した。ただし、隠岐のサンプルだけは漁業者に依頼したため、5月より開始することになった。2005年には2004年の結果を踏まえて、南方の野母崎と隠岐の調査地点では採集期間を1～2ヶ月長くするようにした。なお、調査地北端に位置する秋田県男鹿半島では、2004年～2005年にかけての冬季にも1ヶ月半の間隔で採集を行い、産卵周期の周年にわたるデータを得るようにした。採集個体は確実に成熟サイズに達している必要があるので、サザエでは殻高65mm以上（最適範囲：70-80mm）、オオコシダカガンガラでは殻径35mm、殻高32mm以上（同：38-42mm、34-38mm）、ウラウズガイでは殻高18mm以上（同：20-23mm）のものをそれぞれの種で30個体程度採集した。採集個体は25個体をさらに選別し、調査現地で、あるいは現場から生きたまま送付し、実験室において、サイズを測定後に固定液が軟体部内部まで浸透するように殻を割り、10%ホルマリン海水で固定した。この時、サザエについては、殻の口が大きく軟体部を摘出しやすいので、その重量を測定後、生殖腺を含む内蔵の一部だけを固定した。

②生殖腺指数の測定

ホルマリンに1ヶ月以上保存して軟体部が十分に固くなってから、オオコシダカガンガラとウラウズガイは1N-塩酸で殻を溶かし軟体部を取り出し、さらに数日間ホルマリンに保存した。

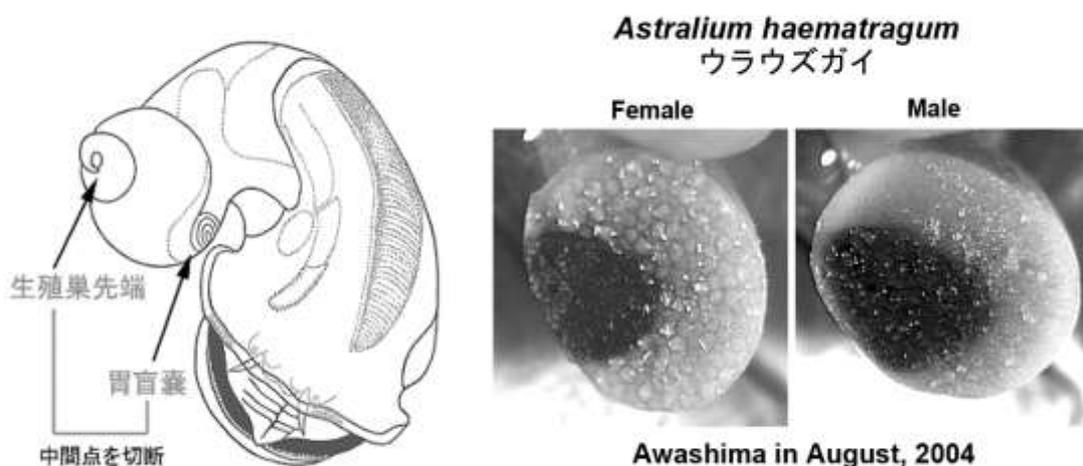


図2 生殖腺の切断部位（サザエ）と生殖腺断面（ウラウズガイ：黒い部分は中腸腺を示している）

その後、生殖腺の先端（螺旋状突起の先端部）から胃盲嚢の中間で切断し、その全断面積（生殖腺は中腸腺の外周にリング状に発達する）と生殖腺断面積を画像解析機により測定し、生殖腺指数を次式により算出した（図2）。

$$\text{生殖腺指数 (Gonad Index)} = (\text{生殖腺断面積} / \text{全断面積}) \times 100$$

この指数は成熟に伴い中腸腺の外側に生殖腺が被厚するので増大し、産卵に伴い生殖腺内部が空洞となりその後萎縮し急激に減少するので、産卵周期を調べるのに極めて有効な方法である¹⁾。

(2) 加入過程

着底加入過程については、研究蓄積があり、ミクロな着底場所や条件が明らかになっているサザエとイセエビをまず対象動物とした。後から対象動物に加えたオオコシダカガンガラについては、同一種で亜種の関係にある太平洋岸に生息するバテイラで生息場所が知られているので²⁾、新潟県粟島で2004年には予備的に生息場所の確認作業を行い、2005年に稚貝の採集を潜水により行った。

サザエは産卵後1日以内に孵化し数日間の浮遊期を経て着底する³⁾。幼生の大きさは殻長300 μm 程度で極めて小さいが特有な形質から判別可能で、着底後もこの形質が残るとともに特有な殻を新たに分泌するので、着底初期稚貝の区別が着底直後から可能である⁴⁾。調査場所は、成熟産卵過程の調査を行っている新潟県粟島と調査地の中では最も対馬暖流の源流域に近い長崎県野母崎とし、着底基質として着底密度の高い有節石灰藻のカニノテ類が生えている場所を選んだ。粟島での産卵期が終了した時期を見計らってそれぞれ2004年と2005年の10月上旬と下旬に調査を行った。着底初期の稚貝は肉眼判別ができないので、採集は10cm方形枠内の有節石灰藻（図3）を水中で剥離し、藻体や基盤の一部ごとエアリフトで吸引し、250 μm メッシュの袋に收容した。採集したサンプルは現場にて10%のホルマリン海水に固定し、数日以内に70%エチルアルコールに交換して保存した。このように処理したサンプルは、後日、実体顕微鏡下でサザエの稚貝を選別し、殻径を測定した。また、採集面積としてカニノテ類の被度を写真の画像解析により算出し、採集個体をその単位面積あたりの密度とした。

イセエビについては、対馬暖流の源流域近くのみ分布しており、幼生の浮遊期が長期にわたるので、サザエと比較するため長崎県野母崎でサザエと並行して調査を行った。イセエビは、本

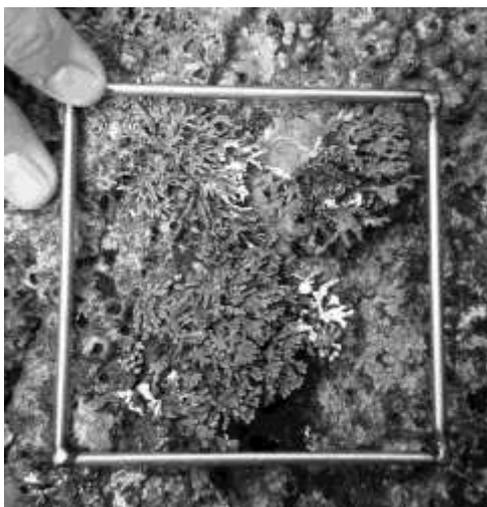


図3 サザエ稚貝を採集した有節石灰藻



図4 オオコシダカガンガラの稚貝が生息する環境

来日本海沿岸に生息せず、かつて行われた移植事業も失敗に終わった経緯があるが、近年数例の採捕報告が見られる⁵⁾。イセエビは、大型海藻の繁茂した陰にある岩盤の穴などの特定した場所を、着底後の隠れ場として選択することが知られている^{6,7)}。水深15m以浅のガラモ場（ホンダワラ類の群落）において、調査対象として選定したホンダワラ類の繁茂した転石とコンクリート製稚エビ礁を、スキューバ潜水により観察し、イセエビのポストラーバと第1期稚エビを、4月から12月頃まで、潜水調査可能な日を見計らい1週間から1ヶ月間隔でカウントした。これを転石と稚エビ礁の水中に露出している部位の全表面積に基づいて、密度に換算した。この方法では、ポストラーバは約1週間で第1期稚エビに変態、第1期稚エビは約2週間で第2期稚エビに脱皮するので、調査日の間隔が3週間より短い場合は、同一個体を重複カウントしている場合があり得る。ただし、ポストラーバと第1期稚エビの期間中に約70%が減耗することから、重複カウントの影響は少ないと考えている。

オオコシダカガンガラ稚貝は、粟島東岸の水深1～2mの表面が比較的きれいな小石の下面に生息することが確認された（図4）。2005年6月と9月に、このような小石が分布する場所で、潜水により大まかな面積を測定後、小石の表面上を肉眼で確認しながら、発見した稚貝を全て採集した。採集した稚貝は、陸上へ持ち帰り生きたまま殻径と殻高を測定した。これらの稚貝については、採集面積が大まかであったが採集努力はほぼ同じであったため、2回の採集における個体数増減の相対比較は可能であると判断されたので、生息密度は計算しなかった。

（3）水温測定

成熟、産卵過程を調査している4調査地に加えて、対馬暖流の日本海への流入域である対馬海峡の壱岐で水温の連続測定を行った。測定は、平均水面下5～7mの特出した岩盤側面に、ワイヤーロープなどで自記水温計（離合社：RMT-500）を固縛する方法により行った。ただし、島根県隠岐については複数の開口部があり、外洋水の交換がよい島前湾の湾口部の水深6mに水温計を垂下する方法をとった。測定間隔は10から20分で、原則として5月と11月頃に、岩盤面に設置した水温計は潜水により交換することにした。新潟県粟島では、調査の都合上毎年6月に交換することにした。さらに、日本海北部では、山形県沿岸の由良にイワガキ増養殖研究のために水温計が外洋に面した沿岸域に比較的長期間設置されており、これらのデータを使うことにより、新潟県粟島と近接する本土側との地理的な比較をするとともに日本海北部海域の長期変動傾向を解析した。

4. 結果・考察

（1）巻貝3種の成熟、産卵期

①サザエ（図5）

北方の粟島と男鹿半島では、水温の上昇とともに生殖腺が発達し、2004年と2005年ともに7月から8月にかけて急激な生殖腺の減少があり、大規模な産卵が行われたことを示した。しかし、一部の個体では、これらの産卵盛期前後にも産卵しており、2005年には産卵が2004年より1ヶ月ほど早く始まり遅く終わり、産卵期間が長くなった。隠岐では採集開始の5月には既に生殖腺は粟島や男鹿半島の最高レベルに達しており、2004年の6月には最大値に達し、徐々に減少し、2005年では同様な傾向を示したが、7月から8月にかけては前年より急激な減少が見られた。このことから、隠岐では6月から8月にかけて産卵盛期を迎え、6月から9月にかけて断続的に

産卵が行われるが、2005 年に見られるような大規模な産卵があると 8 月までにほぼ終了してしまう場合もあると判断された。南方の長崎県野母崎では、2004 年には 4 月から 10 月までの調査期間を通じて高い生殖腺指数の値を維持しているが、平均値と分散の増減が見られることから、この期間において散発的に産卵していることが推測された。2005 年も同様に高い水準を維持しており、9 月から 11 月の間に生殖腺指数の大きな減少が見られるので、ほとんどの個体が産卵したものと推測された。

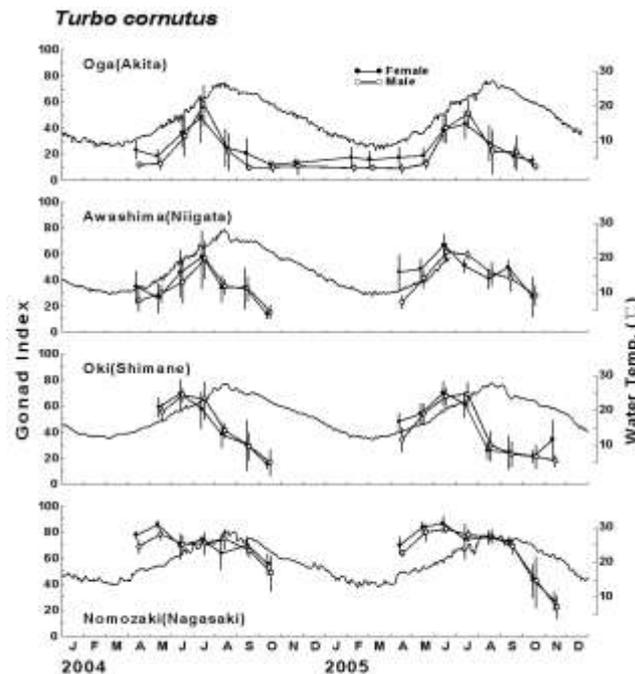


図5 サザエの生殖腺指数の季節変化

② オオコシダカガンガラ (図6)

サザエと同様に粟島と男鹿半島は同様な成熟と産卵の傾向を示した。2004 年には産卵は 8 月から 9 月にかけて大規模に行われたと判断されたが、6 月から 8 月にかけても一部の個体による産卵が認められた。特に 2005 年には、6 月から 7 月、8 月から 9 月にかけての産卵の 2 つのピークが顕著に見られた。粟島では 2004 年の成熟期において、生殖腺指数が男鹿半島より低い値を示したが、2005 年では両地点で同程度の値を示した。隠岐では 2004 年には 7 月から 8 月にかけて明瞭な産卵盛期があり、一部は 6 月から 7 月にかけても認められた。2005 年には前年より大きな産卵盛期は見られなかったが、生殖腺指数の平均と分散の変化から 5 月から 11 月にかけて小規模に断続的に産卵したものと判断された。最も南方の野母崎では周年を通して高い値が維持され、2004 年には 5 月から 10 月にかけて一部の個体による断続的な産卵があり、水温の季節変動に伴う顕著な産卵の周期性が認められなかった。また、採集開始の 4 月には既に生殖腺指数は高い値を示しており、冬季の低水温期でも生殖腺が発達することが推測された。2005 年も同様な傾向であったが、6 月から 7 月、8 月から 9 月、10 月から 11 月と高い値の中でも生殖腺指数が減少することが認められ、一部の個体による断続的な産卵が示唆された。

③ ウラウズガイ (図7)

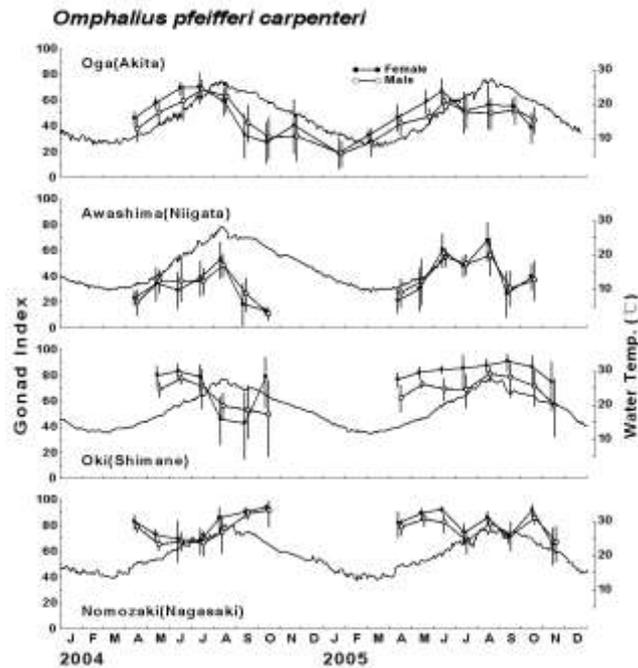


図6 オオコシダカガンガラ生殖腺指数の季節変化

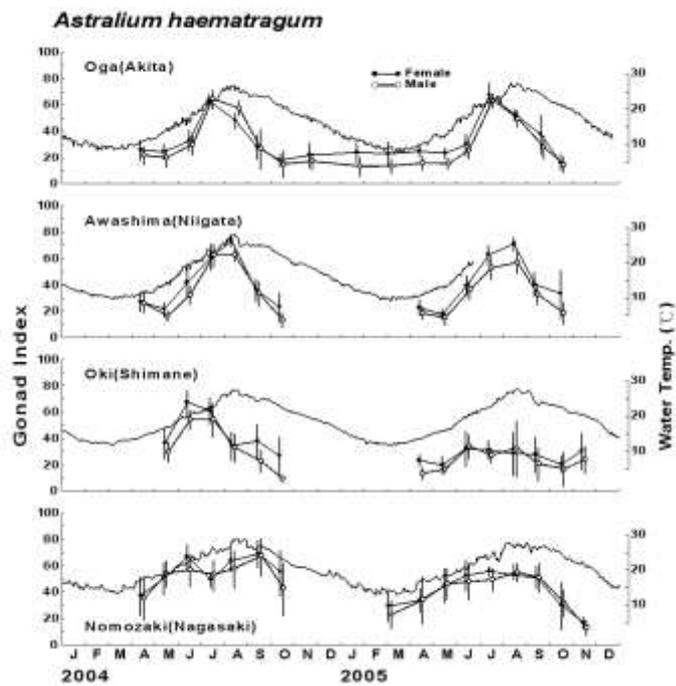


図7 ウラウズガイの生殖腺指数の季節変化

前2種と同様に北方の2調査地では2004年と2005年ともに同様な成熟、産卵パターンを示した。6月から7月にかけて急激に生殖腺が発達し、特に最も北方の男鹿半島で顕著であった。一部の個体において7月から8月にかけて産卵が認められたが、水温が最も高くなった8月から9月にかけて大規模な産卵が行われたと判断された。隠岐と野母崎では、6月まで成熟の促進がみられるが、生殖腺指数のばらつきが多いため一部の個体では断続的に産卵し、その後増減を繰

り返すため 10 月頃まで断続的に産卵するものと判断された。2004 年と 2005 年を総合して判断すると、両地点では春から秋にかけて、断続的に産卵し、ある程度のピークはあるものの、産卵の強度、時期が個体群として同調しないので、年によりまた時期により不規則に変化するものと推測された。

④ 3 種による温暖化の評価の有効性

全体として見た場合、3 種とも地域的に異なるものの同じような季節的成熟、産卵パターンを示した。地理的变化を見た場合、特に、北部海域の新潟県粟島と秋田県男鹿半島はほぼ同じパターンであったが、粟島と日本海西部の島根県隠岐の間で大きな違いが見られた。北部海域では成熟は水温の上昇と連動して進行し極めて短期間に集中的な産卵が行われた。一方、3 種ともに南部海域になるほど周年を通して高い生殖腺の発達が維持され、一度の産卵の規模は小さくなり産卵の早期化と長期化が認められた。しかしながら、水温変動が類似している男鹿半島と粟島の間でも微妙な成熟状態と産卵期の差が認められ、南部海域では多くの個体間のばらつきが見られた。また、経年変動も大きく年ごとに複雑なパターンを示した。このような傾向は、調査海域の水温差は必ずしも小さくなく、同様な傾向が外国でも報告されており¹⁾、温暖化によりどのような経緯を経て変化するかをみる必要がある。

産卵、成熟過程を同一調査地でみた場合、3 種とも同じような傾向を示すものの、さらに詳細に見ると種間で微妙な差も検出された。この差が将来の温暖化の影響評価やモニタリングに有効な種類を選出する際の重要な基準になると考えられる。ウラウズガイは他種と比較すると北部海域では最も水温が高い時期に産卵し、成熟も水温の上昇と 3 種の中で最も高く連動して推移している。南部海域でも、ある程度このような関係を示しているものの産卵が長期化、早期化している。個々の個体が散発的に産卵するのではなく、個体群としてある程度同調して産卵する一方、年により明瞭な産卵ピークが認められない場合も観察された。このような現象は本種が 3 種の中で、成熟、産卵に至る過程で最も温度要求量が高いという南方種的要素を持っていることを示している。すなわち、日本海北部海域では本種は再生産可能限界に近い低温度条件下にあり、温暖化により北方への分布が拡大したり、成熟、産卵パターンがサザエやオオコシダカガンガラのものにシフトしていく、すなわち早・長期化と産卵ピークが不安定になる可能性が考えられる。さらに、ウラウズガイは 3 種の中で最も小型で、サンプルの処理が極めて煩雑であるが個体数では最も豊富に生息しており、特に南部海域の野母崎では本種の採集は極めて短時間で可能であるが、他の 2 種では必要なサンプル数を集めるまで、1 回の潜水では数人のダイバーを必要とする。また、本種は水産的にも漁獲対象種となっていないので、実験的に採集するのに問題は少なく、調査対象として最も適していると思われる。これらのことは、2 年間の結果からの推測なので、今後の経年変化で確認していかなければならない。また、産卵パターンの変化は加入に大きな影響を与えると考えられ、温暖化が与える影響を評価する上でその関係を明らかにしていくことは極めて重要である。

(2) サザエ、オオコシダカガンガラ、イセエビの加入状況

新潟県粟島と長崎県野母崎で各々約 30 枠内のサンプルから採集されたサザエ稚貝の総数は、2004 年には粟島で 7 個体、野母崎で 16 個体と極めて少なく、2005 年にはそれぞれ 51 個体と 16 個体で、粟島で多く採集された。殻径サイズ組成は図 8 のようになり、2004 年では平均（±標準

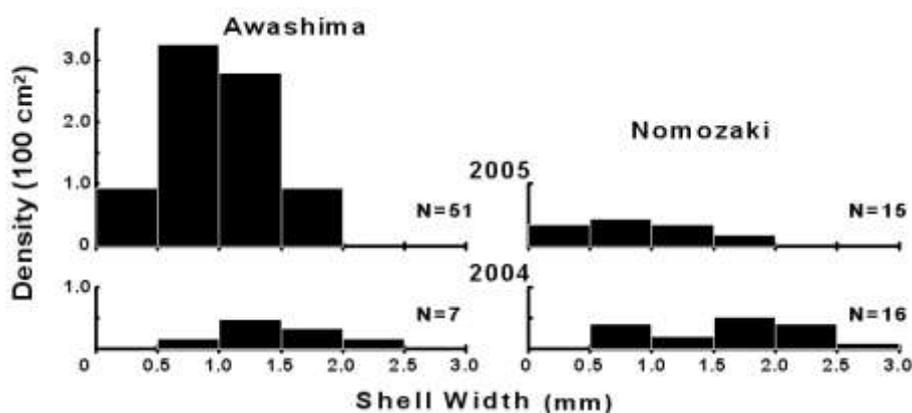


図8 粟島と野母崎で採集されたサザエ稚貝の殻径組成

偏差) で各々 $1.41 \pm 3.88\text{mm}$ と $1.66 \pm 5.60\text{mm}$ 、2005 年では $1.00 \pm 0.41\text{mm}$ と $0.88 \pm 0.47\text{mm}$ であり、それらの大きさには両調査地間では有意な差が認められなかった (t -test, $P > 0.05$)。産卵期の推定から粟島では 2004 年には 7 月から 9 月にかけて、2005 年に 6 月から 10 月に産卵が行われたことが示されており、粟島で採集された稚貝はこの間の産卵群であることが推測された。一方、野母崎で採集された稚貝は、2004 年と 2005 年ともに同じ年に粟島で採集されたものとサイズに明瞭な差が認められないことから、地理的に異なっても同じような時期に産卵されたものであることが示唆された。しかし、産卵パターンが大きく異なる地域において、同じような短期間の加入時期を示すことは、サザエの持つ特性であるかどうかを 2 年間のデータで判断することは難しく、少なくとももう 1 年のデータの蓄積が必要である。また、2004 年には粟島での採集個体密度は野母崎と同程度か、むしろ少ない結果であったが、2005 年には数倍の加入密度であり、野母崎では前年と同様な密度であったのに比べて大きな変化を示した。このことは、2004 年 8 月下旬に日本海を通過した台風 16 号により調査地である粟島東岸に過去 50 年にならぬ大波が発生し、広大な藻場が甚大な被害を受けている。この台風の影響による減耗に起因する可能性が高いことが、2005 年の加入密度の増加でさらに示された。しかし、少なくとももう 1 年の比較データが無い限り、より詳細な検討が不可能で、今後の調査により明らか

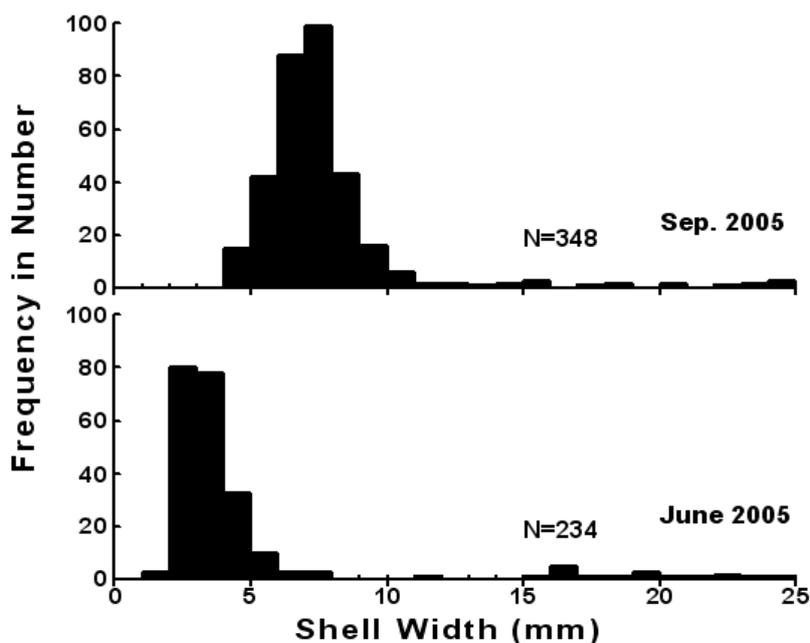


図9 粟島で採集されたオオコシダカガンガラの殻径組成

かにしていく必要がある。

オオコシダカガンガラの稚貝調査では、2005年6月の採集で、殻径3～4mmにモードを持つ稚貝が多数出現し、9月には6～8mmに成長し、この間に新しい稚貝の加入は認められなかった(図9)。このサイズ組成と成長から推定すると、これらの稚貝は、2004年の8月から9月にかけて産卵されたものが加入し、それ以外の時期に産卵されたものはほとんど加入してないことが推測された。従って、比較的長い、あるいは複数の産卵期があっても加入は特定の時期に産卵されたものが加入する傾向が見られ、今後の事例の追加確認が必要である。

2003年から2005年までの調査期間で、5～6月中で水温が約18～20℃に達した時期と、イセエビの加入が始まる時期がほぼ一致していた。また、通常は加入期ではない12月でも、水温の再上昇に伴って小規模ながら加入が生じた例が2004年に見られた(図10)。これらの時期は、九州西岸域の海面水温分布画像をしてみると、暖水塊が長崎半島先端付近に到達する時期とほぼ一致していた。これらのことから、温暖化によって春から夏、あるいは秋から冬の水温が上昇するなら、加入期間が長期化する可能性が示唆された。また、暖水塊が長崎半島先端付近に到達する時期とイセエビの加入が多い時期とほぼ一致する傾向がみられ、今後の検討を要する。

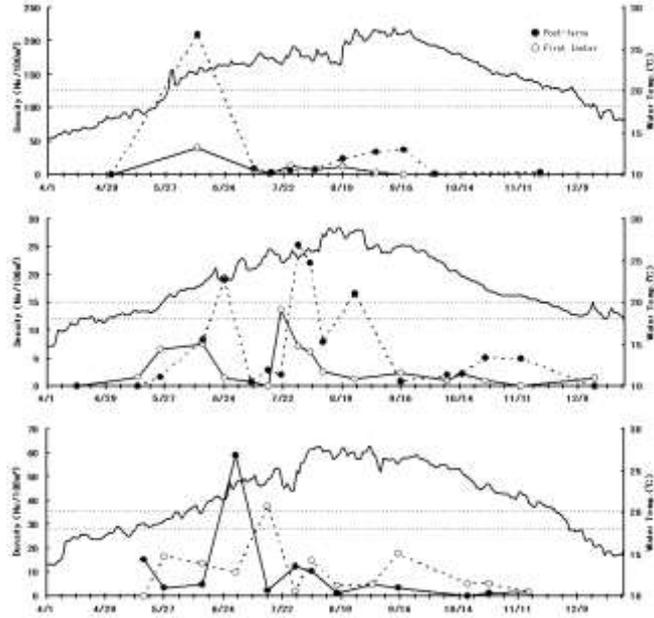


図10 長崎県野母崎におけるイセエビの加入の季節変動

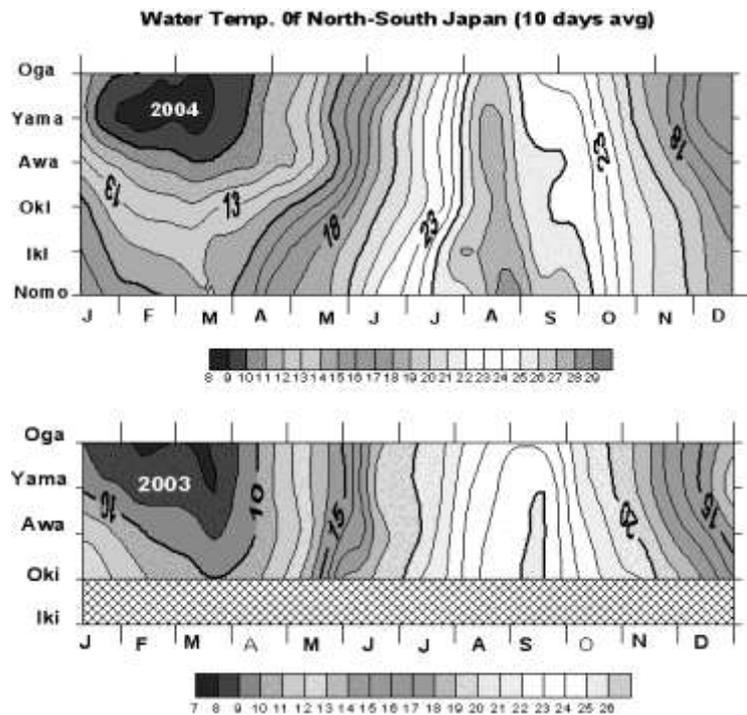


図12 水温の時空間変動(2003-2004年、秋田・男鹿～長崎・野母崎、ただし長崎・壱岐と野母崎は2004年のみ)

(3) 水温の変動

① 対馬暖流域の水温変動様式

成熟、産卵過程の調査を行った東シナ海の長崎県野母崎と日本海中北部に位置する新潟県粟島は過去数年間の水温データがある。他の島根県隠岐と秋田県男鹿半島は2004年には比較的早くから水温を測定することができた。しかし、2005年は、粟島での水温計の回収スケジュールにより6月までしかデータがなく、他の調査点でも2006年になってから回収されたので、解析作業が終わっていない。さらに、比較検討のために設置した長崎県壱岐のデータは水温計が不調だったため、現在校正作業中である。そのため、2003年と2004年に得られたデータにより、詳しく解析作業を行った。その結果、2003年は低温年、2004年は高温年であり、季節的な水温の時空間変動の状況が大きく異なることが分かった(図12)。たとえば、冬季の10℃以下の低温水は2004年には粟島沿岸までしか南下しておらず、低温水の期間も2003年に比べて著しく短かった。一方、夏季に25℃以上を示す期間は、2003年には9月にわずかに出現したにすぎなかった。このような水温環境の大きな違いは、今後、岩礁生物の成熟、産卵、着底加入過程などの比較を行う場合にきわめて重要な点と考えられた。また、比較的長期のデータが得られている新潟県粟島沿岸と山形沿岸の由良について水温の時系列解析を行い、既往の水温長期変動に関する情報と比較しながら、水温上昇のトレンドの有無を調べたところ、近接している新潟県粟島沿岸と山形沿岸は、経年的な水温の変動傾向はほぼ類似していたが、季節的には冬季は粟島沿岸の方の水温が高く、夏季には逆に北側に位置する山形沿岸の水温が高いことが分かった(図13)。とくに冬季の水温の違いは明瞭であった。このことは、比較的単調な海岸線が続く日本海の沿岸域でも、水温変動に陸側の影響を受けることを示しており、産卵・成熟過程を調べるための場所選定が的確であったことを裏付けている。また、水温の年変動は本土側では

島嶼や半島先端より冬に水温が低く夏に高くと大きく変化することから、産卵・成熟過程が複雑であると推測され、このような場所での温暖化の影響を知る場合には、本研究の成果がその基準として極めて有効であると考えられた。一方、経年的には、1996-1997年および2003年はほぼ年間を通して低温傾向を示し、その他の年には高温傾向で推移していることが分かった。とくに2000年の夏季には1℃以上高温が継続し全体としてもっとも高温であった。日本海の1980年以降の表面水温の変化を見ると、1998年から2002年にかけて平年(1980-2002年の平均値)より高温傾向がほぼ全域で認められており、上記の2地点における水温測定は主に水温上昇期に行われていることに留意する必要がある。今後、さらに2年間以上のデータセッ

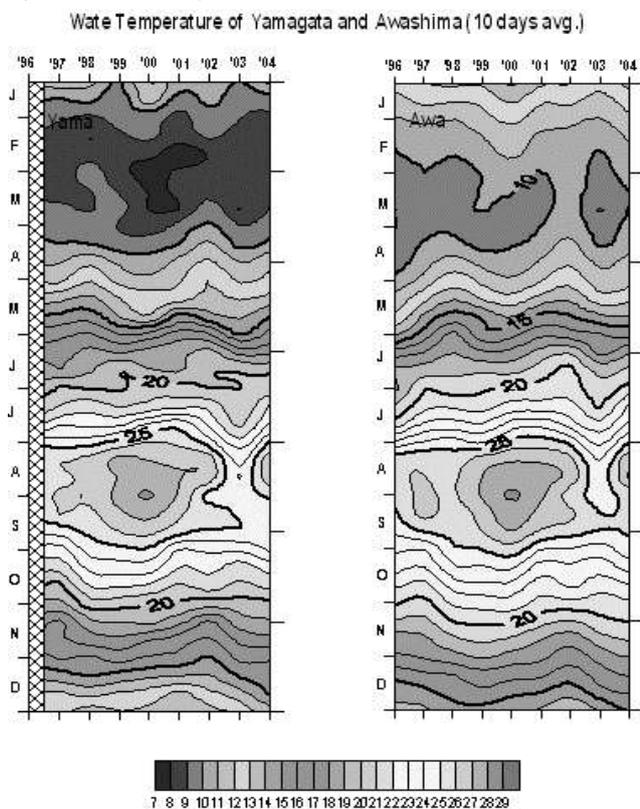


図13 水温の経年変動(粟島沿岸と山形沿岸における測定データの10日ごとの平均値にもとづく)

トが整えば、詳細な解析が可能となる。一方、長崎県野母崎は対馬暖流の影響下にあるものの、流軸は沖合にあるので、九州西方沖合に位置する五島列島か男女群島で水温の連続測定するように努めたが、設置・回収条件が極めて厳しい状況にあり測定するまでには至らなかった。今後も設置を試みるつもりであるが、男女群島では一部のデータが利用できる可能性があるのでその検討も進めている。今後のデータの蓄積と補足データの利用が極めて重要であると考えている。

②巻貝 3 種の成熟、産卵過程に係わる水温変動

巻貝類 3 種の生殖腺の発達により成熟、産卵過程を調べた 4 調査地点の 2004 年と 2005 年の日平均水温変動を図 14 に示した。全体として、対馬暖流域を北上するにつれて水温が低くなる傾向が極めて明瞭に示された。その中で、調査海域間での水温差は、3月の最低水温期から4地点全てで同じような水温 26°C に達する 7 月下旬にかけての期間が特に明瞭であった。それ以後は 2004 年では秋田県の男鹿半島が水温の上昇が少なく、他の 3 地点では 2～3°C 高い値を示し、その後同様な水温の減少傾向で推移した。3月から8月に至る水温上昇期は、成熟、産卵に極めて重要な時期であり、水温変動が類似している日本海北部海域の粟島と男鹿半島では、3種ともに同様な成熟、産卵パターンを示した。これら北部海域の 2 地点と、東シナ海の野母崎、日本海西部の隠岐の 3 調査海域の間には、最低水温期と上昇期に温度差がある。その反映として成熟、産卵期間の早期化や遅延に影響を与えていることが推測された。貝類の成熟と産卵を制御するために、積算温度の尺度が用いられている種類がある⁸⁾。積算温度とは成熟を促す最低水温以上の期間の水温を積算し、ある一定以上の積算水温値になると成熟し、産卵可能となる値である。別の見方をすると、積算温度には、積算開始温度以下にまず水温が下がり、その後の水温上昇で積算開始温度に達したとき成熟開始のリセットがかかり、個体群全体が水温変動と同期した生殖腺の季節変動をおこし、明瞭な成熟と産卵の周期性が維持されるという意味を持っている。2004 年には、サザエとオオコシダカガンガラは粟島と隠岐との間で明瞭な産卵周期を失っている兆候がみられた。ウラウズガイでは、隠岐と野母崎との間で同様な傾向

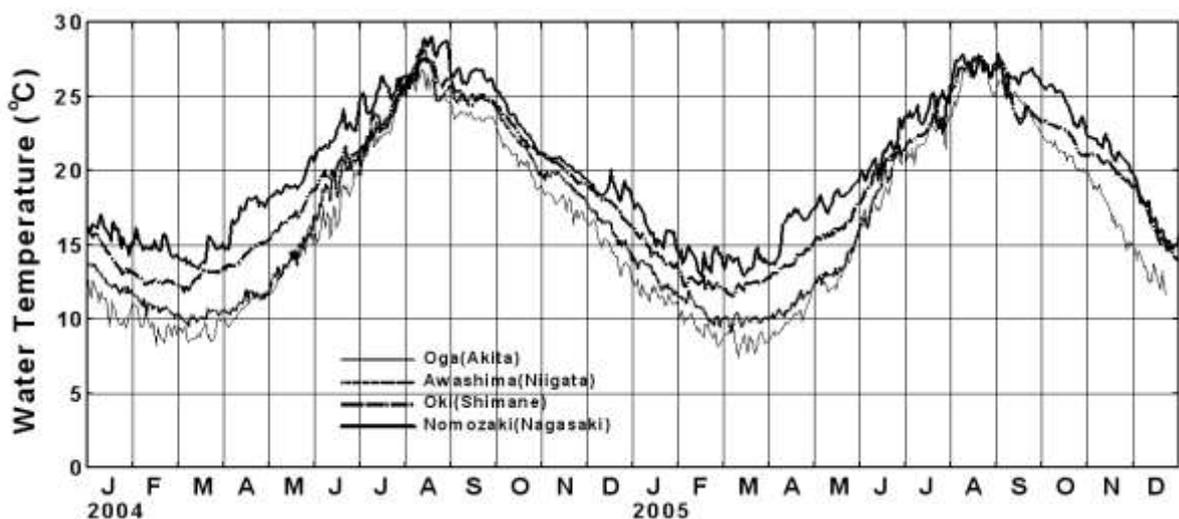


図 14 2004-2005 年における 4 調査地の日平均水温変動

がみられた。2005年にはオオコシダカガンガラとウラウズガイで粟島と隠岐との間に、サザエでは隠岐と野母崎との間でパターンの変化がみられようであった。しかし、隠岐と野母崎では3種ともに季節変動パターンが男鹿半島と粟島ほど明瞭ではなく、また年ごとに異なることから、両年の結果を総合すると、積算開始温度は3種ともに10から13℃の間の水温に相当すると推定された。調査海域間での最低水温差2～3℃という値は今後の温暖化により成熟、産卵パターンを特に日本海北部海域で大きく変化させることを示唆している。産卵パターンは成熟期の水温差でも大きく変わるが、5月から7月までの水温をみると、2005年は2004年より野母崎と隠岐では低く、粟島と男鹿では高めに推移した。このことが両年の産卵パターンに影響をあたえたことは明らかなので、2005年の水温データが整った時点で水温と成熟の関係を解析する必要がある。いずれにしろ、3種の巻貝の成熟、産卵期の地理的比較だけでは不十分で、今後の経年変動のデータ蓄積が必要不可欠である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 対象動物としてサザエ、オオコシダカガンガラ、ウラウズガイを選び、東シナ海の九州沿岸(長崎県野母崎)、日本海西部(島根県隠岐島)、中北部(新潟県粟島)、北部(秋田県男鹿半島)の4地点で、2004年と2005年の原則として4月から10月までの成熟、産卵過程を調べた。季節的成熟過程と産卵パターンは、3種とも地理的には変化するが、同一地域では種間の差が少なく、同じような傾向を示し、北部海域では成熟は水温の上昇と連動し極めて短期間に集中的な産卵がおこなわれ、南部海域では一度の産卵の規模は少なくなり産卵の早期化と長期化が認められた。地理的な成熟過程の変化から、冬季の最低水温の10～13℃の間で成熟パターンが大きく変わる可能性が示唆された。しかし、特に南部の産卵パターンは複雑で経年変動も大きく、成熟過程での水温変化も関与していることが推定され、データの蓄積の必要性が示された。また、ウラウズガイの成熟、産卵に対して、水温上昇の影響を他の2種より調べやすく、実験材料として入手しやすいことから、本種を今後のモニタリングの対象種とする重要性を指摘した。

(2) サザエの加入調査から、2004年と2005年を比較すると、着底稚貝のサイズに差があるので加入時期は異なっていた。しかし、両年とも南方の野母崎と北部の粟島との間では着底稚貝のサイズに差がなく、成熟と産卵のパターンが異なるにも拘わらず、同じ時期に着底加入が行われたことが推測された。粟島で2005年の加入量が多いことから、2004年に加入が少なかった原因は、台風による影響の可能性が大きいことが示唆された。オオコシダカガンガラは、2005年には産卵期が比較的長いにもかかわらず、短期間の加入による稚貝の出現が見られたので、特定の時期に産卵されたものだけが加入したものと判断された。イセエビでは、水温18～20℃に達した時期と、イセエビの加入が始まる時期がほぼ一致していた。また、通常は加入期ではない12月でも、水温の再上昇に伴って小規模ながら加入が見られた。これらの時期は暖水塊の接岸とも関係しているようであった。このようなことから温暖化によって春から夏、あるいは秋から冬の水温が上昇するならば、加入期間が長期化する可能性が示唆された。

(3) 2005年の水温データは断片的であるため2003年と2004年の6調査点のデータに基づき、日本海の水温の時空間的変動を調べたところ、2004年は高温年であり、季節的な水温の時空間変動の状況が両年で大きく相違していることが分かった。このような水温環境の大きな違いは、今後、岩礁生物の成熟、産卵、着底加入過程などの比較を行う場合にきわめて重要な点と考えられた。また、比較的長期のデータが得られている新潟県粟島沿岸と山形沿岸の由良について

水温の時系列解析を行い、水温上昇のトレンドの有無を調べたところ、近接しているが島と本土沿岸域に位置する両地点では、経年的な水温の変動傾向はほぼ類似していたが、季節的には冬季は粟島沿岸の方の水温が高く、夏季には逆に北側に位置する山形沿岸の水温が高いことが分かった。このことは、比較的単調な海岸線が続く日本海の沿岸域でも、水温変動に陸側の影響を受けることを示しており、産卵・成熟過程を調べるための島嶼、半島先端といった場所選定が的確であったことを裏付けた。

6. 引用文献

- 1) Hayashi, I. 1980. The reproductive biology of the ormer, *Haliotis tuberculata*. J. Mar. Biol. Ass. U.K., 60: 415-430.
- 2) 堀川博史・山川 紘. 1982. バテイラ *Omphalius pfeifferi* (Philippi) の生態学的研究. 南西水研報, no. 14: 71-81.
- 3) 阿井敏夫・野中 忠・佐々木 正. 1964. サザエの産卵と発生 - I. 産卵行動観察の一例. 日水誌, 30: 828-830.
- 4) Hayashi, I. 1983. Shell morphology of veliger larvae and juveniles of the Japanese top shell, *Turbo (Batillus) cornutus*. Venus (Jap. Jour. Malac.), 42: 212-216.
- 5) 本尾 洋. 2004. 京都府沿岸で新たに獲れたイセエビ. のと海洋ふれあいセンター研報, no. 14: 35-38.
- 6) Yoshimura, T. and Yamakawa, H. 1988. Microhabitat and behavior of settled pueruli and juveniles of the Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus* at Kominato, Japan. J. Crust. Biol., 8: 524-531.
- 7) Yoshimura, T., Yamakawa, H. and Norman, C.P. 1994. Comparison of hole and seaweed habitats of post-settled pueruli and early benthic juvenile lobsters, *Panulirus japonicus* (Von Siebold, 1824). Crustaceana, 66: 356-365
- 8) 菊地省吾・浮 永久. 1974. アワビ属の採卵技術に関する研究. 第1報 エゾアワビ *Haliotis discus hannai* Ino の性成熟と温度との関係. 東北水研報, no. 33: 69-78.

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌)

- ①Aida, S., H. Nakata, I. Hayashi, T. Yoshimura and N. Nakabayashi (2006) Latitudinal variation in reproductive behavior of the rocky shore organisms along the coastal region of Tsushima Warm Current. Proceedings of the 9th Joint Symposium of Nagasaki University and Cheju National University on Science and Technology, May 2006 (in press)

(2) 口頭発表

- ①Aida, S., H. Nakata, I. Hayashi, T. Yoshimura and N. Nakabayashi (2005) Recent water temperature change in the coastal region of the Tsushima Warm Current and its possible effect on rocky shore organisms. Proceedings of the 5th International Workshop on the Oceanography and Fishery Science of the East China Sea, 133-136,

17-18 October 2005, Jeju, Korea.

- ②Aida, S., H. Nakata, I. Hayashi, T. Yoshimura and N. Nakabayashi (2005) Recent water temperature change in the coastal region of the Tsushima Warm Current (TWC) and its possible effect on rocky shore organisms: A preliminary study. 水産海洋学会研究発表大会講演要旨集, p. 36, 2005年12月3日, 広島.

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

今後、国内的には水産総合研究センターの広報誌やプレスリリースを通じ、成果の広報・普及に努める。また国際的には、調査海域に係る近隣諸国から手始めに、広く成果の普及と温暖化対策の国際的貢献に努める。