

第3章(Ⅲ) 新たな資源管理・増殖に向けた方策の提言

Ⅲ-1 資源評価に基づく漁業管理

堀井豊充

アワビ類には第一種共同漁業権が設定されており、都道府県漁業調整規則の範囲で漁業協同組合が定める漁業権行使規則により管理されている。採捕できる者は組合員に限定されており、米国等諸外国とは異なり遊漁者には開放されていない。さらに内部規則で操業日(開口日)、操業時間、操業方法などが厳しく制限されている場合が多く、また当番制による密漁監視も行われている。これらの順守が伝統的な漁村コミュニティの結束に貢献し、それによって資源もまた維持されてきたのが我が国におけるアワビ漁業、資源管理の特徴である。一方で、漁村単位で取り組まれる管理策は、伝統的、経験的な手法にとどまらざるを得ない。海洋環境や資源水準が安定的に推移している場合は良いが、気候変動等にもなう資源変動(中村ら, 2005; 早川ら, 2007)や餌料環境の悪化、再生産成功率の低下、成長の停滞などの変化には適応できない。現在のアワビ類漁業が抱える問題を的確に解決に導くためには、科学的根拠をもった管理方策の導入が不可欠であると考えられる。堀井ら(2011)は長崎県五島列島小値賀町のアワビ類漁業を解析し、再生産曲線から計算された F_{msy} (MSY を達成する漁獲係数 F) は、 $F=M$ (M : 自然死亡係数) や $F30\%SPR$ (親資源が、漁獲がない場合の 30% で維持される F) 等の、一般に F_{msy} 代用値として用いられる基準値と近似しており、アワビ類においても他の生物資源と同様にこれらの管理基準を用いることが可能であることを示した。すなわち、アワビ類資源においてもマイワシ等 TAC (漁獲可能量) 制度の対象とされている魚種系群の資源評価に準じた評価と管理を行うことによって、資源の持続的利用は可能であると考えられる。しかしながら、資源評価を可能とするための各種データは都道府県の水産関係試験研究機関がごく一部で取得しているに過ぎず、多くの地区では漁獲量程度しかわからない。このことが、アワビ類資源の漁業管理を進める上での隘路となっている。地先資源を独占的に利用する責任として、各漁業地区においてこれらのデータ整備が進められるよう促していく必要がある。

また、アワビ類は初期生活史においてプランクトンの期間があり、この間に分散し、輸送されて着底場所へと運ばれるが、この範囲は明らかに第一種共同漁業権の範囲を超えている。このことが、アワビ類資源に対する加入管理をより困難なものとしている。アワビ類資源の維持には親貝の高密度生息域の存在が不可欠であることが示唆されているが (Babcock and Keesing, 1999)、そのような高密度生息域は一般に高い漁獲圧に晒されており、幼

生供給源としての機能は損なわれている。この解決のためには、各共同漁業権において一定面積での保護区 (MPA) の設置を推奨するなどの施策が必要となろう。一方、地域の実情に応じたきめ細かな漁業管理を進めるためには漁村コミュニティの存在が欠かせない。しかし、今日は各地の漁村で過疎化・高齢化が進み、コミュニティの維持そのものが困難な「限界漁村」も少なく無い。さらにこのような地域では密漁対策も不十分になる。アワビ類漁業への参入については、リミテッドアクセスによる抑制機能を維持しつつ、漁村の活性化や若者の新規参入を促すような新たな管理方策の導入を検討すべき時期に来ている。科学的根拠に基づく総量制限等のアウトプットコントロールの導入、IQ 制による分配の平均化と収益性の維持に加え、新規就業希望者の漁業体験への配分割り当てなども今後は議論の対象となろう。

引用文献

- Babcock, R. and J. Keesing (1999) Fertilization biology of the abalone *Haliotis laevis*: laboratory and field studies. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 1668-1667.
- 早川 淳・山川 卓・青木一郎 (2007) アワビ類およびサザエ資源の長期変動とその要因. *水産海洋研究*, **71**, 95-105.
- 堀井豊充・清本節夫・中村慶幸 (2011) 五島列島小値賀町における暖流系アワビ類の再生産関係からみた過剰漁獲. *黒潮の海洋研究*, **12**, 57-60
- 中村 藍・北田修一・浜崎活彦・大河内裕之 (2005) アワビ類の漁獲変動: エゾアワビの漁獲量と気候変動および種苗放流の関連について. *栽培技研*, **33**, 45-54.

Ⅲ-2 漁場の保全と管理

Ⅲ-2-1) エゾアワビ漁場

干川 裕

全国的な磯焼け対策については、「改訂 磯焼け対策ガイドライン」(水産庁, 2015) に具体的取り組み事例の紹介も含め総合的に解説されている。ここでは、エゾアワビが分布する東北地方から北海道の沿岸で行われている藻場造成とその効果について述べる。

基本となるのはウニ類の食圧制御で、対象となるウニは主にキタムラサキウニであり、もともと漁獲対象として重要な種である。具体的にはウニの生息密度を低くする除去(他の場所への移殖等)や食圧を緩和するために海藻養殖などから発生する廃棄用のコンブやワカメを海中に投入する対策が取られている。

ウニ類の除去は、西日本とは異なり潜水漁業が存在しないことから、潜水業者を雇用して行うためコストがかかる。漁業者自身が実施可能な方法として、船上からのタモ採りや籠漁具を使った方法がある。タモ採りの場合、水深3m以浅では潜水と同じくらいまで密度を下げるができるが、深所や底質が転石などウニの隠れ場所が多い場合には、除去効率は潜水に比べて下がってしまう(秋野・中島, 2014)。そのため、浅所の除去は漁業者が行い、深所の除去に潜水業者を使うことで対策コストを低減させながら効果的なウニ密度管理が可能になると思われる。

青森県佐井村沿岸で行われた大規模なウニ除去試験では、翌年にマコンブが優占する群落が形成された(桐原ほか, 2009)。その結果から磯焼けが持続するキタムラサキウニ現存量の閾値は60~85 g/m²であることが示された。この値はキタムラサキウニが2個体/m²生息していれば磯焼けが持続する可能性があることを示唆している(桐原, 2015)。

また、エゾアワビにとって餌料価値が低いツルアラメ(佐藤・能登谷, 1988)が卓越している海底から本種を除去した場合、マコンブの加入時期にあたる10~12月に実施した試験区には餌料価値が高いマコンブの加入が起こることが報告されている(桐原ほか, 2006)。

福島県でもキタムラサキウニの食圧により藻場が衰退しているという報告があり、水産多面的機能発揮対策支援事業等により大規模なウニ除去(約3トン)を行うとともに、アラメの種を供給するために成熟したアラメを使ったスポアバッグを投入した結果、アラメ幼体(2.5個体/m²)の加入が確認された(榎本, 2015)。その際に、除去前は4~5個体/m²だったキタムラサキウニの生息密度は1個体以下/m²まで下がっており、前述した青森県の対策事例と同じ値であった。

岩手県では三陸沿岸で行われているコンブやワカメの養殖事業から出る未利用海藻を粗い目合の天然繊維性袋に入れて海底に設置し、餌不足のウニの食圧を減少させるとともに、身入りを改善して漁獲物として活用させる取り組みが行われている(水産庁, 2007)。この活動は、未利用海藻の有効利用促進、ウニの商品価値向上、ウニの食圧軽減による藻場の保全という効果を発揮している。

北海道ではウニ類等の食圧制御を中心に、必要に応じてホソメコンブ加入量確保等の要素技術開発に取り組んでいる(干川, 2015)。ウニ類の食圧制御では、これまでの研究から、北海道日本海沿岸におけるホソメコンブ群落造成では、ウニ類の密度管理に有効な時期は遊走子が着生する11月までで、その後発芽時期まで密度を低く保つ必要がある(川井ほか, 2003)。

また場所によっては、ウニ類の密度を下げてみても必ずしもホソメコンブが生育しない事例がある。小樽市忍路で

行った野外試験では、海底付近の流速が速い場所ほどホソメコンブの生育量が多いことが分かった(川井ほか, 2003)。

磯焼け海域でホソメコンブが生育している場所の特徴を調べた結果、水温や波浪条件の季節変化によりウニ類(特にキタムラサキウニ)が深浅移動することが関与していることが明らかになった(吾妻ほか, 1996; 桑原ほか, 2001)。具体的には、ホソメコンブの遊走子が加入する秋から発芽期の春にかけては、冬季の時化によりウニ類が深所に移動して食圧が下がり、一方、春から夏を経て秋までは静穏な状態が続くことでウニ類が浅所へ移動して、ヒバマタ目大型海藻など他の海藻の加入を妨げて基質の更新を図ることで、海藻群落の遷移過程で途中相として現れるホソメコンブが生育できる条件が維持される(桑原, 2003)。

ウニ類の摂餌活動を流速によって制御することが可能であることが室内試験から明らかになった(川俣, 2001)。磯焼けの持続要因と考えられているキタムラサキウニの場合には40 cm/秒以上の振動流下では、ほとんど海藻を摂食できない。この結果に基づいて、野外において漁場造成を行う場合に、天端面の振動流速において、上述したようなホソメコンブの加入に適した季節変化をもたらすために、沖波と海底地形から天端面の高さ(水深)を計算で求めた嵩上げ礁が造成されるようになった(桑原ほか, 2004)。

これらの嵩上げ礁は、当初は設計どおりホソメコンブが濃密に生育したが、造成から5年後から生育不良になった。この理由を明らかにするために、測量による構造変化や沖波条件の変化などを検討したが、明らかな変化はなかった。そこで、ウニ類の摂餌行動抑制効果を検証するために、ホソメコンブ遊走子を着生させたコンクリート板を秋から春にかけて、周囲のブロック上に設置してコンブの生育を調べた。その結果、ホソメコンブ遊走子を着生させたコンクリート板にはホソメコンブが生育し、施設上面のウニ類摂餌行動制御機能は持続していることが分かった(干川ほか, 2013)。その後も同様な試験を2015年まで4年間繰り返したが、遊走子を付けたコンクリート板には毎年ホソメコンブが生育した。ホソメコンブ遊走子を着生させたコンクリート板と一緒に、遊走子を付けていないコンクリート板も設置したが、そこにはほとんどホソメコンブは生育しなかったことから、秋の遊走子を放出する群落規模の縮小や、遊走子の着床から配偶体形成、幼胞子体の発芽に何らかの問題が残されている可能性が考えられる。

身入りが悪い商品価値がなく漁獲されないキタムラサキウニを活用するためには、岩手県で行われているような漁場への餌料供給以外に、陸上や海面での給餌飼育が挙げられる。しかし、管理コストを回収するために

は、漁業と競合しない禁漁期などの端境期に出荷する必要があり、その際に成熟による商品価値の低下を低温飼育により抑制して商品価値を保つ取り組みも行われている(干川・福田, 2014)。

磯焼け海域に多数生息するウニは漁獲されないため高齢な個体が多い。高齢になるにつれて、製品となる生殖巣の色が黒っぽく悪化することが知られているが、餌を十分に与えて身入り(生殖巣指数)を改善すると色調(明るさを示す指標)も改善することが明らかになった(干川, 2014)。餌となる海藻を養殖する場所が確保できれば、簡易な籠を使った給餌飼育で磯焼け海域のウニを商品化できる可能性は高い。

また、これらの対策を実施する際に、事前に効果が出やすい適地を選定する必要がある。現在、北海道と九州では農林水産技術会議委託プロジェクト研究で、適地選定のための事前評価手法の開発が進められており(梶原・桑原, 2015)、今後はこのような評価手法により、効果的な対策が進められると思われる。

引用文献

- 吾妻行雄・中多章文・松山恵二(1996)北海道忍路湾におけるキタムラサキウニの摂食活動の季節変化. 日水誌, **62**, 592-597.
- 秋野秀樹・中島幹二(2014)磯焼け漁場におけるウニ密度管理手法に関する基礎研究. 平成25年度道総研中央水産試験場事業報告書, 124-126.
- 榎本昌宏(2015)福島県いわき市沿岸における磯焼け対策の取り組みについて. 月刊海洋, **47(7)**, 342-344.
- 干川 裕(2014)キタムラサキウニの身入りと品質(特に色)に及ぼす年齢の影響について—高齢ウニの商品化へ向けて—. 北水誌だより, **89**, 15-18.
- 干川 裕(2015)道総研の磯焼け研究ランドデザインについて. 月刊海洋, **47(6)**, 307-312.
- 干川 裕・秋野秀樹・金田友紀・高橋和寛・須貝英仁(2013)事前評価モデルに基づいて造成された増殖礁(嵩上げ礁)機能不全の要因について. 平成25年度日本水産学会春季大会講演要旨集, p147.
- 干川 裕・福田裕毅(2014)給餌型ウニ低温蓄養システムの開発. 平成25年度道総研中央水産試験場事業報告書, 116-118.
- 梶原瑠美子・桑原久実(2015)磯焼け対策のための新たなモニタリング技術の利用とその展望. 月刊海洋, **47(6)**, 295-299.
- 川井唯史・金田友紀・桑原久実(2003)ウニ侵入防止フェンス内におけるホソメコンブ群落に適する底面波浪平均流速とウニ類除去時期. 水産工学, **36(3)**, 213-218.
- 川俣 茂(2001)北日本沿岸におけるウニおよびアワビ

の摂食に及ぼす波浪の影響とその評価. 水研セ研報, **1**, 59-107.

- 桐原慎二(2015)青森県の磯焼けと藻場の現状. 月刊海洋, **47(7)**, 335-341.
- 桐原慎二・藤川義一・蝦名 浩・能登谷正浩(2006)青森県大間崎沿岸におけるツルアラメ卓越群落除去後に観察された海藻群落の遷移. 水産増殖, **54(1)**, 1-13.
- 桐原慎二・藤川義一・今 男人・能登谷正浩(2009)青森県佐井沿岸の磯焼け海域からのキタムラサキウニ除去によるマコンブ群落の形成. *Algal Resources*, **1**, 45-60.
- 桑原久実(2003)北海道南西沿岸における磯焼けの機構解明とその対策に関する研究. 水産工学, **39(3)**, 1097-2004.
- 桑原久実・川井唯史・金田友紀(2001)北海道南西部磯焼け地帯におけるホソメコンブ群落の形成機構. 水産工学, **38(2)**, 159-165.
- 桑原久実・寺井 稔・畑谷 勇・酒向章哲(2004)ウニ漁場造成に係る事前評価手法の開発とその適用. 海岸工学論文集, **51**, 1091-1095.
- 佐藤恭成・能登谷正浩(1988)褐藻ツルアラメ *Ecklonia stolonifera* のサザエ, ウニおよびアワビに対する餌料価値(短報). 日水誌, **54(8)**, 1451.
- 水産庁(2007)平成18年度環境・生態系保全活動支援調査委託事業「沿岸域の環境・生態系保全活動の進め方」. (株)水土舎, 117pp.
- 水産庁(2015)改訂磯焼け対策ガイドライン. 公益社団法人全国漁港漁場協会, 189pp.

III-2-2) 暖流系アワビ類漁場

井本有治

アワビのための漁場保全を考えた場合、磯焼けは最も重要な問題である。海藻の減少はアワビの餌不足につながり、資源に悪影響を与える。対策としては磯焼けが継続している主な要因を把握し、それを除去・緩和することが必要である。また、どのような種類の藻場を回復させたいのか、四季藻場を目指すのか春藻場を目指すのか、そういった目標を明確にすることも重要である。藻場造成に関しては地域により原因や対策が異なると考えられるが、ここでは大分県で実際に行った例を入れて紹介する。

2013年に水産庁が都道府県に行ったアンケート調査によると、南日本では藻場の衰退要因としてウニの食害、魚類の食害、ウニと魚類両方の食害をあげたところが多い(水産庁, 2015)。ウニの食害は全国的な現象であるが、魚類の食害は関東以南で深刻な被害が認められ、回復が困難な状況は南日本に限られている(藤田, 2015)。

① ウニによる食害と対策

南日本では問題となるウニはムラサキウニ、ガンガゼ類、ナガウニ等である（水産庁，2015）。ウニの種類やサイズにもよるが，1 m²あたり5～10個体以上のウニが分布していると磯焼けが継続するようである（水産庁，2015）。ウニの除去は海中でつぶす方法と船上に回収する方法の2種類が最も効率的であると考えられ，実際に数万個単位での除去成果が全国から報告されている。除去対象となるウニには水産上有用種も含まれるが，磯焼け水域に生息する個体は身入りが悪く，漁獲対象となることはない（南里，2014）。ムラサキウニなどの有用種は他の場所に移殖することが多いが，移殖先の海藻が減少したという報告もあるので注意する必要がある（南里，2014）。除去されたウニは有機肥料等として有効利用する研究が進められている（安藤，2015）。また，ウニの駆除を行った後にフェンス等で藻場を囲い，ウニの侵入を抑制する方法も有効である。フェンスはウニの侵入を妨げるという本来の用途の外にも，ウニを除去する範囲を明確にするという効果も見られ，除去の成果を認識しやすいという利点がある（南里，2014）。

② 魚による食害と対策

問題となっている主な植食性魚類はアイゴ，ブダイ，イスズミ類等である（桑原，2015）。水槽飼育試験の結果，ブダイ，アイゴの1日の最大摂餌量は魚体重の4～5%であることを確認している（尾上ほか，2003）。植食性魚類の食害対策は，これらの魚による藻場消失の実態把握が遅れたこと，これらの魚の行動や生態に関する情報が不足していることなどから，ウニの食害対策に比べて明確な成果は得られていない（桑原，2015）。しかし生態面の調査，魚食普及の取り組みは確実に進んでいる。植食性魚類は身が磯臭く，一般的に水産物としての価値が低い。このため，魚の駆除が徹底されず藻場の再生につながらないのが現状である。すり身にするなどの取り組みが研究されており（安藤，2015），また，魚食普及イベントも開催されている。

植食性魚類の除去方法は網，釣り，カゴがある。魚類の種類により有効な方法も異なるため，駆除を考える場合は対象とする魚種が何か，明確にする必要がある（水産庁，2015）。現在，葉状部に残された摂食痕から食害魚種を解明することが可能となってきているが，刺網を入れる方法，磯焼け域に海藻を置きビデオカメラで撮影してみる方法もある。魚はウニに比べて移動力が大きく，駆除の効果が長続きしにくいことも大きな問題である。大分県の入津地区では，2013年12月～2015年3月の間に17回刺網を入れ333尾のブダイを駆除したが（図Ⅲ-2-1），今のところクロメの藻場は造成されていない。調査間隔（前回駆除をしてからの日数）とブダイの漁獲尾数には正の相関が認められ，つまり駆除をすればブダイ

の密度は減少するが，時間の経過とともに元の状態に戻ると推定された（井本，2015）。この海域では月一回程度の駆除では成果を上げることはできないようだ。

駆除の他に，網やカゴで藻場を囲い，侵入を阻止すれば食害を防げることが確認されている（桐山ほか，2003；増田ほか，2007；吉村ほか，2015）。しかしこのような核藻場から周辺に種が広がり，外部に藻場が形成された例はきわめて少ない（桑原，2015）。大分県の大島地区では，2005～2007年にかけて，仕切り網を用いることにより300 m×10 mの範囲に藻場を復活させることが可能であった（尾上ほか，2007）。また大分県の蒲江地区では，2008年に磯焼けを起こしている海域の中に14 m×14 mの天井付きの網囲い試験区を設定し，その後5年間，クロメの藻場を造成した。しかしこれらの方法は網掃除その他の施設維持に労力と費用がかかり，また隣接する磯焼け海域に対する海藻の増殖効果は認められなかった（井本，2013）。大島，蒲江の試験区とも，網を除去した後短期間のうちに藻場は消滅した。これらの方法は磯焼けの原因が食害であることを確認する効果はあっても，単独では広域的な藻場を造成する効果は期待できないだろう。ただし，核藻場と他の制限要因除去を組み合わせることにより南方系ホンダワラ類を含むガラモ場を回復した例はある（田中，2006）。



図Ⅲ-2-1. 駆除されたブダイ

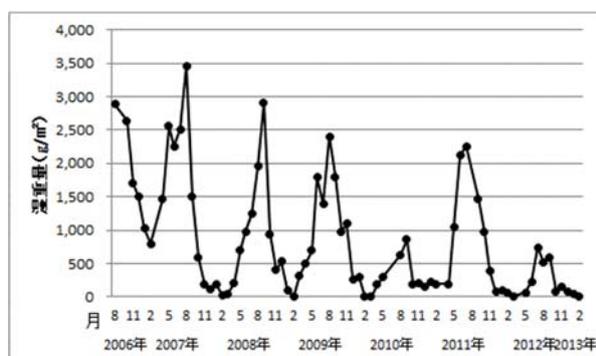
③ 藻場の造成

食害対策以外では，タネの供給が重要である。海藻は陸上植物と異なり遠くにタネを飛ばすことができないため，一度磯焼け状態になった場所ではタネ（孢子，遊走子）を人為的に供給する必要がある。目標とする海藻の成熟期に母藻を設置する方法（図Ⅲ-2-2）と，種苗を利用する方法がある（水産庁，2015）。実施にあたっては，移植先が対象種の生育環境に適していること，ウニや魚類などによる食害が少ないことが前提である。また，海底清掃と組み合わせる方法も有効である。

食害に強い藻場を作るという考えも重要である(桑原, 2015)。単一組成の藻場よりも多種混成の藻場の方がアイゴの被食の影響が緩和される(田井野, 2014; 野田, 2015)。しかし食害圧が高い場所ではいつか全て食べられてしまうので、この方法は限界があるだろう。また、1年目で成熟するカジメ類(早熟カジメ)の存在が報告されている(中嶋, 2013)。大分県蒲江のサエゴヤ地区では、ほぼ毎年秋から冬にかけて魚類の食害のためカジメ類は消滅するが、春から秋にかけては濃密な藻場を形成する(図III-2-3)。したがって存在するカジメ類はほとんど1年目であるが、子嚢班の形成は確認されている(井本, 2015)。



図III-2-2. スポアバックを設置するダイバー(大分市)



図III-2-3. 大分県サエゴヤ地区のカジメ類の密度

食害にあう前に遊走子を放出するため、食べられながらも継続される藻場の例である。このような個体群が局所的なものか広域的なものか確認する必要があるが、早熟カジメ類の移植が有効な磯焼け対策となる可能性がある。

磯焼け対策の成功事例として、大分県名護屋地区の取り組みがあげられる(中嶋, 2014, 2015a)。この取り組みはサポーターの指導を受けながら、名護屋藻場協議会の漁業者が行ったものである。事前調査の結果、磯焼けが持続する要因は「ウニの食害」、「タネの不足」、「魚の食害」と考えられた。2007年に取り組みを開始し、ウニはムラサキウニ、ガンガゼ類、ナガウニ属を対象として、

計70万個を駆除した。ウニの密度は対策前は約3個/㎡であったが、2013年9月以降は0.1個/㎡台と少なくなった。ウニ密度の低下に伴い、2014年3月を最後にウニの除去は行っていない。タネの供給は、カゴによるクロメの母藻移植、オープンスポアバック方式によるヨレモクモドキの母藻移植、小型ネット方式によるノコギリモクの移植、礫によるテングサなど小型海藻の移植を行った。魚類の駆除は2012年に集中して行い、ブダイ、アイゴ、イスズミ類を駆除した。これらの対策を行うことにより、現在対策地内にはクロメ場、ガラモ場およびテングサ場などが混在する豊かな藻場が再生している。これらのことは、藻場再生の阻害要因が複数ある場所において藻場再生を加速するには、全ての阻害要因に対して複合的な対策を同時に実施する必要性があることを示している(中嶋, 2015b)。この事例では藻場の回復があるレベルを超えると、後は爆発的に回復するようである。また、藻場協議会のメンバーは7名とけっして多くはないが、少人数の取り組みでも熱意を持って取り組みれば成果を出すことは可能であることを実証した。

引用文献

- 安藤 亘 (2015) 植食動物の有効利用に係わる現状と課題. 水産工学, **51**, 207-211.
- 藤田大介 (2015) 世界の磯焼けの現状. 月刊海洋, **47**, 275-280.
- 井本有治 (2013) 磯焼け対策に関する技術開発. 平成24年度大分県農林水産研究指導センター水産研究部事業報告書, 16-17.
- 井本有治 (2015) 磯焼け対策に関する技術開発. 平成26年度大分県農林水産研究指導センター水産研究部事業報告書, 19-22.
- 桐山隆哉・大橋智志・藤井明彦・吉村 拓 (2003) 藻場に対する食害実態調査. 平成14年度長崎県総合水産試験場事業報告, 95-102.
- 桑原久実 (2015) 魚の食害対策に係わる技術と課題. 水産工学, **51**, 253-257.
- 増田博幸・鈴木敬道・水井 悠・西尾四良・堀内俊助・中山恭彦 (2007) 静岡県榛南磯焼け海域におけるカジメ成育への食害防除網の効果. 水産工学, **44**, 119-125.
- 中嶋 泰 (2013) 早熟カジメはいる! . 平成25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藻類情報交換会資料.
- 中嶋 泰 (2014) もうかる藻場をめざして. 豊かな海, **33**, 63-67.
- 中嶋 泰 (2015b) 新しい播種方法とその考え方. 水産工学, **51**, 227-232.
- 中嶋 泰 (2015a) 名護屋の藻場再生が示すこれから. 月

- 刊海洋, 47, 329-334.
- 南里海児 (2014) ウニ食害対策に係わる技術と課題. 水産工学, 51, 213-219.
- 野田幹雄 (2015) 藻場の生態系機能を活用したアイゴの食圧の吸収. 月刊海洋, 47, 290-294.
- 尾上静正・内海訓弘・三浦慎一・田村勇司・安楽康宏・森由基彦 (2003) カジメ藻場再生技術確立事業. 平成 14 年度大分県海洋水産研究センター事業報告書, 175-179.
- 尾上静正・平澤敬一・都留久美子・山田英俊・東馬場 大 (2007) 緊急磯焼け対策モデル事業. 平成 17 年度大分県農林水産研究センター水産試験場事業報告書, 38-46.
- 水産庁 (2015) 改訂版磯焼け対策ガイドライン. 公益社団法人全港漁港漁場協会.
- 田井野清也 (2014) 高知県における磯焼け対策の現状と課題. 平成 26 年度水産庁主催磯焼け対策全国協議会発表要旨.
- 田中敏博 (2006) 南日本における磯焼けと藻場回復. 水産工学, 43, 47-52.
- 吉村 拓・八谷光介・清本節夫 (2015) 小型海藻藻場の重要性和磯焼け域におけるその回復の試み. 水産工学, 51, 239-245.

Ⅲ-3 親貝集団の造成

千川 裕

アワビ類の親貝集団を造成・保護する上で、再生産特性を考慮する必要がある。

一般に、浮遊幼生期間を持つ海産無脊椎動物では、小さい卵を大量に産んで、着底するまで摂餌しながら成長するグループと、大型の卵を少量産んで、親由来の卵黄を栄養とし着底まで摂餌をしないグループがある。前者はホタテガイなどの二枚貝類や、ウニ類が含まれ、浮遊期間も約 1 ヶ月と長く、産卵数もホタテガイでは 1 億個以上、ウニ類でも 1~2 千万個と言われている。一方、アワビ類は後者に含まれ、浮遊期間は 1 週間以内の種が多く、産卵数も 100~200 万個と極端に少ない。

また、アワビ類の種苗生産技術開発から、受精に有効な精子濃度は種によって異なり、クロアワビで 40 万個/ml (梶川, 1980), エゾアワビで 20~40 万個/ml (菊地・浮, 1974a; 大森ほか, 1995), マダカアワビで 17.3~173 万個/ml および 139 万個/ml (神奈川県, 1967; 酒井・兎玉, 2000), メガイアワビでは 30~50 万個/ml の範囲で受精率が 65.0~89.1% である (藤井ほか, 1993)。精子濃度が多すぎると卵の奇形が発生し、逆に少なすぎると受精率が低下する。エゾアワビでは 7~10 万個/ml 以下では受精率は下がる (菊地・浮, 1974a)。また、メガイアワビでは、精子の受精能力は時間経過とともに低下し、

20°C で受精から 15 分後では 74% だった受精率が、1 時間後には 22% まで下がることが報告されている (藤井ほか, 1995)。エゾアワビの精子では、放精から 1 時間後でも受精率は 96% (22.7°C) と高いこと (菊地・浮, 1974b) と比べると、メガイ精子の受精能力は短時間で低下することが特徴である。

体外受精を行うアワビ類では、少数の卵を効率良く受精させる必要がある。野外で雌雄間の距離と受精率を調べた報告では、距離の増加に応じて指数的に受精率が減少することが示されている (Babcock and Keesing, 1999)。東北沿岸のエゾアワビや相模湾のトコブシでは、台風の通過に同調して大規模な産卵が行われることが知られており (佐々木, 2001; Onitsuka et al., 2007), 放精・放卵の同期性という点から受精率を高めることに効果的と思われる。

しかし、親貝資源が減少すると生息密度が低下し、個体間の距離が広がってしまい、台風による時化など外部要因で同期して放出しても、受精に必要な精子濃度の不足や、精子が卵に到達するまでに時間がかかり受精能力が低下するなどの問題が生じることが考えられる。そのため、再生産用の親貝集団を造成もしくは保護する場合には、低密度で広い範囲を保護 (禁漁) するよりも、限定された漁場でも高密度で親貝が生息する条件を満たすことが重要と思われる。

どのような場所に保護区 (禁漁区) を設定するかについては、その場所から生まれた浮遊幼生が着底するまでに、どのように輸送・拡散するかを把握して、漁場へ効率的に加入することが望ましい。このような解析については、Miyake et al. (2009, 2010) が流動モデルによる予測を行っている。この手法を用いることで、事前にその場所で生まれた浮遊幼生がどの程度の範囲に加入するかを推定することができる。

また、親貝集団造成では集団管理の簡便性や、地先への加入を目的とすると、台風等により一斉に産卵した浮遊幼生が広域に拡散する「大量一回産卵・広域分散型」よりも、各地域単位で少量産卵が数回行われる「少量多回産卵・地先滞留型」を有する親貝集団の増強が有効と考えられている (中家ほか, 2011)。中家ほか (2011) は、漁場の特性と加入およびその後の生残・成長結果に基づき、海岸および海底地形から、急深で岬状に突出している漁場では「大量一回産卵・広域分散型」であり、海底勾配が緩やかで弓状に湾入した漁場では「少量多回産卵・地先滞留型」である可能性を示唆した。

エゾアワビでは、雌の産卵数は個体の大きさに伴い増加することが報告されている (小林ほか, 2007)。そのため、大型個体が高密度で生息する状態を維持することで、効率的な再生産が可能となる。しかし、磯焼け等で餌料海藻が少ない漁場では成長の鈍化により親貝の大きさが

小さい(干川, 2012)。したがって、餌料環境が良好で成長・成熟が保証される場所に保護区(禁漁区)を設けて、再生産用の親貝集団を保全することや、あるいは良好な漁場を複数の区画に分けて、輪採制により数年毎に漁獲を行うことで、その間の再生産を維持する漁業管理上の方策が必要となる。

引用文献

- Babcock, R. and J. Keesing (1999) Fertilization biology of the abalone *Haliotis laevis*: laboratory and field studies. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **56**, 1668-1678.
- 藤井明彦・高木信夫・前迫信彦(1993) 介類種苗生産技術研究. 平成4年度長崎県水産試験場事業報告, 192-196.
- 藤井明彦・高木信夫・野中 健(1995) 介類種苗生産技術研究. 平成6年度長崎県水産試験場事業報告, 98-100.
- 干川 裕(2012) 北海道の磯焼け海域における群集構造の特徴とエゾアワビの再生産へ及ぼす磯焼けの影響. *日水誌*, **78(6)**, 1208-1212.
- 梶川 晃(1980) クロアワビの種苗生産に関する研究—II 幼生の飼育と採苗. 鳥取県水産試験場報告, **22**, 55-58.
- 神奈川県(1967) 4. アワビ種苗生産試験. 神水試資料 No.92 昭和41年度業務概要, 36-39.
- 菊地省吾・浮 永久(1974a) アワビ属の採卵技術に関する研究 第3報 精虫濃度と受精率の関係. *東北水研研報*, **34**, 67-71.
- 菊地省吾・浮 永久(1974b) アワビ属の採卵技術に関する研究 第4報 生殖素の受精能力の持続時間と温度との関係. *東北水研研報*, **34**, 73-75.
- 小林俊将・武蔵達也・遠藤 敬・原 素之(2007) 天然漁場におけるエゾアワビの産卵量の推定. *水産増殖*, **55(2)**, 285-286.
- Miyake, Y., S. Kimura, T. Kawamura, T. Horii, H. Kurogi and T. Kitagawa (2009) Simulating larval dispersal processes for abalone using a coupled particle-tracking and hydrodynamic model: implications for refugia design. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **387**, 205-222.
- Miyake, Y., S. Kimura, T. Kawamura, T. Kitagawa, M. Hara and H. Hoshikawa (2010) Estimating larval supply of Ezo abalone *Haliotis discus hannai* in a small bay using a coupled particle-tracking and hydrodynamic model: insights into the establishment of harvest refugia. *Fish. Sci.*, **76**, 561-570.
- 中家 浩・高見秀輝・小畑千賀志・押野明夫・芳賀圭悟・千葉充子(2011) 異なる立地環境下におけるエゾアワビの産卵と浮遊幼生の着底. *宮城水産研報*, **11**,

5-13.

- Onitsuka, T., T. Kawamura, T. Horii, N. Takiguchi, H. Takami and Y. Watanabe (2007) Synchronized spawning of abalone *Haliotis diversicolor* triggered by typhoon events in Sagami Bay, Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **351**, 129-138.
- 大森正明・河原郁恵・石田亨一(1995) 第2章エゾアワビ種苗生産技術の実際. 栽培漁業技術シリーズ No.2 アワビ類の種苗生産技術, 社団法人日本栽培漁業協会, 93-124.
- 酒井勇一・児玉 哲(2000) マダカアワビの採卵について. *北水誌* により, **49**, 20-21.
- 佐々木 良(2001) エゾアワビの加入機構に関する生態学的研究. *宮城水産研報*, **1**, 1-86.

Ⅲ-4 種苗放流事業の見直しと放流技術の改善

鴨志田正晃

放流事業の考え方として、放流した種苗を効率的に回収する「一代回収型」と放流した種苗が生き残り再生産による増殖効果を期待する「再生産期待型」の二つの考え方がある(清水, 2008)。千葉県では、「一代回収型」の種苗放流は、放流3年後の漁期中に全て漁獲回収する輪採漁場で行われており、高い投資効率が得られる放流方法としている(Uchino et al., 2004)。これに対し、一般漁場へのアワビ種苗放流は再生産による増殖効果も期待する「再生産期待型」としてとらえられているが、再生産量は定量が困難であり、放流種苗一代の回収率と経済効果の把握にとどまっている。これまでのアワビの放流事業は、再生産を期待しながらも回収率をどう向上させるかに重点を置き進められてきた感がある。一代回収の考え方に基づけば回収率、費用対効果が上がっている事例もあり、漁業者自ら実施する収益事業として放流事業を行うことも一つの選択肢として考えられる。また、岩手県では、1970年代までは1,000トンを超える漁獲量があったが、1989年には200トン以下に減少し、その後漁獲量は徐々に増加し、1998年には500トンを超えるまで資源が回復した。主な原因としては、太平洋北海域の海況変動により天然稚貝の発生量が増加したためと考えられているが、漁獲量が減少している時期に600~800万個の種苗放流を継続し、放流貝の漁獲量は年間100トン(回収率10%)、混入率20~50%であったことから、放流種苗が親貝資源の底上げに重要な役割を果たしたと考えられている(西洞ほか, 2001)。しかしながら、再生産による増殖効果に関しては、資源回復を目指して長期にわたって大量の種苗が放流され、放流種苗の混入率は確実に上がっているにもかかわらず、多くの地域で資源量の回復には至っていないのが現状である(河村ほか, 2008)。岩手県の事例のように種苗の大量放流により親貝

資源の底上げの可能性はあるものの、顕著に資源量を増加させるためには、さらに大量の種苗放流が必要であり、都道府県の放流事業予算が大きく削減され、漁業者の収益も減少し種苗購入経費の負担が難しくなっている状況では困難と考えられる。

一方、資源管理の効果に関しては、千葉県の器械根では1970年の資源量は350トンであったが、その後減少し続け1994年にはわずか12トンとなり、1995～2012年まで18年間自主禁漁としたが、禁漁期間中の資源の年間増加率は5%弱と微増程度であった(本稿I-3-4)。長崎県の小値賀町では、アワビの資源量は1986年に200トンを上回る水準であったが、2007年には50トン以下に減少した。その後10年間にわたる漁獲率の大幅な低減措置を取ったが、いまだに資源の回復が果たせていない(堀井ほか, 2008)。このように、極端に減少した資源は、禁漁あるいは漁獲規制を実施しても資源の回復には時間がかかることが明らかになっている。

資源が増加しない主な原因は天然稚貝の発生量の低迷であり、これは、乱獲等により親貝の生息密度が低下したことにより受精率の低下が起こる(Babcock and Keesing, 1999)ことが一因と考えられている。資源量がかつてのレベルに回復させるためには、十分な量の再生産を保証する親貝の高密度生息域を再構築し維持する必要があるが、このような高密度生息域は一般に高い漁獲圧に晒されており、幼生供給源としての機能は損なわれているため、保護区(禁漁区)の設置が必要と考えられている(本稿III-1)。上記のように漁獲規制のみでは資源の回復に時間がかかること、種苗放流は適正な方法で実施すれば親個体群の再構築を速やかに進める手段となりえると考えられていることから、保護区の設定と種苗放流を組み合わせることによる親個体群の造成が必要であろう。

アワビ資源の回復のためには、アワビ類本来の生態学的特性に基づいた科学的根拠のある漁業管理、漁場管理、種苗放流の手法を確立し実施していく必要がある(河村ほか, 2008)が、放流手法については、1990年代以前の調査に基づき放流技術マニュアルがとりまとめられているものの、依然としてばらまき放流が行われている地域もあり、放流海域に適した時期、場所に放流されていないことが多いのが実情である。千葉県では、種苗にストレスを与えずに放流後の害敵による食害を低減する放流器システムを開発しており(内野ほか, 2005)、こういった手法を使うことにより放流後の減耗の低減が可能と思われる。また、近年、温暖化による磯焼けが進行し、放流技術マニュアルの作成時とは異なる餌料環境、漁場環境にあると考えられることから、現在の環境に対応した放流手法の見直しが必要である。磯焼けが進行した海域では、従来に比べ餌料環境が悪化していることから、こ

れに見合った放流量の検討、あるいは、放流場所の見直しも必要であろう。放流適サイズは殻長30mmとされているが、長崎県、秋田県の調査では、餌料環境が良い場所で、食害種が少ない時期であれば殻長20mm台の放流でも可能とされており、種苗生産コストの削減のためには各海域に適した放流サイズ、時期、場所の検討が必要である。これらの放流手法の検討には、放流種苗の生残状況、餌料環境、害敵生物生息量といった調査が必要となるがアワビ類の放流事業が民営化されて以降、放流効果調査が中止された都道府県が多いことから、継続的な調査体制の整備が必要である。

人工飼育された種苗は稚貝の遺伝的変異性が天然集団に比べて低いことが報告されており(原, 2008)、人工種苗の大量放流が再生産を通じて天然集団に悪影響を及ぼすことが懸念されている。再生産による資源の回復を図る際には、親資源を確保するために多くの放流種苗が必要であり、遺伝的多様性に配慮した種苗の利用に努めるべきである。現在の種苗生産で使用されている親貝の数は平均58個体と少なく、雌雄比にも不均衡が見られる。また、4割以上の種苗生産場で継代飼育親貝が使用されている実態があり(原, 2008)、遺伝的多様性を維持できる数の親貝を使用して種苗生産を行う必要がある。

エゾアワビは、生息域以外の日本海、瀬戸内海、東シナ海で2013年においても放流されている。エゾアワビは、クロアワビに比べ岩の上や側面に表出する傾向が強く漁場の浅いところに集中する性質を持つ(篠原ほか, 1997)とされており、生態的に暖流系アワビ類と異なること、また、放流したエゾアワビが交雑を含め再生産に関与する可能性も示唆されている(原, 2008)ことから、生息域以外への放流については、生態系への影響に配慮し避けるべきである。エゾアワビが生息域以外で放流されているのは暖流系アワビ類の種苗生産技術がエゾアワビに比べ確立されていないため必要な種苗を確保できないことにも起因することから、今後は種苗生産技術の改良を進めていく必要がある。暖流系3種についてもクロアワビは浅所に多く、昼間、転石や岩礁の狭い空間に潜んでいるが、マダカアワビとメガイアワビはクロアワビの生息水深より深い露出した海底にすみ場を形成し生態的に異なる(小島・湯浅, 1993)とされており、放流種の選定、放流場所には十分に配慮する必要がある。さらに、同じ種でもエゾアワビ、クロアワビには、いくつかの遺伝的に異なる地域集団が存在する。異なる地域集団間では地形や海流による隔離が起こり、ある程度の交流はあるものの、それぞれ独立して再生産を行っていると考えられている。放流種苗をアワビ漁場で天然に発生した個体と同様な生残や再生産を期待するならば、少なくとも地域集団からの親貝を使用することが必要である(原, 2008)。

引用文献

- Babcock, R. and J. Keesing (1999) Fertilization biology of the abalone *Haliotis laevis*, Laboratory and field studies. *Can J Fish Aquat Sci*, **56**, 1668-1678.
- 原 素之 (2008) 遺伝学的観点からのアワビ種苗放流の現状と課題. 月刊海洋, **40**, 538-542.
- 堀井豊充・清本節夫・中村慶幸 (2008) 五島列島小値賀町の素潜り漁業から見た暖流系アワビ類の資源変動要因. 月刊海洋, **40**, 495-499.
- 河村知彦・堀井豊充・高見秀輝 (2008) アワビ類栽培漁業の検証と今後の展望. 月刊海洋, **40**, 485-489.
- 小島 博・湯浅明彦 (1993) 牟岐町地先におけるマダカアワビ・メガイアワビの生態と海士漁業. 平成3年度徳島県水産試験場事業報告, 54-59.
- 西洞孝広・野呂忠勝・藤嶋 敦・遠藤 敬・山口正希・長洞幸夫 (2001) 磯根資源の初期生態の解明に関する研究 (岩手県). 水産業関係特定研究開発促進事業「磯根資源の初期生態の解明に関する研究」総括報告書, 41-80.
- 清水利厚 (2008) 千葉県におけるアワビ種苗放流技術 (総説). 千葉水総研報, **3**, 45-52.
- 篠原直哉・太刀山 透・深川敦平 (1997) 筑前海における放流エゾアワビの分布生態. 福岡水海技セ研報, **7**, 19-25.
- Uchino, K., T. Simizu, T. Tanaka and T. Shibata (2004) Abalone resource decline and recovery attempt in CHIBA Prefecture, Japan. *Journal of Shellfish Research*, **23**, 1219-1222.
- 内野加奈子・田中種雄・柴田輝和・清水利厚 (2005) 放流器システムの開発—透明付着板を用いた放流籠によるアワビ種苗放流方法の効率化. 千葉水総研報, **4**, 55-64.

III-5 種苗生産技術の改善

河村知彦

日本におけるアワビ類の人工種苗生産は、1960年代に本格的に技術開発が始まった。1970年代後半には種苗の大量生産が可能となり、各地で人工種苗の放流事業が行われるようになった。現在では、エゾアワビ、クロアワビ、マダカアワビ、メガイアワビ、トコブシ、フクトコブシの6種・亜種の人工種苗が、全国各地で合わせて年間3,000万個近く放流されている。

各地の種苗生産施設では、毎年ほぼ安定的に種苗を生産、供給することが可能になっており、種苗生産に係わる技術はほぼ完成したものとなってきた。特に、後述する“舐め板”と呼ばれる採苗器を用いたエゾアワビの種苗生産技術は、世界中で様々な手法で行われているア

ワビ類の種苗生産技術の中でも、最も安定的に高い着底・変態率を得られ、稚貝の生残率や成長速度も高い効率的な技術と言える。しかしながら、舐め板による採苗技術にも後述するような様々な問題点があり、エゾアワビ以外の他のアワビ類にも効果的なことがわかっているにもかかわらず、日本国内におけるエゾアワビ生産施設以外では現在ほとんど用いられていない。日本国内においても、クロアワビを初めとする他のアワビ類の種苗生産施設では使用されていない。各施設で一定量の種苗が生産できるようになり、生産工程がマニュアル化されて以降、新たな技術の開発や改良は不活発となった。むしろ、新たな技術を導入することにより確立された工程を変えることのリスクを回避することが重視されてきたこと、また、日本国内における種苗生産施設の多くが都道府県の水産試験場等の附属施設から独立した組織になり、技術開発をする人員や予算を確保しにくくなったことなどがその要因と考えられる。

一方、日本では1990年代以降に、天然における稚貝発生量の低迷要因を解明することを目的として、アワビ類の繁殖生態や初期生態に関する研究が活発に行われた。また、海外でも、アワビ類の大規模な養殖が盛んになるにつれて種苗生産技術に係わる初期生態の研究が活性化された。その結果、舐め板の機能について科学的な証明が行われるとともに、幼生の着底・変態機構や稚貝の初期食性などに関する新たな生態学的知見が数多く集積された (Kawamura et al., 2005; 河村, 2008)。これらの最新知見を取り入れれば、現在の種苗生産技術には、舐め板を用いた技術を含めてまだ多くの技術改良の余地があると考えられる。

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震にともなう大津波によって、三陸沿岸のエゾアワビ種苗生産施設の多くが壊滅的な被害を受けた。その多くは、2015年現在で既に再建され、種苗生産も再開されているが、施設を再建するにあたってより効率的な種苗生産技術の導入を進めるため、農林水産技術会議のプロジェクト研究「アワビの緊急増殖技術開発研究」が2012年度から開始された。このプロジェクトでは、エゾアワビの繁殖生態や初期生態に関する最新の知見に基づき、より効率的で安定した母貝育成技術、採卵技術、採苗技術の開発を進め、さらにそれらの技術を種苗生産現場へ導入することにより、種苗生産コストの削減を図ることを目的としている。それらの技術の多くは他のアワビ類の種苗生産にも適用可能であり、エゾアワビでの技術革新が進めば、日本の暖流系アワビ類の種苗生産現場にも新技術の導入を進める機運が高まることが期待される。

本稿では、アワビ類種苗生産技術の現状と問題点を、アワビ類の繁殖生態や初期生態に関する科学的知見とあわせて整理するとともに、エゾアワビで進んでいる新た

な技術開発を含め、アワビ類の生態に関する最新の知見に基づいた新たな種苗生産技術開発の可能性について論じる。

Ⅲ-5-1) アワビ類種苗生産技術の現状と問題点

① 親貝の成熟促進技術と産卵誘発技術

アワビ類各種の産卵期は、エゾアワビとトコブシでは夏から秋、クロアワビ、マダカアワビ、メガイアワビでは秋から初冬とされているが、実際に放卵・放精が可能になる時期は、水温経過や餌料環境に依存して年や場所によって異なる。エゾアワビなどでは、ある一定値（エゾアワビでは7.6℃）を超える水温の積算値（成熟有効積算水温）に比例して生殖巣が発達することが知られており（菊地・浮, 1974a）、人為的な水温管理によって成熟をコントロールすることが可能になっている（浮, 1995）。

アワビ類は雌雄異体で、放卵・放精型の繁殖を行う。したがって、受精を成功させるためには、雌雄が放卵・放精を同期させる必要があるが、多くの種で雌雄が配偶行動を行わない可能性が高い。そのような種では、何らかの環境変化を引き金にして多くの個体が同期的に放卵・放精を行う（河村, 2007）。三陸沿岸に生息するエゾアワビでは、大小の時化によって（佐々木, 2001; Sasaki and Shepherd, 1995; 西洞, 2002; 中家・高見, 2012）、相模湾のトコブシでは台風規模の時化によって（Onitsuka et al., 2007b, 2010a; 鬼塚・河村, 2008）放卵・放精が誘発されるものと考えられている。時化に伴って生じるどのような変化が具体的に放卵・放精を誘発するのかは未だ明らかにされていないが、飼育条件下では、紫外線を照射した海水（菊地・浮, 1974b）や過酸化水素を添加した海水（Morse et al., 1976）が配偶子放出を誘起する現象が知られており、種苗生産施設で計画的に放卵・放精を行わせる技術として用いられている（浮, 1995）。紫外線照射海水や過酸化水素添加海水がアワビ類の配偶子放出を誘発する機構として、ホルモン様物質のプロスタグランジンが関与するものと考えられている。プロスタグランジンにはアワビ類の放卵放精を誘発する作用があり、紫外線による光分解によって、あるいは過酸化水素の添加によって生じた活性酸素がアワビの体内でプロスタグランジンの合成活性を高めるものと推察されている（Morse et al., 1976）。

相模湾に生息するトコブシでは、生殖腺の発達状況の周年変化から、一度放卵・放精を行った後に再び成熟が進行し、約1ヶ月程度で次の産卵が可能になると考えられている（Onitsuka et al., 2007b）。エゾアワビでも、飼育環境下において十分な餌料が与えられた場合には、同一個体が1産卵期に少なくとも2回は放卵・放精可能であることがわかっている（Fukazawa et al., 2007; 高見ほか, 2012）。産卵期の最初に発達した卵母細胞のほとんどが産卵あるいは再吸収されて消失した場合、その後卵巣内で

新たな卵母細胞が発達を開始し、水温20℃では初回の産卵から約1ヶ月後に再び成熟して産卵可能になる（Fukazawa et al., 2007）。しかしながら、実際の種苗生産現場では、同一個体からは通常1産卵期に1度しか採卵を行っていない。

1個体あたりの産卵数は、産卵時における生殖巣の発達程度によって変化すると考えられるが、生殖巣の量的発達には、水温だけでなく摂餌量や餌の質にも影響を受ける（Uki and Kikuchi, 1982）。エゾアワビでは、餌料として与えた海藻の種による産卵数や産卵回数の違いが検討されており、マコンブとアラメを給餌した個体に比べてアカモク、マクサ、アオサを給餌した個体では、産卵数、産卵回数ともに明らかに少なかったことが報告されている（高見ほか, 2012）。日本国内の種苗生産施設では、ほとんどの場合に、マコンブやワカメ、アラメなどの生の海藻が母貝養成用の餌料として用いられているが、餌料の質と生殖腺の発達について十分な考慮が行われているとは言えない。

水温経過や餌料環境は、産卵期や産卵量ばかりでなく配偶子の質にも影響を及ぼす。オーストラリアに分布するウスヒラアワビでは、天然から採集された個体と飼育されていた個体間で卵の含有脂肪酸量や脂肪酸組成に違いが見られ、これは餌料の違いに起因すると考えられている（Daume and Ryan, 2004）。エゾアワビでは、産卵時の成熟有効積算水温が高いほど卵に含まれる脂肪酸やタンパク質の割合が増加すること、また、脂肪酸やタンパク質の含有率が高いほど、幼生が浮遊していられる期間が伸長し、変態後の初期稚貝の飢餓耐性が増すことがわかっている（Fukazawa et al., 2005）。母貝の卵質は、過去の産卵履歴によっても変化すると考えられる。エゾアワビでは、同一産卵期の最初に産まれた卵に比べて2回目の卵では含有する脂肪酸とタンパク質の割合が増加したことが報告されている（Fukazawa et al., 2007）。親貝の繁殖生理と配偶子および幼生の質の関係については、未だ基礎的研究が不足しており、現在のアワビ類の種苗生産工程ではほとんど配慮されていない。

② 浮遊幼生の発達過程と飼育技術

アワビ類の浮遊幼生は摂餌を行わず、基本的には卵黄を栄養源としている。エゾアワビでは、受精後の卵発生とふ化後の幼生の発達過程が詳しく調べられ、発生・発達速度と水温の関係が明らかにされている（関・菅野, 1977）。種苗生産が行われている他の日本産アワビ類についても同様の情報が集積され、それらに基づいた幼生の管理技術が確立されている（浮, 1995）。また、幼生の飼育技術についても、種苗生産現場で様々な技術開発が行われ、各種アワビ類の幼生を健全に飼育する技術が確立されている（大森ほか, 1995; 柳沢, 1995 など）。

いずれの種についても、浮遊幼生は発生後数日中に着

底・変態が可能となり（関・菅野, 1977, 1981a; Roberts, 2001）, 水温と発達速度の関係式から, あるいは歯舌の発達過程などから採苗時期をかなり正確に判定することができる。種苗生産現場では, 浮遊幼生が着底・変態可能になって以降できるだけ早く採苗を行うことが通例となっているが, 浮遊幼生は, 着底・変態を誘起する化学的因子に遭遇しない場合には浮遊期間を延長することができる（Takami et al., 2002; Onitsuka et al., 2010c）。エゾアワビの場合には少なくとも2週間程度（Takami et al., 2002）, トコブシでは7~11日（Onitsuka et al., 2010c）は変態能力を失わずに浮遊可能であり, 変態後に十分な餌料が保証されれば, 変態の遅れは成長速度や生残率に影響を及ぼさない。浮遊期間が長いほど幼生の着底・変態誘起因子に対する感受性は高まるため（Takami et al., 2002; Onitsuka et al., 2010c）, 種苗生産工程においても浮遊期を長めに取ることにより, 着底・変態率を高められる可能性がある。しかし, 着底・変態後の餌料不足に対する耐性は浮遊期が長くなるほど低下するため（Takami et al., 2002; Onitsuka et al., 2010c）, 幼生をあまり長く浮遊させると変態後の稚貝の生残率や成長速度が低下する恐れがある。トコブシでは, 幼生の着底・変態率と変態後の稚貝の成長・生残を最大にする浮遊期間は5~7日と推定されている（Onitsuka et al., 2010c）。

ただし, 幼生が浮遊可能な最長期間は, 生まれ持った卵黄の量や質（卵質）によって変化し（Fukazawa et al., 2005）, それは産卵時の母貝の成熟状況や産卵履歴によって異なるため（Fukazawa et al., 2007）, 採苗に最適な浮遊期間を決める際には, 母貝の産卵時の状態も考慮する必要がある。親貝の配偶子（卵および精子）の質が幼生や稚貝の成長や生残に及ぼす影響については, 現時点では十分な検討が行われておらず, 今後詳しい研究が必要である。

③ 浮遊幼生の着底・変態過程と採苗（着底・変態誘起）技術

浮遊幼生の着底・変態過程は, アワビ類種苗生産の成否を左右する重要な工程の一つであり, これまでに世界中で様々な技術開発が行われてきたが, 現在においても多くの課題が残されている。着底・変態は外部からの化学的因子により誘起されることがわかっている（Roberts, 2001）。その化学的メカニズムについては未だ完全には解明されておらず, アワビの種によっても異なる可能性があるが, 着底と変態は必ずしも同一の因子により誘起されるものではなく, それぞれ別の因子によるものと考えられている（Roberts, 2001; Roberts et al., 2007）。

天然環境下では, 世界中の多くのアワビ類について, 稚貝が殻状の紅藻類である無節サンゴモ上に多く生息することが知られており, 室内実験でこれまでに調べられた全ての種の浮遊幼生について, 無節サンゴモが着底・

変態を強く誘起したことが報告されている（Roberts, 2001; 河村, 2007）。様々な実験結果から, 無節サンゴモ自体が浮遊幼生の着底・変態を誘起する複数の物質を出すものと考えられているが, それらの物質や作用機序は完全には明らかにされていない（Roberts, 2001; Roberts et al., 2004）。また, 現在のところ, 無節サンゴモ類を計画的に培養する技術は開発されておらず, 種苗生産の採苗工程において無節サンゴモを利用している例はない（Kawamura et al., 2005）。

日本のエゾアワビ種苗生産施設の多くでは, “舐め板”と呼ばれる微細藻類が付着した板が採苗器として用いられている。これは, 表面に付着微細藻類が自然繁茂したプラスチック製の板に殻長1~3cmのアワビ類稚貝を付着させて摂餌活動を行わせたものであり, エゾアワビばかりでなく他の多くのアワビ類についても, 浮遊幼生の着底・変態を誘起することが知られている（Roberts, 2001; 河村, 2007）。舐め板上では, 付着力が強く, 摂食圧に対する耐性の高い *Cocconeis* 属（以下, コッコネイス）などの珪藻（Suzuki et al., 1987）やアワビモという和名を持つ緑藻 *Ulvella lens*（以下, ウルベラ: 高橋, 1986）などが優占している。稚貝に食い残された微細藻類と稚貝が摂餌しながら匍匐するときに残した粘液（匍匐粘液）が相乗的に働いて, 浮遊幼生の着底・変態を誘起するものと考えられているが, 無節サンゴモ同様, その化学的メカニズムはまだ完全には解明されていない（関・菅野, 1981b; 関, 1997; Roberts, 2001）。

舐め板上で優占する藻類の一つである緑藻ウルベラは, アワビ類稚貝による匍匐を行わせた場合（舐め板処理）により強く幼生の着底・変態を誘起するが, 単独でも比較的高く, 安定的な誘起効果を示すことが知られている（高橋, 1986; Daume et al., 2000）。オーストラリアでは, アカアワビ（*Haliotis rubra*）とウスヒラアワビ（*Haliotis laevigata*）の養殖施設において, 培養したウルベラが幼生の着底基質として広く用いられている（Daume, 2006）。日本でもウルベラは, 特にエゾアワビ種苗生産の採苗に用いられているが, オーストラリアでのように単独で用いられるわけではなく, 主に舐め板処理を施した後に用いられている。

エゾアワビ以外のアワビ類では, 日本国内においても海外においても, 表面に付着珪藻を自然発生させたプラスチック板を採苗に用いている場合が多い。多くの場合, 取水を濾過することにより大型の珪藻をできるだけ排除することや, 強い水流を当てて群体状の珪藻を除去することにより, 小型の珪藻種が優占する平面的な群落が形成されるような工夫をしている。この場合, 付着珪藻群落の構造は舐め板同様平面的になるが, 舐め板とは異なり, 付着力が強いコッコネイスなどの珪藻やウルベラが必ずしも優占するわけではない。

付着珪藻のアワビ浮遊幼生に対する着底・変態誘起能は、無節サンゴモや舐め板に比べて不安定である (Roberts, 2001; Roberts et al., 2007)。コッコネイスなど特定の付着珪藻に対して、アワビ類浮遊幼生が非常に高い着底・変態率を示した例が報告されている (大貝ほか, 1991; 河村・菊地, 1992; Roberts and Nicholson, 1997) が、同じ種に対する着底・変態率を実験的に調べた場合にも結果に一貫性がなく (河村・菊地, 1992), 同一株であっても繰り返し実験すると結果が異なることがある (Roberts et al., 2007)。同じ株の珪藻に対しては、概して珪藻密度が高い場合にアワビ浮遊幼生の着底・変態率が高い (河村・菊地, 1992; Daume et al., 1999; Roberts et al., 2007) が、この関係も常に成立するものではない (Roberts et al., 2007)。立体的な群体を造る珪藻に対しては概して変態率が低い (柳橋ほか, 1986; 河村・菊地, 1992) が、これはアワビ類幼生が珪藻の粘液に絡まって正常に着底・変態できないためと考えられている (河村・菊地, 1992)。

付着珪藻のアワビ類浮遊幼生に対する着底・変態誘起能が不安定であることの原因については特定されていない。付着珪藻と共存する細菌の影響が考えられるが、ニュージーランドに生息するヘリトリアワビ (*Haliotis iris*) 浮遊幼生の着底・変態について調べた結果では、細菌の有無や存在量のみでは付着珪藻の幼生に対する着底・変態誘起能の変動を説明できなかった (Roberts et al., 2007)。細菌のみによってアワビ類浮遊幼生の着底・変態が強く誘起された例は知られていない (Roberts, 2001; Roberts et al., 2007)。

アメリカやメキシコのアワビ類の養殖施設では、 γ -アミノ酪酸 (以下、GABA) を用いて幼生の着底・変態を促進する技術が用いられている (Kawamura et al., 2005; 河村, 2008)。GABA は微生物によって分解されやすく (Kaspar and Mountfort, 1995), 無節サンゴモや舐め板に比べて幼生を変態まで導くために時間がかかるため (Roberts, 2001), GABA を効果的に用いるには通常は抗生物質等を併用する必要があるが、メキシコのアカネアワビ *Haliotis rufescens* の種苗生産では、抗生物質を用いずに GABA によって着底・変態を誘起できたことが報告されている (Searcy-Bernal and Anguiano-Beltrán, 1998)。また、GABA は幼生の遊泳行動を阻害して変態させる機能を持つため (Roberts, 2001), GABA を用いる場合には着底基質を水平方向に設置する必要がある。したがって、採苗板を鉛直方向に高密度に設置して表面積を確保している日本の種苗生産施設での使用には適していない。さらに GABA は、トコブシなどの小型種の浮遊幼生の着底・変態を促進しないこともわかっている (Roberts and Nicholson, 1997; Bryan and Qian, 1998)。アメリカやメキシコの種苗生産現場で、実際にどのような方法で GABA を用いているのかは明らかにされていない。

④ 稚貝の成長に伴う食性変化と給餌技術

エゾアワビでは生活史の初期に、成長に伴って主な餌料が大きく3回変化することがわかっており、成長段階毎の食性が明らかにされている (Kawamura et al., 1998b; 高見・河村, 2002; Takami and Kawamura, 2003; 河村, 2007)。エゾアワビ以外で生活史初期の食性が詳細に調べられた例は少ないが、遺伝的にエゾアワビと近縁ではないニュージーランド産のヘリトリアワビ (Kawamura et al., 1998a; Roberts et al., 1999a) やトコブシ (Onitsuka et al., 2007a) でも同様の生活史初期における食性変化が認められたことから、エゾアワビ初期稚貝の摂餌生態は、似通った環境に生息するアワビ類にある程度共通するものと考えられる。

浮遊幼生期から変態後数日間は卵黄を主な栄養源とし、変態直後の初期稚貝は、まったく餌を与えない状態でも殻長 0.4 mm 程度までは成長できる (Takami et al., 2000, 2002)。しかし、変態後 10 日程度までには卵黄を使い果たし、その後は無節サンゴモや珪藻などの分泌粘液、アワビ稚貝の分泌粘液など、広範な粘液状の物質を主な餌料とする (Kawamura and Takami, 1995; Takami et al., 1997a, 1997b)。この時期には、珪藻の細胞内容物は成長に不可欠ではなく、珪藻の種による成長速度の差は小さい。しかし、殻長 0.6~0.8 mm まで成長すると粘液物質だけでは良好に成長することができなくなり、付着珪藻の細胞内容物などを摂取する必要が生じる (Kawamura et al., 1995)。アワビ類は珪藻の細胞殻を消化管内で分解・消化できないため、細胞内容物を利用するためには、基質から珪藻を剥ぎ取る際に珪藻の殻を壊す必要がある。付着力が弱いため稚貝が“摂食しやすい”珪藻の餌料価値が必ずしも高いとは言えない。*Cylindrotheca closterium* (以下、シリンドロセカ) や一部の *Nitzschia* 属珪藻などの例外的に殻のもろい珪藻 (Kawamura et al., 1995, 1998a) を除けば、摂食されやすい珪藻の多くは分解されずに丸呑みにされ生きたまま排泄されてしまうため、稚貝が細胞内容物を栄養源として利用することができない。細胞の大きさが稚貝の口径よりも小さな珪藻は、摂食されやすいため好適餌料と考えられがちであるが、その多くは分解・消化率が低いため、稚貝が成長に必要な栄養を確保するためには非常に多くの量を摂取する必要がある。一方、基質に強く付着するコッコネイスなどの珪藻は、剥ぎ取られる際に殻が壊れやすく、結果的に初期稚貝が珪藻の細胞内容物を利用することができるため餌料価値が高い (Kawamura et al., 1995, 1998a, 1998b; Roberts et al., 1999a)。アワビ類初期稚貝がこれら付着力の強い珪藻を効率よく基質から剥ぎ取ることができるようになるのは殻長 0.8 mm 前後からであり、それはこの頃に起こる歯舌の構造変化によるものと考えられる (Roberts et al., 1999b; Kawamura et al., 2001; Onitsuka et al., 2004)。エゾアワビで

は、殻長 2 mm 前後から海藻の幼芽（芽胞体）を効果的に利用できるようになることが実験的に確かめられている（Takami et al., 2003）。海藻幼芽のトコブシに対する餌料価値を配偶体と芽胞体に分けて餌料価値の高い珪藻と比較した結果では、配偶体の餌料価値は殻長 3~6 mm（Onitsuka et al., 2010b, 2011）の、芽胞体の餌料価値は殻長 5 mm 以上のトコブシ稚貝にとって高かった（Onitsuka et al., 2010b）。アワビ類稚貝が成長とともに海藻幼芽を利用できるようになるのは、大型海藻の藻体に含まれる多糖類を分解する消化酵素活性の増加（Takami et al., 1998）や歯舌の構造変化（Kawamura et al., 2001; Onitsuka et al., 2004）に伴うものと考えられる。一方、*Cocconeis* 属などの珪藻は、ある程度成長した稚貝に対しては餌料効率が低く、他に好適な餌料がある場合には積極的に摂餌されなくなる（高見ほか, 1996）。

上述したように、アワビ類の種苗生産現場においては様々な手法を用いて浮遊幼生の着底・変態が誘起されているが、いずれについても、変態した初期稚貝はその後引き続き着底した基質上で飼育される。ほとんどの場合に、殻長 5 mm 程度に成長すると着底基質から剥離され、人工餌料の給餌が開始される。したがって、殻長 5 mm 程度までは、着底基質となる採苗板上に存在する餌料が稚貝の栄養源となる。殻長 5 mm 程度になると、人工餌料も栄養源として効率的に利用されるものと考えられる。

舐め板上では、板の作成に用いたアワビ稚貝が残した匍匐粘液や板上の付着藻類が分泌する粘液物質が変態直後からの（Takami et al., 1997b）、また、殻長が 0.8 mm に達する頃からは板上に優占するコッコネイスなどの珪藻が好適餌料となり（Kawamura et al., 1995）、少なくとも殻長 5 mm 程度までは良好に成長を続ける。舐め板上でしばしば優占するウルベラは、初期稚貝の餌料としては不適と考えられている（Uki et al., 1981; Daume et al., 2000）。単種培養されたウルベラが採苗に広く用いられているオーストラリア産のアカアワビとウスヒラアワビの初期稚貝も、殻長 3 mm 程度までウルベラを効率的に摂取できないことがわかっている（Daume et al., 2004）。“舐め板化”処理を行わずにウルベラの優占する板で採苗を行い、そのままエゾアワビ初期稚貝の飼育を継続した場合、着底後初期にはアワビモの分泌粘液が好適餌料となるが、着底・変態後 2 週間程度以降になると稚貝は良好に成長することができなくなる（關, 1997; Daume, 2006）。

自然発生した付着珪藻を用いた採苗方法の場合には、変態直後から殻長 0.6~0.8 mm 程度までは珪藻が分泌する粘液が好適な餌料となる（Kawamura and Takami, 1995）。しかし、その後は粘液物質だけでは良好に成長することができなくなり、付着珪藻の細胞内容物などを摂取する必要が生じるため、採苗板上に優占する珪藻の種によって成長速度に違いが生じてくる（Kawamura et al., 1995,

1998a, 1998b）。海外のアワビ類種苗生産施設では、単種培養した付着珪藻を初期餌料として用いている例も見られるが（Kawamura et al., 2005）、その多くは大量培養しやすい珪藻を用いており、必ずしも餌料価値の高いものを選んでいないわけではない。

III-5-2) アワビ類の繁殖生態、初期生態に基づく新たな種苗生産技術開発の可能性

上述したように、日本国内のエゾアワビ種苗生産施設で広く用いられている舐め板による採苗技術は、天然で着底基質となっている無節サンゴモには及ばないものの、他の採苗法に比べれば浮遊幼生の着底・変態を安定的に強く誘起し、変態後の初期稚貝にとって好適な餌料を提供するため、現在使われている採苗技術としては世界で最も優れた技術と言える。しかし実際には、舐め板採苗技術は日本国内におけるエゾアワビ生産施設以外では現在ほとんど用いられていない。舐め板の作成には、幼生を投入する前にあらかじめ舐め板を作成するための別水槽と板を舐めさせるための稚貝を確保する必要があること、それら稚貝の剥離作業等に多大な労力を要すること、稚貝に板を舐めさせてコッコネイスやウルベラなど幼生の着底・変態に好適な藻類を優占させるまでに長時間を要すること、その間に管棲多毛類や小型甲殻類などの汚損生物が混入しやすいこと、などがその理由と考えられる（Kawamura et al., 2005; 河村, 2008）。日本におけるアワビ類の種苗生産は、過去においては都道府県の公立の機関を中心に進められてきたが、現在ではその多くが民営化されつつあり、生産コストの削減が求められている。海外においては、ほとんどの場合、養殖業の一環として民間業者がアワビ類の種苗生産を行っており、生産コストを可能な限り抑えることが至上命題となっている。このような状況において、比較的成本や労力の高い舐め板を用いた種苗生産技術を現状のまま普及させることは困難と考えられる。また、舐め板を用いた場合にも、板上の珪藻の密度や種組成を長期間維持することは難しく、稚貝の成長速度は必ずしも安定的に高いとは言えない。現状の舐め板採苗技術に代わる新たな手法の開発が必要とされる。

2011 年の大津波で被災した種苗生産施設の再建にあわせて、新たな種苗生産技術の開発、導入を目指したプロジェクト研究「アワビの緊急増殖技術開発研究」では、アワビ類初期稚貝の摂餌生態に関する最新の科学的知見に基づき、初期稚貝に対する餌料価値が高い付着珪藻の大量培養技術を確立し、それを種苗生産工程に組み込むことを目指した技術開発が進んでいる。上述したように、殻長 0.6~0.8 mm 程度までのアワビ類初期稚貝は広範な粘液物質を餌料とするため、付着珪藻が繁茂する採苗器上で初期稚貝の密度が適正に保たれてさえいれば、優占

する珪藻の種にかかわらず良好な成長が期待できる。しかし、0.6~0.8 mm 以上に成長すると、初期稚貝は粘液物質だけでは良好に成長することができなくなり、付着珪藻の細胞内容を摂取する必要が生じるため、採苗器上に優占する珪藻の種によって成長速度に大きな違いが生じる。この時期以降の初期稚貝にとって餌料価値の高い珪藻は、初期稚貝が摂餌する際に細胞が壊れやすい種であり、コッコネイスなど付着力の非常に強い珪藻、あるいはシリンドロセカなどの細胞殻の脆い例外的な種がその候補として挙げられる。コッコネイスなど付着力の強い珪藻は、浮遊幼生の着底・変態を比較的高率に誘起し、殻長 0.8 mm 程度以上の初期稚貝にとっては好適餌料であるが、粘液の分泌量がやや少ないため、細胞を基質から剥離できない小さな初期稚貝にとっては好適な餌料にならない。また、増殖速度が非常に遅く(河村ほか, 1998)、基質に強固に付着するため剥離展開が困難である。それに対して、シリンドロセカなどの針型の細胞形状を持つ珪藻種(以下、針型珪藻)は、着底直後から初期稚貝期を通じて餌料価値が高い。また、増殖が非常に速く、培養や剥離展開も容易である。このことから「アワビの緊急増殖技術開発研究」では、シリンドロセカなど針型珪藻の最適な培養条件を明らかにし、大量培養法を確立した。

針型珪藻は付着力が弱いため、わずかな水流や振動で基質から剥がれ落ちて海水中に懸濁するが、懸濁した状態でも増殖できるため、懸濁させて高密度に培養し、段階的に大量培養を進めることが可能である(松本ほか, 2018a)。それを採苗板上に付着させて用いるわけであるが、針型珪藻はアワビ類浮遊幼生の着底・変態をほとんど誘起しない(河村・菊地, 1992; Roberts et al., 2007)。そこで、ウルベラと針型珪藻を併用することにより、着底・変態率を下げずに餌料の安定供給を行う手法の開発が進んでいる。ウルベラを培養した後に数日間の舐め板処理を施し、そこに培養した針型珪藻を添加した板を用いてエゾアワビの採苗を実験的に行った結果、安定的に高い幼生の着底・変態率が得られ、さらに従来の舐め板を用いた手法に比べて高い稚貝の生残率と成長速度が得られた(松本ほか, 2015)。さらに、舐め板処理を施さないウルベラに針型珪藻を添加した板に対しても 60%を超える幼生の着底・変態率が得られることが確認にされた(松本ほか, 2018b)。

付着珪藻などの天然餌料ではなく、人工微粒子餌料を用いた全く新しい採苗・飼育法が考案されている(Stott et al., 2004)。すなわち、プラスチック板の表面に非常に細かい人工餌料の粒子をあらかじめ吹き付けて塗布したものを採苗器として用いた方法である。自然発生した付着珪藻を与えた場合と同等の成長速度が報告されているが、舐め板を用いた場合や実験的に餌料価値の高い珪藻

を餌料とした場合に比べれば成長は遅く、生残率も低い。また、餌の追加方法が未確立であり、幼生の着底・変態率も低いことなど、実用化するためには解決すべき問題点が多く残されている。しかし、自然変動する微細藻類を餌料とする方法とは異なり、採苗器の状態を一定に維持可能であることから、改良が行われれば、将来的には画期的な新手法として期待される。

現在、ほとんどのアワビ類種苗生産施設において、稚貝が殻長 5 mm 程度に成長すると着底基質から剥離され、人工餌料の給餌が開始される。上述したように、この時期の稚貝は海藻類の幼芽を餌料として利用可能になっており、培養した海藻の配偶体や芽胞体を給餌する手法もあり得る。稚貝の成長や生残を人工餌料と海藻幼芽を給餌した場合で比較した研究例はないが、海藻幼芽を餌料とすることにより、給餌による飼育海水の汚染を軽減することはできる。アワビ類の餌料として有効なワカメやマコンブなどについては、すでに種苗生産の手法が確立されており、配偶体や芽胞体を必要な時期に入手することは可能である。アワビ類稚貝に給餌する手法を開発すれば、十分に実用化可能と考えられる。

「アワビの緊急増殖技術開発研究」では、新たな採苗手法の開発とともに、親貝の採卵手法についても改良を試みている。すなわち、雌のエゾアワビ同一個体が 1 産卵期に少なくとも 2 回は成熟して放精可能になること(Fukazawa et al., 2007; 高見ほか, 2012)、2 回目に成熟した卵(2 次成熟卵)は 1 回目の成熟卵よりも卵質が優れている可能性があること(Fukazawa et al., 2005, 2007)を利用し、同一の雌から複数回採卵を行うことによってコストの削減と種苗生産効率の向上をはかるため、事業規模での検証と実用化を目指した技術開発を行っている。卵や精子の質については、まだ基礎研究が必要な段階ではあるが、親貝に与える餌料の選択や改良、成熟過程や産卵誘発のタイミングの調整により、卵や精子の質を向上させ、稚貝の成長速度や生残率を上げることが可能になるかもしれない。

人工飼育されたアワビ稚貝の遺伝的変異性が天然集団に比べて低いことが報告されており(Hara and Sekino, 2007)、人工種苗の大量放流が再生産を通じて天然集団に悪影響を及ぼすことが懸念されている。人工種苗の生理・生態的特性が天然個体とは異なり、それが放流後の成長や生残に影響を及ぼす可能性も考えられてきたが、詳細な研究は行われていない。稚貝の放流後の成長速度や生残率、さらには再生産能力を向上させるためにも、天然個体群への悪影響を避けるためにも、人工種苗の“質”についての研究が必要であり、質の高い種苗を放流する努力が求められている。

引用文献

- Bryan, P.J. and P.Y. Qian (1998) Induction of larval attachment and metamorphosis in the abalone *Haliotis diversicolor* (Reeve). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **223**, 39-51.
- Daume, S. (2006) The role of bacteria and micro and macro algae in abalone aquaculture: a review. *J. Shellfish Res.*, **25**, 151-157.
- Daume, S., S. Brand-Gardner and W.J. Woelkerling (1999) Preferential settlement of abalone larvae: diatom films vs non-geniculate coralline red algae. *Aquaculture*, **174**, 243-254.
- Daume, S., S. Huchette, S. Ryan and R.W. Day (2004) Nursery culture of *Haliotis rubra*: the effect of cultured algae and larval density on settlement and juvenile production. *Aquaculture*, **236**, 201-209.
- Daume, S., A. Krsinich, S. Farrell and M. Gervis (2000) Settlement and early growth of *Haliotis rubra* in response to different algal species. *J. Appl. Phyco.*, **12**, 479-488.
- Daume, S. and S. Ryan (2004) Fatty acid composition of eggs derived from conditioned and wild caught greenlip abalone broodstock (*Haliotis laevigata*). *J. Shellfish Res.*, **23**, 967-974.
- Fukazawa, H., T. Kawamura, H. Takami and Y. Watanabe (2007) Oogenesis and relevant changes in egg quality of abalone *Haliotis discus hannai* during a single spawning season. *Aquaculture*, **270**, 265-275.
- Fukazawa, H., H. Takami, T. Kawamura and Y. Watanabe (2005) The effect of egg quality on larval period and post-larval survival of an abalone *Haliotis discus hannai*. *J. Shellfish Res.*, **24**, 1141-1147.
- Hara, M. and M. Sekino (2007) Genetic differences between hatchery stocks and natural populations in Pacific abalone (*Haliotis discus*) estimated using microsatellite DNA markers. *Mar. Biotech.*, **8**, 80-90.
- Kaspar, H.F. and D.O. Mountfort (1995) Microbial production and degradation of γ -aminobutyric acid (GABA) in the abalone larval settlement habitat. *FEMS Microbiology Ecology*, **17**, 205-212.
- 河村知彦 (2007) アワビ類浮遊幼生の着底場選択とその生態学的意義. *Sessile Organisms*, **24**, 27-34.
- 河村知彦 (2008) 生態学的特性に基づいたアワビ類種苗生産技術. *月刊海洋*, **40**, 552-559.
- 河村知彦・菊地省吾 (1992) エゾアワビ幼生の着底と変態に及ぼす付着珪藻の影響. *水産増殖*, **40**, 403-409.
- 河村知彦・岡村和麿・高見秀輝 (1998) アワビの好適餌料珪藻 *Cocconeis scutellum* var. *parva* の増殖特性. *水産増殖*, **46**, 509-516.
- Kawamura, T., R.D. Roberts and C.M. Nicholson (1998a) Factors affecting the food value of diatom strains for post-larval abalone *Haliotis iris*. *Aquaculture*, **160**, 81-88.
- Kawamura, T., R.D. Roberts and H. Takami (1998b) A review of the feeding and growth of postlarval abalone. *J. Shellfish Res.*, **17**, 615-625.
- Kawamura, T., R.D. Roberts and H. Takami (2005) Importance of periphyton in abalone culture. In: *Periphyton: Ecology, Exploitation and Management*, eds. M.E. Azim, M.C.J. Verdegem, A.A. van Dam and M.C.M Beveridge, CABI Publishing, UK, 269-284.
- Kawamura, T., T. Saido, H. Takami and Y. Yamashita (1995) Dietary value of benthic diatoms for the growth of post-larval abalone *Haliotis discus hannai*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **194**, 189-199.
- Kawamura, T. and H. Takami (1995) Analysis of feeding and growth rate of newly metamorphosed abalone *Haliotis discus hannai* fed on four species of benthic diatom. *Fisheries Sci.*, **61**, 357-358.
- Kawamura, T., H. Takami, R.D. Roberts and Y. Yamashita (2001) Radula development in abalone, *Haliotis discus hannai*, from larva to adult in relation to feeding transitions. *Fisheries Sci.*, **67**, 596-605.
- 菊地省吾・浮 永久 (1974a) 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. *東北水研研報*, **33**, 69-78.
- 菊地省吾・浮 永久 (1974b) アワビ属の採卵技術に関する研究 第2報 紫外線照射海水の産卵誘発効果. *東北水研研報*, **33**, 79-86.
- 松本有記雄・伯耆匠二・中坪あゆみ・西洞孝広・野呂忠勝・貴志太樹・高見秀輝・河村知彦 (2018a) アワビ類の初期餌料として好適な針型珪藻 *Cylindrotheca closterium* の大量培養法と採苗板への展開法に関する研究. *日水誌*, 印刷中.
- 松本有記雄・中坪あゆみ・高見秀輝・河村知彦 (2018b) エゾアワビの採苗における緑藻アワビモ *Ulvella lens* の利用可能性と針型珪藻 *Cylindrotheca closterium* との併用. *日水誌*, 印刷中.
- 松本有記雄・野呂忠勝・高見秀輝・藤浪祐一郎・久慈康支・河村知彦 (2015) アワビモ *Ulvella lens* と稚貝の匍匐粘液に針型珪藻 *Cylindrotheca closterium* を付着させた板によるエゾアワビ採苗法の検討. *日水誌*, **81**, 995-997.
- Morse, D.E., H. Duncan, N. Hooker and A. Morse (1976) Hydrogen peroxide induces spawning in mollusks, with activation of prostaglandin endoperoxide synthetase. *Science*, **196**, 298-300.
- 中家 浩・高見秀輝 (2012) エゾアワビの異なる繁殖形態による加入機構の比較. *日水誌*, **78**, 1217-1220.

- 大貝政治・若野 真・長井 敏 (1991) エゾアワビ幼生の着底と稚貝の成長に及ぼす付着性微細藻類の影響. 水産増殖, **39**, 263-266.
- 鬼塚年弘・河村知彦 (2008) 相模湾におけるトコブシの新規加入量変動要因. 月刊海洋, **40**, 500-506.
- Onitsuka, T., T. Kawamura and T. Horii (2010a) Reproduction and early life ecology of abalone *Haliotis diversicolor* in Sagami Bay, Japan. JARQ, **44**, 375-382.
- Onitsuka, T., T. Kawamura, T. Horii, N. Takiguchi, H. Takami and Y. Watanabe (2007b) Synchronized spawning of an abalone *Haliotis diversicolor*, triggered by typhoon events in Sagami Bay, Japan. Mar. Ecol. Prog. Ser., **351**, 129-138.
- Onitsuka, T., T. Kawamura, S. Ohashi, T. Horii and Y. Watanabe (2004) Morphological changes in the radula of abalone *Haliotis diversicolor aquatilis* from post-larva to adult. J. Shellfish Res., **23**, 1079-1085.
- Onitsuka, T., T. Kawamura, S. Ohashi, T. Horii and Y. Watanabe (2007a) Dietary value of benthic diatoms for post-larval abalone *Haliotis diversicolor*, associated with the feeding transitions. Fisheries Sci., **73**, 295-302.
- Onitsuka, T., T. Kawamura, S. Ohashi, S. Iwanaga and T. Horii (2010b) Dietary value of gametophytes and juvenile sporophytes of the brown macroalga *Eisenia bicyclis* for juvenile abalone *Haliotis diversicolor*. Fisheries Science, **76**, 619-623.
- Onitsuka, T., T. Kawamura, S. Ohashi, S. Iwanaga, and T. Horii (2011) Growth and survival of juvenile abalone *Haliotis diversicolor* fed on brown macroalgal gametophytes, a potential alternative initial diet, Aquaculture, **313**, 79-83.
- Onitsuka, T., T. Kawamura, S. Ohashi, S. Iwanaga, T. Horii and Y. Watanabe (2010c) Effects of delayed metamorphosis and delayed post-settlement feeding on post-larval survival and growth of the abalone *Haliotis diversicolor*. Aquaculture, **298**, 239-244.
- 大森正明・河原郁恵・石田亨一 (1995) エゾアワビ種苗生産技術の実際. 「アワビ類の種苗生産技術」日本栽培漁業協会, 東京, 93-124.
- Roberts, R.D. (2001) A review of settlement cues for larval abalone (*Haliotis* spp.). J. Shellfish Res., **20**, 571-586.
- Roberts, R.D., H.F. Kaspar and R.J. Barker (2004) Settlement of abalone (*Haliotis iris*) larvae in response to five species of coralline algae. J. Shellfish Res., **23**, 975-987.
- Roberts, R.D., T. Kawamura and C.M. Handley (2007) Factors affecting settlement of abalone (*Haliotis iris*) larvae on benthic diatom films. J. Shellfish Res., **26**, 323-334.
- Roberts, R.D., T. Kawamura and C.M. Nicholson (1999a) Growth and survival of post-larval abalone (*Haliotis iris*) in relation to their development and diatom diet. J. Shellfish Res., **18**, 243-250.
- Roberts, R.D., T. Kawamura and H. Takami (1999b) Morphological changes in the radula of abalone (*Haliotis iris*) during post-larval development. J. Shellfish Res., **18**, 637-644.
- Roberts, R.D. and C.M. Nicholson (1997) Variable response from abalone larvae (*Haliotis iris*, *H. virginea*) to a range of settlement cues. Moll. Res., **18**, 131-141.
- 西洞孝広 (2002) 岩手県におけるエゾアワビ資源の回復とその要因. 月刊海洋, **34**, 477-481.
- 佐々木 良 (2001) エゾアワビの加入機構に関する生態学的研究. 宮城水産研報, **1**, 1-86.
- Sasaki, R. and S.A. Shepherd (1995) Larval dispersal and recruitment of *Haliotis discus hannai* and *Tegula* spp. on Miyagi coast, Japan. Mar. Freshwat. Res., **46**, 519-529.
- Searcy-Bernal, R. and C. Anguiano-Beltrán (1998) Optimizing the concentration of γ -aminobutyric acid (GABA) for inducing metamorphosis in the red abalone *Haliotis rufescens* (Mollusca: Gastropoda). J. World Aqua. Soc., **29**, 463-470.
- 關 哲夫 (1997) エゾアワビの種苗生産技術体系とその基礎となる生物学的研究. 東北水研研報, **59**, 1-71.
- 關 哲夫・菅野 尚 (1977) エゾアワビの初期発生と水温による発生速度の制御. 東北水研研報, **38**, 143-153.
- 關 哲夫・菅野 尚 (1981a) エゾアワビ被面子幼生の着底と変態について. 東北水研研報, **42**, 31-39.
- 關 哲夫・菅野 尚 (1981b) アワビ足蹠粘液状物質によるエゾアワビ被面子幼生の着底誘起. 東北水研研報, **43**, 29-36.
- Stott, A.E., T. Takeuchi and Y. Koike (2004) Performance of a new artificial abalone hatchery culture system in terms of settlement of larvae and growth and survival of postlarval *Haliotis discus discus* (Reeve). Fisheries Sci., **70**, 1071-1080.
- Suzuki, H., T. Ioriya, T. Seki and Y. Aruga (1987) Changes of algal community on the plastic plates used for rearing the abalone *Haliotis discus hannai*. Nippon Suisan Gakkaishi, **53**, 263-267.
- 高橋寛爾 (1986) 緑藻類 *Ulva lens* の生態に関する研究. 昭和 59-60 年度宮城栽セ事業報告, 32-60.
- 高見秀輝・河村知彦 (2002) エゾアワビの成長に伴う食性変化とその機構. 月刊海洋, **34**, 504-511.
- Takami, H. and T. Kawamura (2003) Dietary changes in the abalone, *Haliotis discus hannai*, and relationships with the development of the digestive organ. J. Agr. Res. Quart., **37**, 89-98.
- 高見秀輝・河村知彦・山下 洋 (1996) エゾアワビ 1 歳貝に対する付着珪藻の餌料価値. 水産増殖, **44**, 211-216.

- Takami, H., T. Kawamura and Y. Yamashita (1997a) Contribution of diatoms as food sources for post-larval abalone *Haliotis discus hannai* on a crustose coralline alga. *Moll. Res.*, **18**, 143-151.
- Takami, H., T. Kawamura and Y. Yamashita (1997b) Survival and growth rates of post-larval abalone *Haliotis discus hannai* fed conspecific trail mucus and/or benthic diatom *Cocconeis scutellum* var. *parva*. *Aquaculture*, **152**, 129-138.
- Takami, H., T. Kawamura and Y. Yamashita (1998) Development of polysaccharide degradation activity in postlarval abalone *Haliotis discus hannai*. *J. Shellfish Res.*, **17**, 723-727.
- Takami, H., T. Kawamura and Y. Yamashita (2000) Starvation tolerance of newly metamorphosed abalone *Haliotis discus hannai*. *Fisheries Sci.*, **66**, 1180-1182.
- Takami, H., T. Kawamura and Y. Yamashita (2002) Effects of delayed metamorphosis on larval competence, and post-larval survival and growth of abalone *Haliotis discus hannai*. *Aquaculture*, **213**, 311-322.
- 高見秀輝・深澤博達・河村知彦・村岡大祐 (2012) エゾアワビの成熟に及ぼす餌料の質・量の影響. *日水誌*, **78**, 1205-1207.
- Takami, H., D. Muraoka, T. Kawamura and Y. Yamashita (2003). When is the abalone *Haliotis discus hannai* Ino 1953 first able to use brown macroalgae? *J. Shellfish Res.*, **22**, 795-800.
- 浮 永久(1995)アワビ類の繁殖生理と種苗生産の組立て. 「アワビ類の種苗生産技術」日本栽培漁業協会, 東京, 1-92.
- Uki, N., J.F. Grant and S. Kikuchi (1981) Juvenile growth of the abalone, *Haliotis discus hannai*, fed certain benthic micro algae related to temperature. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.*, **43**, 59-64.
- Uki, N. and S. Kikuchi (1982) Influence of food levels on maturation and spawning of the abalone, *Haliotis discus hannai* related to effective accumulative temperature. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.*, **45**, 45-53.
- 柳橋茂昭・高尾充英・大岩和男 (1986) 愛知県栽培漁業センターにおけるアワビ種苗生産について. 愛知県栽培漁業センタークロアワビ種苗生産技術, 2-44.
- 柳澤豊重 (1995) クロアワビ種苗生産技術の実際. 「アワビ類の種苗生産技術」日本栽培漁業協会, 東京, 125-153.

Ⅲ-6 日本におけるアワビ類養殖の方向性

鴨志田正晃

禁漁措置を取った場合のアワビ漁業の代替として, 現

在放流用として使用している種苗を用いてアワビ類養殖を行ってはどうかという考え方がある。日本で生産されている放流用のアワビ類種苗 2,500~3,000 万個を養殖に振り向け, 3~4 年間養殖し 1 個体が 150 g になると仮定すると 3,750~4,500 トンの生産が可能と試算され, これは近年の漁獲量の 2 倍以上で, 減少した天然アワビ類を十分にカバーできる量としている (原, 2010)。また, オーストラリア, ニュージーランド以外のメキシコ, 南アフリカ, 韓国, アメリカなど世界の漁獲量は日本と同様に減少が著しく, 世界市場への供給量が減少していることから不法な漁獲が急増し, 2008 年には世界中で 5,000~6,000 トンが密漁されたと推定されており, 養殖生産量の増加は世界的なアワビ類の需給バランスをある程度緩和すると評価されている (原, 2010)。実際に 2013 年の FAO の統計によると世界のアワビ類養殖生産量は約 12 万トンと天然の漁獲量約 8,000 トンの 10 倍以上となっており養殖が主流となっている。このように世界の養殖生産量が増加する中で, 安価な養殖アワビ類, 特に韓国産アワビ類が日本に大量に輸入されている現状にある (山川, 2014)。一方, 日本におけるアワビ類の養殖は, 主に放流用に生産された種苗を用いて養殖が行われており, 出荷サイズまで育成するのに 3~4 年かかることから生産コストが高く養殖業として発展してこなかった。養殖産業として成立させるためには, 安価な中国産, 韓国産の養殖アワビ類と少なくとも同等レベルまで低コスト化する技術開発が必要である。生産コストを下げるためには, 光熱水量のかからない海面養殖で天然海藻あるいは安価な養殖海藻を利用することが考えられる。ただし, アワビの生息適水温は 13~20°C とされており (井上, 1987), 日本では冬期と夏期の水温差が大きく, また, 温暖化の影響で海水温が上昇していることを考えると養殖に適した海域は, 太平洋中から東北, 北海道など, かなり限定された地域になると思われる。養殖筏等が設置できる穏やかな海面や安価な天然海藻等を確保でき, アワビ類の養殖に適した環境条件を持つ海域を選定することが必要となる。

もう一つの考え方として, 育種により成長の早い種苗, 高温や低水温に強い系統, 筋萎縮症など疾病に耐性を持った系統などを開発 (原, 2010) して養殖に用いることで飼育期間の短縮や効率化を図り, 生産コストを下げる事が考えられる。しかし, このような養殖種苗は天然集団と異なる遺伝特性を持つことから, 開放的な海での養殖生産は育種した種苗が天然海域に逃避する可能性があり, 生態系への大きなリスクを伴うことが懸念されている (原, 2010)。このため育種による養殖は, 陸上養殖など海面と隔離された環境で行う必要がある。閉鎖循環システムの利用を含め陸上で養殖を行う場合には, 取水, 加温などの光熱水費がかかること

から、温排水や地熱を利用できる場所の選定も必要である。

安価な外国産アワビ類に対抗して養殖産業として発展させるためには、安定的な需要確保のための販売戦略が必要である。中国、韓国のような大規模養殖は、日本の環境を考えると難しく、地産地消の取り組みや安全安心な高品質のアワビ類を生産して販売することになるであろう。また、生産コストを押さえるために大型サイズのアワビに限らず、一口アワビでの出荷や新たな食べ方としてアワビの新メニュー開発（養殖ビジネス編集部, 2014）といった需要を掘り起こす取り組みの検討も必要である。

引用文献

- 原 素之(2010)第2章日本に輸入される養殖水産物 アワビ。「養殖」臨時増刊号, 55-59.
- 井上正昭(1987)アワビの漁業管理. 国内における資源評価および管理手段に関するレビュー, 日本水産資源保護協会, 120-218.
- 山川 紘(2014)日本と海外におけるアワビの養殖産業. 月刊養殖ビジネス, **51**, 9, 3-7.
- 養殖ビジネス編集部(2014)国産アワビ養殖の現状と課題解決のための挑戦. 月刊養殖ビジネス, **51**, 9, 12-15.