

### 第3章 海洋深層水による海洋生物の増養殖

#### 3.1 海洋生物の増養殖が抱える諸問題

国内の水産業を取り巻く情勢は、漁獲量の増大に伴う資源の低迷、沿岸環境の悪化、輸入の増加、漁業従事者の減少や高齢化などの諸問題を抱えて大変厳しい。その善後策となるはずの栽培漁業や資源管理型漁業も、各海域の生態系や生物群集に関する基礎知見が不足しているうえ、沿岸域が自然（平衡）から逸脱した脆弱な人為的生態系・群集に変遷しているため、一部に成功例が垣間見えるにすぎない。バブル経済崩壊後の長引く不況に端を発し、公共事業として行われてきた増殖場造成などの水産土木事業や港湾・海岸保全事業も曲がり角に来ており、経済効果や採算性に加え、事業の必要性や自然への配慮がこれまで以上に問われている。特に、四半世紀が経過した栽培漁業は、社会情勢の変化や放流事業の不調のため、対象魚種や取り組み体制の見直しが迫られ、地域によっては清浄な飼育用水の確保も困難になっている。栽培漁業に係る生物飼育は、小規模の試験研究と異なり、資源回復、食料増産、経費回収などの重要な使命を帯び、しかも疾病に弱い稚仔期を大量に高密度で扱うことから、飼育用水の量と質が要求される。水量と水質の確保は、淡水生物の場合には湖沼・河川水ではなく地下水、海洋生物の場合には表層海水よりも海洋深層水（以下、深層水）への期待が大きいが、深層水の使用によって新たな問題も起こりうる。

#### 3.2 海洋深層水の特性と生物飼育

水産分野は、低水温、富栄養、清浄、水質安定という深層水の4大特性をフルに活かせる唯一の分野である。参考までに、表3-2-1に高知県と富山県に

表3-1-1 高知県と富山県における表層水と海洋深層水の水質比較データ

項目	高知県		富山県	
	表層海水 (0m)	海洋深層水 (320m)	表層海水 (0m)	海洋深層水 (320m)
水温 ℃	16.1-24.9	8.1-9.8	8.30	1-2
pH	8.1-8.3	7.8-7.9	*	—
塩分 psu	33.7-34.8	34.3-34.4	33.0-34.0**	34.0-34.1
溶存酸素量 ppm	6.4-9.5	4.1-4.8	—	—
硝酸態窒素 μM	0.0-5.4	12.1-26.0	0-3	14-26
リン酸態リン μM	0.0-0.5	1.1-2.0	0.03-0.1	1.2-1.8
ケイ酸態珪素 μM	1.6-10.1	33.9-56.8	3.9	30-38
クロロフィルa mg/m <sup>3</sup>	4.2-50.6	痕跡	—	—
生菌数 CUF/ml	10 <sup>8</sup> -10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	10-10 <sup>5</sup>	1-10

値は各県のパンフレット「室戸海洋深層水」「富山の深層水」による。

\*—は表示なし。 \*\*内湾域のため、沿岸では2分の1以下にまで下がる。

における表層水と深層水の水質比較データを示した。

#### 3.2.1 低水温

低水温の確保は、サケ・マス、エゾアワビ、コンブなど冷水性生物、マダラ、エゾバイ類など深海生物の飼育・培養には不可欠で、ヒラメやクルマエビなどの浅海生物も、夏の高水温期に水温を下げれば、疾病を予防して生残率を高め、成長を維持できる。必要な温度や期間は対象生物で異なるが、深層水を冷熱源として熱交換か混合すれば表層水を機械冷却するのに比べてコストを抑えられる。

ただし、深層水原水は多くの海洋生物の増養殖にとって水温が低すぎるため、加温が必要となる。加温は、ランニングコストを下げるために、温泉、地熱、温排水、工場廃熱、太陽熱などの活用が望ましく、風呂・温水プールとの複合利用、廃熱回収や緊急システム（復元・補助回路への切り替え）の導入も

検討すべきである。特に、日本海固有水は1℃未満、陸上揚水時で3℃前後と低く、大半の生物の成長適温を大きく下回り、生涯を通じて原水で飼育できるのは深海性のエゾバイ類などに限られる。

低温の深層水を熱交換やボイラーなどで加温して飼育すると、溶存ガス（主に窒素）が気化し、眼球突出や腹部膨張などを引き起こすので、予備槽の設置や十分な曝気が必要となる。水温維持のために表層水と混合したり、廃熱回収のために深層水を循環利用したりすると清浄度を低下させ、特に循環利用の場合、低温であるために「生物ろ過」が十分に機能しないこともあるので注意を要する。

### 3.2.2 富栄養性

深層水中には表層水（外海水）と比べて無機栄養塩類が比較的多く含まれ、藻類の培養に有利である。特に、有用物質の生産や水産餌料として注目される微細藻類の連続培養、食用・餌料用の海藻（大型藻類）の大量培養への期待が大きく、前者は二枚貝、ウニ、ナマコなど浮遊幼生の大量飼育、後者はアワビなどの餌料自給型の種苗生産・養殖への道を開くものである。

なお、深層水が表層水と比べて比較的多く含まれるのは多量栄養塩類（窒素、リン、ケイ素の3成分）であるが、窒素やリンも必ずしも十分な濃度ではなく、定量ポンプなどで適宜、栄養塩類を添加する場合もある。例えば、通常の深層水の栄養塩類濃度は、富栄養化した内湾域の表層水に比べると低く、ノリの培養では不足する。鉄、銅、マンガン、コバルトなどの微量栄養塩類は表層海水と大差ないか、むしろ少ないのが普通で、キレート剤の添加が必要となることもある。

### 3.2.3 清浄性

清浄性は魚介藻類の飼育・培養水の必須条件で、環境汚染物質、表層水由来の疾病の誘発や異物混入の懸念を払拭する。飼育水槽の屋根の塗装や建材メッキの影響を除き、飼育水中に溶存していた環境汚染物質が生物に甚大な被害を

及ぼした例は知られていないが、病原性の細菌やウイルスが極力少ないことは、ストレスが加わりやすい大量飼育の疾病予防上、不可欠とされる<sup>2)</sup>。発病した生物の治癒は期待できないが、傷を受けた場合も含め、表層水より生存期間が長くなる傾向がある。

もう一つの大きな利点は、深層水の配管は付着生物による汚損が少ないことである。表層水の場合、ムラサキイガイやフジツボの浮遊幼生が吸い込まれ、管の内壁を覆って取水量の低下や管の閉塞を起こすので定期的清掃の費用が嵩むが、深層水の場合は不要である。フジツボやウズマキゴカイによる飼育生物の汚損や取り上げ時の損傷も、飼育生物とともに持ち込まない限り起こらない。

なお、深層水の清浄性はあくまでも流水系で威力を発揮する。止水の場合には単なる「富栄養の培養液」となるので注意を要する。光のあたる配管や水槽では深層水中に僅かに含まれる珪藻（表層域由来）の繁茂、水流が弱い貯水槽ではイソギンチャクの付着が問題となる。珪藻の繁茂は透明な配管で気泡発生（キャビテーション）を起こし、断水の原因になりうる。

注）深層水の清浄性と生物飼育に関する議論はまだ少ない。一般に、病原性の細菌・ウイルスが少ない環境での飼育は疾病を予防し、生残率を高め、飼育施設の生産成績を上げるのに理想的で、施設内で一生を管理する完全養殖や親養成に適している。しかし、放流用種苗の育成では、生体防御機能（免疫）獲得の点で疑問が残る。海に放流した際の放流初期減耗を増大させる原因ともなりかねない。深層水施設内で生残率が高い種苗が健苗とは限らない。この点に関してはさらに多くの生物について事例を集積し、検討する必要がある。

### 3.2.4 水質安定性

深層水は表層水と比べて水温、塩分、pH、溶存酸素あるいは無機栄養塩類濃度などの変動が小さい。水質安定性は、季節や海況に伴う水温や塩分など水質の変化から飼育・培養技術を開放し、技術の平易化や省力化に貢献する。特に、魚介類の種苗生産や中間育成では、猛暑時や給水異常による高水温、降水

(特に長雨)による塩分低下が生産の不安定要因となりやすいが、深層水の場合は表層水と比べて水質が安定しているため、少なくとも自然変動に起因する大量斃死を防げる。ただし、深層水ではpH(通常の海水では8.4前後)が8.0を下回ることがあり、生物によっては何らかの影響を受ける可能性がある。

深層水を屋外水槽で使用する場合、水槽規模、給水量、攪拌状況、給水口からの距離にもよるが、昼夜や天候で水槽内の水温差が5℃以上に及ぶこともある。一般に、水温の低下は成長の抑制や活力の低下を引き起こすだけで、短期間であれば飼育生物が死ぬことはないが、水温の上昇は一時でも酸欠、体内気泡の発生、ストレスの増加などを起こし、大量斃死を起こす危険がある。

### 3.3 水産分野における飼育の実際

水産分野での飼育は、放流事業に係る種苗生産、中間育成、親養成のほか、養殖、出荷調整用の蓄養、餌料生物の培養などがある。対象生物は、藻類、甲殻類、棘皮動物、軟体動物、魚類など多岐にわたる。深層水の使用法、原水飼育、加温飼育(原水加温、熱交換)、表層水混合など、まちまちである。深層水の取水地では、上述の諸特性を活かし、従来型の浅海・表層生物の飼育改善、あるいは深海性、冷水性生物への着手が実施・計画されている。多くは試験・研究段階に留まっているが、本格的な事業に展開されているものもある。

#### 3.3.1 魚類

##### (1) サケ・マス類

多くのサケ・マス類は川で生まれ、海や湖で育ち、再び川へ戻って産卵する。深層水による養殖研究はハワイのOTEC関連事業(1982~1984年)で、「ギンザケのスマルト化」、「ギンザケおよびマスノスケの成長」、「OTEC模擬海水を用いた同2種の重金属摂取」、「海-飼育ニジマスの成熟促進、排卵および産卵」、「サケ・マス類養殖の採算性」の5研究が行われた。高知県海洋深層水研

究所では㈱日本水産が深層水によるベニザケとヒメマスの育成試験を行った。

富山県ではサクラマスの増殖を基幹事業としてきた。サクラマスは駅弁で有名な「鱒の寿し」の原料であるが、河川環境の悪化などにより漁獲量は往時の数十分の一に激減し、北海道からの移入に頼らざるを得ないのが現実である。

サクラマスは川で生まれ、1年半を川で過ごす(図3-3-1)。雄は川に残留して小型のまま成熟するヤマメで、雌は1年間海で過ごし、北の海へ索餌回遊して大型化し、川に戻って越夏してから上流域で産卵する。サケと比べて河川生活期が長く、河川的生活圏が上流域に及ぶ。「鱒の寿し」に用いられるのは大型の雌で、富山県は増産を目指して数十年前から放流事業を行ってきたが、資源の減少により親魚の確保も困難となった。飼育は水温18℃以下に維持する必要があり、夏季の水温上昇のため池中養殖による親養成には限界があった。かつて全雌化技術も確立されたが、生態系への影響が問題となり、実用化されず、この後を受けて注目されたのが深層水による親養成であった。

富山県は海の深層水に加え、北アルプスに源をもつ地下水にも恵まれ、深層水(約3℃)と地下水(約18℃、淡水)を熱交換して各々を12℃前後に調節し、サクラマスの一生、つまり河川生活期と海洋生活期の両期間を同一水槽内で飼育管理できるようになった。当初の生産目標は毎年100万粒の種卵の生産であった。最初の数年間は30万粒前後で推移していたが、2001年以降は90万粒を

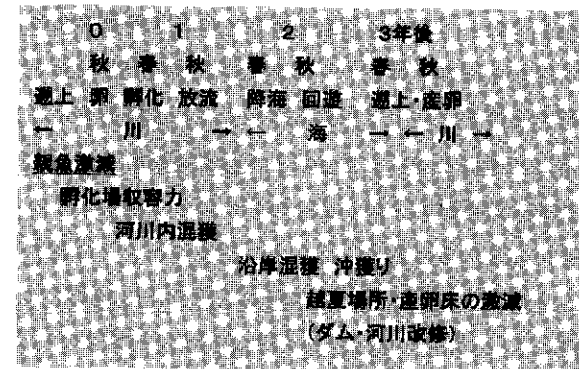


図3-3-1 サクラマスの生活場所と資源増大の制限要因

を超える種卵が得られている。この間、ガス病の発生や細菌性腎臓病（BKD）が問題になったが、前者は飼育水槽への注水の前段階での曝気槽の設置、後者は防疫体制の整備によってほぼ克服された。1997年には専用の卵管理施設が整備され、疾病の水平感染の懸念も払拭された。これ以外に、餌料別成長試験、深層水の低温性を利用した耳石標識試験などの研究も行われている。現在、親養成はある程度軌道に乗っているが、資源の増大には程遠い。種卵は親養成用を残して県内の孵化場に運ばれ、約1年間の飼育後、稚魚が川に放流される。しかし、孵化場での歩留まりやスモルト率、さらには放流後の河川・海域での減耗（捕食、混獲など）があり、回帰率は0.01~0.02%に留まっている。

#### (2) ヒラメ・カレイ

ヒラメは飼育しやすい高級魚種で、成長が早く、国内各地で海面（小割式）や陸上養殖が盛んに行われ（2002年で6,000t）、100億円産業となっている。栽培漁業も盛んで、全国で種苗が生産されている。近年は韓国（主に済州島）でも養殖が盛んで、日本の2倍以上の生産量がある。生活水温帯は広いが、夏に水温が25℃以上になると白点病などの疾病が発生しやすくなる。

ハワイではUwajima Fisheries Inc. が州内に刺身・寿司ネタを供給するために深層水で養殖している。高知県では、1995年から海洋深層水研究所で得られた受精卵を県栽培漁業センターで放流用稚魚の生産に用いた。日量50万粒の良質受精卵が生産され、他県の種苗生産機関からも高い評価を得て、瀬戸内海沿岸や西日本海域を視野に入れた親魚団地構想の事業化が進められた。富山県は1997~1998年に高密度養殖試験を行い、未成魚で従来の2倍の収容密度、1/2の海水使用量で高成長、高生残率の成績が得られ、陸上養殖のコスト低減の可能性が示された。アワビやコンブと組み合わせた多段利用試験も行われた。沖縄県ではクルマエビ養殖の水槽が空く時期にヒラメ養殖が行われた。

ヒラメとの差別化を図る目的で、ホシガレイやマツカワなど一部のカレイ類でも養殖が試みられた。ホシガレイは北海道以南~九州の沿岸に広く分布し、全長60cmに達する高級魚で、魚価がヒラメを上回る地域もある。高知県が深層水を活用した適温維持により高い生残率を得たが、雌雄の成長差が大きく、

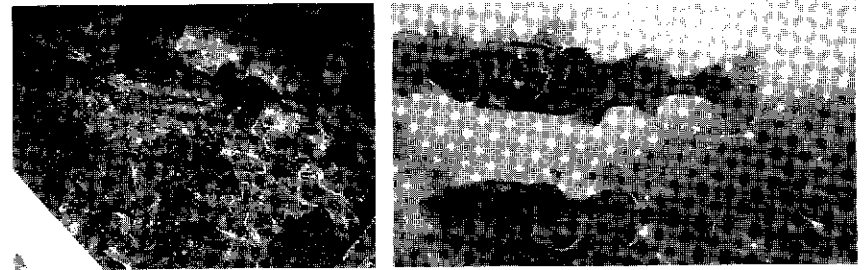


図3-3-2 海洋深層水で飼育中のマツカワ（左）とマダラ放流用種苗（右）

養殖用の種苗生産のためには全雌化が必要である。マツカワ(図3-3-2)は、北日本に広く分布していたが、現在、日本近海では絶滅が危惧されている。雌の身はヒラメのように白いが、雄は黄色くなる。味は雄の方がよく、「キビラメ」と呼ばれ珍重される。刺身、煮付け、唐揚げ、皮の湯通しなどに利用され、フルコース向きの魚である。岩手県の民間会社が種苗販売を始めており、地域特産化への期待も大きい。深層水取水県では富山県が多段利用研究の一環として10~20℃で成長試験を行い、15℃で良好な成長を得た。このほか、ノルウェーではハリバットの種苗生産や親魚養成に関する研究に取り組みされている。

#### (3) メダイ

メダイは日本近海の固有種で、北海道以南の水深100m以深に生息し、特に本州中部以北の太平洋側に多い。全長80cm、体重8~9kgに達し、人気の釣り魚種でもある。幼魚は春~夏に流れ藻とともに北上し、体長30cmを超えると深所に移動する。高知県が天然幼魚の飼育を試み、当初、眼球突出症候群が発生したが、深層水の注入前に曝気して防ぎ、高い生残率を得た。成長は天然に劣らず、満4才で成熟し、ホルモン処理により自然産卵に成功した。

#### (4) キンメダイ

キンメダイは「深海の貴婦人」とも言われる高級魚で、北太平洋に広く分布し、日本周辺では太平洋側の水深200~600mに生息する。特に関東近海では釣りで人気がある。1年中市場に出回るが、冬が旬で、煮つけが定番である。高

高知県では船上採卵により5万尾の孵化仔魚を得て、最長17日間の飼育に成功したが、安定飼育を行うには適切な初期餌料を開発する必要があるという。

#### (5) マダラ

北太平洋北部の中層に広く分布し、群れを成す大型魚で、漁業はもちろん、生態系の群集調節者としても重要である。日本近海では北日本沿岸の水深200～300mの陸棚や陸棚斜面に生息し、産卵場（浅所）の異なる複数の系群が知られる。漁獲量は近年全国的に減少し、種苗放流による資源の増大に期待がかけられている。大型魚であるため、清浄性の高い低温飼育水が大量に必要であることから、深層水への期待が大きい。富山県では日本栽培漁業協会（現水産総合研究センター栽培漁業センター）能登島事業場と共同で深層水を用いた飼育研究を行い、定置網で漁獲された天然魚や深層水で育成した魚を小型水槽中でペアリングさせ自然採卵させた。受精率や孵化率は安定しないが、2001年には全長31mm、10,000尾が生産された。生産された人工種苗を深層水原水區（3.7℃）と加温區（表層水と混合、9℃）で飼育した結果、成長は加温區、生残率は原水區で良かった。種苗（図3-3-2右）は海域へ放流されているが、放流後直ちに漁獲される魚も多く、生態的特性の把握や放流技術の改良も必要である。

#### (6) ハタハタ

東アジア沿岸に広く分布し、干物や「しょっつる」（魚醤油）の原料として食用にされる。水深200m前後の砂泥底に生息し、晩秋～初冬（水温12～13℃）に浅所の藻場に来遊し、海藻の根元にゴルフボール大の卵塊を産む。仔魚は約1ヶ月半後に孵化し、全長約4cmに育つと深海底に移動する。かつては船上で投棄されるほど資源量が多かったが、近年は漁獲量が激減している。秋田県では1992年以降の3年間を禁漁とする措置が取られ、天然親魚を用いて種苗を大量生産し、全長約4cmまで育てて沿岸へ放流した。現在、秋田県のハタハタ漁獲量は下げ止まっているが、年によって産卵回遊が早まり、抱卵数の少ない小型魚が主体となる。富山県では日本栽培漁業協会能登島事業場と共同で親魚養成を試みた。親魚の飼育には10℃以下の低温が必要で、人工1歳魚を6月

に収容した試験では、雌雄とも8月以降に生殖腺指数が高くなり、11～12月に産卵・放精が確認され、海藻を水槽に入れると卵塊が産み付けられた。

#### (7) その他の魚類

ハワイでは、ナンヨウアゴナシ（ツバメコノシロ科）の養殖が行われている。地元でモイと呼ばれ、古来、ハワイ国王一族しか食べられなかった高級魚であるが、釣りによる乱獲で漁獲量が激減し、高級レストランでしか食べることができない。タツノオトシゴなどアクアリウム産業への応用も試みられている。高知県では近年養殖対象種としても人気があるトラフグの飼育試験を実施し、1995年には長日処理と人工催熟により2月上旬の早期採卵に成功した。

### 3.3.2 貝類

#### (1) アワビ

アワビは国内有数の高級水産物で、全国各地で種苗放流や増殖場造成が行われ、民間も陸上・海面養殖を事業化してきた。海外でも台湾やオーストラリア、ニュージーランドなどで盛んに養殖されている。しかし、国内では乱獲、密漁、生息環境の悪化などのために漁獲量が激減し、一部を除き増殖事業も実っていない。このため、長らく栽培漁業の有力候補とされながらも、撤退を余儀なくされた例も少なくない。一般に、アワビ類は高水温に弱く、伊豆半島では黒潮が接岸して磯焼けが発生した際に激減する。低温の深層水の利用では主にエゾアワビ（図3-3-3左）が注目される。天然物の市場出荷サイズは小型が3～4年貝、大型が6～7年貝であるが、温泉排水を利用して水温を20℃前後に維持して飼育すれば2年でも殻長6～7cmに育ち、一口アワビとして出荷される。

深層水を用いた最初のアワビ養殖は、ハワイで1982年に始まったHawaiian Abalone Farmsの取り組みで、餌となるジャイアントケルプとともにアカネアワビを養殖した。国内では高知県海洋深層水研究所で1991年からクロアワビの中間育成や早期採卵試験が行われ、親貝の成熟や稚貝の生残率で深層水混合による水温調節が有効であることが示された。富山県でも1995年以降、エゾアワ



図3-3-3 海洋深層水で飼育中のエゾアワビ（左）とカガバイ（右）

ビの越冬試験、多段利用試験が行われた。

現在、深層水を用いたアワビ養殖事業はハワイと富山県入善町の2ヶ所で行われている。ハワイでは1997年以降、Big Island Abalone Cooperation (BIAC) が年間約100tの出荷を目指してエゾアワビ（平均体重80~100g）を生産している。製品はKona Coast Abaloneとして商標登録され、日本や米国本土にも輸出される。2002年には100万ドルを売り上げ、2003年には州知事によって輸出企業大賞に輝いた。アワビは屋外水槽で飼育され、深層水で培養したダルス（BIACがアワビ餌料海藻として特許を獲得）を餌料としている。入善町では2002年以降、漁業協同組合がエゾアワビ（図3-3-3左）を養殖している。深層水（日本海固有水）は極めて低温であるため、ボイラーによる加温と循環ろ過を取り入れ、配合餌料やコンブ（乾燥、深層水育成）の給餌により殻長7~8cmで料亭やホテル・旅館などに出荷している。

### (2) エゾバイ類

エゾバイ類は深海産の巻貝で、有用種が煮物や刺身などに利用される。種によって生息帯が異なり、カガバイは水深200m、オオエッチュウバイは水深1,000m付近に生息する。産卵に伴う深浅移動は知られておらず、一生を深層の低温環境で過ごすことから、深層水とは最も相性がよい。卵胎生で、卵は卵塊として貝殻の表面などに産み付けられる。卵塊は数十個の卵囊の塊であり、一つの卵囊の中に2,000個の卵が含まれる。ただし、卵の大半（栄養卵）は少数の発育卵に吸収され、この発育卵から親と同じ形をした稚貝が生まれ、殻高

7~9mmになると卵囊を破って外に出て、泥の中の有機物や死肉片を食べて育つ。産出される卵塊の数や孵出する稚貝の数は種ごとに異なる。

富山県が深層水原水や冷却深層水を用いて飼育し、カガバイ（図3-3-3右）はほぼ周年産卵すること、産卵の間隔が2年以上に及ぶこと、稚貝がイワシなどの給餌で育つことなどを明らかにした。低温が維持できれば飼いやすく、多段利用の末端飼育種としても有望である。成長が遅く、養殖には向かないが、資源管理型漁業の推進のための生態学的知見が集積されつつある。

### (3) その他の貝類

カキはカリブ海のセント・クロイ (St. Croix) 島で行われた人工湧昇試験で、フランスガキの養殖が組み込まれたのが最初である。国内で注目されるイワガキは広島湾や松島湾で養殖されるマガキとは別種で、本州日本海沿岸の夏の味覚として知られる。島根県、京都府、新潟県などで養殖され、他の地域でも漁場造成や資源管理の取り組みが盛んに行われてきた。海洋科学技術センターは深層水で連続培養した浮遊珪藻を給餌しながら浮遊幼生の飼育を試み、餌料培養と種苗生産の多段利用化の可能性を示唆した。富山県では入善町の海洋深層水利用施設で天然イワガキ（図3-3-4左）の出荷調節（蓄養）が試みられた。付着物を除去して加温深層水をかけ流しておくだけでエラや生殖腺の状態がよくなり、日持ちが長くなり好評を得た。ハワイでは、アメリカ最大のカキ生産者であるCoastal Seafood Companyが進出し、カキやアサリの種苗生産を行っている。

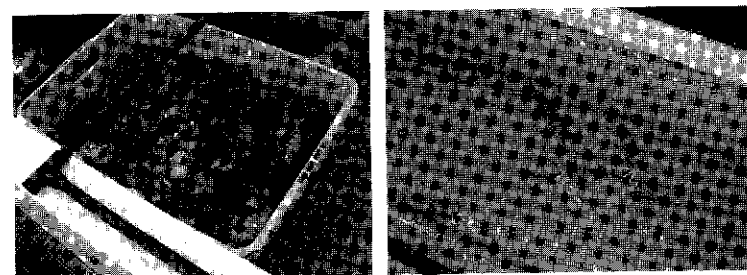


図3-3-4 海洋深層水で蓄養中のイワガキ（左）と展示中のトヤマエビ（右）

### 3.3.3 甲殻類

#### (1) ロブスター・イセエビ

最初に深層水で飼育された甲殻類はアメリカンロブスター（ウミザリガニの仲間）で、北米大西洋岸の温帯域に広く分布し、日本にも盛んに輸出される。雑食性で、ウニや貝、小型動物、魚の死肉などを食べ、全長約30cm（最大1m, 20kg）になり、浅海群集の重要な調節者でもある。5～8歳で産卵する。受精卵は雌の腹部で約1年間抱えられたまま発生し、孵化後数週間、3回脱皮しながら浮遊生活を送る。全長約2cmで着底し、石の下や砂の中で約2年間を過ごす。当歳で8回、2歳で5回、3歳で3回脱皮し、その後も雄が年2回、雌が1回脱皮する。春から夏にかけて浅海に出現し、秋から冬にかけて沖に移動する。

最初、Sanders Associates Inc. がハワイのOTEC関連事業の一環として養殖を試みた。表層水と深層水の混合で適水温（約20℃）の清浄海水が周年得られるため、全米唯一の商業養殖適地として注目した。しかし、22℃を超えると斃死し、養殖装置を遮蔽しないと付着生物が増えて成長を妨げるなど、予想以上に経費が嵩んだ。この後、ハワイではKona Cold Lobster Co.が表層水と深層水の混合水を使用して卵から成体まで育成し販売したが、天然エビの資源水準が高く、単価が上がらず、合衆国東岸から空輸したエビの蓄養販売に移行した。

日本のイセエビは、三重県などで長く飼育研究が行われ、実験レベルでは稚エビまで育成できるが、幼生期が非常に繊細で、脱皮回数も多く、餌や容器などの課題もあり、量産には至っていない。深層水の使用例は田崎真珠(株)が幼生飼育試験に用いたにすぎない。

#### (2) トヤマエビ

トヤマエビ（図3-3-4右）は通称ボタンエビの名で知られ、ホッコクアカエビ（通称アマエビ）と同属であるが、大型で、全長約20cmまで成長する。北太平洋北部に広く分布し、富山湾（和名の由来）では水深200～400mの陸棚斜面で小型底曳網やかごなどで漁獲される。寿命は10年以上で、雄性先熟の性

転換を行い、2～3歳は雄、4歳以上が雌である。産卵期は3～5月で、卵は雌に10ヶ月間抱えられた後、1～3月に孵化する。稚エビは親エビより浅い水深に生息し、成長に伴って深海に移動する。日本栽培漁業協会小浜事業場では1985年から冷却海水で天然親エビを用いた種苗生産を行い、1996年以降、富山県と共同研究が始まった。天然の抱卵エビ（雌）を深層水原水に収容し、表層水や熱交換した深層水で種苗生産（全長15mm、初夏に放流）まで行い、中間育成による種苗の大型化（全長30mm、秋放流）には表層水と深層水の混合水を使用した。2000年までに全長20mm、45万尾の生産技術が確立され、日裁協生産分と併せて102万尾の大量種苗放流も行われた。種苗は富山県で開発された眼球破壊による標識が施され、深海用放流器で放流されたが、回収率は極めて低調であった。

#### (3) クルマエビ類

クルマエビは最も美味しい食用エビで、市場価格も高い。20世紀初頭には天草地方で蓄養・活エビ販売が始まり、1960年代から養殖、1970年代から放流事業が展開され、日本の栽培漁業は瀬戸内海のクルマエビの生産・放流事業から始まった。放流事業は一時全国に広まったが、一定の回収・経済効果を得るためには種苗の大型化や継続利用が可能な放流適地が必要で、採算性や環境悪化を理由に撤退・縮小した県も多い。現在、市場は養殖に支えられ、沖縄、熊本、鹿児島が8割強を占める。国内では北海道南部以南の内湾砂泥域に分布する。東南アジア、アフリカ東岸やオーストラリア北岸など、東太平洋からインド洋に至る暖海域に広く生息し、近年、スエズ運河を経て地中海東部に分布域を拡大した。台湾、中国、オーストラリア、トルコ、スペインなどからも空輸される。稚エビ（体長10～60mm）は干潟に棲み、成長に伴って外洋域の深所へ移動し、体長210mmを超える2、3歳エビは水深50～100mで生活する。需要が大きく、成長が早く、天然物と味の差がないのが養殖の魅力であるが、感染種苗の混入などにより疾病が発症すると大きな被害をもたらす。近年は養殖用種苗の輸入も行われ、疾病対策上大きな問題となった。

沖縄県では、1963年頃から養殖が始まり、国内3大産地の一つであるが、

1998年に県内45%の養殖場でウイルス性疾病PAV（急性ウイルス血症）が発症し、25億円の被害が発生したことから健苗の安定確保が急務であった。2000年以降、深層水の低温性と清浄性を活用し、養殖エビによる母エビ養成技術の確立を目指した。水温18~24℃に維持した深層水池で継代飼育を行い、2代目以降、6~9月に催熟（ホルモン処理）して種苗を生産している。種苗は2.7~3.5cmで県内各養殖場に出荷され、約60%の歩留まりで出荷サイズとなる。

ハワイでは世界有数のエビ生産・供給業者High Health Aquaculture Inc.が進出し、SPF（生残や発育に深刻な影響を及ぼす特定の病原菌を保有しない状態）で成長の早いクルマエビ属3種の親エビの養成・出荷を目指している。ウシエビは世界で最も養殖量が多く、世界のエビ生産量の半分以上を占め、エクアドルエビは中南米、アメリカ、中国、タイなどで盛んに養殖される。同社ではTVR（タウラウイルス耐性）とKona Stockの2種のSPF親エビを販売している。ブルーシェリンブは、IHHNウイルスやタウラウイルスに感染しにくく、近年、養殖用の需要が伸びた。出荷時にハワイ州農業局からSPF健苗証明書添付し、1995年以降、病原生物は検出されなかったことがないという。

#### (4) その他の甲殻類

富山県ではズワイガニ（図3-3-5左）が豊漁時に出荷調整のため蓄養され、体を高く持ち上げて盛んに歩行する「活きガニ」として高値に取引される。

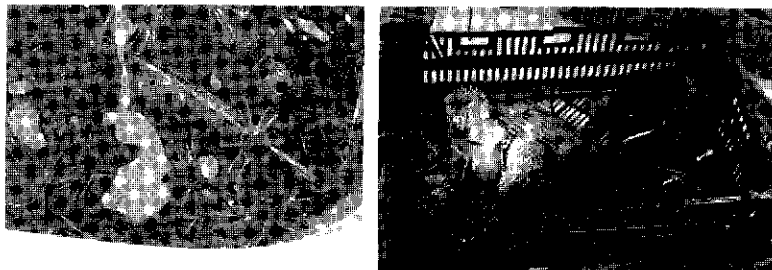


図3-3-5 蓄養中のズワイガニ（左）と飼育中のホクヨウオオバフンウニ（右）

### 3.3.4 その他の動物

#### (1) ウニ類

富山県でウニ、ヒトデ、クモヒトデ、沖縄県でアカウニの飼育が試みられている程度であるが、エゾバフンウニの種苗生産や身入り改善が期待される。

ノルウェーではホクヨウオオバフンウニ（図3-3-5右）が飼育されている。このウニは美味であるが、しばしば大型の線虫が寄生し、安定した食材ではない。線虫は海面で垂下飼育したウニにも感染し、これを阻止するために清浄な深層水が使われている。近縁種バリヅスはこの線虫による感染例がなく、両種の交雑種の飼育も試みられている。浮遊幼生には栄養添加海水で培養した植物プランクトン、成体には天然コンブが餌とされている。ウニ類は磯焼けを引き起こすほど摂餌が旺盛で、給餌のタイミングや餌の十分な確保が課題となる。

#### (2) その他の動物

高知県では寶石サンゴ（アカサンゴ）の飼育研究が行われ、群体を2年以上生存させた。富山県ではコンブ片や珪藻の堆積物（厚さ5~10cm程度）を利用し、深層水多段式利用研究（6~10℃）の末端飼育種としてフツウゴカイを飼育した。釣り餌としては小型であったが、魚類飼育餌料として期待され、現在の陸上養殖（小石を敷き詰めたビニールハウス）と異なる展開が考えられる。

### 3.3.5 海藻

海藻は、海の野菜とも言われるくらいで、ノリ、ワカメ、コンブ、ヒジキなど、日本人の食卓には欠かせない。特に、ミネラル、食物繊維あるいは種々の機能性成分が豊富であるために、健康食品として注目されている。

#### (1) 褐藻

深層水を用いた培養例が最も豊富なのはコンブ類で、食用のほか、貝類用飼育餌料として培養の実用化が進められている。アラメやカジメなどの暖海性種を除き冷水性で、いわゆるコンブは北海道周辺および東北地方の太平洋側にしか分布しない。昨今、南日本でも冬季のみコンブの海面養殖が行われるが、品質の面で天然物や自然分布域の養殖物に勝るものではなく、非分布域での海面



養殖については行為自体を疑問視する向きもある。

富山県では、洋上取水装置「豊洋」の船上でマコンブの短期培養試験（水温約6～9℃）が行われ、夏季の成長を確認した。また、配偶体やコンブ幼芽の室内培養を行い、深層水で培養すると表層水の場合より成長は早い、PESI培地（褐藻用培養液）の場合ほどではなく、体色も薄くなることが判明した。

高知県では、産地の異なるマコンブやオニコブとの雑種などが培養された。いずれも各種・品種の特徴を保持しながら成長し、6カ月で最大葉長3.14mに達した。マコンブでは深層水と表層水の培養藻体間で成分に差が認められ、タンパク質は前者が後者の2.5倍、糖質は0.6倍となった。アルギン酸の成分マンヌロン酸とグルロン産の比（M/G比）も、両者で異なる季節変化を示した。

コンブ類の培養には海水の流動が不可欠で、量産には広いスペースと水深の深い大型水槽が必要となるほか、藻体が空中に露出すると干出部位が壊死する。富山県では深層水を用いてコンブを剪定しながら培養する方法が確立された（図3-3-6）。本法は、コンブの成長組織が葉状部と茎状部の移行帯に存在し、介在成長を行う性質を生かし、藻体を月1回程度、定期的に剪断して再成長させるもので、アワビ養殖と組み合わせた多段利用の一環として開発された。再成長は春から夏にかけて盛んで、秋から冬にかけて衰えるが、周年成長

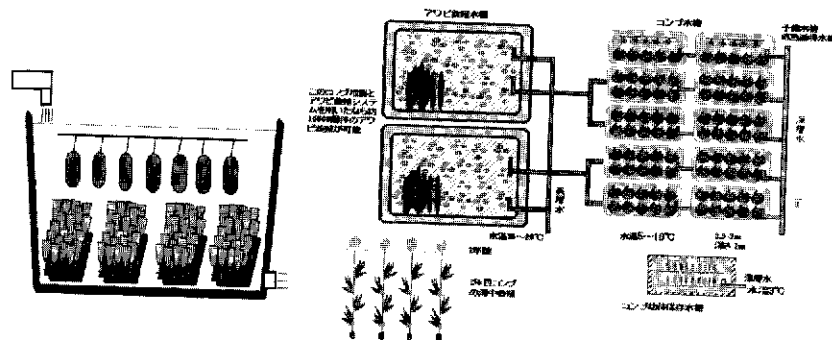


図3-3-6 コンブ培養を応用した自給型アワビ養殖（松村・藤田 2002）

が確認されている。切り取った葉状部はアワビの飼育餌料のほか、流水水槽中に吊るして子囊斑（遊走子を生じる斑状の部位）を形成させ母藻として用いる。

このほか、国内では、ワカメ、ワカメとヒロメの雑種、チガイソ、サガラム、ツルアラメ、ヒジキなどの培養が試みられた。ワカメは、通常、冬に芽生えが成長し、春から初夏にかけて成熟し枯れるが、高知県では1998年（平成10年）秋の「全国豊かな海づくり大会」（徳島）に向けて表層水を混ぜて調温した深層水で培養が行われ、150cmを超える成熟藻体が展示された。その後、高知県では深層水を用いた周年の屋外養殖も実施している。ジャイアントケルプは、かつてハワイの巨大な屋外池（直径30m、水深5m）でアワビ、ウニ、サケなどとの混合養殖が試みられたが、企業は倒産した。昨今、国内では各地の水族館でジャイアントケルプの展示培養が盛んで、頻りに空輸されているので、天然資源の保護や輸送経費の節減のために、深層水を用いた種苗供給に期待が寄せられる。

## (2) 紅藻

紅藻には、国内最大の養殖産業に成長したノリ（海苔）、寒天原藻のテングサやオゴノリ、カラゲナン原藻のキリンサイやツノマタ、海藻サラダ・刺身のつまとして人気の高いオゴノリやトサカノリなどが含まれる。

セント・クロイ (St. Croix) 島では貝類飼育排水を利用してカギイバラノリ、ハワイのOTEC関連事業ではノリ（アサクサノリ）とオゴノリが栽培された。ノリは3cm前後の幼体が3～5週間で商用サイズ（30～50cm）になり、日本に輸送され、製品化も試みられたが、評価は低かった。国内のノリ養殖はほぼナラワサビノリ1品種が用いられ、優良株が盛んに選別されている。味、色、艶、固さなど総合的に流通業者や消費者の厳しい評価に耐えなければ商品化は厳しい。オゴノリはハワイ郷土料理“poke”に用いられ、商業ベースで培養されている。

国内では、オゴノリ、テングサ、トサカノリ、トゲキリンサイ、ミリンなどの培養が試みられた。オゴノリは沖縄県で海洋深層水と表層水の混合水（7：3）を用いた大量栽培が行われ、50t水槽1基当たり1ヶ月間に最大で300kg

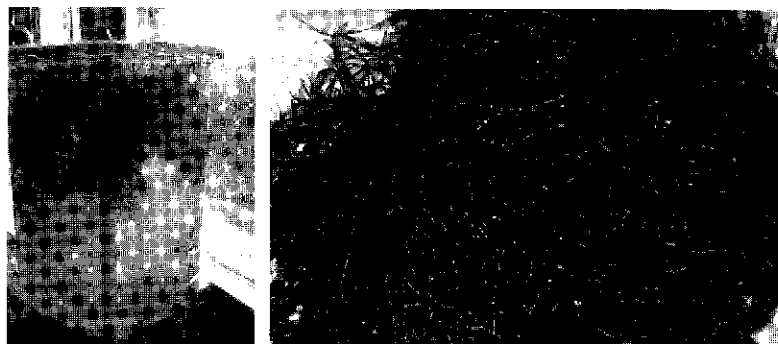


図3-3-7 海洋深層水を用いて培養した紅藻ミリン

程度の藻体が収穫可能であるとしている。また、深層水培養藻体は表層水培養藻体と比べて亜鉛やカロチンなどの有用成分が多く含まれるという。

富山県では深層水のかげ流し培養により、テングサの直立体の伸長と成熟に成功した。テングサの培養では初期発生の観察に終始したものが多く、室内培養で直立体の伸長や成熟させた例は国内で初めてである。

このほか、近年では、トゲキリンサイ、トサカノリなど海藻サラダ系の海藻も試みられ、約2%/日の日間成長率が得られたが、培養期間が長くなると付着藻類の生育が顕著になる。紅藻は海藻の中でも特に種数が多く、有用種もバラエティに富み、海藻サラダ系の種を中心に製品化への期待が大きい。東京海洋大学では、入善町の協力を得てカラゲナン海藻ミリン（図3-3-7）が加温深層水（14℃）中で極めて生長がよく、約140日間で20倍以上に増えることを明らかにした。

### (3) 緑藻

これまでに深層水で培養された緑藻には、アナオオサ（高知県）、アワビモ（富山県）、スジアオノリ（高知県）、クビレヅタ（商品名：ウミブドウ、沖縄県）などがある。アナオオサやアオノリ類は富栄養条件で異常発生しグリーンタイドの原因にもなる。現在、スジアオノリは徳島県吉野川や高知県四万十川などの河口域、クビレヅタは沖縄県の陸上水槽で養殖されている。スジアオノ

りでは、高知県で開発された孢子集塊化による海藻養殖法が用いられ、養殖品が市販されている。同法は、数十ないし百個程度の孢子・発芽体を高密度に付着させて孢子集塊を作り、基盤から剥がして浮遊させながら養殖するもので、他の海藻にも応用できる。緑藻にはイワソタ類をはじめ観葉植物となる美しい種が多く、この方面への応用も期待される。また神奈川県京急油壺マリナーパークではアマモ（海草）の展示水槽に深層水が使われ、良好な成長結果を得ている。

### 3.3.6 微細藻類

微細藻類の多くは単細胞で、プランクトン（浮遊生物）として出現するが、底生生活種や群体形成種も含まれる。海藻とともに水界における重要な基礎生産者で、機能性成分に富み、食用や水産用餌料となる種も多い。微細で、細胞体積当りの表面積が大きく、収容密度を高められれば栄養塩を効率よく吸収できる。

水産用餌料としては、アワビ、カキ、アサリ、ナマコ、ウニ、エビなどの浮遊幼生や着底後の初期餌料として各地の種苗生産施設でタンク培養が行われているほか、種によっては濃縮液（冷蔵）、冷凍品、粉末などが市販されている。タンク培養は、簡便なバッチ方式（閉鎖系）でも栄養添加や試薬調合が面倒で、流水による連続培養（開放系）ではコンタミネーション（雑藻や原生生物の繁

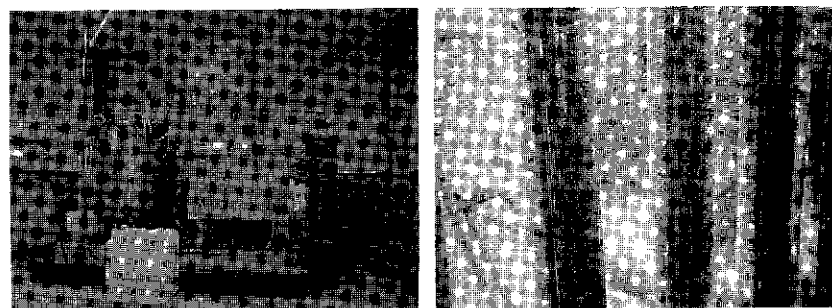


図3-3-8 海洋深層水による浮遊珪藻（左）と付着珪藻（右）の連続培養

殖)が起こりやすくなる。富栄養性と清浄性を併せ持つ深層水は連続培養に都合がよいが、鉄が不足がちで、キレート剤の添加が必要なこともある。深層水を用いた微細藻類の培養事例は数多くあるが、水産餌料の例は浮遊珪藻(イワガキ)と付着珪藻(アワビ、アカウニ)の小規模試験に限られる(図3-3-8)。浮遊珪藻は幼生期に初期餌料として用いられるだけであるが、付着珪藻は周年の活用が可能で、エゾアワビでは、珪藻だけで成体まで育てた例もある。

### 3.4 まとめ

深層水は低温や富栄養条件を好む生物の飼育に適し、親養成や種苗生産、放流調査のための標識作業や放流現場までの輸送や出荷にも活用できる。今後、表層域の生物の飼育改善や養殖に利用が広がると思われるが、多くの深海生物は成長が遅く、出荷サイズまで長年を要するので、生態研究が中心となる。

深層水利用上の問題点としては、電気代のほか、魚介類の飼育ではガス病や加温コスト、海藻の培養では付着藻類(特に珪藻)やその他の着生藻類との競合が挙げられる。深層水(特に日本海固有水)は多くの生物の飼育・培養には冷たすぎ、効率良い加温(熱源、廃熱回収)や多段式利用の検討が必要である。

水産分野における深層水利用の大きな魅力は、後述の非水産(食品・健康)分野も含めた総合利用の一環として位置付けられることである。地域経済への波及効果は非水産分野での期待が大きいが、取水量の大部分を水産分野で使用するので、単独では採算性が厳しい(しかし必要な)事業、あるいは非水産分野(加工やリゾート化)と絡めて生産物の付加価値向上も可能になる。

飼育・培養以外では、深層水やその水、電気分解水などを活用した魚介類の鮮度保持、市場施設の洗浄などが注目されている。特に、水産物の鮮度保持では生臭さが消え、可食期間が長くなるとの評価もあり、活魚・鮮魚輸送では大いに期待されるが、微生物相の変化など、実態の解明が遅れている。市場施設の洗浄についても、深層水の富栄養性のため床面を覆う微細藻類(藍藻や珪藻)の繁殖を助長し、滑りやすくなる可能性もあり、実証試験が必要である。

## 第4章 海洋深層水による海域の肥沃化

### 4.1 海域の生産と肥沃化

海洋生態系(表層)では、植物プランクトン、サンゴ礁共生藻類、海藻、海草、塩生湿原植物、マングローブなど、大小様々な植物が生産者として群集を支えている。これらの植物は、クロロフィルや各種の補助色素によって太陽の光エネルギーを吸収し、水中の二酸化炭素( $\text{CO}_2$ 、通常の海水のpHでは重炭酸イオン $\text{HCO}_3^-$ として溶存)に含まれる炭素(C)を炭水化物として固定する。これが光合成または炭酸固定と呼ばれるプロセスで、植物と一部の細菌しか行うことができない。

植物は生活に炭水化物を大いに利用しており、丈夫な細胞壁を合成したり貯蔵物質として蓄えたりしているが、脂質(細胞膜の成分、貯蔵物質)、タンパク質(細胞膜の成分、酵素)、核酸(遺伝子)など、生命活動の上で欠かせない物質も炭水化物を骨格として体内で生合成する。動物は光合成や一部の生合成を体内で行えないので、植物やこれを食べた小動物を食べて生活する。

炭水化物は炭素(C)と水素(H)と酸素(O)の3元素から成り、脂質はリン(P)、核酸は窒素(N)とリン、タンパク質は窒素とリンとイオウ(S)も含み、植物はこれらの元素やミネラルを海水中から摂取しなければならない。このうち、すべての植物が大量に必要とし、浅海(特に外海)で生長の盛んな夏季を中心に不足しがちなのは窒素とリンである。窒素は硝酸塩(他に亜硝酸塩、アンモニウム塩)、リンはリン酸塩として海中に溶け込んでおり、珪素を含む珪酸塩と合わせて栄養塩類と呼ばれる。

太陽光が十分には届かない深海(真光層以深)では植物が光合成は弱いか行われず、表層から沈降してきたプランクトンなど生物遺骸の分解が卓越し、表層海水よりも栄養塩類濃度が高く、生物に利用されないまま海水(深層水)中に溶け込んでいる。したがって、栄養塩類が不足している表層海域に海洋深層