

【調査課題名】

「漁場生産力の有効活用によるアサリ母貝場造成および新規創出技術開発」

【実施期間及び担当者名】

- ・水産総合研究センター
増養殖研究所（横須賀庁舎）＊ 張 成年＊・山本敏博・丹羽健太郎・（柴田玲奈）
増養殖研究所（南勢庁舎） 日向野純也・淡路雅彦・松本才絵
北海道区水産研究所 長谷川夏樹（現増養殖研究所）
 - ・北海道立総合研究機構中央水産試験場 櫻井 泉・秦 安史
 - ・東京海洋大学 鈴木秀和
 - ・愛知県水産試験場 宮脇 大・村内嘉樹・（平井 玲）
 - ・三重県水産研究所 水野知巳・羽生和弘・（程川和宏）
 - ・熊本県水産研究センター 川崎信司・内川純一・（梅本敬人・生嶋 登）
- ＊は中核機関と主担当者
（ ）内は異動者

【実施年度】

平成22年度～平成24年度

【緒言】

浅海・干潟域における最重要水産資源である二枚貝類は、その生活史を通して微細藻類やデトライタスを摂取するとともに様々な動物の餌として利用され、物質循環と水質浄化といった沿岸生態系の生産力および海洋環境の保全に重要な役割を果たしている。そのため、二枚貝類資源を健全な状態で維持あるいは悪化している資源を回復させることは、生態系の保全に役立つだけでなく、近年減少傾向が著しい沿岸水産資源の回復にも繋がる可能性が大きい。アサリ漁獲量の減少については、埋立による生息場の減少、幼生ネットワークの崩壊、乱獲、食害、秋季～冬季におけるアサリの減耗、成長不良や成熟不良が主要な要因として挙げられている。過去に実施された調査研究においては、干潟における水温条件と餌条件が成長生残を左右している実態や、着底・加入を促進する要素技術が種々検討された。しかし、生物再生産の出発点である産卵量と母貝場の評価については、未だ現場スケールでの調査が行われていない。特に、埋立による生息場の減少は母貝場の減少を意味し最終的には再生産の低下に直結するだけでなく、従来は浮遊幼生が分散することによって結ばれていた個体群間の繋がりを分断することになる。人為的に新規母貝場の創出や既存の母貝場の機能向上を図ることにより、母貝場の配置によっては幼生ネットワークを補完し、数量によっては産卵量の底上げが期待できる。また、全国各地でアサリ親貝の肥満度の低下や干潟上部での成

長・身入り不良が観察されており、餌その他環境の悪化による成長不良が成熟に影響し最終的には稚貝発生量の低下に結びついているのではないかと懸念されている。そのため、餌と海洋環境をより詳細に把握し、アサリの成熟、産卵に対する場の評価を行う必要があり、環境が不適切であると判断されるならばその改善策を講じる必要がある。本事業では、親貝となるアサリの成長・成熟・産卵といった再生産能力とクロロフィル濃度×流動環境との関係性を評価し、成熟・産卵に対する制限要因の特定と成熟・産卵を確保できる基準を策定する。さらに、これらの指標を目安として、既存の母貝場における機能向上を図るための土木工学的造成手法による環境改善対策の提案や新たな母貝場の創出技術の開発に資する情報収集と整理を目的とする。

(全体計画)

上記の目的を達成するための研究開発として、下記4項目の調査研究等を行う。

(1) 6海域(サロマ湖、厚岸湖、三浦半島周辺、三河湾、伊勢湾、有明海)における、アサリの餌環境の指標となるクロロフィル濃度と流速、そしてクロロフィル濃度と流速の積であるクロロフィルフラックスデータの収集。アサリの成長、成熟をモニタリングするための定期調査及び現場飼育試験。

(2) アサリの生殖腺観察及びよう卵数の推定。

(3) 環境とアサリ消化管内容珪藻相の分析。

(4) 餌量と産卵数や成長との関係及び流速と摂餌効率との関係を検討するための実験。

上記4項目について、下記の通り、各担当機関が分担して調査研究を推進する。

(独) 水産総合研究センター(北海道区水産研究所・増養殖研究所)

○上記4項目全体にわたって進行管理を担当する。

○(1)については北海道区水産研究所が厚岸湖、増養殖研究所(横須賀庁舎)が三浦半島周辺での調査を担当する。

○(2)のうち生殖腺の組織学的観察による成熟状況判定は北海道区水産研究所と増養殖研究所が担当し、卵黄タンパク質量の分析によるよう卵数推定の技術開発と応用については北海道区水産研究所が担当する。

○(4)のうち餌量と産卵数との関係については増養殖研究所(南勢庁舎)が担当し、流速と摂餌効率との関係については増養殖研究所(横須賀庁舎)が担当する。

(地独) 北海道立総合研究機構中央水産試験場

○(1)について、サロマ湖における調査を担当する。

○(4)について、現場の表層泥を海水で攪拌した後の上澄液(懸濁液)をアサリに与える室内実験及び底生藻類の巻上げを目的とした沈子ロープをサロマ湖に設置してアサリの成長を観察する野外実験を担当する。

東京海洋大学

○(3)について、サロマ湖、三河湾、伊勢湾、有明海で採取された海水、底泥、ア

サリ消化管の珪藻組成についての分析を担当する。

愛知県水産試験場

○（１）について、三河湾における調査を担当する。

三重県水産研究所

○（１）について、伊勢湾における調査を担当する。

熊本県水産研究センター

○（１）について、有明海における調査を担当する。

【方法】

調査研究 1：各地における定期調査及び現場飼育試験

担当機関：（独）水産総合研究センター（北海道区水産研究所・中央水産研究所・増養殖研究所）、（地独）北海道立総合研究機構中央水産試験場、愛知県水産試験場、三重県水産研究所、熊本県水産研究センター

（方法）調査対象地を図 1 に示した。各地においてアサリの漁場と非漁場（あるいは不適と想定される場所）の 2 箇所において、アサリの成長、成熟をモニタリングするための標本を採取した。コンテナや網袋を用いてアサリを飼育した。飼育期間は各地で任意とし、流速データロガーとクロロフィルデータロガーを用いて、飼育期間中の流速、クロロフィル濃度、水温をモニタリングした。飼育開始時でのアサリの殻長、殻高、殻幅および殻付全重量を測定し、飼育終了後に同様の項目を測定するとともに解剖し、軟体部湿重量を測定した。1 標本あたり 14 個体の軟体部を凍結し、中央部を 1-2mm スライスして組織観察用にデビッドソン液で固定した。残りの軟体部は雌雄を判別後に雌のみを選んで卵黄タンパク分析用に凍結保存した。

調査研究 2：アサリの成熟、産卵評価

担当機関：（独）水産総合研究センター（北海道区水産研究所・増養殖研究所）

（方法）デビッドソン液で一晩固定した軟体部を 70%エタノールに置換して保存した。常法によりパラフィン包埋し、厚さ 5 μ m の切片を作製し、ヘマトキシリン・エオシン染色した。卵黄タンパク質分析の前処理として、-80 $^{\circ}$ C で冷凍保存されたアサリ軟体部の凍結乾燥と破砕を行い、このサンプルにプロテアーゼ阻害剤（ナカライテクス社 04080）入りの抽出バッファー（20mM Tris-HCl、150mM NaCl、pH7.5）をサンプル湿重量の 5 倍量程度加えてホモジナイズした後、遠心分離（15000g、20 min、4 $^{\circ}$ C）を行い、上清を ELISA 用サンプルとして -80 $^{\circ}$ C で冷凍保存した。分析にあたっては、ELISA サンプルを 0.5%BSA-PBS で 2～100 倍に希釈してマイクロプレートに分注し、一次抗体として浜口と薄（2006）の抗アサリ卵黄タンパク質モノクローナル抗体、二次抗体として HRP 標識抗マウス IgG ヤギ抗体（DAKO 社）と順次反応させた後、発色基質として TMB + (DAKO 社) を添加後、マイクロプレートリーダーで吸光値を測定した(波長 450 nm)。

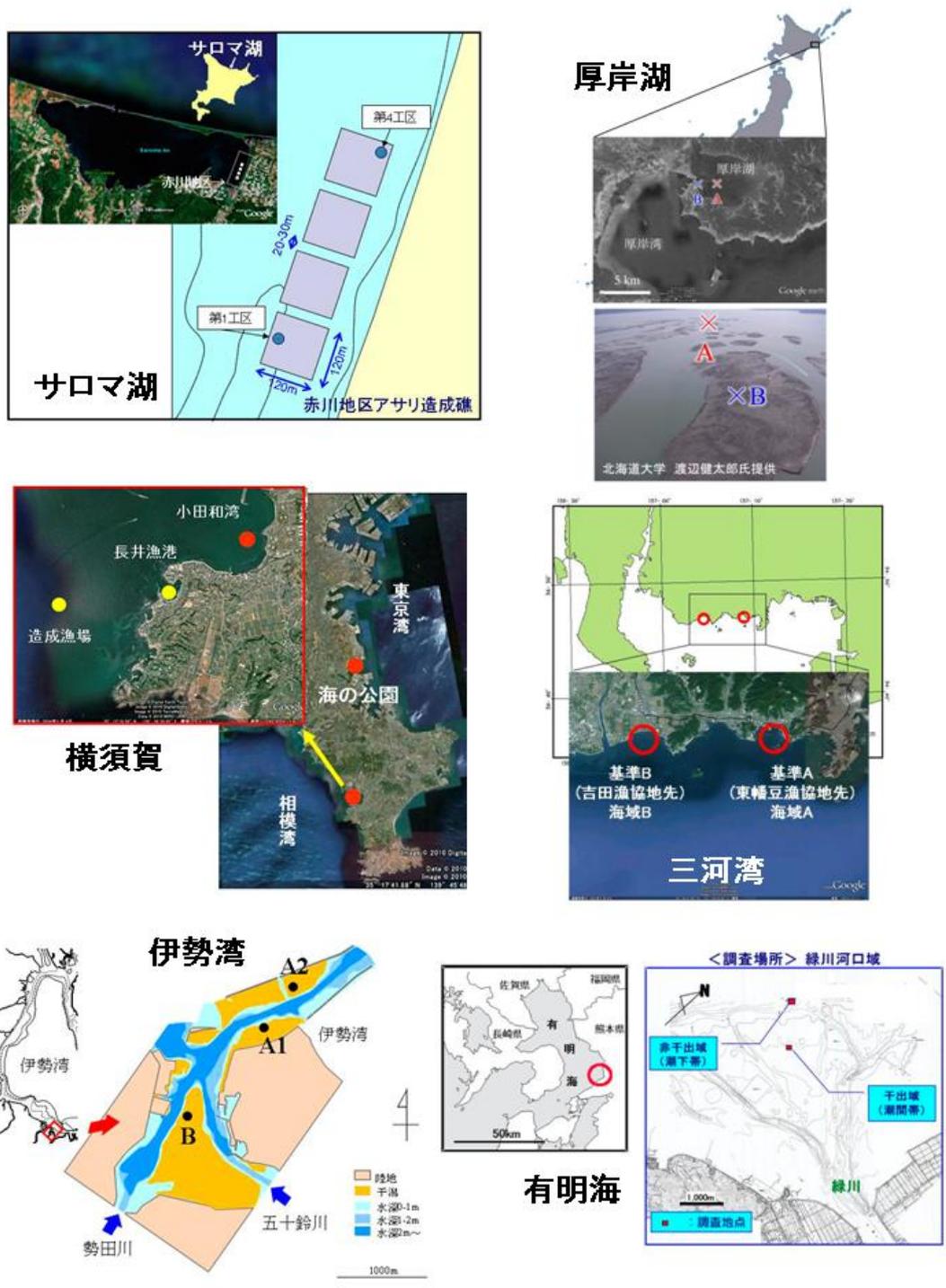


図 1. 現地調査及び飼育試験に選定した 6 箇所

調査研究 3：アサリの食性解析

担当機関：東京海洋大学

(方法) 22-23 年度においてはサロマ湖、三河湾、伊勢湾、有明海におけるアサリの消化管内容の珪藻組成について分析した。24 年度においては三河湾と伊勢湾における海水、底泥、アサリ消化管内容の珪藻組成について分析した。飼育現場の海水は GFF フィルターで 500ml-1L を濾過し、5% グルタルアルデヒド海水で固定した。底泥はコアサンプラー (50ml のプラスチックシリンジを加工) で径 3.5cm、1cm 厚で採集し、5% グルタルアルデヒド海水で固定した。アサリは 3 個体を解剖し、消化管をできるだけ多く取り出して 5% グルタルアルデヒド海水で固定した。配水管洗浄法 (南雲 1995) で有機物などを取り除き、長田・南雲 (2001) に準拠して顕微鏡観察用の試料 (光学顕微鏡観察用永久プレパラートと走査型電子顕微鏡観察用グリッド) を作製した。光学顕微鏡 (LM) による珪藻被殻の観察は 70 倍の油浸レンズを使用し、デジタルカメラ (NikonD70s) を用いて写真撮影を行い、その写真をもとに種の同定・計数を行い、種組成を算出した。

調査研究 4：餌量と産卵数や成長との関係及び流速と摂餌効率との関係

担当機関：(独) 水産総合研究センター (増養殖研究所)、北海道立総合研究機構中央水産試験場

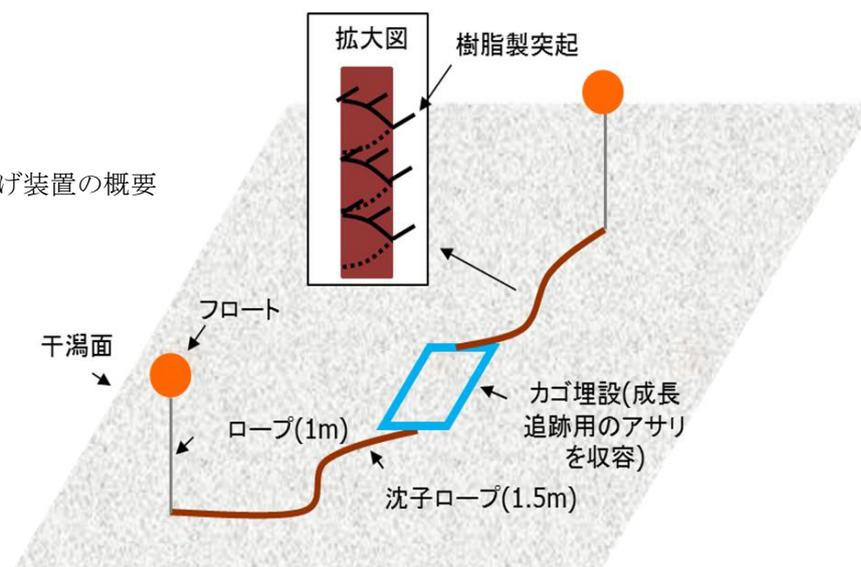
(方法) 増養殖研究所 (南勢庁舎) では、平成 23 年 3 月から増養殖研地先の筏で一か月垂下飼育したアサリを 4 月半ば (水温 16°C、平均肥満度 11.7) に水槽 (容量 45 リットル、90 個体/水槽) に移し、水温 20°C 一定でキートセロス・ネオグラシーレを連続給餌して飼育した。給餌条件は設定濃度 8 万 (H 区)、1.6 万 (M 区)、0.3 万細胞/ml (L 区) の 3 条件とし、定期的に流入水と排水のクロロフィル a (Chla) 量の差を測定して給餌条件設定を確認した。飼育開始 12, 24, 44, 64 日目に各区 15 個体ずつ採集し、肥満度、生殖巣組織像、閉殻筋グリコーゲン量を測定、観察した。平成 24 年 9 月末に水揚げされた産卵期のアサリ (水温 22°C、平均肥満度 14.9) を、10 月初めから 11 月半ばまで 42 日間、水温 21°C 一定でキートセロス・ネオグラシーレを連続給餌して飼育した。アサリは容量 20 リットルの水槽に 30 個体収容し、9 水槽 270 個体を飼育した。初めの 20 日間はすべての水槽の餌濃度の設定を 6 万細胞/ml とし、その後 22 日間は給餌条件を 3 種類、すなわち 8 万 (H 区)、1.6 万 (M 区)、0.3 万細胞/ml (L 区) とし、各区 3 水槽ずつとした。定期的に流入水と排水のクロロフィル a 量の差を測定して給餌条件設定を確認した。給餌条件変更後 7、17、21 日目に各給餌条件 30 個体を用い、昇温刺激による産卵誘発 (干出 2 時間、海水馴致 20 分、20°C から 28°C への昇温 3 回まで) を行った。産卵誘発当日に誘発前の個体を各区 8~10 個体採集し、殻サイズ、軟体部湿重量を測定し、生殖巣組織像観察に供した。残りの個体は産卵誘発に用い、放卵した場合メス一個体ずつの産卵数を計数した。そして産卵誘発翌日にすべて採集し、誘発前の個体と同様に測定、観察した。

北海道立総合研究機構中央水産試験場 (北水試) では、市販の珪砂 (中央粒径 0.7mm) をプラスチックコンテナ (37cm×26cm×24cm) (以下、水槽と称す) に 5cm 厚で敷き、個体

標識したサロマ湖産アサリ 20 個体を収容した。コンテナ 2 個用意し、2011 年 5～12 月および 2012 年 5～10 月の間に飼育実験を行った。現場底泥（2011 年は 100g、2012 年は 25g）を 15L 濾過海水中で攪拌し、その上澄み液と人工飼料（M1）0.1g を 1 日に午前と午後 2 時間ずつ計 4 時間、試験区に与えた。対照区では人工飼料（M1）0.1g を添加した濾過海水 15L を与えた。その他の時間は、両試験区ともに濾過海水の掛け流し（16 時間/日）および人工飼料（M1）0.1g を添加した濾過海水 15L（4 時間/日）で飼育した。試験中にアサリが死亡した場合は、別に給餌飼育していた死亡個体と同サイズのアサリを補充してアサリの収容密度を保った。試験中は 1～2 か月間隔でアサリの殻長と全重を測定した。2011 年 7 月 13 日にサロマ湖第 4 工区において、底生藻類の巻上げを目的とした沈子ロープ（以後、巻上げ装置と称す）を両端に取り付けたプラスチック製カゴ（アサリ飼育試験と同型、試験区）と何も取り付けていないプラスチック製カゴ（対照区）を各 1 個、埋設した（図 2）。各カゴには第 4 工区で採取した平均殻長 23.9～25.5mm のアサリを、30 個体/カゴの密度で収容した。その後 8 月 25 日、9 月 21 日および 10 月 26 日に試験区と対照区のアサリの殻長を測定した。

増養殖研究所（横須賀）では、流速とアサリの摂餌効率との関係を把握するために競馬場型のアクリル製回転水槽を設計した（図 3）。直線部分に 20cm x 30cm x 5cm の窪みを作成し、その中に砂利を入れたプラスチックカゴを設置した。80%濃度（塩分濃度約 27-29‰）に調整した飼育海水を 25L 投入した場合の水深は 15cm であった。実験期間中の水温は 24 ± 1 °C に保った。流量調節ができる小型水中ポンプで飼育海水を回転させた。直線部分の内側と外側では流速が異なるため、カゴの中央部分にプラスチック板を差し込み、外側の区画だけでアサリを飼育した。アサリを入れずに異なる流速下で 5gr/L のベントナイト溶液を 100ml 投入し 2 分ごとに CLW で濁度を記録した。アサリを入れた状態での試験では、まずカゴにアサリを投入し 1 時間後に水管を出していない個体を取り上げてからベントナイトを投入した。砂面直上の流速を電磁流速計で 30 分ごとに 3 回記録した。1 回の摂餌試験は 2 時間行い、試験終了後に人工飼料（M1）を約 4 時間給餌した。その後、濾過器を 12 時間作動させて飼育海水を循環濾過し、翌朝、飼育海水を全交換した後に同じ個体群を用いて次の試験を行った。

図 2. 巻上げ装置の概要



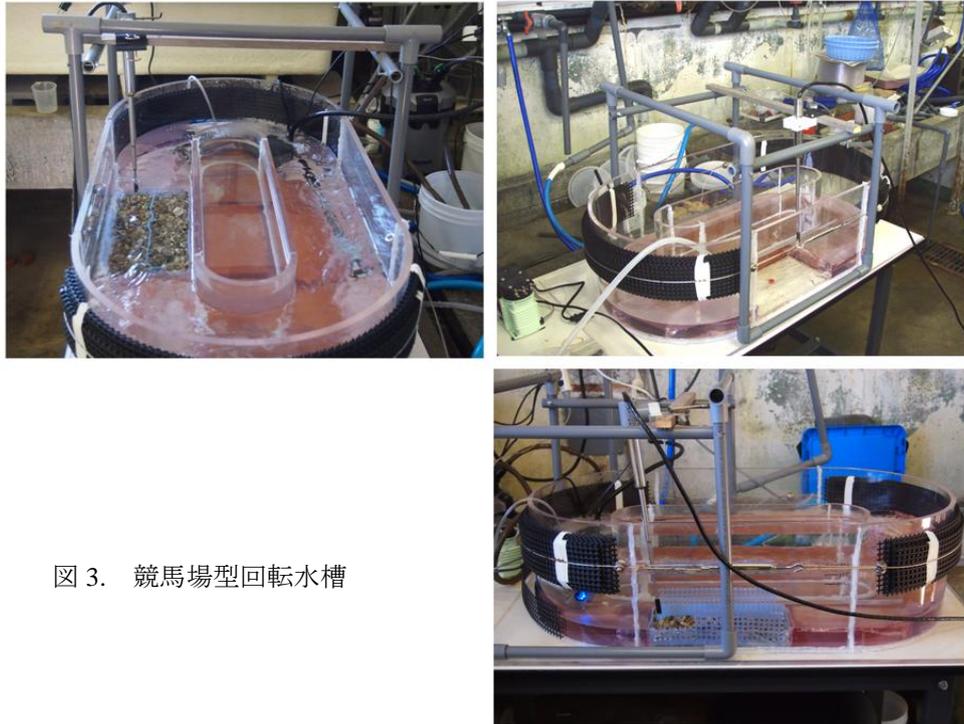


図 3. 競馬場型回転水槽

【結果】

調査研究 1：各地における定期調査及び現場飼育試験

アサリの餌環境の指標となるクロロフィル濃度と珪藻相及び摂餌効率に影響すると考えられる流速、そしてクロロフィル濃度と流速の積であるクロロフィルフラックスについて 6 海域（サロマ湖、厚岸湖、三浦半島周辺、三河湾、伊勢湾、有明海）でデータ収集するとともに、アサリの現場基準標本と飼育標本の成長と成熟・産卵についてモニタリングを行った。細部課題 1 で行った室内飼育実験では軟体部 1g 当たり換算した産卵数は平均で 100 万個以上あった一方、現地基準標本と飼育標本では明らかに卵数が少なかった（図 4）。これは、現場においては産卵あたりの卵数は多くない一方で、短期間に複数回産卵するためであると考えられる。調査対象とした 6 海域でのクロロフィル濃度と流速の平均を図 6 に示した。クロロフィルフラックス（10, 20, 40, 80）は点線で示した。クロロフィル濃度の平均が $10\mu\text{g/l}$ を越える調査地は殆ど無く、多くは $2\sim 8\mu\text{g/l}$ の範囲であった。流速に関しては平均で 20cm/s を越える調査地はなかった。サロマ湖ではクロロフィルフラックスが 10 を下回る場合が多くみられた。各調査地におけるクロロフィル濃度、流速、クロロフィルフラックスと成長・成熟形質（肥満度、増殻長、平均卵数、最大卵数）との関係を図 6 に示した。サロマ湖（A）と厚岸湖（B）ではクロロフィルフラックスとアサリの成長・成熟形質との間で明瞭な関係が見られ、クロロフィルフラックスが大きい場所で全ての形質が有意に大きい値を示した。サロマ湖と厚岸湖以外（C-F）でのクロロフィルフラックスの多寡と成長・成熟間との関係は明瞭ではなかったが、クロロフィルフラックスが高くともクロロフィル濃度が $2\mu\text{g/l}$ 以下

の場合には成長・成熟に影響が見られる場合が多かった。クロロフィルフラックスが10以下になる場合が多いサロマ湖では肥満度と増殻長において他海域より劣っていた。すなわちアサリの良好な成長・成熟にはクロロフィルフラックスが10以上の環境が望ましいが、クロロフィル濃度が $2\mu\text{g/l}$ 以上必要となる。

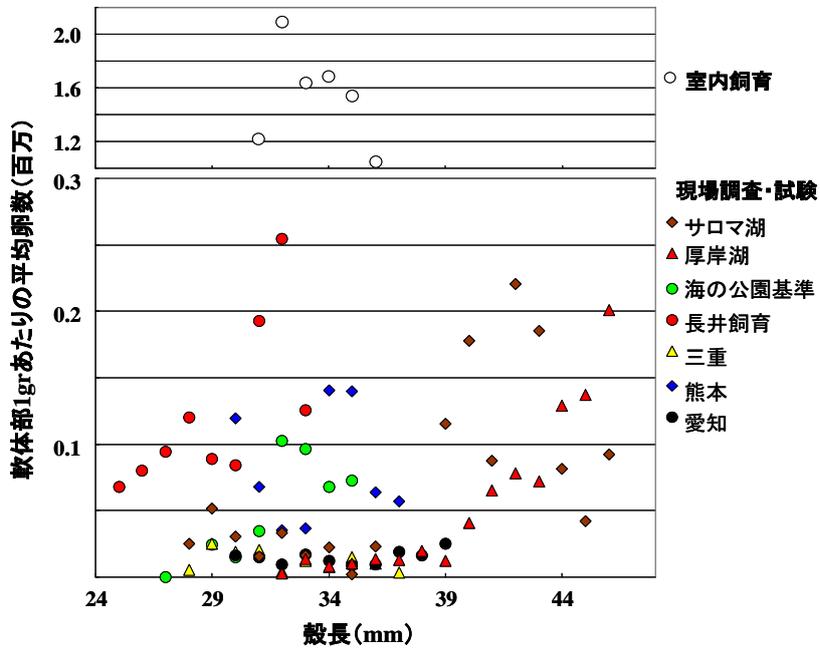


図4. 室内飼育個体の産卵数（実測値：上）と卵黄タンパク量から推定した現場飼育及び基準標本の卵数（下）

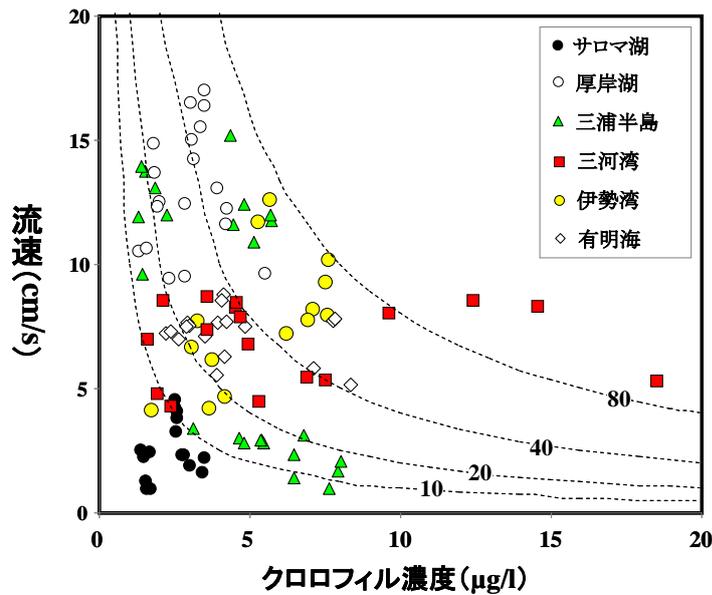


図5. 各調査地でのアサリ飼育期間中におけるクロロフィル濃度と流速。点線はクロロフィルフラックスを示す

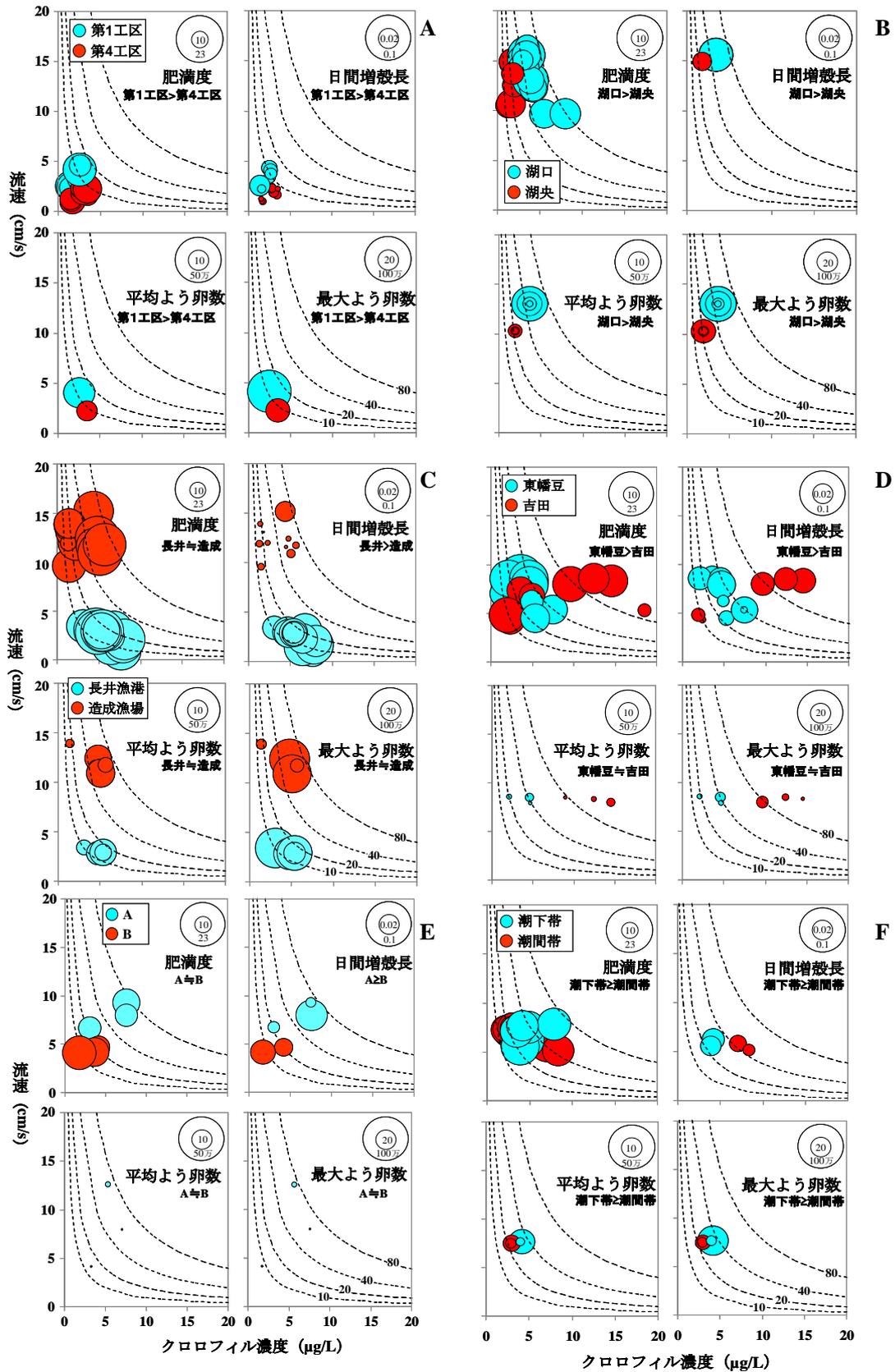


図 6. 各地におけるクロロフィル濃度、流速、クロロフィルフラックスと成長・成熟形質との関係。(A) サロマ湖、(B) 厚岸湖、(C) 横須賀、(D) 三河湾、(E) 伊勢湾、(F) 有明海

調査研究 2 : アサリの成熟、産卵評価

成熟段階は未分化期、成長初期、成長後期、成熟期、放出期、退行期の 6 段階に分類された (図 7)。後述の卵黄タンパク質分析と併用するにあたっては、アサリ軟体部を -80°C で凍結後、中央部分を約 2mm 程度スライスし、それをデビッドソン液で固定して組織切片の作製を行った。凍結標本を用いたこのような手法でも問題なく成熟度評価は可能であった。

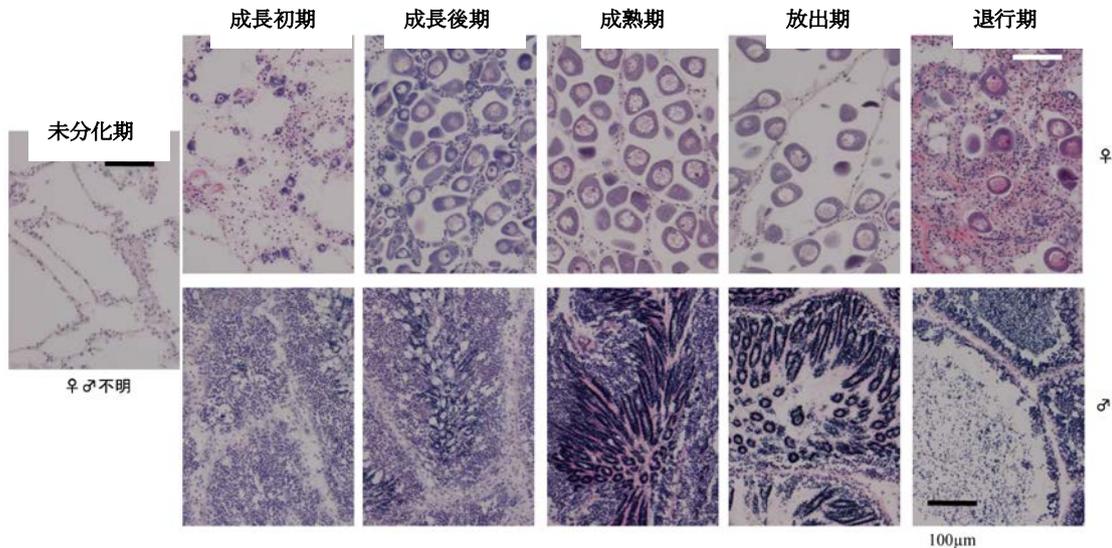


図 7. アサリ生殖腺の成熟段階

浜口と薄 (2006) の抗アサリ卵黄タンパク質モノクローナル抗体を用い、酵素免疫測定法 (ELISA 法) による卵黄タンパク質量によって卵数を推定する手法を開発した。成熟盛期のアサリ切片の免疫組織染色の結果、雄においては染色された部位は確認されなかったが、雌では卵が染色された (図 8)。卵に含まれる卵黄タンパク質量は、採集日で大きく異なるとともに、同じ採集日においても個体間で大きなばらつきが見られ (図 9)、このうち 2012 年 8 月 20 日の個体において卵 1 個あたりの卵黄タンパク質量 R が 0.31 となり最も多かった。一方、誘発産卵によって得られた卵では、卵黄タンパク質量が少なく、さらに、孵化率の高い卵 (< 20%) にくらべ低い卵 (< 5%) において、その量が少なかった。このことから、放出された卵では、卵黄タンパク質に変化が生じ、抗体による反応性

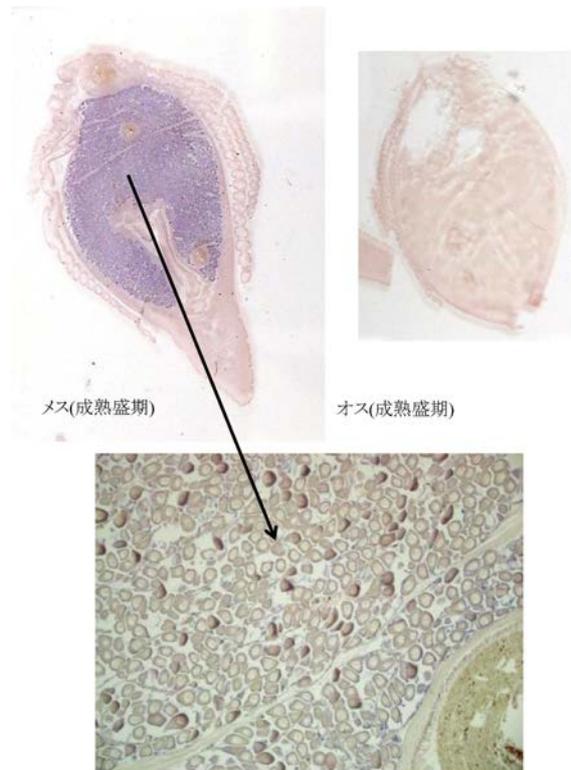


図 8. 抗アサリ卵黄タンパク質モノクローナル抗体を用いたアサリ組織切片の免疫組織染色像

が低下することと考えられ、誘発産卵で得られた卵の卵黄タンパク質含有量は、よう卵数の算出には適さないと判断した。一方、北海道厚岸海域において得られたアサリを用いて行った分析によって（現場飼育参照）、軟体部 1gWW あたり卵黄タンパク質量 R は、成熟直前の 1 ヶ月で急増した（図 10）。水温の低い当該海域において、この時期に卵数が急変することは考えにくいことから、抗体が認識・結合する卵黄タンパク質のエピトープは、タンパク質の変化などにより成熟直前に急増すると考えられた。これらの結果から、本分析で用いる抗体によって定量されたタンパク質量は、成熟し産卵に至る可能性の高い卵に蓄積するものであり、軟体部に含まれる卵黄タンパク質量 R と成熟盛期のアサリの卵の卵黄タンパク質量 R の最高値 0.31 から算出された卵数が、実際のような卵数に近いものとなると判断した。



図9. アサリ卵1個に含まれる卵黄タンパク質量 R

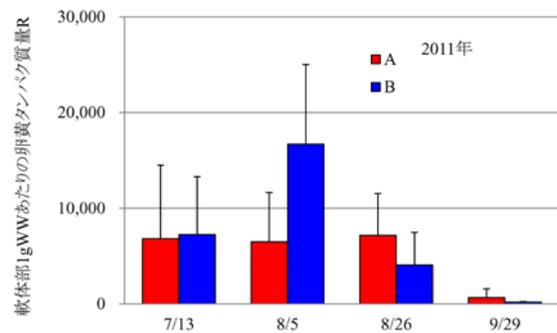


図 10. 厚岸湖 B 地点で観察された卵黄タンパク質量 R の急増

調査研究 3：アサリの食性解析

サロマ湖、三河湾、伊勢湾、有明海の現地基準及び飼育アサリ標本の消化管内珪藻相分析を行った。各海域内の場所間および時期間では顕著な差異が見られなかったため、各海域内標本をプールして海域間比較を行った（図 11）。生活型（付着と底生、浮遊性、未特定）に分けたところ、サロマ湖と三河湾では付着と底生性（A+S）が卓越する一方、伊勢湾と有明海では浮遊性（P）が卓越した。出現珪藻の種数と多様性について検討したところ、種数、多様性ともに三河湾で最も高く、伊勢湾で最も低い結果が得られた。

表 1 に平成 24 年 4 月分三河湾（東幡豆）産アサリの胃内容と環境中の珪藻組成を示した。本調査では、東幡豆産および吉田産のアサリ消化管内容物の珪藻組成は、ともに付着性種が多かった。この結果は Kasim and Mukai（2009）が北

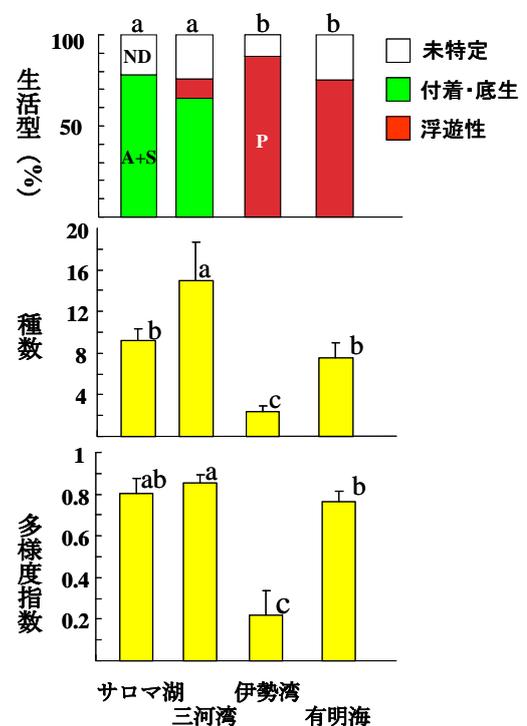


図 11. 4 海域のアサリ消化管内容標本で見られた珪藻の生活型（上）、種数（中）、多様度指数（下）。生活型頻度についてはカイ自乗検定、種数と多様度指数については Kruskal-Wallis 検定を行った。

海道厚岸湖産のアサリの消化管内容物の珪藻組成を調査した結果と一致する。本研究でも海域や採集時期が異なると浮遊性種が多く検出されることもあったので、摂餌における選択制（どこに生育している珪藻を食しているか?）に関してはさらに検討する必要があると考える。消化管内容物珪藻のうち（特に吉田産）、比較的多く観察された種類（*Navicula* spp. と *Cocconeis scutellum* var. *scutellum*）は底泥中に多く存したが、海水中からも確認された。これは波浪等で巻き上がった細胞が採集されたと考えられ、アサリ自身もこのような状態にある珪藻を食していると考えられる。一方、本調査で海水中より見いだされた浮遊性種の多くはアサリに摂餌されていない、あるいは摂餌されても少量であった。特に *Chaetoceros* spp. と *Eucampia zodiacus* は顕著であった。*Chaetoceros* spp. は細胞端から長いとげを有し、糸状に連なった群体を形成して浮遊する。*Eucampia zodiacus* は殻が大きく、糸状かつ螺旋状に連なった群体を形成する。この「摂餌しにくさ」はこれらの種類の形態によると考えられる。

表 1. 三河湾（東幡豆）産アサリの胃内容と環境中の珪藻

出現種	生育形	胃内容	海水	底泥
中心類				
<i>Anaulus minutus</i>	S	5.8	9.1	5.9
<i>Chaetoceros danicum</i>	P	2.2	3.0	
<i>Chaetoceros didymum</i>	P		6.8	
<i>Chaetoceros</i> spp.: resting spore		1.4	2.3	
<i>Cyclotella atomus</i>	P	1.4		
<i>Ditylum brightwellii</i>	P		4.5	
<i>Eucampia zodiacus</i>	P	1.4	3.8	
<i>Skeletonema costatum</i>	P	1.4	3.0	
<i>Skeletonema</i> sp.	P			
<i>Thalassiosira eccentrica</i>	P			
羽状類(無縦溝)				
<i>Fragilaria</i> sp.	A	10.1	9.9	10.1
<i>Neodelphineis pelagica</i>	P	0.7		2.4
<i>Opephora</i> sp.	S	2.2	1.5	1.8
<i>Tabularia waernii</i>	A		0.7	13.5
羽状類(双縦溝)				
<i>Amphora helenensis</i>	A	1.4	1.5	9.5
<i>Berkeleya rutilans</i>	A		1.5	
<i>Catenula adhaerens</i>	A			3.6
<i>Fragilariopsis</i> sp.	A	0.7		0.6
<i>Gomphonemopsis exigua</i>	A			
<i>Navicula agatkae</i>	S	2.2	0.7	
<i>Navicula agnita</i>	S	5.0		1.2
<i>Navicula salinicola</i>	S	1.4	6.0	17.1
<i>Nitzschia amabilis</i>	S			
<i>Nitzschia perindistincta</i>	S	5.8		3.0
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	P	9.4	11.5	
羽状類(単縦溝)				
<i>Cocconeis neothumensis</i> var. <i>marina</i>	A	1.4		
<i>Cocconeis scutellum</i> var. <i>scutellum</i>	A			
<i>Planothidium deperditum</i>	A	12.2	3.8	8.3
<i>Planothidium</i> sp.	A			3.0
Others		33.9	30.4	20.0

調査研究 4：餌量と産卵数や成長との関係及び流速と摂餌効率との関係

増養殖研究所（南勢庁舎）において、餌料環境がアサリの生殖巣発達と産卵に及ぼす影響を検討するため、3段階の濃度（H区：8万、M区：1.6万、L区：0.3万細胞/ml）でキートセロス・ネオグラシーレを連続給餌してアサリを飼育し、産卵誘発刺激に反応した個体の産卵数を測定した。その結果、200万個以上の産卵が見られた個体の頻度はH区で8割以上、M区で5割、L区で4割強というように餌濃度によって産卵数に差が見られるとともに、H区とL区間では肥満度に差があった（図12）。また今回の飼育実験では肥満度の増加や到達値が天然条件下で観察される値より低く、これは単一種の餌料珪藻を給餌したためである可能性が考えられた。

北水試が行ったサロマ湖の現場底泥の懸濁水を用いた室内給餌実験において、試験期間中の生残率は90%以上で、試験区間で大きな差異はなかった。日間増殻長または日間増重量は、2011年は9月まで、2012年は7月まで試験区のほうが対照区に比べて有意に高かったが、その後は2012年の7～8月の日間増殻長を除き、試験区と対照区の間で有意差は認められなかった（図13、14）。

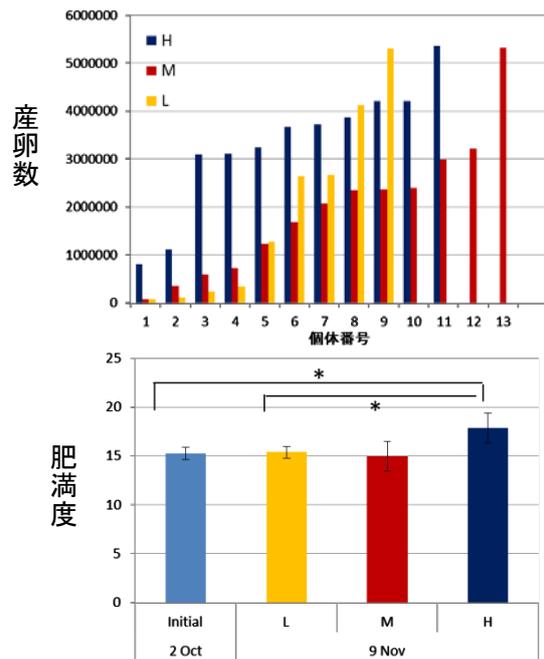


図 12. 給餌条件変更後 17 日目の産卵誘発でのメス 1 個体あたり産卵数（上）と産卵誘発前の肥満度（下）。青 H 区、赤 M 区、黄 L 区、薄青は実験開始時。縦線は 95%信頼区間

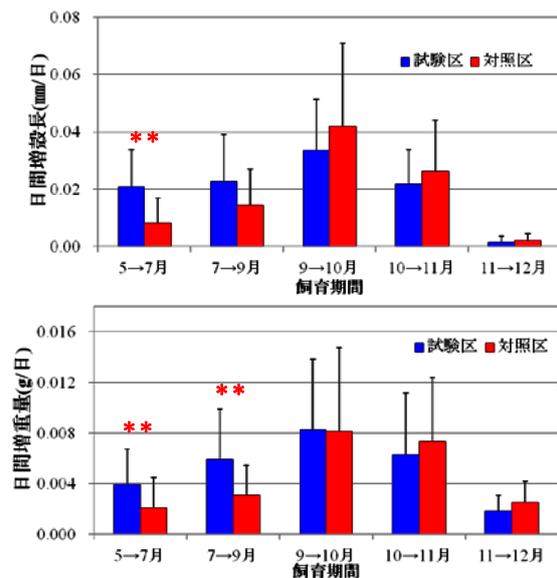


図 13. 2011 年における飼育期間中のアサリの日間増殻長（上）と日間増重量（下）縦棒とバーは、平均値と標準偏差を示す。** : $p < 0.01$ (Mann-Whitney's U-test)

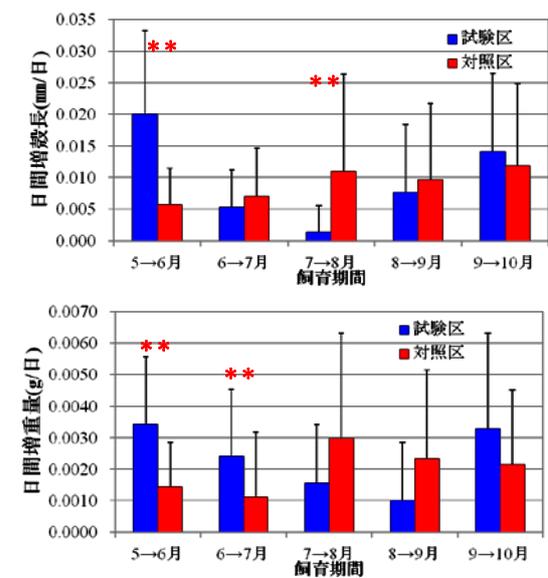


図 14. 2012 年における飼育期間中のアサリの日間増殻長（上）と日間増重量（下）縦棒とバーは、平均値と標準偏差を示す。** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$ (Mann-Whitney's U-test)

また、底生藻類の巻上げを目的とした装置を用いた野外試験において、アサリの平均殻長の増加量は、3回の測定すべてにおいて試験区のほうが対照区に比べて高かった（図15）。ただ、9月以降の成長は対照区のほうが試験区に比べ高いことが窺われた。

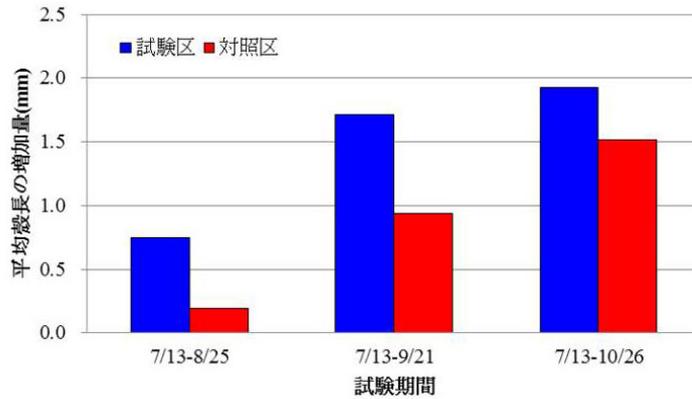


図15. 試験区別のアサリの平均殻長の増加量

増養殖研究所（横須賀庁舎）で行った流速と摂餌効率との関係についての実験結果を図15に示した。アサリ無しの状態では4段階の流速（秒速 2.6 ± 0.1 cm、 12.5 ± 0.1 cm、 18.7 ± 0.6 cm、 27.7 ± 0.3 cm）のうち流速が遅いほうでベントナイト濃度の初期低下が速い傾向が見られ、ベントナイトの沈殿が反映されていると考えられたが、試験終了前15分間での最終濃度は4段階の流速間で有意差がなかった（クラスカル・ウォリス検定, $p > 0.08$ ）。アサリを入れた状態（同じ個体を使用）では明らかにアサリが無い状態よりもベントナイト濃度の低下が速く、試験終了前15分間での最終濃度は3段階の流速間で有意差が見られ（クラスカル・ウォリス検定, $p < 0.05$ ）、 18.8 ± 0.7 cm で最も低く、 26.8 ± 0.7 cm で最も高かった。すなわち、これら3段階の流速のうち中程度の流速（ 18.8 ± 0.7 cm）で最もアサリの摂餌効率が良く、遅い流速（ 7.9 ± 0.3 cm）では効率が減少し、速い流速（ 26.8 ± 0.7 cm）では効率が最も低いことを示す。近縁のヨーロッパアサリ（*Ruditapes decussatus*）を用いた研究によると（Sobrala and Widdows, 2000）、秒速3cmの流速で最も取り込み効率が高く、秒速17cmでは約2割減となり、秒速24cmでは半減した。ヨーロッパアサリでは流速が遅いほう（0.6-8cm/s）で取り込み効率が高く、アサリでは遅い流速（ 7.9 ± 0.3 cm）よりも中程度の流速（ 18.8 ± 0.7 cm）で取り込み効率高いという違いがある。類似点としては秒速24cmや26.8cmといった流速を越えると取り込み効率が著しく減少することである。

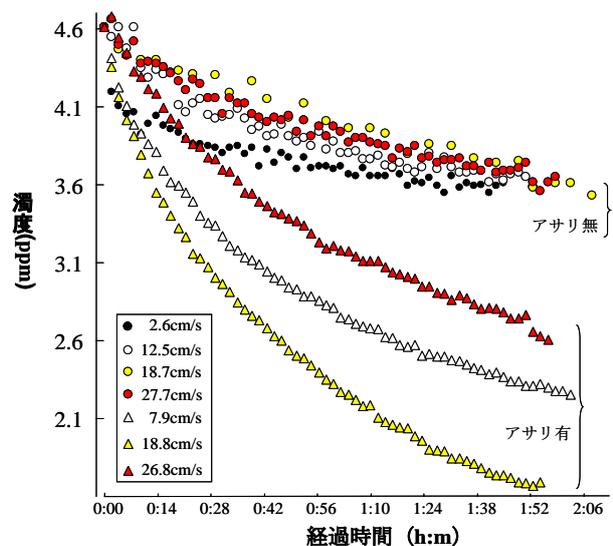


図16. ベントナイト濃度の低下パターン

【考察及び提言】

本事業ではアサリの成長、成熟、産卵に影響する餌量（クロロフィル濃度）と流動環境（潮流速）の相互作用について検討するために、アサリの漁場（あるいは比較的適すると想定される場所）と非漁場（あるいは比較的適さないと想定される場所）で環境調査と飼育試験を行った。さらに、給餌量と産卵量の関係や流速と摂餌効率の関係を把握するための室内実験、及びフィールドにおける餌料環境改善の試みを行った。

給餌量を調整した室内飼育実験の結果からは、給餌量が多いほど肥満度とグリコーゲン含量が高いレベルで維持されること、産卵数が多い個体の割合が高くなることが示され、過去の研究結果と一致する（鳥羽 1989; 鳥羽ら 1992; 松野ら 2005）。また殻長ごとの産卵数も過去の研究結果とよく似ていた（鳥羽ら 1992）。流速を調整した粒子取り込み実験からは、 $18.8\pm 0.7\text{cm/秒}$ の流速で取り込み効率が、それよりも遅い流速（ $7.9\pm 0.3\text{cm/秒}$ ）や速い流速（ $26.8\pm 0.7\text{cm/秒}$ ）に比べ有意に高く、アサリの餌取り込み効率において至適流速が実験室でのデータではあるものの 20cm/秒 程度であることが示された。今後詳細な実験が必要であるが、今回の結果と近縁のヨーロッパアサリでの結果（Sobrala and Widdows 2000）から推察すると、餌取り込み効率については 25cm/秒 程度以上の流速環境は好ましくないものと考えられる。

調査現場においてアサリを飼育した期間でのクロロフィル濃度の平均は殆どの場合 $2\text{-}8\mu\text{g/l}$ の範囲にあり、平均で $10\mu\text{g/l}$ を越える場所は三河湾の吉田で一時期に見られただけであった。クロロフィル濃度が低いほうとしては、サロマ湖で調査期間の約半数近くで平均 $2\mu\text{g/l}$ 未満を示し、平均 $3\mu\text{g/l}$ 未満の場合は 9 割を占めた。厚岸湖でも三分の一の場合で平均 $2\mu\text{g/l}$ 未満を示したが、流速が速いことからクロロフィルフラックスが 10 以下を示す場合は無かった。サロマ湖は流速も遅い場合が多く、そのためクロロフィルフラックスが 10 以下を示す場合が殆どであることが特異的であり、サロマ湖のアサリのみが肥満度で 20 を越えることが無いこととよく一致している。三浦半島の長井地区における飼育実験では流速の速い造成漁場で殻成長が極端に悪かった。一方で同じ程度の流速環境にある厚岸湖では問題無く殻成長が見られたことから、この程度の流速で殻成長は阻害されるわけではなく、垂下飼育による揺れが貝殻成長に影響したものと考えられる。

全ての調査現場においてクロロフィルフラックスとアサリの成長（肥満度と日間増殻長）の間には正の相関が見られる場合が多く、少なくとも逆相関は横須賀の長井漁港と造成漁場の日間増殻長を除いて無かった。横須賀の場合は前述のように流速が速い造成漁場での垂下飼育によるものが原因であろう。一方、卵数に関しては北海道以外では明瞭な関係が得られなかった。例えば、三河湾と伊勢湾ではクロロフィル濃度、流速、クロロフィルフラックスのどれを見ても他海域に劣ることはなく、かえって優れているにもかかわらず推定卵数が非常に少なかった。このような極端に少ない卵数については別の要因による可能性がある。本事業で行った室内飼育実験では現場飼育アサリよりもはるかに多い産卵数が観察されている。また、横浜海の公園から横須賀地区に移して垂下飼育した場合には、海の公園基準標本よりも卵数において優ることが示された。室内飼育実験では産卵を誘発するために水温刺激

を与えている。この場合、非常に安定した水温条件での飼育を継続したことにより、アサリが産卵誘発をかけられるまで産卵せずに成熟卵が蓄積していたことが充分考えられる。また、垂下飼育や潮下帯で飼育した場合は常に水中にあるため干潟に比べ水温変動が小さいものと考えられる。一方、干潟や浅場では干満の影響によってアサリが経験する温度の変動が大きいのではないかと考えた。そこで、各地での飼育期間における1日間の水温変動と推定卵数との関係について検討した(図17)。温度調整した室内飼育での1日の温度変化幅は0.5℃以下であり、垂下飼育や潮下帯での飼育では1.5℃未満であった。一方、潮間帯での温度変化幅は全て2.0℃以上であり最大で20℃以上に達する場合もあった。卵数は1日の温度変化幅が2.0℃以上になると極端に少なくなることが示された。鳥羽と深山(1995)は、産卵期に採取し3日から2週間室内で飼育したアサリ(天然個体)と、1ヶ月から3ヶ月間室内飼育したアサリ(飼育個体)に対して水温刺激による産卵誘発を行ったところ、後者のほうで産卵数の多い個体が多かったことを報告しており、本事業での観察結果と一致する。また、鳥羽と深山(1995)では個体ごとの飼育期間と産卵数の関係が記されていないが、天然個体でも200-300万個以上の産卵が見られているため、数日から2週間の飼育期間でこれだけの卵数が蓄積できるものと予想できる。温度変化による産卵誘発は自然界で実際に起こっているものと考えられ、本事業で調査対象としたクロロフィルフラックスと産卵ポテンシャルとの関係を検討するうえではノイズとなる。しかしながら、自然状態では産卵1回当たりの産卵数は少ないものの、産卵期の間は何回も産卵を繰り返すものと考えられ、栄養状態が良い場合には産卵回数が増えるといったことは十分にあり得ることである。また、室内実験からも栄養状態が良い場合には産卵数が増えることが示されている。さらに、単位重量あたりの卵数は個体のサイズとともに多くなることから、成長が良い場合には結果的に産卵数が増えることになる。

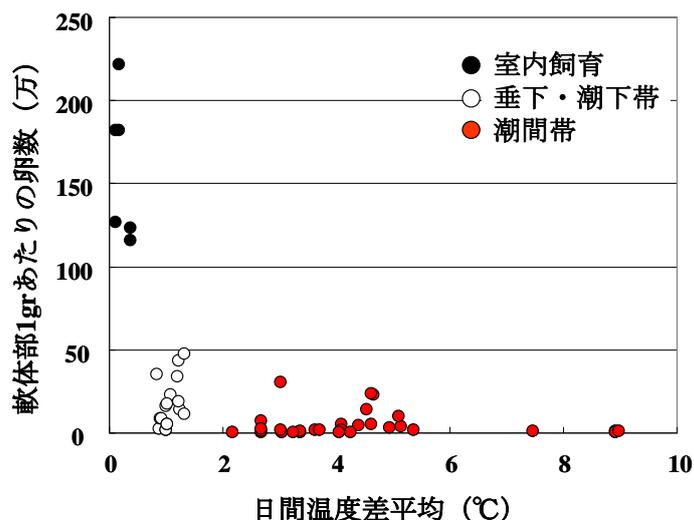


図17. 各調査地での飼育期間における1日間での最高最低温度差の平均とアサリ軟体部1gあたりの卵数 (温度差10℃以上は示していない)

母貝場機能向上のためのイメージを図 18 に示した。クロロフィルフラックスが低調（10 以下）であると判断される場所で、クロロフィル濃度が低い場合（ $2\mu\text{g/l}$ 以下）には、底生微細藻類の巻き上げや栄養塩供給、流速が遅い場合には地盤高調整や導流堤設置といった手法の適用が考えられる。一方、流れが強すぎる場合（ 25cm/秒 程度以上）には築堤やフェンスといった抑制手法が必要となる。餌量だけでなく珪藻の多様性もアサリの成長と関係することが示唆されたことにより、アマモ場造成や形質の異なる砂れきの導入による基質の複雑化といった手法で珪藻相の多様性向上を図ることも有意義であろう。大型個体ほど単位重量あたりの産卵数が多くなる結果が得られたことから、現在各地で行われている禁漁区や殻長制限だけでなく、大型母貝を対象とした保護策も重要である。

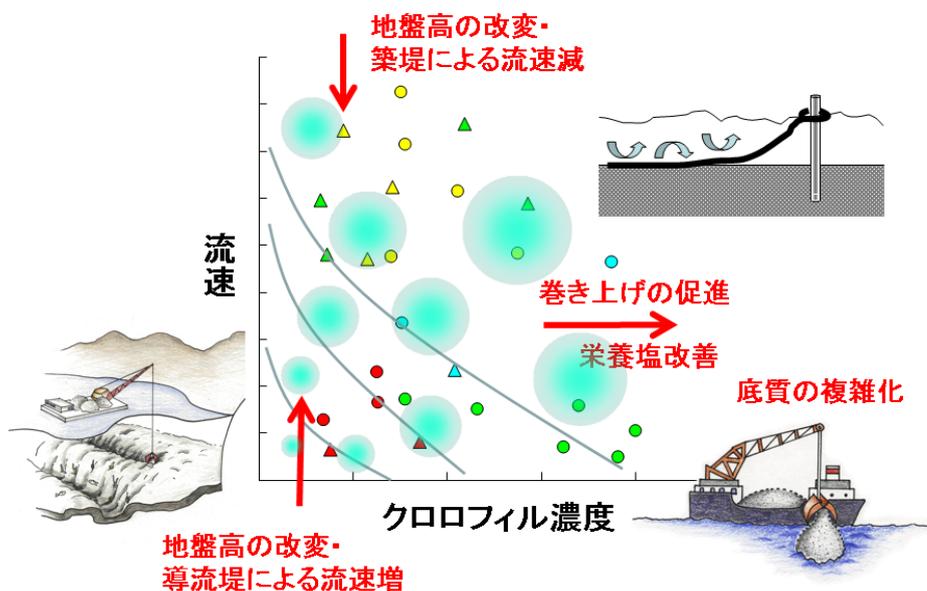


図 18. クロロフィル濃度、流速、クロロフィルフラックスを指標とした母貝場機能向上のためのイメージ

母貝場の新規創出にあたってはクロロフィル濃度、流速そしてクロロフィルフラックスの多寡を判断基準として、未利用海域、潮下帯や垂下飼育が可能な場所の選定を図ることができる。その場合、幼生の輸送を考慮しなければならないことは当然であるが、アサリに限らず多くの海産動物種におけるソースシンクの関係は現在のところシミュレーションに基づく検討が殆どであり、実際のところよくわかっていない場合が多い。しかしながら、東京湾のように広大な面積の干潟・浅場域が埋立によって失われた場所では、現在のアサリ漁場及び生息場間の浮遊幼生による交流が寸断されていることは明らかである。そのため何らかの原因で地域小集団のサイズが著しく減少した場合、他地域からの加入による立ち直りに時間がかかることになる。食害や貧酸素対策がクリアできれば潮下帯の有効活用が考えられる。また、未利用空間である水柱を活用するための沖合での垂下飼育技術開発や既存の養殖筏の利用も有効であろう（図 19）。垂直護岸や橋といった人工構造物も垂下飼育を基本とした新規母貝場に利用できる（図 20）。いずれにせよ、干潟・浅場間の交流を効率的に補間するような配置を考慮しなければならない。



図 19. 未利用空間である水柱の利用

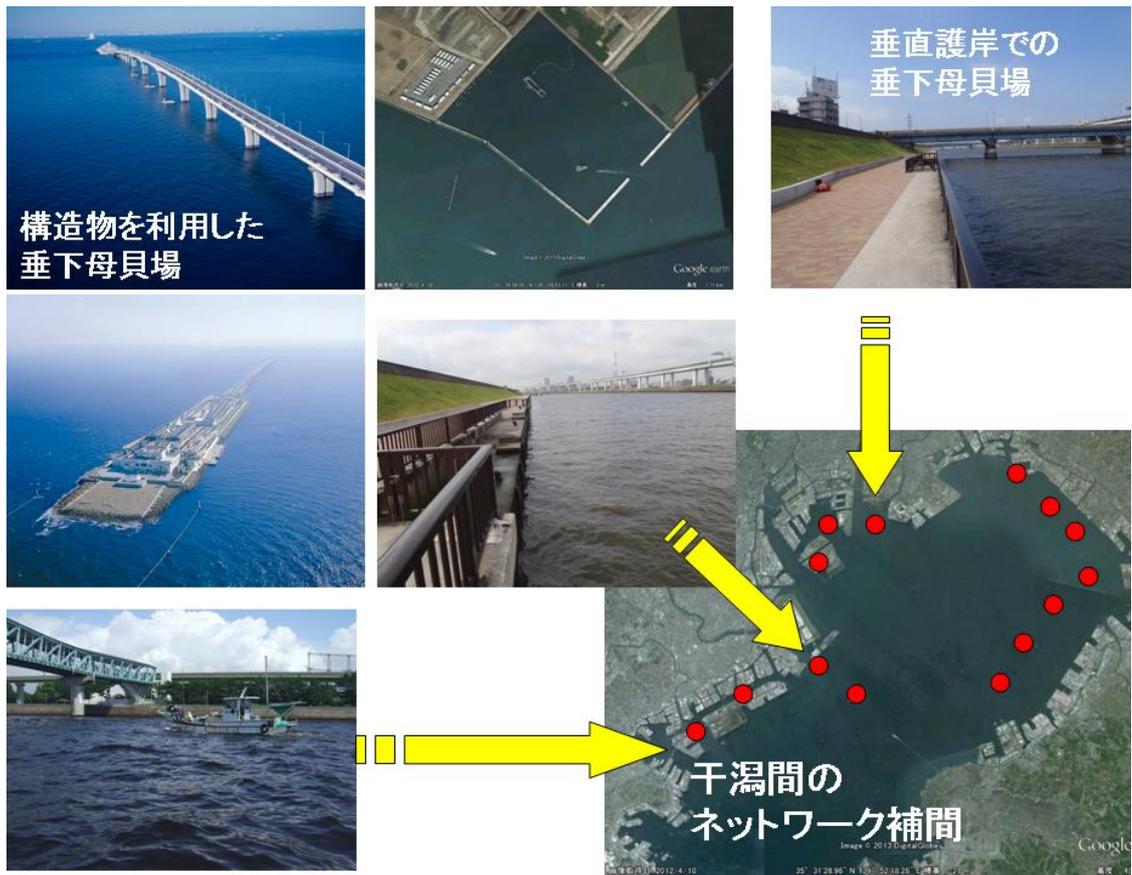


図 20. 幼生ネットワーク補間のための新規母貝場設置イメージ

【摘要】

室内飼育個体と比較して、現場飼育アサリでは1回あたりの産卵数は少ないものの、短期間で繰り返し産卵するものと考えられた。サロマ湖と厚岸湖ではクロロフィルフラックスとアサリの成長・成熟形質（肥満度、増殻長、平均卵数、最大卵数）との間で明瞭な関係が見られ、クロロフィルフラックスが大きい場所で全ての形質が有意に大きい値を示した。サロマ湖と厚岸湖以外でのクロロフィルフラックスの多寡と成長・成熟間の関係は明瞭ではなかったが、クロロフィルフラックスが高くともクロロフィル濃度が 2 $\mu\text{g/l}$ 以下の場合には成長・成熟に影響が見られる場合が多かった。クロロフィルフラックスが 10 以下になる場合が多いサロマ湖では肥満度と増殻長において他海域より劣っていた。すなわちアサリの良好な成長・成熟にはクロロフィルフラックスが 10 以上の環境が望ましいが、クロロフィル濃度が 2 $\mu\text{g/l}$ 以上必要となる。一方、珪藻種の多様性もアサリの成長に関与していることが示された。室内実験により、餌量と産卵数が強く関係していること、8cm/秒や 27cm/秒よりも 18cm/秒の流速でアサリは粒子を効率良く摂取することが示された。

既存の母貝場でクロロフィルフラックスが低調であると判断される場所で、クロロフィル濃度が低い場合には、底生微細藻類の巻き上げや栄養塩供給、流速が遅い場合には地盤高調整や導流堤設置といった手法の適用が考えられる。一方、流速が強すぎる場合には抑制手法が必要となる。また、珪藻相の多様性向上にはアマモ場造成や形質の異なる砂泥の導入による基質の複雑化も応用可能である。母貝場の新規創出にあたってはクロロフィルフラックスの多寡や幼生の輸送を判断基準として、潮下帯や垂下飼育が可能な場所の選定を図ることが重要である。

【引用文献】

- 浜口昌巳・薄 浩則 (2006) アサリの性の変異による影響実態の解明。「環境ホルモン—水産生物に対する影響実態と作用機構—」編集委員会編.環境ホルモン—水産生物に対する影響実態と作用機構—. 恒星社厚生閣 (東京) pp.103-111.
- Kasim, M and Mukai, H. (2009) Food sources of the oyster (*Crassostrea gigas*) and the clam (*Ruditapes philippinarum*) in the Akkeshi-ko estuary. *Plankton & Benthos Research* 4: 104-114.
- 松野 進・多賀 茂・和西昭仁・河村和寛 (2005) 異なる餌料を投与した浅蜆の産卵と摂餌. *Bull. Yamaguchi Pref. Fish. Res. Ctr.* 3: 105-109.
- 長田敬五・南雲 保 (2001) 珪藻研究入門. 日本歯科大学紀要 (一般教育系) 30: 131-141.
- 南雲 保 (1995) 簡単で安全な珪藻被殻の洗浄法. *Diatom* 10: 88.
- Sobrala, P. and Widdows, J. (2000) Effects of increasing current velocity, turbidity and particle size selection on the feeding activity and scope for growth of *Ruditapes decussatus* from Ria Formosa, southern Portugal. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 245: 111-125.
- 鳥羽光晴 (1989) アサリの水槽飼育での性成熟過程における摂餌量の重要性. *水産増殖* 37 (1): 63-69.
- 鳥羽光晴・夏目 洋・山川 紘 (1992) 東京湾産アサリの成熟と産卵に関する二、三の知見. *水産工学* 29 (1): 47-53.
- 鳥羽光晴・深山義文 (1995) アサリ人工産卵における産卵量および卵径と、卵・幼生の生き残りの関係. *水産増殖* 43 (3): 315-321.