

東京湾の漁業と環境

第5号

平成26年3月

Fishery and Oceanography in Tokyo Bay

No. 5, March 2014

増養殖研究所

中央水産研究所

National Research Institute of Aquaculture
National Research Institute of Fisheries Science
FRA, JAPAN

東京湾の漁業と環境 第5号

目次

I. 平成24年度東京湾研究会ミニシンポジウム

「江戸前の復活！東京湾の再生に踏み出すために」報告

1. 趣旨説明

江戸前の復活！東京湾の再生に踏み出すために・・・児玉真史・山本敏博 1

2. 基調講演

これからの東京湾再生の方向性とそれを支える科学技術・・・中村由行 3

東京湾の底泥の平面分布について・・・岡田知也 13

3. 話題提供

2012年の貧酸素水塊の状況および定点における底泥性状の変化

・・・大畑 聡 23

東京湾奥の浅場に着底した二枚貝や甲殻類の生息状況

・・・小泉正行 25

東京湾のアサリを増やすには

・・・張 成年・山本敏博・丹羽健太郎・日向野純也・淡路雅彦・松本才絵・
長谷川夏樹・櫻井 泉・秦 安史・鈴木秀和・宮脇 大・村内嘉樹・
水野知巳・羽生和弘・程川和宏・内川純一・生嶋 登 29

横浜市海の公園における水質浄化機能の推定

・・・秋元清治・小山利郎・岡靖一郎・小海茉莉絵・小関祥子・加藤健太 49

II. 研究事例紹介

中川河口域におけるウナギの分布状況と生息環境

・・・山本敏博・張 成年・黒木洋明・児玉真史 55

釣り人から見た東京湾のマコガレイ資源・・・久保田洋 57

魚類を指標とした東京湾の干潟における生物多様性の評価・・・工藤孝浩 67

盤洲のカイヤドリウミグモ

・・・鳥羽光晴・小林 豊・石井 亮・張 成年・山本敏博・丹羽健太郎・
良永知義・宮崎勝己 79

平成24年度中央ブロック東京湾研究会 議事録

平成24年度中央ブロック東京湾研究会 出席者名簿

東京湾のアサリを増やすには

張 成年*1・山本敏博*2・丹羽健太郎*2・日向野純也*3・淡路雅彦*3・松本才絵*3・長谷川夏樹*3・
 櫻井 泉*4・秦 安史*4・鈴木秀和*5・宮脇 大*6・村内嘉樹*6・水野知巳*7・羽生和弘*7・
 程川和宏*7・内川純一*8・生嶋 登*8

Seinen CHOW*1, Toshihiro YAMAMOTO*2, Kentaro NIWA*2, Junya HIGANO*3, Masahiko AWAJI*3,
 Toshie MATSUMOTO*3, Nastuki HASEGAWA*3, Izumi SAKURAI*4, Yasufumi HADA*4,
 Hidekazu SUZUKI*5, Dai MIYAWAKI*6, Yoshiki MURAUCHI*6, Tomomi MIZUNO*7,
 Kazuhiro HANYU*7, Kazuhiro HODOKAWA*7, Jun-ichi UCHIKAWA*8 and Noboru IKUSHIMA*8

*1 独立行政法人 水産総合研究センター 中央水産研究所

*2 独立行政法人 水産総合研究センター 増養殖研究所 (横須賀庁舎)

*3 独立行政法人 水産総合研究センター 増養殖研究所 (南勢庁舎)

*4 北海道立総合研究機構 中央水産試験場

*5 東京海洋大学

*6 愛知県水産試験場

*7 三重県水産研究所

*8 熊本県水産研究センター

〒236-8648 横浜市金沢区福浦 2-14-4

E-mail: chow@affrc.go.jp

*1 National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research Agency, Japan, 2-12-4 Fukuura,
 Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa, Japan

*2 National Research Institute of Aquaculture, Nagai 6-31-1, Yokosuka, Kanagawa 238-0316, Japan

*3 National Research Institute of Aquaculture, Nakatsuhamaura 422-1, Mie 516-0193, Japan

*4 Fisheries Research Institute, Hamanaka 238, Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan

*5 Tokyo University of Marine Science and Technology, Konan 4-5-7, Tokyo 108-8477, Japan

*6 Aichi Prefectural Fisheries Experimental Station, Wakamiya 97, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan

*7 Mie Prefecture Fisheries Research Institute, Hamajima 3564-3, Shima, Mie 517-0404, Japan

*8 Kumamoto Prefectural Fisheries Research Center, Oyano-cho 2450, Kumamoto 869-3603, Japan

【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、着床・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。日本各地で埋立が行われてきたが、人口稠密地である大都市周辺では特に規模が大きく、東京湾はその代表的な存在である。東京湾のアサリ漁獲量は減少の一途をたどり、現在では他地域産の種苗を放流することによって漁業が支えられているが、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かもしれない。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。

平成 22 年度～平成 24 年度の 3 年間にわたって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）が代表機関となり、北海道立総合研究機構中央水産試験場、東京海洋大学、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と共同して水産庁水産基盤整備調査委託事業「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」を行った。この事業では、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、クロロフィル濃度と流動環境の積であるクロロフィルフラックスを評価し、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ことを目的とした。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再生産機能向上を図るための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も行なった。ここでは全国規模で行った本事業の内容と結果について簡単に紹介する。

【材料と方法】

調査海域と定期調査及び現場飼育試験

調査対象地を図 1 に示した。北海道のサロマ湖と厚岸湖、神奈川県の大磯半島、愛知県の三河湾、三重県の伊勢湾、熊本県の有明海の 6 地域においてアサリ基準標本を定期的に採取した。アサリの分析項目は肥満度と成熟である。アサリの漁場（あるいは好適と想定される場所）と非漁場（あるいは不適と想定される場所）の 2 箇所を飼育場所として設定し、コンテナによる埋設、

網袋による海底設置あるいは垂下することによってアサリを飼育した。飼育期間は2週間から2ヶ月とし、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測定を行うとともに、軟体部重量を測定した。1標本あたり14個体を組織観察用とし、軟体部を -80°C で凍結した。凍結個体の中央部を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再び -80°C で凍結保存した。

アサリの成熟、産卵評価

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 $5\mu\text{m}$ 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°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°C ）を行い、上清をELISA用サンプルとして -80°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・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）。

アサリの食性解析

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500-1000ml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。

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

水産総合研究センター増養殖研究所（南勢庁舎）では、平成24年9月末に水揚げされた産卵期のアサリを、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。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。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、放卵した場合雌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類似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 ヶ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）と何も取り付けし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。

水産総合研究センター増養殖研究所（横須賀庁舎）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）。高さは 25cm、幅は 55cm、直線部分は 40cm、コーナーの半円部分の半径は 27.5cm である。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大きく異なるため、流軸方向にプラスチック板をカゴ中の砂利に差し込み、外側の区画（幅約 6cm）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 5g/L のベントナイト溶液を 100ml 投入し 2 分ごとにクロロフィル濁度データロガー（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。

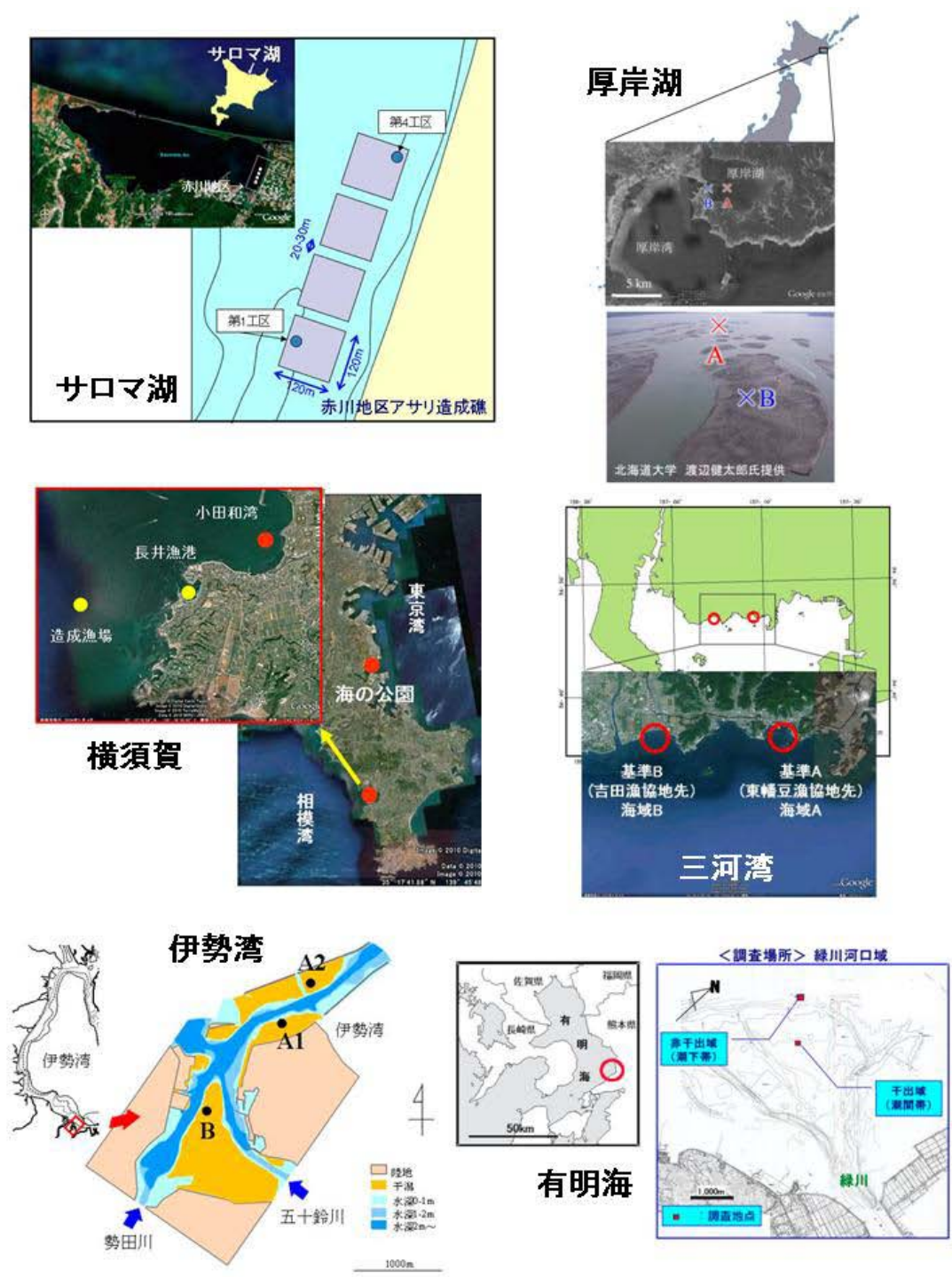


図 1. 現地調査及び飼育試験に選定した 6 箇所

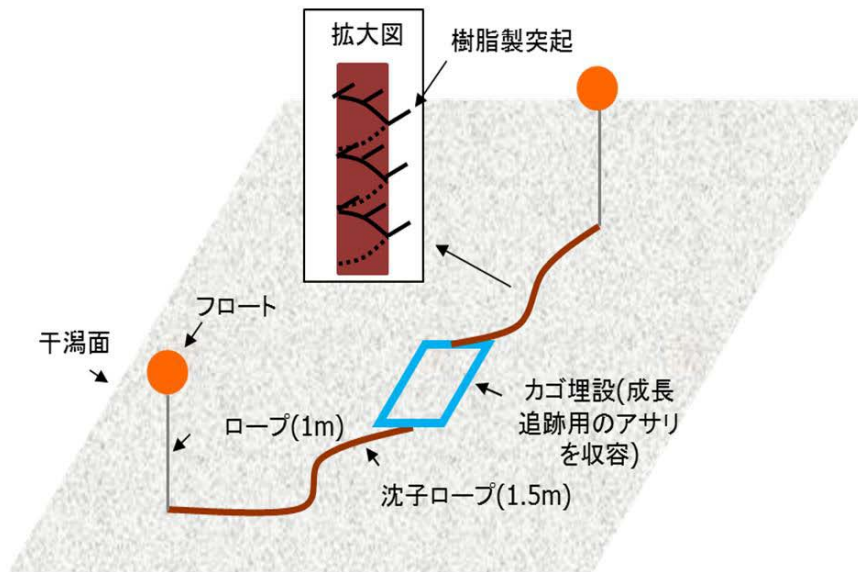


図2. 巻上げ装置の概要

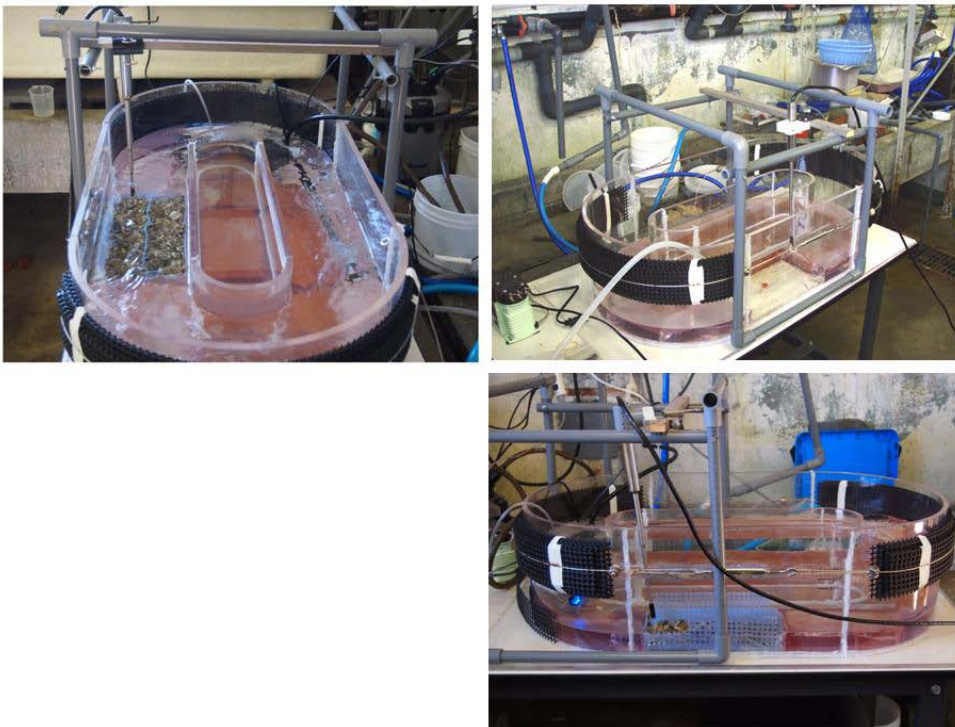


図3. 競馬場型回転水槽

【結果】

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4)。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。

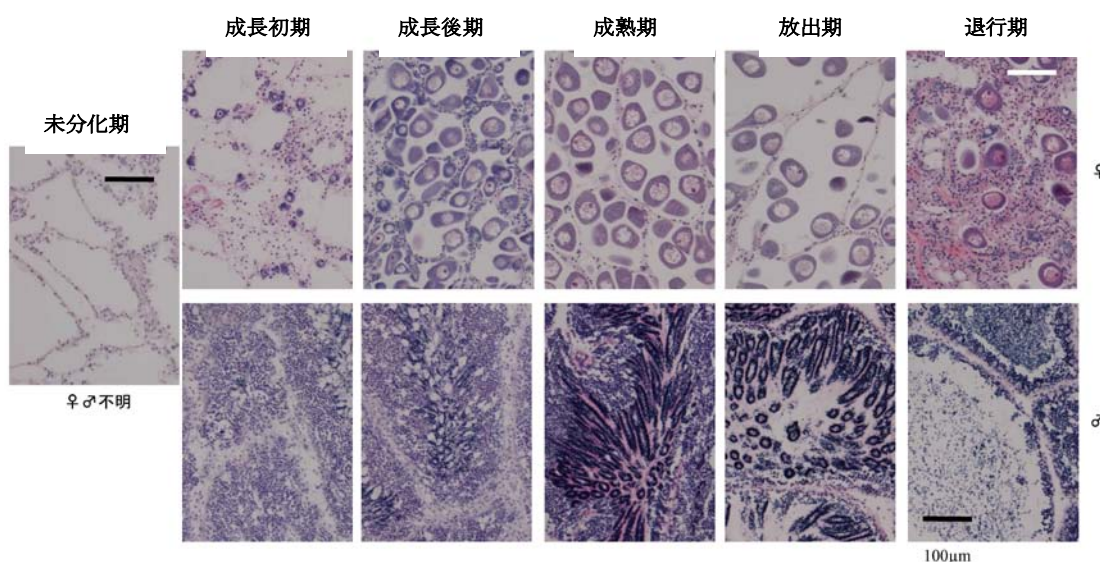


図4. アサリ生殖腺の成熟段階

浜口・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よう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5)。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6)、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、産卵誘発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、抗体による反応性が低下するものと考えられ、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では(現場飼育参照)、軟体部1gあたりの卵黄タンパク質量が成熟直前の1ヶ月で急増した(図7)。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が、タンパク質の変化などにより成熟直前に急増したと考えられた。すなわち、本分析で用いた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したものと考えられる。以上のことから、成熟盛期のアサリから切り出された卵1個の卵黄タンパク質量の最高値を放出直前の卵の卵黄タンパク質量とみなし、卵黄タンパク質量からのよう卵数の算出に用いることとした。

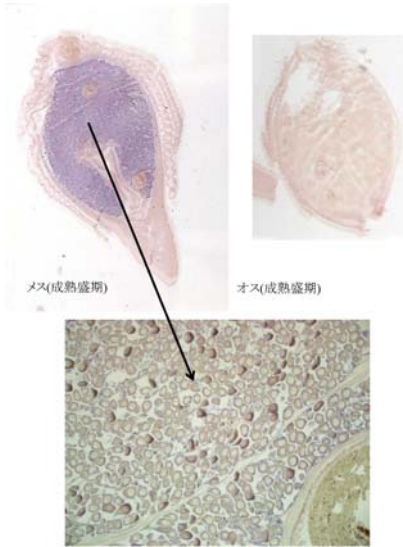


図 5. 抗アサリ卵黄タンパク質モノクローナル抗体を用いたアサリ組織切片の免疫組織染色像

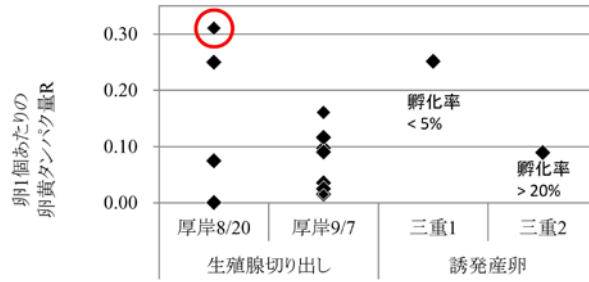


図 6. アサリ卵 1 個に含まれる卵黄タンパク量

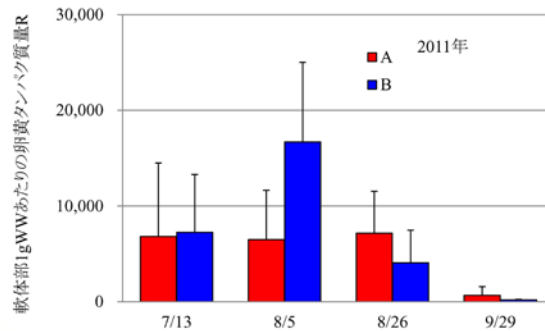


図 7. 厚岸湖 B 地点で観察された卵黄タンパク質量 R の急増

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。後述の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 8）。これは、現場においては産卵一回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 9 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 μ g/l を越える調査地は殆ど無く、多くは 2~8 μ g/l の範囲であった。流速に関しては平均で 20cm/秒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 10 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高い値を示した。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・成熟間関係は明瞭ではなかったが、クロロフィルフラックスが大きくともクロロフィル濃度が $2\mu\text{g}/\text{l}$ 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 $2\mu\text{g}/\text{l}$ 以上必要となる。

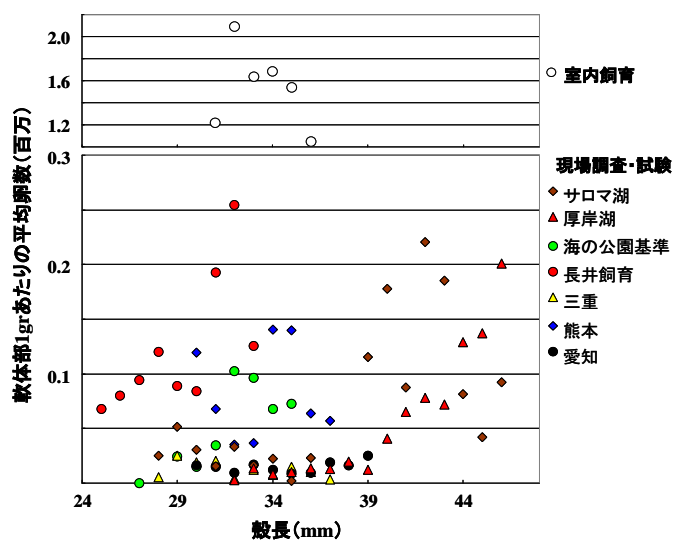


図 8. 室内飼育個体の産卵数（実測値：上）と卵黄タンパク量から推定した現場飼育及び基準標本の卵数（下）

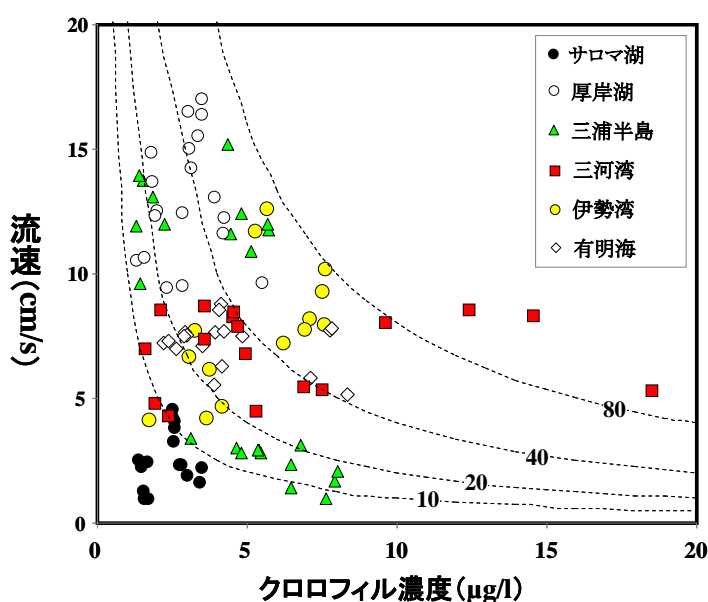


図 9. 各調査地でのアサリ飼育期間中におけるクロロフィル濃度と流速。点線はクロロフィルフラックスを示す

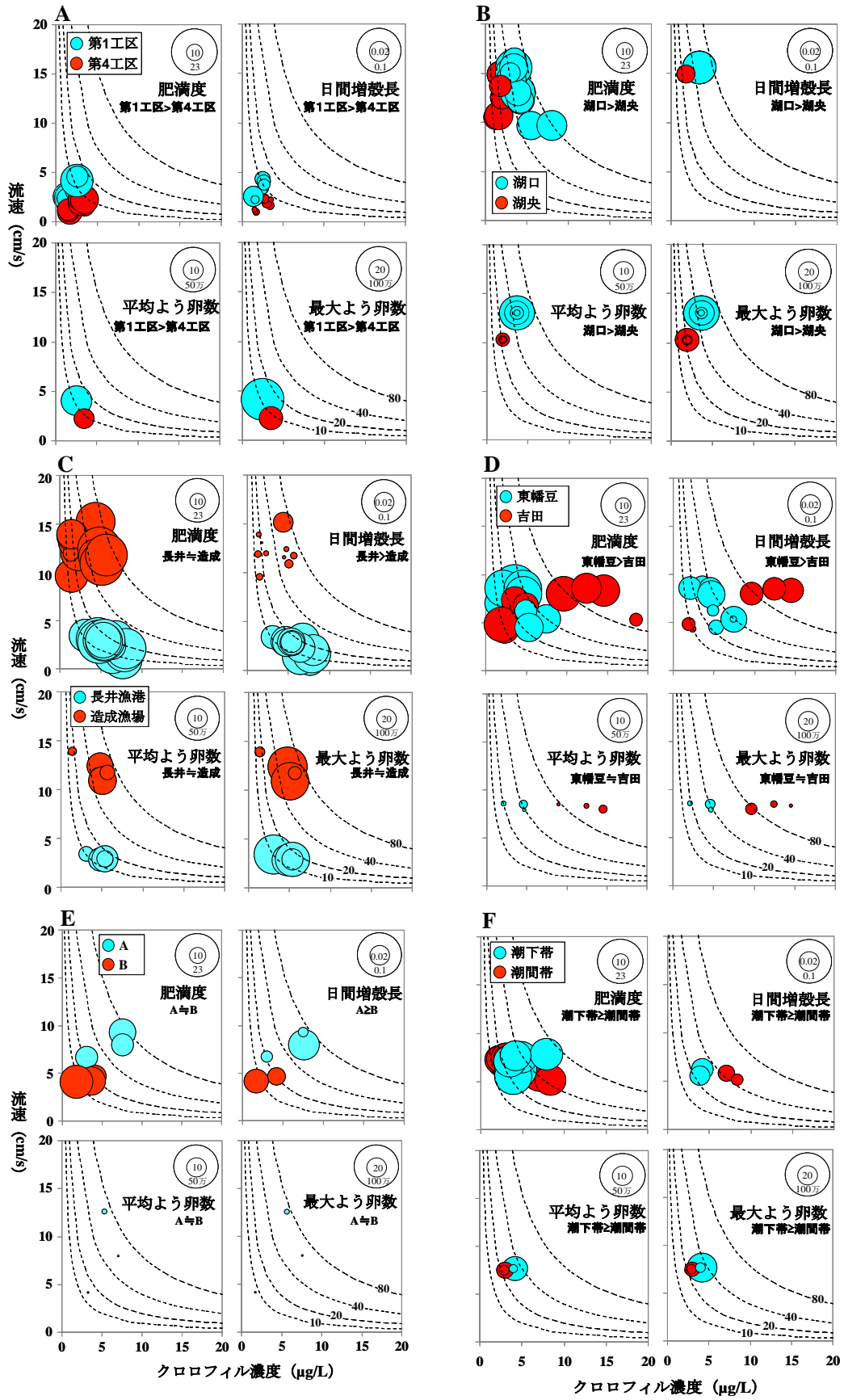


図 10. 各地におけるクロロフィル濃度、流速、クロロフィルフラックスと成長・成熟形質との関係。(A) サロマ湖、(B) 厚岸湖、(C) 横須賀、(D) 三河湾、(E) 伊勢湾、(F) 有明海

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性 (A) と底生性 (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度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、摂餌における選択性 (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、比較的多く観察された種類である

(*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。

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 段階の餌濃度 (H 区: 8 万、M 区: 1.6 万、L 区: 0.3 万細胞/ml) でアサリを飼育し、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た。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

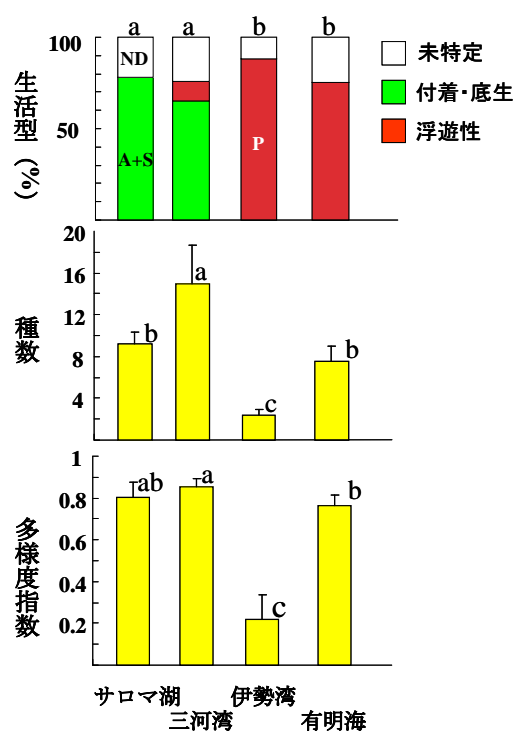


図 11. 4 海域のアサリ消化管内容標本で見られた珪藻の生活型 (上)、種数 (中)、多様度指数 (下)。生活型頻度についてはカイ自乗検定、種数と多様度指数については Kruskal-Wallis 検定を行った。異なるアルファベットが有意差を示す。

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12、13)。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回の測定全てにおいて試験区のほうが対照区に比べて高かった(図14)。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。

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

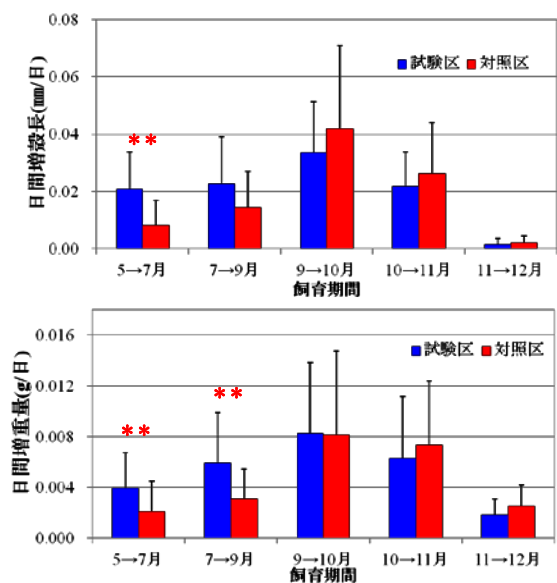


図 12. 2011 年における飼育期間中のアサリの日間増殻長（上）と日間増重量（下）
縦棒とバーは、平均値と標準偏差を示す。** : $p < 0.01$ (Mann-Whitney's U-test)

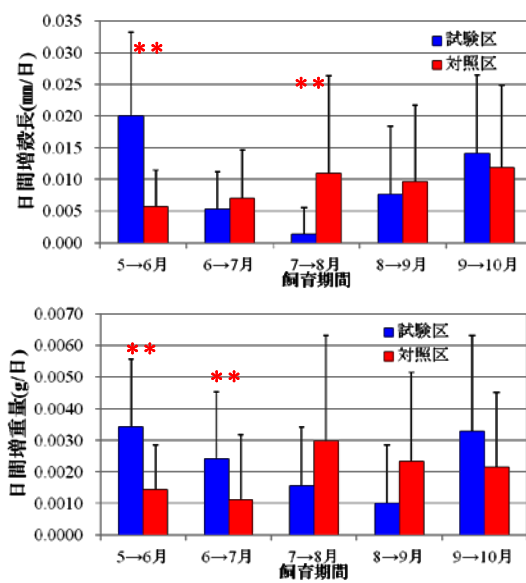


図 13. 2012 年における飼育期間中のアサリの日間増殻長（上）と日間増重量（下）
縦棒とバーは、平均値と標準偏差を示す。** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$ (Mann-Whitney's U-test)

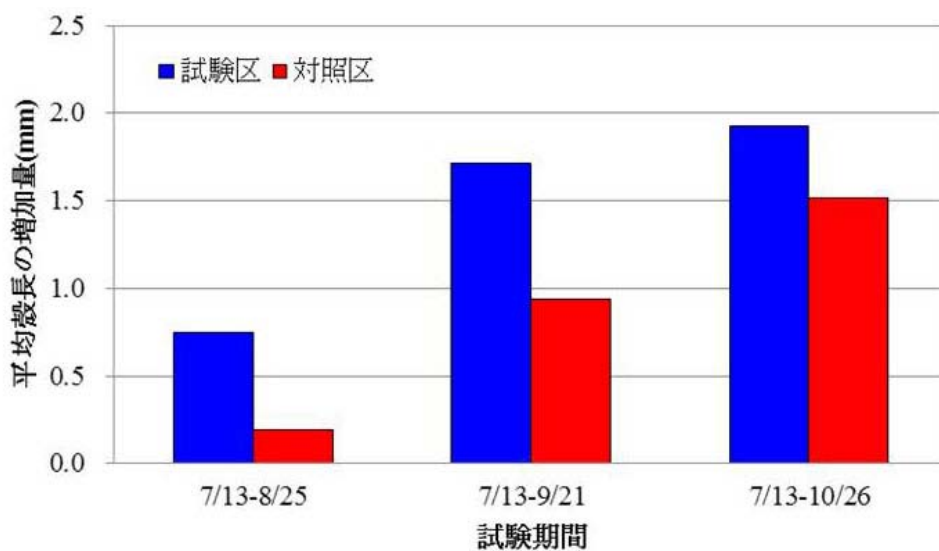


図 14. 試験区別のアサリの平均殻長の増加量

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 ($2.6 \pm 0.1 \text{cm/秒}$ 、 $12.5 \pm 0.1 \text{cm/秒}$ 、 $18.7 \pm 0.6 \text{cm/秒}$ 、 $27.7 \pm 0.3 \text{cm/秒}$) 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（ $7.9 \pm 0.3 \text{cm/秒}$ 、 $18.8 \pm 0.7 \text{cm/秒}$ 、 $26.8 \pm 0.7 \text{cm/秒}$ ）で有意差が見られ（クラスカル・ウォリス検定、 $p < 0.05$ ）、 $18.8 \pm 0.7 \text{cm}$ で最も低く、 $26.8 \pm 0.7 \text{cm}$ 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（ $18.8 \pm 0.7 \text{cm/秒}$ ）で最もアサリの摂餌効率が良く、遅い流速（ $7.9 \pm 0.3 \text{cm/秒}$ ）では効率が減少し、速い流速（ $26.8 \pm 0.7 \text{cm/秒}$ ）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）、 3cm/秒 の流速で最も取り込み効率が高く、 17cm/秒 では約 2 割減となり、 24cm/秒 では半減した。ヨーロッパアサリでは流速が遅いほう（ $0.6\text{-}8 \text{cm/s}$ ）で取り込み効率が高く、アサリでは遅い流速（ $7.9 \pm 0.3 \text{cm/秒}$ ）よりも中程度の流速（ $18.8 \pm 0.7 \text{cm/秒}$ ）で取り込み効率高いという違いがある。類似点としては 24cm/秒 や 26.8cm/秒 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。

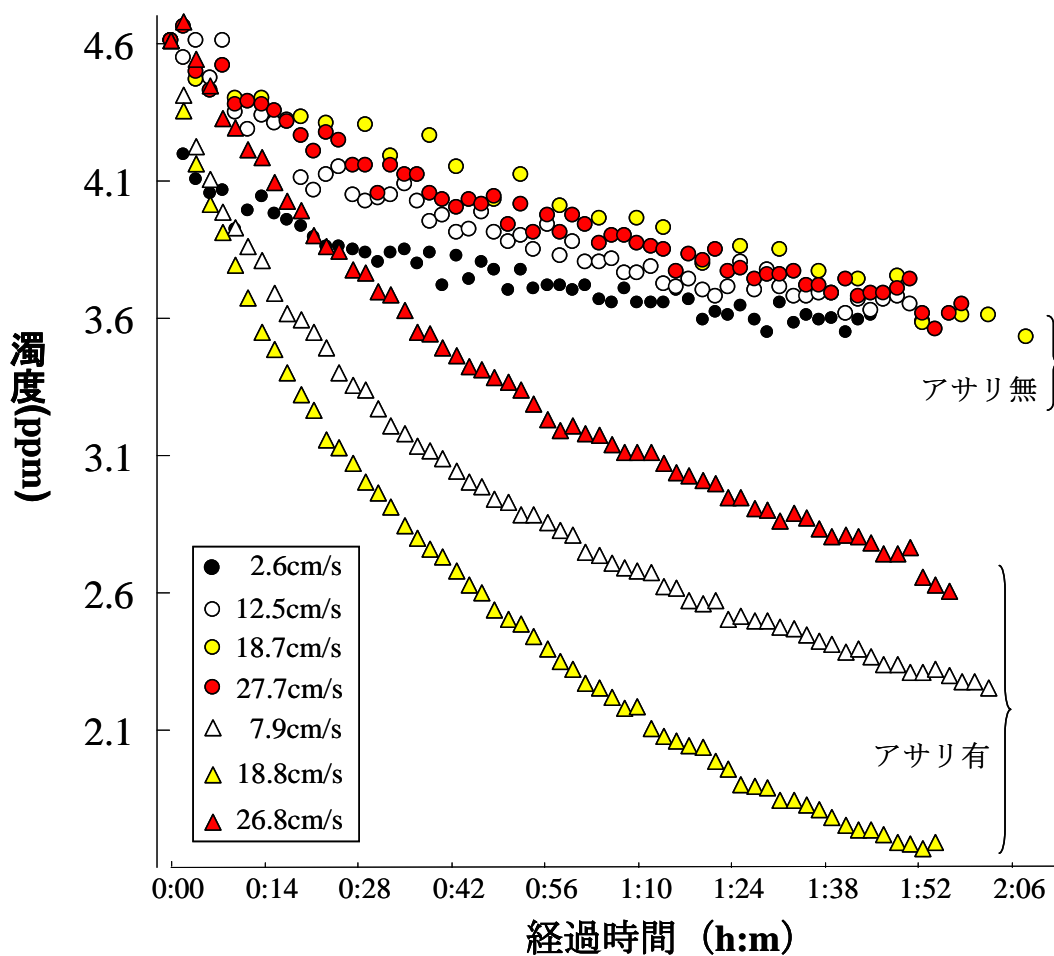


図 15. ベントナイト濃度の低下パターン

【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; 鳥羽ほか 1992; 松野ほか 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 ± 0.7 cm/秒の流速で取り込み効率が、それよりも遅い流速（ 7.9 ± 0.3 cm/秒）や速い流速（ 26.8 ± 0.7 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 $2-8 \mu\text{g/l}$ 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分近くで平均 $2 \mu\text{g/l}$ 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期間で平均 $2 \mu\text{g/l}$ 未満を示したが、比較的流れ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。サロマ湖は流れも遅い場合が多く、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符号している。三浦半島の長井地区における飼育実験では流れが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れが速い造成漁場での垂下飼育による揺れが原因と考えられ、揺れをできるだけ軽減できれば成長は補償できよう。あるいは、漁獲物を短期間蓄養することによって産卵だけを期待する方策も考えられる。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、海の公園の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16)。温度調整した室内飼育での1日の温度変化幅は 0.5°C 以下であり、垂下飼育や潮下帯での飼育では 1.5°C 未満であった。一方、潮間帯での温度変化幅は全て 2.0°C 以上であり最大で 20°C 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°C 以上になると極端に少なくなることが示された。鳥羽・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・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。

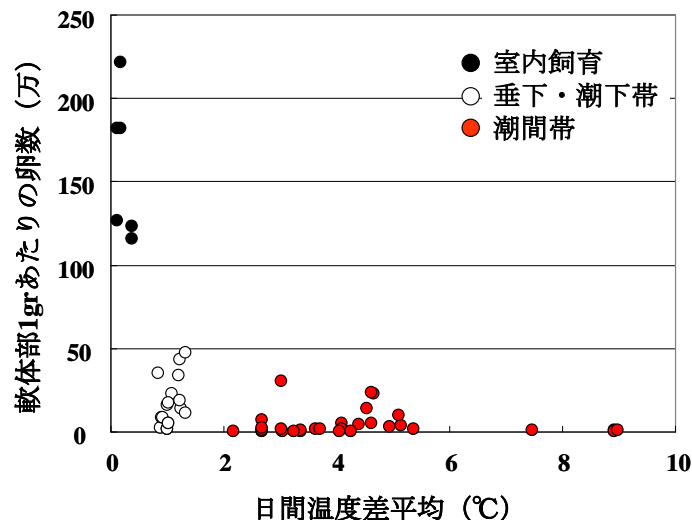


図16. 各調査地での飼育期間における1日間での最高最低温度差の平均とアサリ軟体部1gあたりの卵数
(温度差 10°C 以上は示していない)

母貝場機能向上のための提言

母貝場機能向上のためのイメージを図17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。

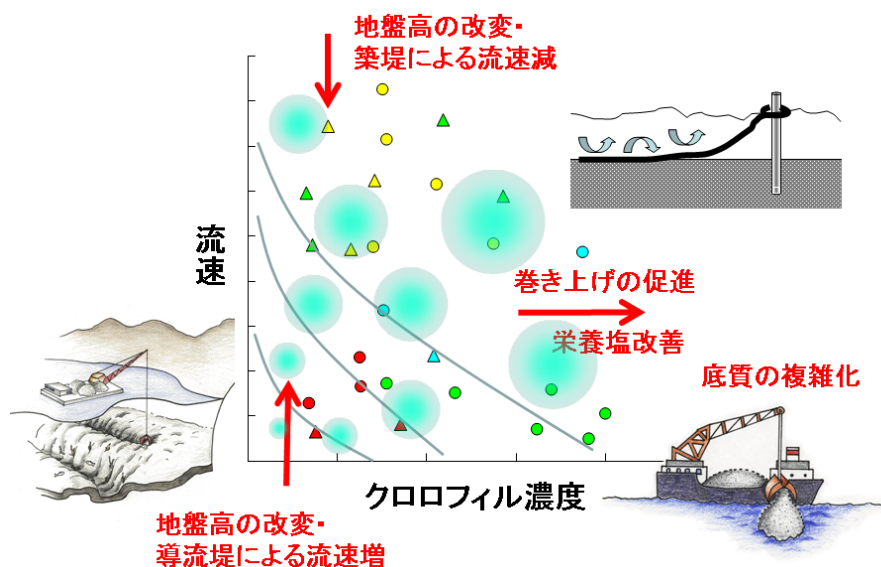


図 17. クロロフィル濃度、流速、クロロフィルフラックスを指標とした母貝場機能向上のためのイメージ

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 18）。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 19）。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する必要があるだろう。現実としてそ



図 18. 未利用空間である水柱の利用

のような新規母貝場の設置場所及び設置期間には種々の要因で制限があり、可能な場所で可能な期間行うことになる。具体的には、漁獲したアサリを天然海域に垂下等により短期間蓄養してから出荷することにより、少なくとも1回は産卵させるという方策が現状では有効であろう。漁獲、乾出、温度変化等の刺激により産卵が誘発される可能性も高く、蓄養期間によっては肥満度回復も十分期待できよう。さらに砂抜きもできる点で付加価値も上がるかもしれない。産卵盛期にはほとんどの個体が放卵、放精可能な状態にあるものの、漁獲したアサリを現場で効率的に産卵させる刺激について検討する必要がある。

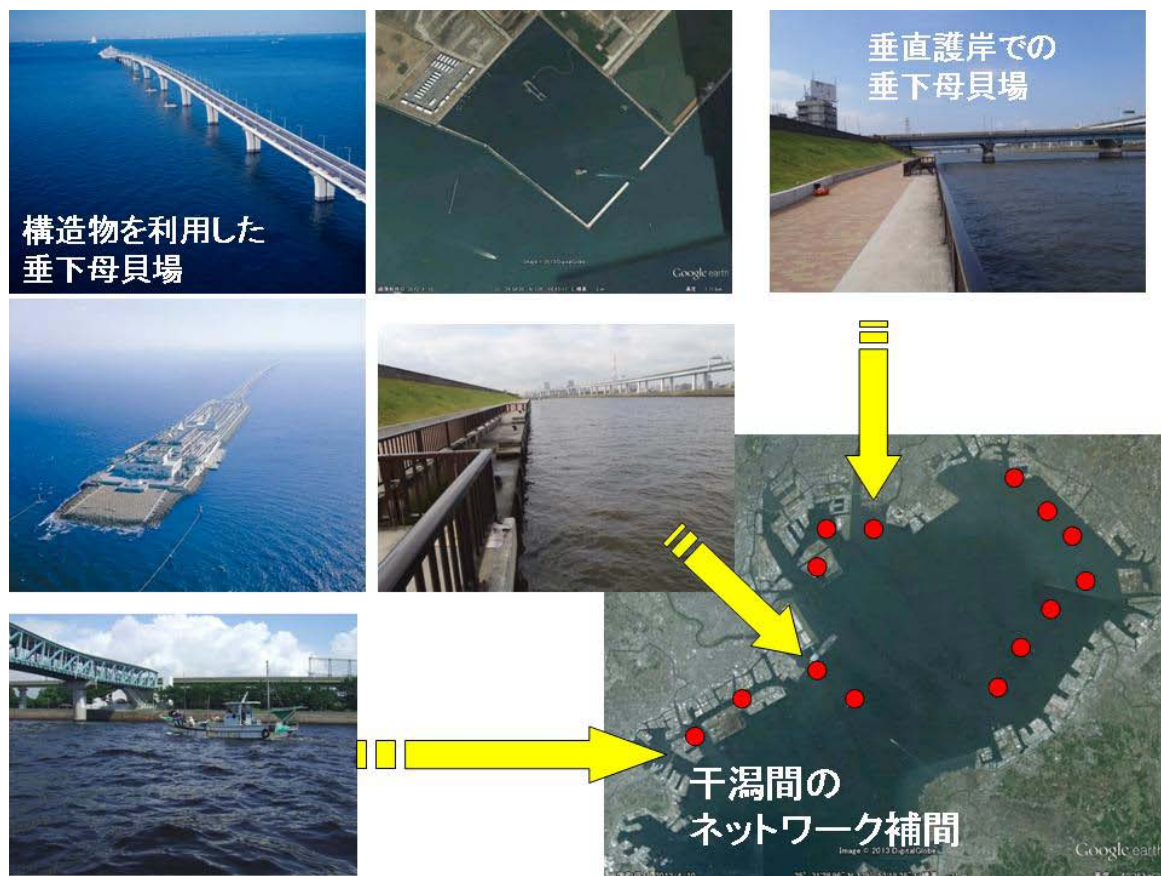


図 19. 幼生ネットワーク補間のための新規母貝場設置イメージ

謝辞

本報告は水産庁水産基盤整備調査委託事業によって行った調査・研究結果を要約したものである。調査をすすめるにあたっては厚岸漁業協同組合、サロマ湖養殖漁業協同組合、北海道大学北方生物圏 FSC 厚岸臨海実験所、(株)西村組、長井漁業協同組合、大楠漁業共同組合、公益財団法人横浜市緑の協会海の公園、東幡豆漁業協同組合、吉田漁業協同組合、伊勢湾漁業協同組合からは多大な協力と便宜をはかっていただきました。浜口昌巳博士（水研セ・瀬戸水研）からはアサリ卵黄タンパク質の分析にあたり抗体の提供およびご助言をいただきました。梶ヶ谷義一氏、高橋千枝氏、川島智子氏、浅野恭子氏、青木貴美恵氏には標本処理や分析に多大な協力をいただきました。さらに、千葉県水産総合研究センターの鳥羽光晴博士からは終始助言をいただきました。また、水産庁研究指導課の坂野博之博士からは内容に関して重要なコメントをいただきました。ここに感謝の意を表します。

【摘要】

アサリの成長・成熟・産卵といった再生産能力と、クロロフィル濃度と流動環境の積であるクロロフィルフラックスを評価し、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ことを目的とした。室内飼育個体と比較して、自然環境下のアサリで特に水温変動の大きい環境に曝されている場合には産卵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大きくとともにクロロフィル濃度が $2\mu\text{g/l}$ 以下の場合には成長・成熟に負の効果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—, 恒星社厚生閣, 東京, 103-111.
- Kasim, M. and H. Mukai, 2009: Food sources of the oyster (*Crassostrea gigas*) and the clam (*Ruditapes philippinarum*) in the Akkeshi-ko estuary. *Plankton and 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. *Bulletin of Yamaguchi Prefectural Fisheries Research Center*, 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, 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 J. Widdows, 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. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 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, 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, 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, 315-321.