

被覆網によるアサリの保護・増殖

羽生和弘・南部亮元*

Protection and propagation of the asari clam, *Ruditapes philippinarum*, using cover nets

KAZUHIRO HANYU AND RYOGEN NAMBU*

キーワード：アサリ，被覆網，波浪，高水温

- (1) Field tests were conducted to confirm the protective and propagative effects of cover nets on clams in the intertidal zone at the mouth of the Miwatari River in the Matsusaka region. The abundance of clams was found to increase far beyond the break-even point, even though no maintenance measures such as removal of competitors and predators, and improvement of bottom quality were taken.
- (2) It was hypothesized that the cover net improved the survival rate of clams by reducing the effect of waves.
- (3) Differences in the effectiveness and economic efficiency of the cover nets were observed between sites. One of the causes was presumed to be the inhibition of clam growth due to the high water temperature. The effect of high water temperature was greater in sites with higher ground level, and the ground level suitable for the installation of cover nets was estimated to be DL+0.6 m or deeper at the mouth of the Miwatari River.
- (4) At the mouth of the Miwatari River, it was determined that the maintenance of cover nets through the removal of competitors and predators, and improvement of bottom quality, was unnecessary.
- (5) A preliminary survey of the population density of juvenile clams was necessary for the spread of the protection and propagation of clams using cover nets.
- (6) A negative correlation between population densities of different clam sizes has been suggested. Therefore, to secure a stable supply of natural juveniles, it is necessary to regularly catch large clams, implement a rotation system in the covered net area, and use different areas for juvenile and adult clams depending on the height of the ground.

三重県ではアサリ (*Ruditapes philippinarum*) の漁獲量・資源量が長期的に減少しており，資源回復・増殖が課題となっている (羽生 2021)。本県ではこれまでに漁業者による増殖手法として，のり網の設置による稚貝の定着促進 (長谷川ら 2012)，網袋による採苗 (長谷川ら 2017)，垂下養殖 (日向野 2014) の有効性が検討されてきた。その後，これらは県内各地で導入が検討され一定の有効性が確認されたものの，網・施設等の維持管理にかかる労力が大きい等の問題があり，普及は一部の地区に限られている。

被覆網 (かぶせ網) によるアサリの保護・増殖は，干潟の地盤表面を覆うように数メートル程度の網を張ること

により，網下のアサリに対する食害・波浪の影響を低減し，アサリの生残・成長を高める技術である (柴田ら 2001; 柴田・土屋 2002; 齊藤ら 2010)。かつてアサリの主産地であった千葉県と大分県では，本法により，漁獲可能サイズまで生残・成長させることに成功している一方で (伊藤・小川 1999; 柴田・石橋 1999)，本法も網の維持管理にかかる労力が大きいとの報告もあり (小林ら 2012)，基本的には網袋と類似した手法であるため，本県においても同様の問題が生じる可能性がある。そこで本研究では，あえて維持管理を行わない被覆網の野外試験を実施し，被覆網の有効性と経済性，維持管理の必要性を確認するとともに，普及上の課題を整理した。

*国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所 (現 水産技術研究所) (現所属 国際農林水産業研究センター)

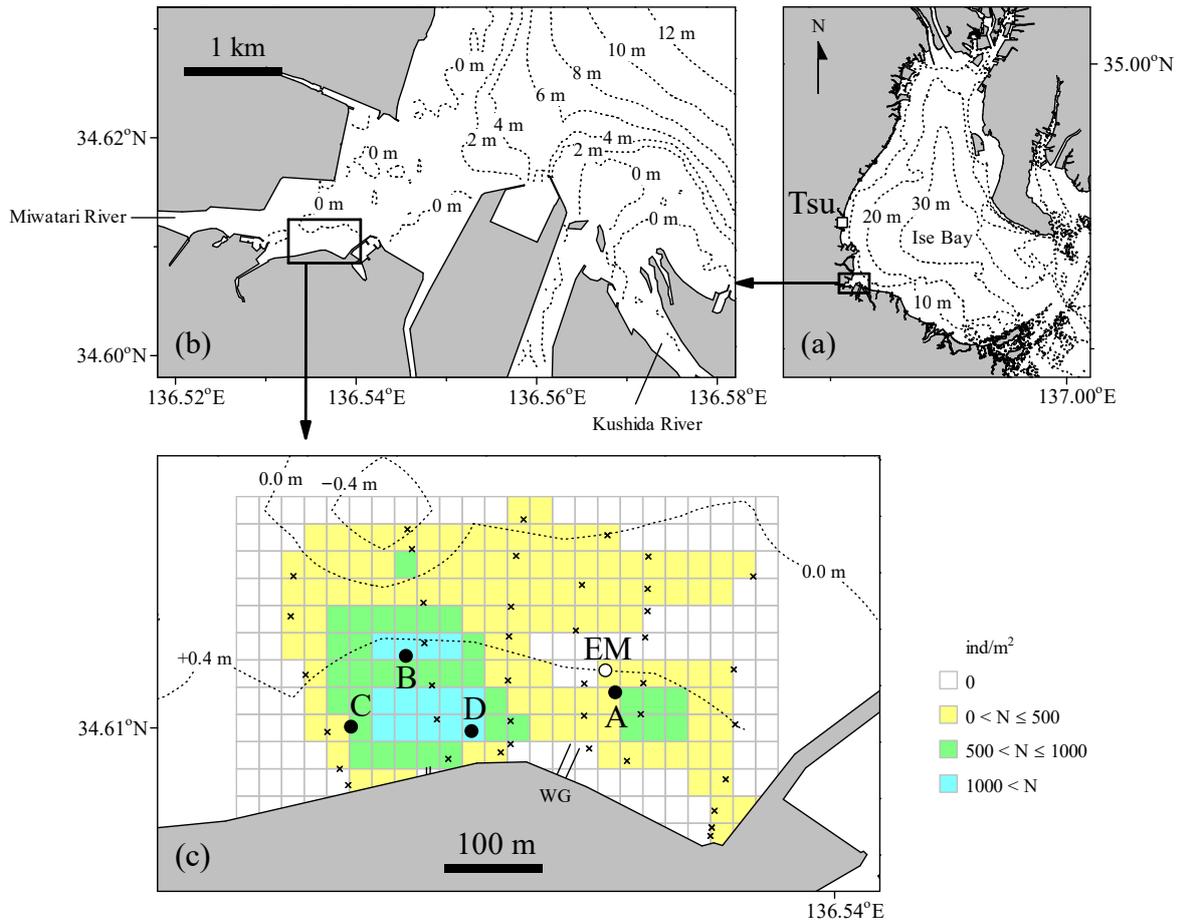


Fig. 1. (a): Location of the Matsusaka region in Ise Bay, Japan. Numbers: water depth. Wind speed and direction observed by the Japan Meteorological Agency in Tsu. (b) Location of the study sites in the Matsusaka region. Numbers: water depth. (c): Location of the study sites. Numbers: distance from the datum level; solid circles with A, B, C, D: cover net and control sites; open circle with EM: water current observation point; WG: water gate; crosses: sampling points of *Ruditapes phillinarum* on 20 June 2016; color mesh: density of *R. phillinarum* estimated by the spline method based on the sampling data.

方法

1. 試験海域と供試貝

野外試験は伊勢湾南西部に位置する松阪地区の三渡川河口の潮間帯で実施した (Fig. 1)。三渡川河口は松阪地区の代表的なアサリ漁場であるが、自然発生したアサリ (殻長 20 mm 未満) の大部分は漁獲対象サイズ (殻長 30 mm 以上) に成長する前に減耗することが多い (羽生ら 2017)。本研究では、三渡川河口に自然発生したアサリを被覆網で保護し、その生残・成長を調べた。

アサリの生息密度の高い区域に被覆網を設置するため、事前調査として 2016 年 6 月 20 日にハンドスミス型採泥器 (採泥面積 0.05 m²) を用いて 42 か所で採泥し、

目合 2 mm のふるいに残ったアサリの個体数密度 (ind/m²) を求め、スプライン法でアサリの分布図を作成した (Fig. 1)。スプライン法の計算には R ver. 3.4.4 (R Core Team 2018) と fields ver. 9.7 (Nychka et al. 2017) を使用した。分布図において個体数密度がおおむね 500 個体/m² 以上で、地盤高の異なる 4 つの区域 (区域 A, B, C, D) を選定した。GPS 測量器 (Trimble R8/5800, Nikon-Trimble 社製) を用いて 2017 年 5 月 12 日に測量した地番高 (DL からの距離とし、正值が潮間帯を表す) は、区域 A が DL+0.6 m, 区域 B が DL+0.5 m, 区域 C が DL+0.7 m, 区域 D が DL+0.9 m であった。なお、潮下帯は網の設置・維持管理が難しいため、本研究では設置区域の対象外とした。

2. 試験区

2015 年秋産まれの稚貝の保護を目的として 2016 年 7 月 4 日の干潮時に A-D の各区域に被覆網 1 枚を設置した (以下, Net-1 区と呼ぶ)。また, 2016 年春産まれの稚貝の保護を目的として 2016 年 11 月 12 日に, さらに 2016 年秋産まれの稚貝の保護を目的として 2017 年 5 月 24 日に各区域に被覆網 1 枚を設置した (以下, それぞれ Net-2 区, Net-3 区と呼ぶ)。被覆網には付着生物が付着しにくいと報告されている樹脂製モノフィラメント (山口県 2012) の防鳥網 (ふわっと防鳥 (目合い 9 mm, 5 m×4 m, 日本マタイ社製)) を使用した。ツメタガイ (*Glossaulax didyma*) による食害と波浪による網の巻き上がりを防ぐため, 網の設置時に網端 4 辺の約 20 cm を地面にほぼ垂直に埋め込み, 網端 4 辺の網上に土のう袋 (重量約 20 kg) を 1 つずつ設置した。各区域内における被覆網区 (Net-1 区, Net-2 区, Net-3 区) の配置は各区域の中心点 (Fig. 1) から半径 50 m 以内で既設の網から 10–50 m 離れた位置とした。対照区は被覆網から 20 m 以上離れた位置に各区域 1 か所を設定した。

3. 生物調査

(1) アサリの個体数密度と殻長組成

アサリの生残率と現存量 (後述) を算出するため, 2016 年 7 月 4 日から 2018 年 3 月 19 日にかけて, 2 か月に 1 回, ハンドスミス型採泥器 (採泥面積 0.05 m²) を用いて, 各区域各區で 1–2 回採泥し, 採泥ごとに目合 2 mm のふるいにかけて残ったアサリ (殻長 3.0 mm 以上) をすべて取り上げ, 個体数を計数した。また, 採泥ごとに最大 50 個体の殻長を測定し, 階級幅 1 mm での殻長組成を求めた。個体数密度の検出限界は採泥回数によって変わるが, 本研究では一律 1/0.05 = 20 ind/m² とみなした。

(2) アサリの生残率

前述の殻長組成に混合正規分布を最小二乗法 (五利江 2002) であてはめ, 各コホートの平均殻長, 殻長の標準偏差, 個体数を推定した。異なる調査日間のコホートの対応は平均殻長の推移から目視で判定した。伊勢湾におけるアサリの産卵盛期は春季と秋季の年 2 回と考えられるため (松本ら 2014), 各コホートの初出調査日の平均殻長が 5–7 月におおむね 15 mm 未満のコホートを前年秋産まれ, 9–11 月におおむね 15 mm 未満のコホートを当年秋産まれとみなして, 産まれた西暦と春季 (s)・秋季 (a) の組み合わせでコホート名を表記した。例えば, 2015 年秋産まれのコホートは 2015a, 2016 年春産

まれのコホートは 2016s と表す。複数のコホートが混在する場合は, 混在が想定されるコホート名を+でつないで表記した。本研究において長期間出現したコホート 2015a+2016s と 2016a について, 調査間の生残率, すなわち 2 か月間の生残率 S_i (%) を次式で算出した。

$$S_i = \left(\frac{N_{i+1}}{N_i} \right)^{\frac{1}{\Delta t_i} \times \frac{2}{12}} \times 100 \quad (1)$$

ここで, i は何回目の調査であったかを表す調査番号, N_i は調査 i での個体数密度 (ind/m²), N_{i+1} はその次の調査 $i+1$ での個体数密度 (ind/m²), Δt_i は調査 i から調査 $i+1$ までの期間 (年) を表す。式 1 の指数部分は, 調査間隔が 2 か月に 1 回ではなかった場合の補正を表す。ただし, コホートの出現後, その個体数密度が検出限界未満となった場合は式 1 によらず, S_i は 0 % とした。

伊勢湾において漁獲につながったアサリコホートの生残率は, 鈴鹿地区において 6.8 か月間で 9–44 % (羽生ら 2017), 伊勢地区において 12 か月間で 59–100 % (羽生 2016) であったと報告されている。これらは, 2 か月間の生残率に換算すると, それぞれ 49–78 % と 92–100 % となる。本研究ではこれらを参考として, S_i が 49% 未満の場合に, その期間に個体数密度が大きく低下したと判断した。ただし, S_i が 49% 未満となっても N_{i+1} を上回る個体数密度が後続の調査で確認された場合は, 個体数密度の低下は観測誤差の影響によるものと考えられるため, 個体数密度は大きく低下しなかったものと判断した。

各コホートの初出調査日から最終調査日までの期間に観測された個体数密度 N_t に次式を最小二乗法であてはめた。

$$\log(N_t) = \log(N_0) - Mt \quad (2)$$

ここで, t は 2016 年 7 月 4 日からの年数, N_0 は $t=0$ での個体数密度, M は自然死亡係数である。また, 次式により年間生残率 S (%) を求めた。

$$S = e^{-M} \times 100 \quad (3)$$

ただし, コホートの出現後, その個体数密度が検出限界未満となった場合は, 式 3 によらず, 年間生残率を 0 % とした。

(3) アサリ初期稚貝の個体数密度

被覆網が初期稚貝 (本研究では殻長 0.4–1.0 mm と定義)

の個体数密度に及ぼす影響を確認するため、2016年11月12日、2017年1月30日、2017年3月13日に各区域の対照区と Net-1 区において地盤表面の底泥試料をコアサンプラー（採泥面積 9.075 cm²、深さ 1 cm、底面に目合 100 μm のメッシュを張り付けたもの）で 2 回採取した。試料をローズベンガル添加 10% 中性ホルマリンで固定した後、実体顕微鏡下で外部形態（酒井・関口 1992）に基づいてアサリを同定し、初期稚貝の個体数密度 (ind/m²) を求めた。個体数密度は採泥 2 回の平均値とした。なお、個体数密度の検出限界は $1/(9.075/100^2 \times 2) = 551 \text{ ind/m}^2$ であった。

(4) 大型サイズの個体数密度と小型サイズの個体数密度の相関

大型サイズ（親貝）のアサリ個体数密度が小型サイズ（稚貝）のアサリ個体数密度に及ぼす影響を確認するため、2017年5月9日の個体数密度・殻長組成調査時に確認されたコホート 2015a+2016s（平均殻長 15 mm 以上）を大型サイズ、コホート 2016a（平均殻長 5 mm 未満）を小型サイズとして、個体数密度の相関を散布図で確認した。また、2015a+2016s の単位を kg/m²（後述の現存量に準じて算出）とした場合の相関も確認した。

(5) 競合生物の個体数密度

アサリ増殖ではホトトギスガイ (*Musculista senhousia*) 等の競合生物の除去が必要となる可能性がある（全国沿岸漁業振興開発協会 1997）。本研究では、アサリの個体数密度・殻長組成調査時にアサリ以外の二枚貝類の個体数密度と殻長組成をアサリと同様に調査した。

(6) 食害生物の個体数密度

アサリ増殖ではツメタガイ等の食害生物の除去が必要となる可能性がある（斉藤ら 2010）。本研究では、アサリの個体数密度・殻長組成調査時に巻貝類とカニ類の個体数密度をアサリと同様に調査した。また、巻貝類は殻長組成を、カニ類は殻幅組成をアサリと同様に調査した。ただし、2017年9月以降のカニ類の殻幅組成は欠測となった。

(7) 被覆網の汚損生物

汚損生物が網に大量に付着する場合、網の定期交換が必要となる（小林ら 2012）。本研究では、汚損生物の除去の必要性を確認するため、アサリの個体数密度・殻長組成調査時に海藻やフジツボ類等の付着状況を目視で確認し、調査海域の写真を撮影した。

4. 環境調査

(1) 底質

被覆網にはアサリに対する波浪の影響を低減する効果が期待されるが（柴田ら 2001; 柴田・土屋 2002）、静穏化により、網下の底質が悪化する可能性もある。本研究では底質改善（水産庁 2008）の必要性を検討するため、アサリの個体数密度・殻長組成調査時に各区域各区の地盤表面の底泥約 30 g を葉さじで 2 回採取し、550 °C・6 時間の燃焼条件で強熱減量を求め（佐藤ら 1987）、2 試料の平均値を算出した。また、地盤表面の底泥約 30 g を葉さじで 2 回採取し、酢酸亜鉛 1% (w/w) を添加して研究室に持ち帰り、そのうちの底泥湿重量約 1 g 中の酸揮発性硫化物量 (AVS) を検知管法で分析した（荒川 1980; 西村・井上 2000）。検知管にはヘドロテック-S 用検知管（ガステック社製）を使用し、乾燥試料重量あたりの含有量に換算し、2 試料の平均値を算出した。ただし、被覆網区については、2017年9月以降の Net-1 区と Net-2 区が欠測、2018年1月以降は対照区と Net-3 区も欠測となった。

(2) 水温

アサリでは水温 25 °C 以上で成長阻害が、35 °C 以上でへい死が発生する可能性がある（磯野ら 1998）。本研究では生残・成長に対する水温の影響を区域間で比較するため、2016年7月4日から2018年3月19日までの各区域の対照区において、地盤表面（地盤の直上 5 cm）と地中（深さ 5 cm）に水温・照度ロガー（UA-002-64, Onset 社製）を設置し、1 時間に 1 回、水温と照度を測定した。一部の区域では地盤高の変化によるロガーの埋没や露出が認められたため、同時に測定した照度により埋没・露出を判定し、異常値を除去した。調査期間中の最小値と最大値の算出には全測定値（異常値を除く）を使用した。平均値、25 °C 以上の観測割合、35 °C 以上の観測割合については、すべての区域で欠測の認められなかった期間の測定値を使用した。なお、本研究では潮間帯での測定であるため測定値が気温を表す場合もあったが、水温と気温を区別せずに取り扱った。

(3) 底面せん断応力

アサリの生残には波浪による地盤のかく乱が大きな影響を及ぼす（柿野 2006）。本研究では調査海域における地盤のかく乱頻度を調べるため、2017年1月30日から2018年3月19日まで地盤高 DL+0.5 m の 1 か所 (Fig. 1) において、次の方法で底面せん断応力を調査した。まず、電磁流向流速計 (Compact-EM, JFE アドバンテック社製) により、海底面の流向流速を毎正時に 0.5 秒間隔で 600 回

観測した。次に、この観測データから東西平均流速と南北平均流速、有義波の波浪流速、周期、主波向を求め、Kleinhans (2005) に基づいて、波浪による底面せん断応力 τ_w と移流による底面せん断応力 τ_c を求めた。これらの解析には TS-Master ver.6.6 (川俣茂¹ 作製) と移動限界判定 ver.3.2 (桑原 2011) を使用した。なお、電磁流向流速計のセンサー位置は海底直上 0.3 m (すなわち地盤高 DL+0.8 m) としたが、本研究では底面で観測したものとみなした。ただし、センサーが水面から露出する時間帯は欠測とし、三渡川河口の水面は鳥羽の観測潮位 (気象庁) に等しいものとした。地盤の移動限界せん断応力を算出するため、各区域の対照区の地盤表面の底泥試料を 2016 年 11 月 12 日、2017 年 1 月 30 日、2017 年 3 月 13 日に強熱減量と同様に採取し、レーザー回折式粒度分析装置 (SALD-3100, 島津理化社製) により中央粒径を求めた。調査回数が少なかったため、中央粒径の全データをプールして平均値、最小値、最大値を求め、それぞれの移動限界に対応する底面せん断応力を算出した。

(4) 風速と降水量

干潟地形やそこに生息する生物相の変動は、外力として風、潮位、波、河川出水の影響を受けることが想定される (山内 2001)。本研究においては底面せん断応力の時系列変化に対する風と河川出水の影響を考察するため、津 (Fig. 1) における平均風速と風向、24 時間積算降水量 (気象庁) を整理した。

5. 被覆網の有効性と経済性

被覆網区におけるアサリの現存量 (後述) の最大値が対照区のそれより大きい場合、被覆網によるアサリの保護・増殖に有効性があるものと判断した。被覆網区における現存量最大値が損益分岐点 (後述) を上回る場合に被覆網によるアサリ保護・増殖に経済性があるものと判断した。また、アサリが成長し現存量が損益分岐点を上回るまでの期間は短いほど望ましく、上回る期間は、生産計画上、長いほど望ましいと考えられるため、網の設置後から上回るまでの月数、および継続して上回った月数を求めた。これらに加えて、本研究では、供試具には自然発生したアサリの利用を前提としたため、網設置時の初期個体数密度の損益分岐点 (後述) を求めた。

(1) アサリの現存量

次の殻長重量換算式 (長谷川・日向野 2010) を用いて

殻長 1 mm の精度で個体あたりの重量 w_x を算出した。

$$w_x = 2.4 \times 10^{-4} \times x^{2.97} \quad (4)$$

$$W_x = \frac{w_x \times n_x}{1000} \quad (5)$$

ここで、 x は殻長 (mm)、 n_x は殻長 x の個体数密度 (ind/m²)、 W_x は殻長 x での総重量 (kg/m²) を表す。調査日ごとに各区域各区について求めた殻長別総重量を殻長 25 mm 以上、30 mm 以上、32 mm 以上で集計した (以下、これらを現存量と呼ぶ)。なお、これらの殻長区分は本県ではそれぞれ銘柄「下」以上、「小」以上、「中」以上に相当する (三重県水産研究所 2011)。

(2) 漁獲量の損益分岐点

本研究では松阪地区の採貝漁業者が被覆網によるアサリ保護・増殖に取り組むものとして、アサリ漁獲量の損益分岐点 (kg/m²) を算出した。網の設置後の維持管理をあえて行わず、結果的にも維持管理は不要と判断されたため、支出には網の設置とアサリの漁獲にかかる経費のみを計上した。固定費には、被覆網、土のう袋、鍬 (網の埋設に使用)、ジョレン (漁獲に使用) の購入費、小型船舶 (漁獲物の輸送に使用) の減価償却費、変動費には、網の設置と漁獲にかかる人件費、小型船舶の燃料費が想定される。このうち、鍬とジョレンの購入費については、松阪地区では半農半漁の漁業者が多く、新たな購入は不要と考えられるため、本研究では 0 円とした。また、小型船舶の減価償却費についても既存の採貝漁業者にとっては無視できるほど小さいと考えられるため、本研究では 0 円とみなした。被覆網 (ふわっと防鳥, 日本マタイ社製) の購入費は 2500 円/枚、土のう袋 (KR-10P, コメリ社製) は網 1 枚あたり 4 個必要であり、90 円/枚であった。網の設置とアサリの漁獲は 1 名で可能であり、網の設置にかかる時間は本研究での実際の設置時間より 30 分/枚、漁獲にかかる時間は別途実施した試験操業より 30 分/枚を想定した。三重県における最低賃金は 874 円/時間

Table 1. Breakdown of expenditures for the protection and propagation of clams using a cover net

	Item	Yen per piece of cover net
Fixed cost	Cover net	2500
	Soil cyst bags	90
Variable cost	Personnel cost	874
Total		3464

¹ 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部 (現 水産研究・教育機構水産技術研究所)

Table 2. Break even point for the protection and propagation of each clam size using a cover net

Shell length (mm)	Price of clams (yen /kg)	Break even point (kg/m ²)*
20	200	1.1
30	320	0.7
32	490	0.5

*Total cost per piece of cover net: 3464 yen; area per piece of cover net: 16m².

(2020年2月)であるため、人件費を874円/枚とした。三渡川河口は集荷場・漁港に隣接しており、網1枚あたりの漁獲回数を1回とした場合、小型船舶の燃料使用量は無視できるほど小さいため、本研究では燃料費を0円とした。以上より、網1枚あたりの支出は3464円となった(Table 1)。収入については、漁獲時のアサリのサイズと単価を過去の例(三重県水産研究所 2011)より、殻長25mmを200円/kg、30mmを320円/kg、32mmを490円/kgと仮定し、網1枚あたりの有効面積を16m²/枚として、各殻長での損益分岐点(kg/m²)を次式で算出した(Table 2)。

$$Y_{25\text{mm}} = \frac{3464}{200 \times 16} \cong 1.1 \quad (6)$$

$$Y_{30\text{mm}} = \frac{3464}{320 \times 16} \cong 0.7 \quad (7)$$

$$Y_{32\text{mm}} = \frac{3464}{490 \times 16} \cong 0.5 \quad (8)$$

なお、これらの損益分岐点は、「殻長25mm以上」のように漁獲物に単価の高い大きな個体が含まれる場合には、過大で安全側に配慮した値となる。また、単価の変動リスクが考慮されていないため、一つの目安に過ぎないことにも留意する必要がある。

(3) 初期個体数密度の損益分岐点

任意の初期個体数密度 N が Δt か月後に殻長 x に生残・成長し、殻長 x での現存量が損益分岐点の現存量 Y_x に等しい状況を次式で表す。

$$w_x N e^{-M \frac{\Delta t}{12}} = Y_x \times 1000 \quad (9)$$

次のように上式を N について整理し、初期個体数密度の損益分岐点 N_{bep} とした。

$$N_{bep} = \frac{Y_x \times 1000}{w_x} e^{M \frac{\Delta t}{12}} \quad (10)$$

式4と本研究により求めたパラメータを式10に代入し、殻長25mm、30mm、32mmの N_{bep} を求めた。本研究ではそれぞれを殻長25mm以上、30mm以上、32mm以上での損益分岐点とみなした。

結果

1. 生物調査

(1) アサリのコホート

確認されたコホートは2015a, 2016s, 2016a, 2017sの計4つであった。各コホートの推移は次のとおりであった(Fig. 2-A, -B, -C, -D)。

コホート2015aと2016s 対照区の2015aは後続の2016sとの区別が2016年9月から2017年3月の間に困難となった。対照区における2015a+2016sは、平均殻長が20mm未満で推移し、2017年3-5月に消失した。一方、Net-1区の2015aは2016sとの区別が2017年1-3月に困難となったものの、2015a+2016sは、平均殻長が20mmを上回り、2017年3-5月に消失することなく推移した。Net-2区の2015a+2016sも平均殻長が20mmを上回り、2017年3-5月に消失することなく推移した。Net-3区に2015aと2016sは出現しなかった。

コホート2016a 2017年5月以降に出現し、最終調査日まで出現した。平均殻長は20mm未満で推移した。

コホート2017s 区域A, C, Dにおいて2017年7月以降に出現した。平均殻長は15mm未満で推移した。コホート2015a, 2016s, 2016aと比べて個体数割合が極端に小さかったため、後述する生残率の解析対象外とした。

(2) アサリのコホート別の個体数密度と生残率

コホート2015a+2016s, 2016aの個体数密度の推移(Fig. 3-A, -B, -C, -D)と年間生残率(Table 3, 4)は次のとおりであった。

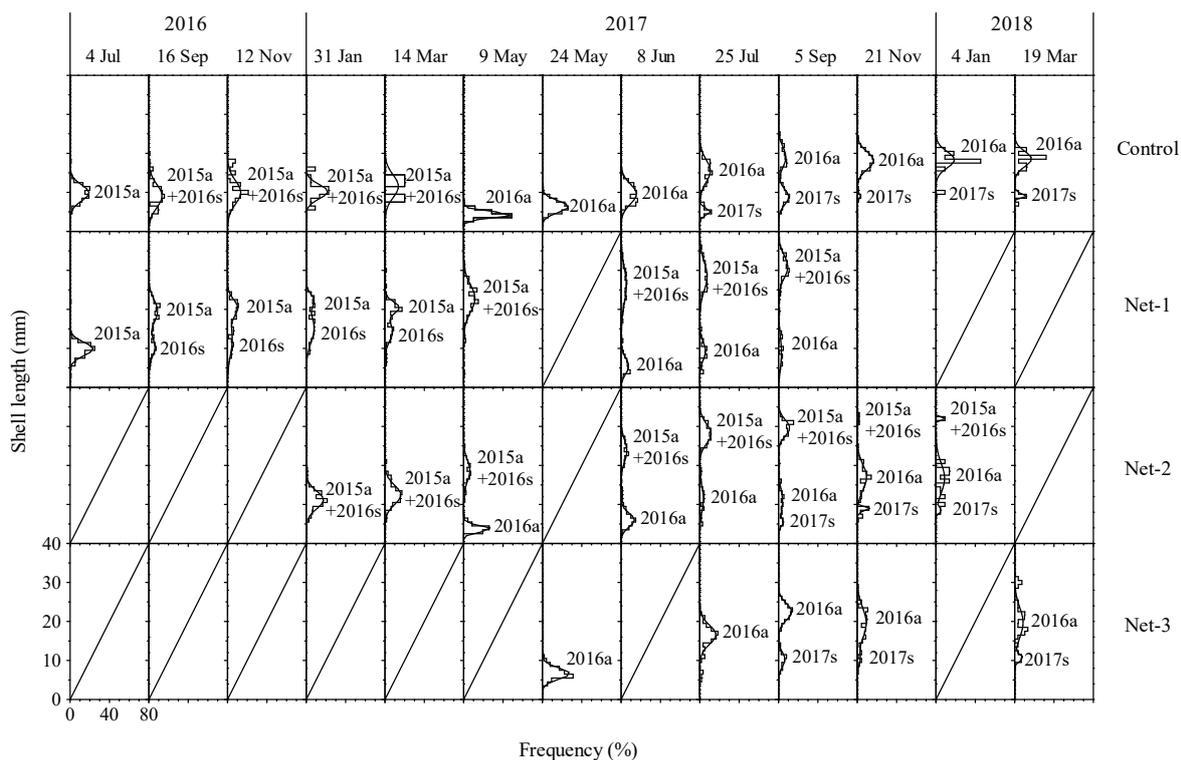


Fig. 2-A. Shell length histogram of *Ruditapes phillinarum* in site A. Curve lines: normal distributions estimated by the least-squares method; letters: cohort names; oblique lines: no data.

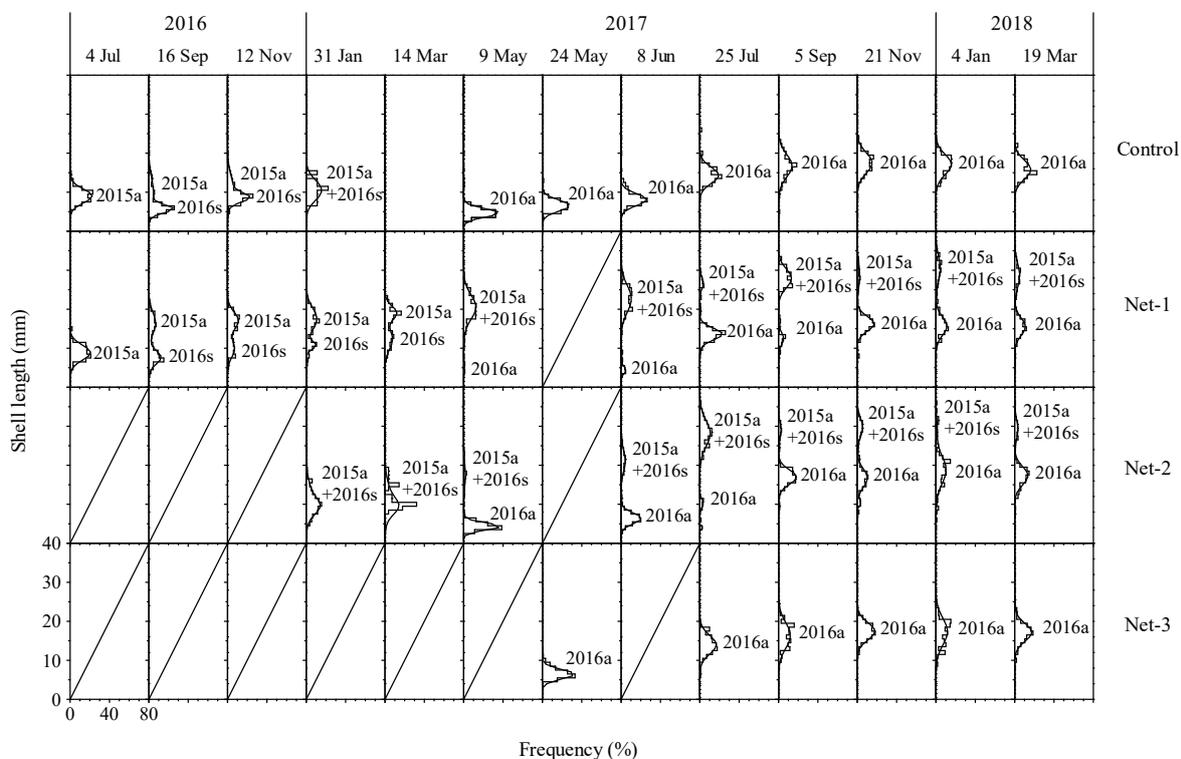


Fig. 2-B. Shell length histogram of *Ruditapes phillinarum* in site B. Curve lines: normal distributions estimated by the least-squares method; letters: cohort names; oblique lines: no data.

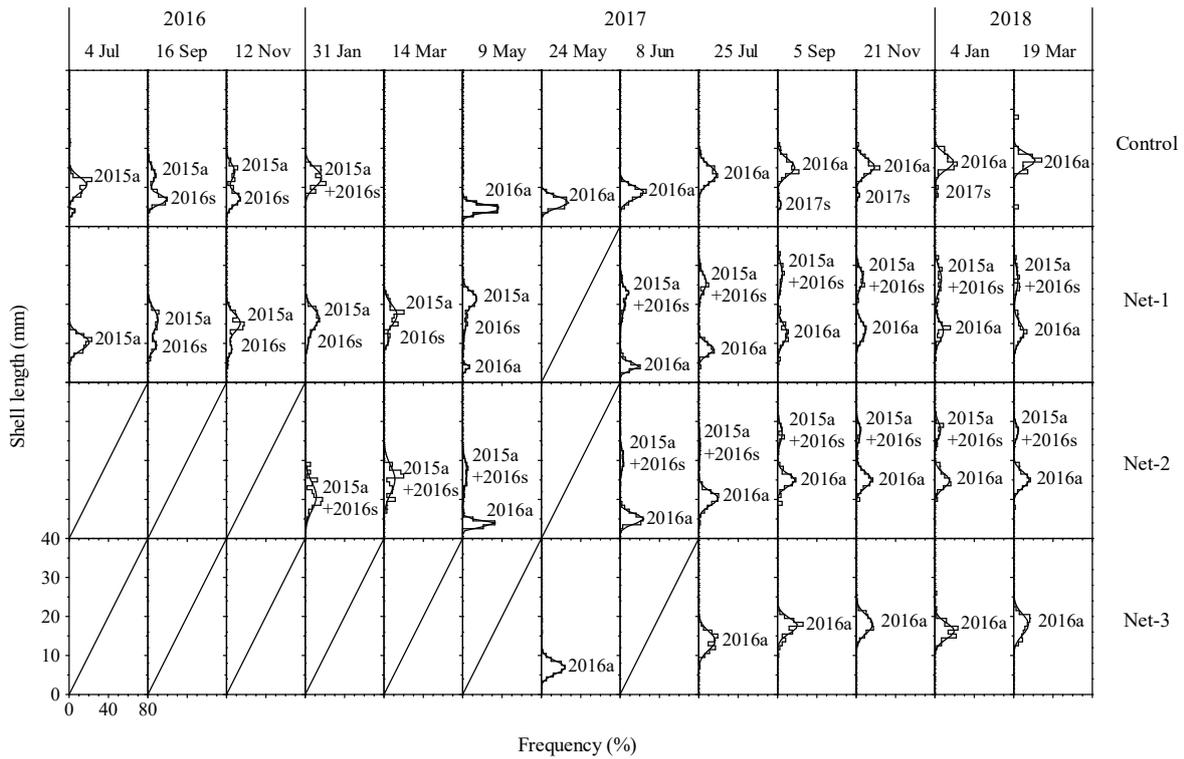


Fig. 2-C. Shell length histogram of *Ruditapes philinarum* in site C. Curve lines: normal distributions estimated by the least-squares method; letters: cohort names; oblique lines: no data.

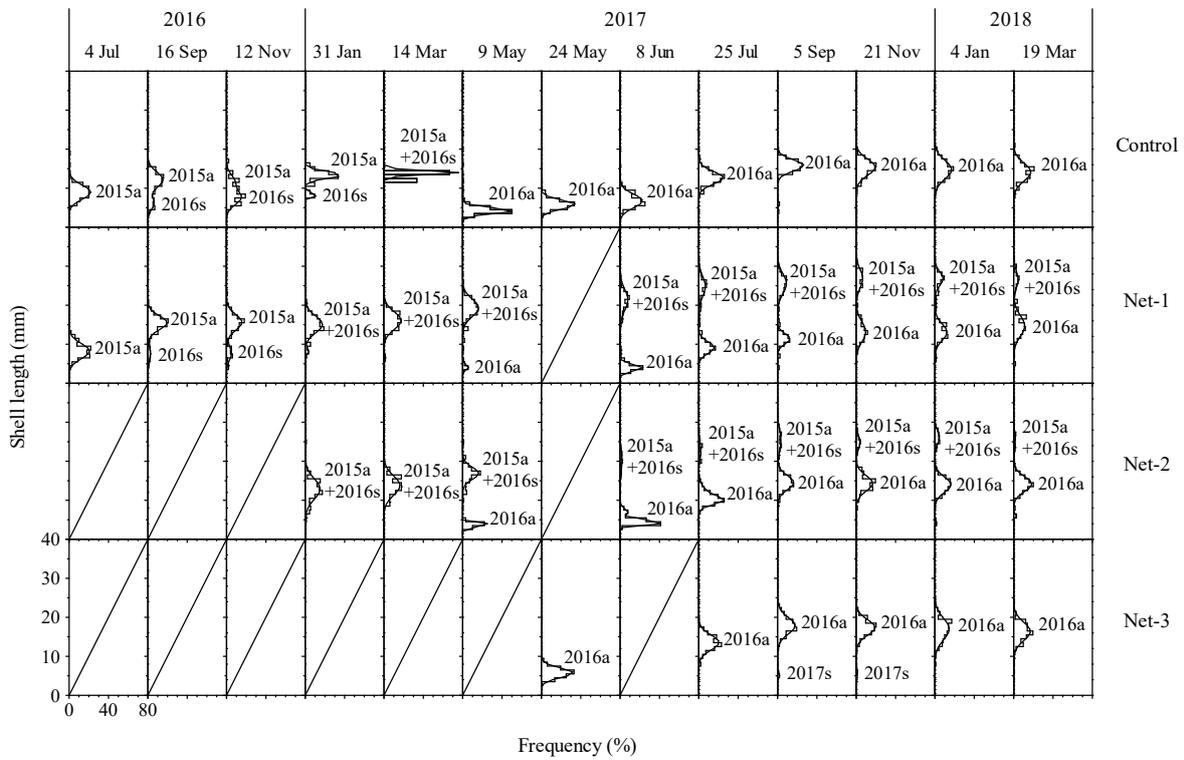


Fig. 2-D. Shell length histogram of *Ruditapes philinarum* in site D. Curve lines: normal distributions estimated by the least-squares method; letters: cohort names; oblique lines: no data.

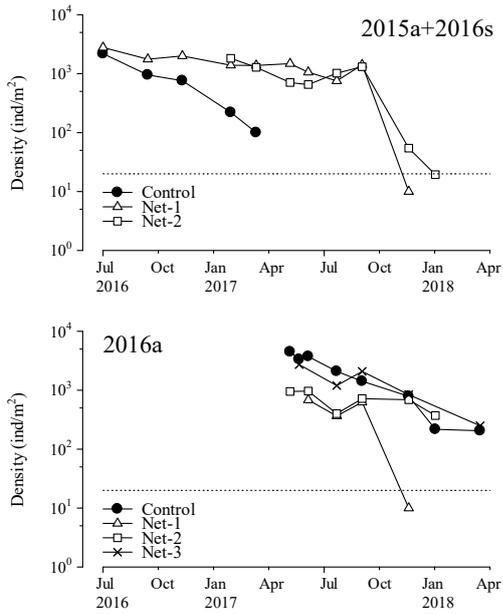


Fig. 3-A. Density of *Ruditapes phillinarum* cohort 2015a+2016s and 2016a in site A. Dotted lines: detection limit (20 ind/m²). In order to display the data on a logarithmic scale, density 0 ind/m² was converted to 10 ind/m².

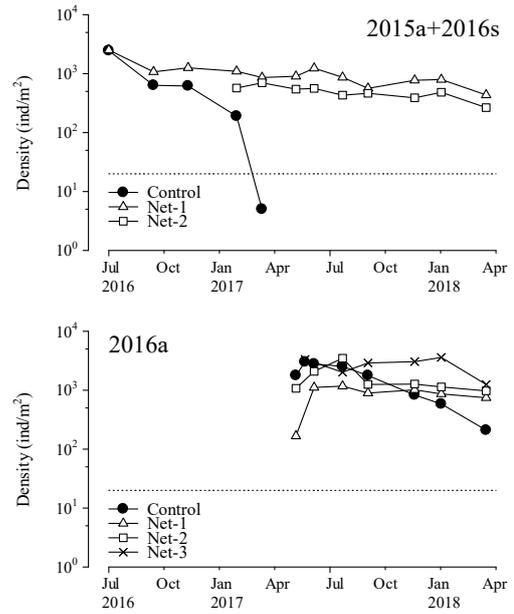


Fig. 3-C. Density of *Ruditapes phillinarum* cohort 2015a+2016s and 2016a in site C. Dotted lines: detection limit (20 ind/m²). In order to display the data on a logarithmic scale, density 0 ind/m² was converted to 10 ind/m².

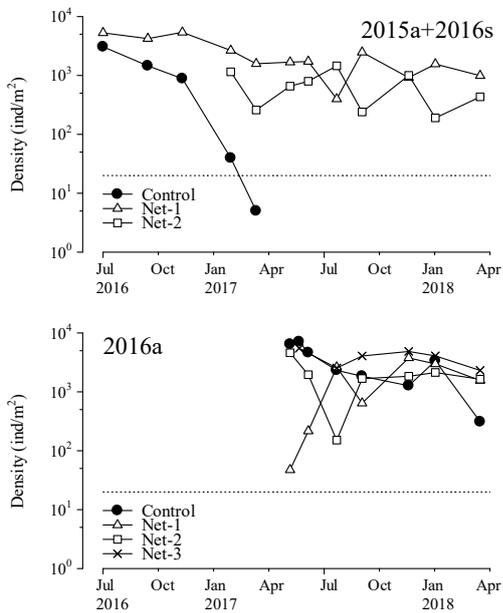


Fig. 3-B. Density of *Ruditapes phillinarum* cohort 2015a+2016s and 2016a in site B. Dotted lines: detection limit (20 ind/m²). In order to display the data on a logarithmic scale, density 0 ind/m² was converted to 10 ind/m².

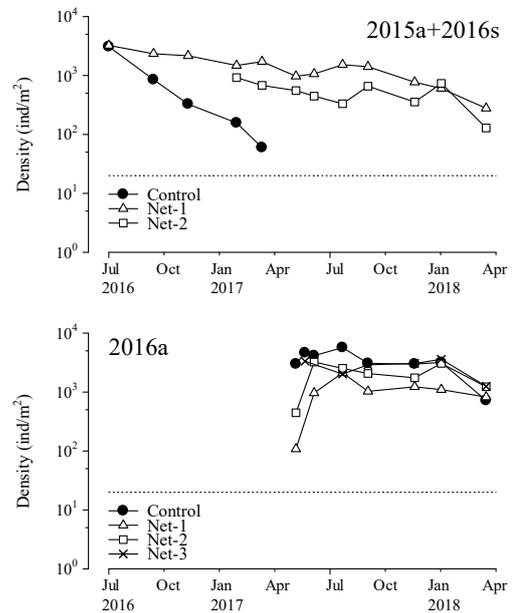


Fig. 3-D. Density of *Ruditapes phillinarum* cohort 2015a+2016s and 2016a in site D. Dotted lines: detection limit (20 ind/m²).

Table 3. Annual survival rate (%) of cohort 2015a+2016s

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	1	0	1	—
B	0	34	55	—
C	0	50	54	—
D	0	32	36	—

Table 4. Annual survival rate (%) of cohort 2016a

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	2	0	36	6
B	7	4027	108	60
C	6	214	50	55
D	23	320	152	55

コホート 2015a+2016s 区域 A, B, C における対照区では、2016 年 11 月から 2017 年 3 月までの期間（秋冬季）に個体数密度の大きな低下が確認された。一方、同区域における Net-1 区と Net-2 区では同時期の個体数密度にそのような大きな低下は確認されなかった。区域 D における対照区では 2017 年 1-3 月（冬季）に加えて 2016 年 7-9 月（夏季）にも大きな低下が確認された。同区域における Net-1 区と Net-2 区では 2017 年 11 月まで大きな低下は確認されなかったが、Net-2 区では 2018 年 1-3 月（冬季）に大きな低下が確認された。区域 A では 2017 年 11 月の調査時に網の大破・埋没が確認され、Net-1 区と Net-2 区での個体数密度はそれを反映して 2017 年 9-11 月に大きく低下した。そのため、区域 A における年間生残率は、対照区の 0%と同様、0-1%と低かった。区域 B, C, D における年間生残率は、対照区では 0%であったのに対し、Net-1 区と Net-2 区でのそれは 34-55%と推定された。

コホート 2016a 区域 A における対照区では 2017 年 6-7 月（夏季）と 2017 年 11 月から 2017 年 1 月までの期間（秋冬季）に個体数密度の大きな低下が確認された。一方、同区域の被覆網区では 2016 年 6-7 月（夏季）に大きな低下は確認されなかったが、Net-1 区では 2017 年 9-11 月（秋季）、Net-2 区では 2017 年 11 月から 2018 年 1 月までの期間（秋冬季）、Net-3 区では 2017 年 9-11 月（秋季）に大きな低下が確認された。区域 B, C, D における対照区では 2018 年 1-3 月（冬季）に大きな低下が確認された。一方、区域 B における被覆網区では最終調査日まで個体数密度の大きな低下は確認されなかった。区域 C における Net-1 区と Net-2 区でも大きな低下は確認されなかつ

たが、Net-3 区では 2018 年 1-3 月（冬季）に大きな低下が確認された。区域 D における Net-1 区では個体数密度の大きな低下は確認されなかったが、Net-2 区と Net-3 区では 2018 年 1-3 月（冬季）に大きな低下が確認された。区域 A における年間生残率は、対照区では 2%，被覆網区では 2017 年 11 月の調査時に網の大破・埋没が確認され、0-36%と推定された。区域 B, C, D における年間生残率は、対照区では 7-23%であったのに対し、被覆網区では 2017 年 5 月から秋冬季にかけて上昇する傾向があり、50-4027%と推定された。

(3) アサリ初期稚貝の個体数密度

初期稚貝の個体数密度は 2016 年 1-3 月に急増し、区域 A と B で高く、区域 C と D で低い傾向があった (Fig. 5)。試験区間の差について区域間で共通した傾向は認められなかった (Fig. 5)。

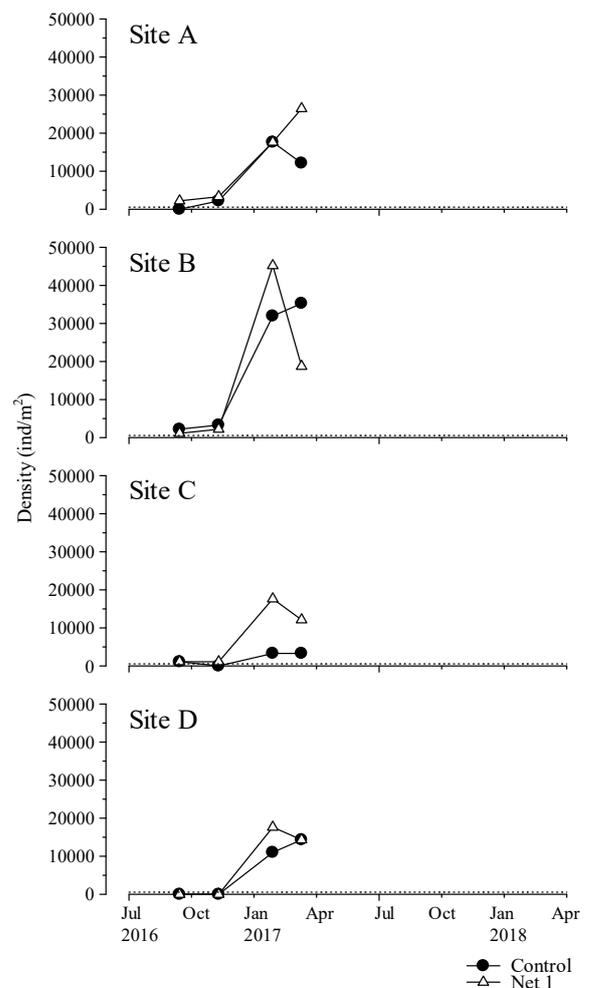


Fig. 5. Density of *Ruditapes phillinarum* with a shell length 0.4–1.0 mm. Dotted lines: detection limit (551 ind/m²).

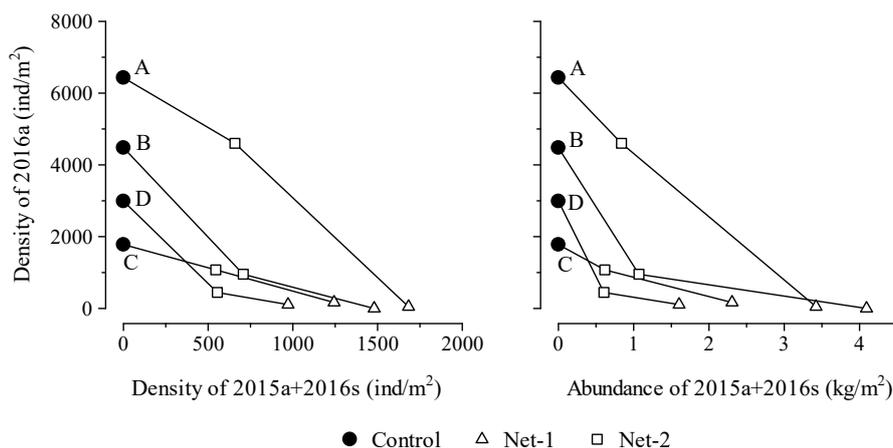


Fig. 6. Relationship between density of *Ruditapes phillinarum* cohort 2015a+2016s and density of *R. phillinarum* cohort 2016a, and between abundance of *R. phillinarum* cohort 2015a+2016s and density of *R. phillinarum* cohort 2016a. Letters: site names.

(4) 小型サイズの個体数密度と大型サイズの個体数密度の相関

小型サイズ(コホート 2016a)の個体数密度は、大型サイズ(コホート 2015a+2016s)が認められなかった対照区については、高い方から順に区域 A, B, D, C となった (Fig. 6)。大型サイズの個体数密度の高かった Net-2 区では、どの区域においても対照区での個体数密度より低く、大型サイズの個体数密度の高かった Net-1 区では、どの区域においても Net-2 区より低かった (Fig. 6)。2015a+2016s の単位を現存量とした場合も同じ傾向であった (Fig. 6)。

(5) 競合生物の個体数密度

被覆網区で確認された二枚貝類は、ホトトギスガイ、シオフキ (*Macra veneriformis*), ユウシオガイ (*Moerella rutila*), オチバガイ (*Psammotaea virescens*), イソシジミ (*Nuttallia japonica*), アサリ, ハマグリ (*Meretrix lusoria*), オキシジミ (*Cyclina sinensis*), オオノガイ (*Mya arenaria oonogai*), オキナガイ (*Laternula anatina*), ソトオリガイ (*Laternula marilina*) であった。平均個体数密度の上位1位はアサリであり、2位はホトトギスガイであった。被覆網区におけるホトトギスガイの個体数密度の最大値は、区域 B の Net-3 区における 2017 年 9 月の 820 ind/m² であった (Fig. 7)。いずれの区域においても、2017 年 11 月以降のホトトギスガイの個体数密度は対照区より被覆網区で高い傾向があった (Fig. 7)。ただし、区域 B の Net-3 区における個体数密度は徐々に低下し、区域 A, C, D におけるそれは 160 ind/m² 以下で推移し (Fig. 7)、地盤を覆い尽くすようなマットの形成はいずれの区域においても確認されなかった。

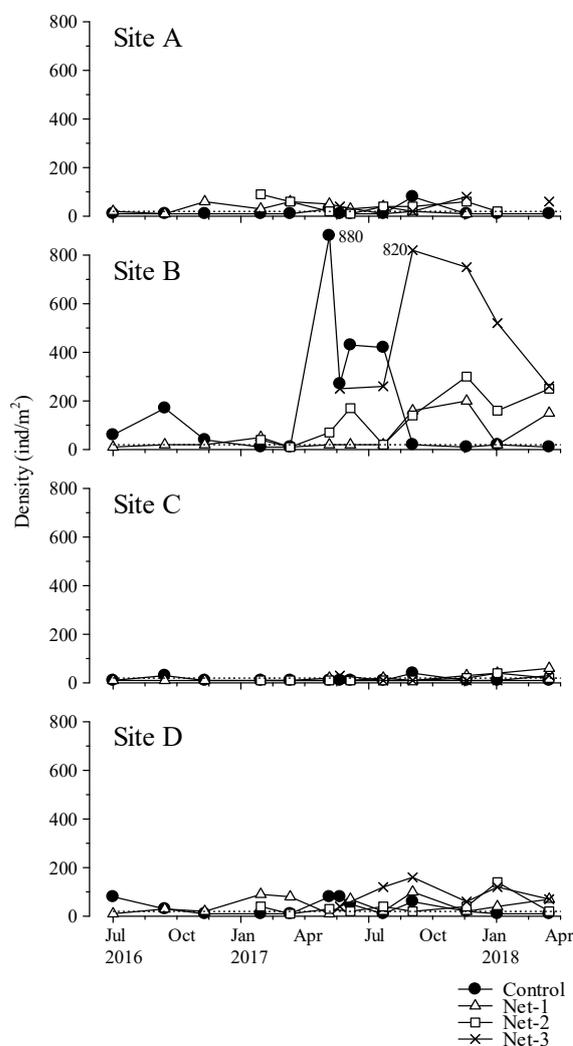


Fig. 7. Density of *Musculista senhousia*. Dotted lines: detection limit (20 ind/m²). Density 0 ind/m² was converted to 10 ind/m².

(6) 食害生物の個体数密度

対照区・被覆網区で確認されたアサリを捕食する可能性のある生物は、ツメタガイ (瀬川・服部, 1997), サキグロタマツメタ (*Laguncula pulchella*) (酒井, 2000), イソガニ (*Hemigrapsus sanguineus*) (浜口ら, 1997) であった。ツメタガイは 2017 年 5-7 月に認められ (Fig. 8), その殻長範囲 (最小-最大) は, 対照区が 6.4-18.8 mm, Net-1 区が 5.5-17.3 mm, Net-2 区が 9.5-25.9 mm, Net-3 区が 6.9-24.6 mm であった。サキグロタマツメタは 2016 年 7 月の

対照区と Net-1 区, 2017 年 11 月の対照区, 2018 年 1 月の Net-3 区で 20 ind/m² 認められた。その殻長範囲は 11.8-22.5 mm であった。イソガニについては他種の混在が否定できなかったため, カニ類として取り扱った。カニ類の個体数密度は, おおむね対照区より被覆網区で高い傾向があった (Fig. 9)。殻幅範囲は, 対照区が 2.7-16.0 mm, Net-1 区が 2.4-12.6 mm, Net-2 区が 2.7-15.9 mm, Net-3 区が 7.6-12.2 mm であった。

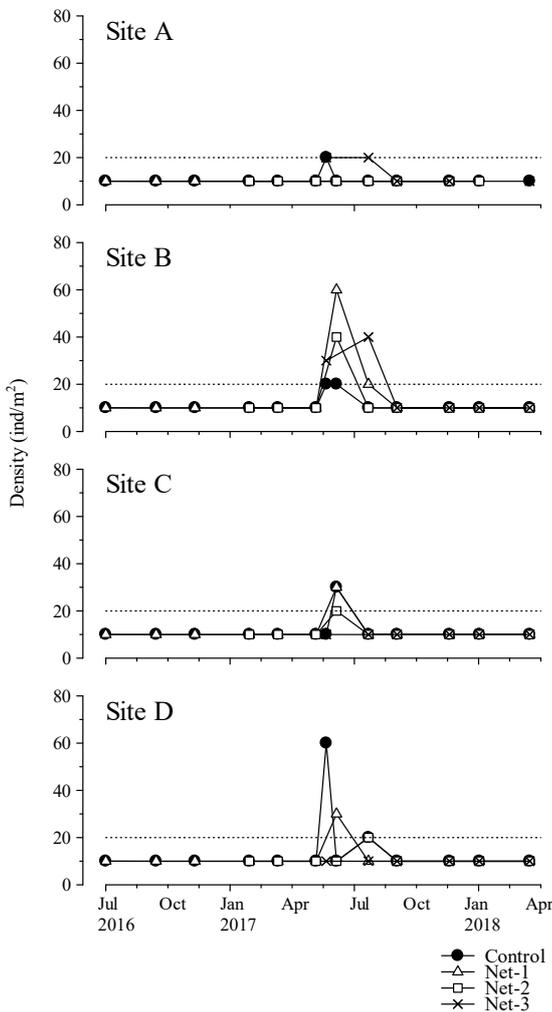


Fig. 8. Density of *Glossaulax didyma*. Dotted lines: detection limit (20 ind/m²). Density 0 ind/m² was converted to 10 ind/m².

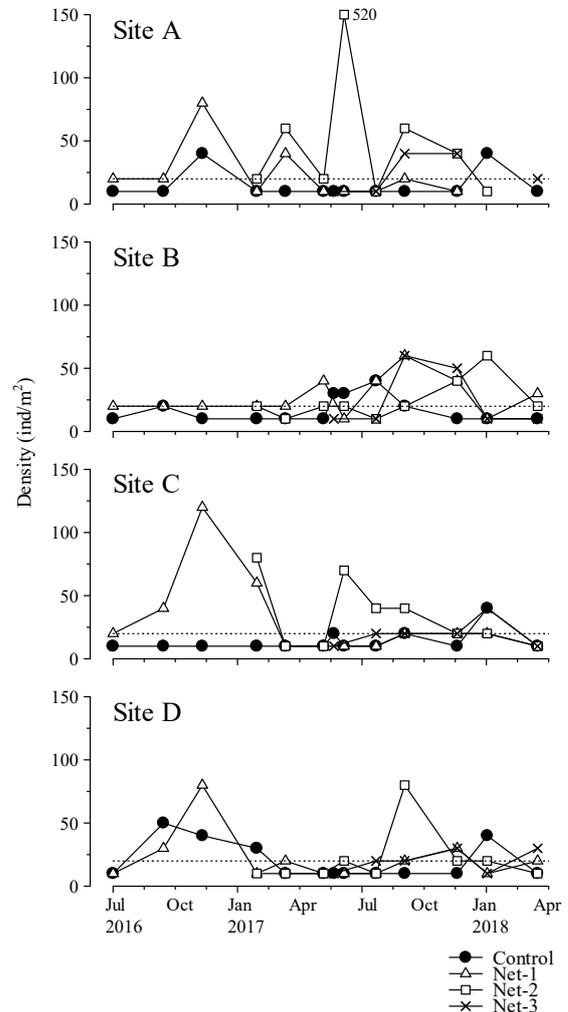


Fig. 9. Density of crabs. Dotted lines: detection limit (20 ind/m²). Density 0 ind/m² was converted to 10 ind/m².

(7) 被覆網の汚損生物

被覆網自体に付着する大型の付着生物は確認されなかった。網下には、2016年9月ごろに紅藻類が確認されたが、2016年10月に自然消滅した (Fig. 10)。2017年5月

ごろからアナアオサ (*Ulva pertusa*) が三渡川河口の広範囲に繁茂し始め、2017年9月ごろには試験区を完全に覆い尽くした状態が干潮時に確認された (Fig. 10)。しかし、これも2017年10月には自然消滅した (Fig. 10)。



Fig. 10. Photographs of cover nets and sea algae in the study area.

2. 環境調査

(1) 底質

強熱減量と AVS は、対照区よりも被覆網区で高い傾向があった (Fig. 11, 12)。AVS は 1-5 月 (冬春季) に低く、7-9 月 (夏季) に高い傾向があった (Fig. 12)。強熱減量

もおおむね同様の傾向があった (Fig. 11)。なお、区域 C の Net-3 区において 2017 年 5 月に 8.5 % と比較的高い強熱減量が確認されたが (Fig. 11)、網の設置当日の値であるため、網の影響によるものではなかった。

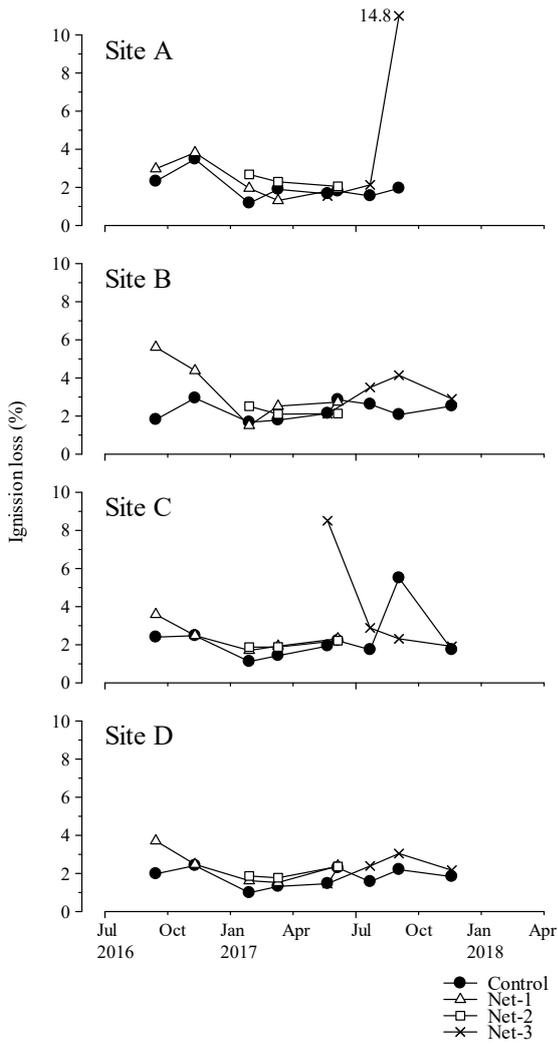


Fig. 11. Ignission loss.

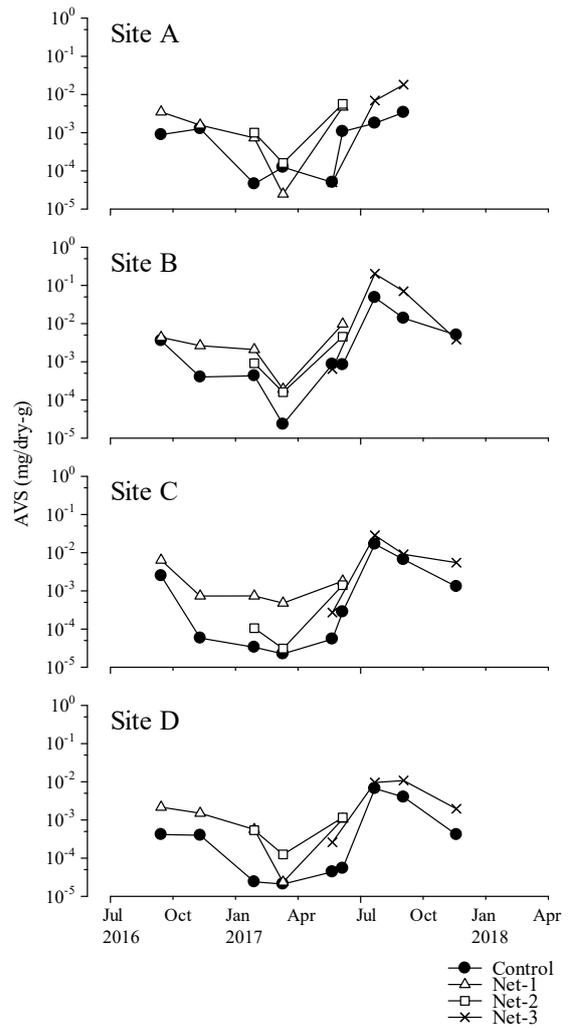


Fig. 12. Acid volatile sulfide (AVS).

(2) 水温

観測結果を Fig. 13 に示した。最高値は 7-8 月 (夏季) に認められ, 干出時も含む地盤表面の最高値は, 区域 A が 44.1 °C, 区域 B が 43.8 °C, 区域 C が 46.2 °C, 区域 D が 45.1 °C, 地中の最高値は区域 A が 34.8 °C, 区域 B が 36.9 °C, 区域 C が 36.1 °C, 区域 D が 37.2 °C であった。最低値は 1-2 月 (冬季) に認められ, 地盤表面の最低値は, 区域 A が -2.3 °C, 区域 B が -2.6 °C, 区域 C が -3.2 °C, 区域 D が -2.5 °C, 地中の最低値は区域 A が 0.7 °C, 区域 B が 0.6 °C, 区域 C が -0.1 °C, 区域 D が 0.7 °C であった。地盤表面の平均値は, 区域 A が 18.8 °C, 区域 B が 18.7 °C, 区域 C が 19.0 °C, 区域 D が 18.9 °C,

地中の平均値は区域 A が 18.7 °C, 区域 B が 18.7 °C, 区域 C が 18.7 °C, 区域 D が 18.7 °C であった。地盤表面における 25 °C 以上の観測割合は, 区域 A が 33.4 %, 区域 B が 33.6 %, 区域 C が 34.4 %, 区域 D が 35.2 %, 地中における 25 °C 以上の観測割合は, 区域 A が 32.0 %, 区域 B が 32.4 %, 区域 C が 33.0 %, 区域 D が 33.7 % であった。地盤表面における 35 °C 以上の観測割合は, 区域 A が 1.8 %, 区域 B が 1.4 %, 区域 C が 2.5 %, 区域 D が 3.1 %, 地中における 35 °C 以上の観測割合は, 区域 A が 0.0 %, 区域 B が 0.1 %, 区域 C が 0.0 %, 区域 D が 0.5 % であった。

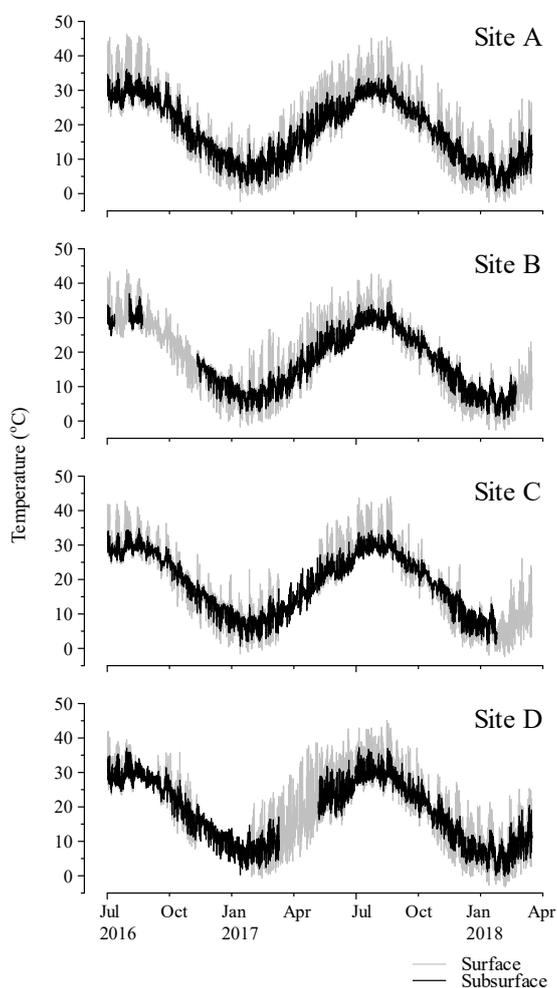


Fig. 13. Surface and subsurface temperatures.

(3) 底面せん断応力

中央粒径の最小値は 0.39 mm, 最大値は 0.93 mm, 平均値は 0.74 mm であった。いずれの中央粒径においても地盤の移動限界を超える底面せん断応力の観測例の大部分は, 波浪によるものであった (Fig. 14)。地盤 (中央粒径

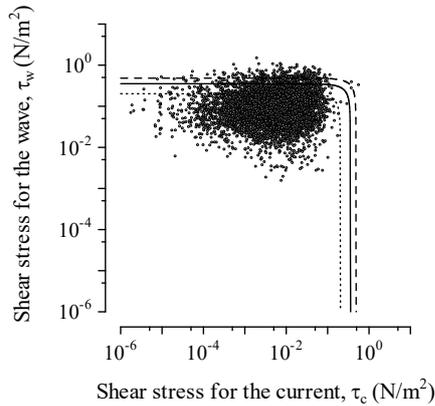


Fig. 14. Shear stress for the wave and current.

Points: observation values in the study area; dotted line: movement limit of sediment with a central grain size 0.39 mm; solid line: movement limit of sediment with a central grain size 0.74 mm; dashed line: movement limit of sediment with a central grain size 0.93 mm.

0.74 mm) の移動限界を超えるせん断応力は, 北東方向から入射する波浪と西北西から入射する波浪によるものが主体であった (Fig. 15)。移流によるせん断応力が移動限界を超えた観測例はわずか 3 例であり, 北へ向かう移流と北東に向かう移流によるものであった (Fig. 15)。

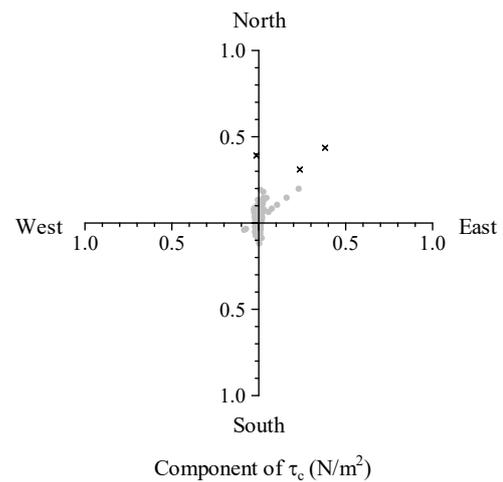
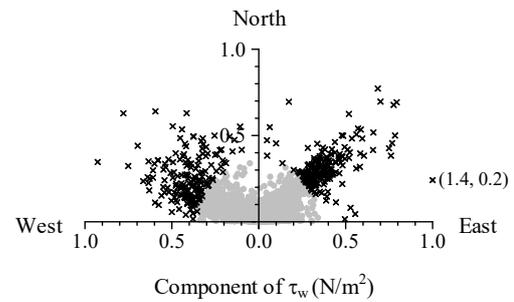


Fig. 15. Shear stress components for the wave and current. Crosses: observation values of shear stress over the movement limit of sediment with a central grain size 0.74 mm; gray circles: observation values of shear stress below the movement limit of sediment with a central grain size 0.74 mm.

(4) 風速と降水量

地盤（中央粒径 0.74 mm）の移動限界を超える波浪によるせん断応力は、10-3 月（秋冬季）に頻発していた（Fig. 16）。秋冬季は北西風が卓越する季節であった（Fig. 16）。7-9 月（夏季）は台風等の強風発生時を除けば、移動限界を超える波浪によるせん断応力の発生頻度は非常に低かった（Fig. 16）。地盤の移動限界を超える移流によるせん

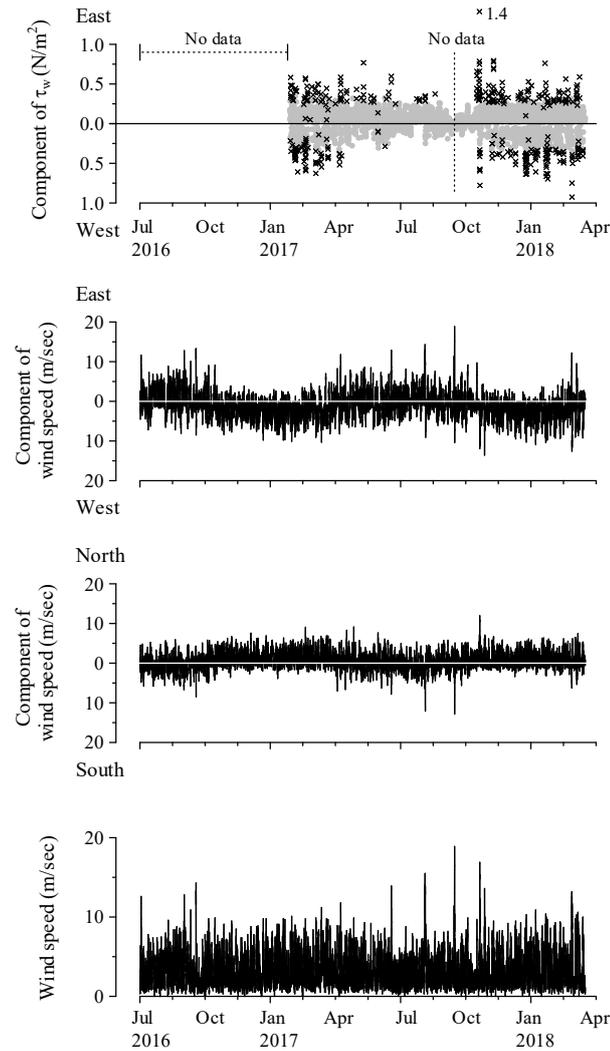


Fig. 16. Shear stress components for the wave τ_w in the study area, components of wind speed, and wind speed in Tsu. Crosses: observation values of shear stress over the movement limit of sediment with a central grain size 0.74 mm; gray circles: observation values of shear stress below the movement limit of sediment with a central grain size 0.74 mm. Wind speed observed by the Japan Meteorological Agency.

断応力が確認された日付は 2017 年 10 月 23 日と 2018 年 3 月 9 日であった（Fig. 17）。10 月 23 日の 24 時間積算降水量は 300 mm を超えていた（Fig. 17）。一方、3 月 9 日の 24 時間積算降水量は 61 mm であった（Fig. 17）。61 mm を超える降水量は 2017 年 8 月にも確認されたが、そのときに強い移流は確認されず、降水量と移流との関係は不明瞭であった（Fig. 17）。

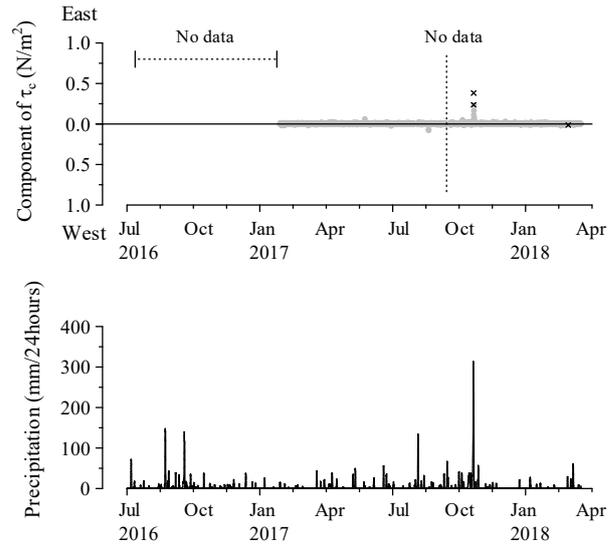


Fig. 17. Shear stress components for the current τ_c in the study area and precipitation in Tsu. Crosses: observation values of shear stress over the movement limit of sediment with a central grain size 0.74 mm; gray circles: observation values of shear stress below the movement limit of sediment with a central grain size 0.74 mm. Precipitation observed by the Japan Meteorological Agency.

3. 被覆網の有効性と経済性

(1) 現存量最大値

殻長 25 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、すべての区域の Net-1 区と Net-2 区、区域 A, C, D の Net-3 区の現存量最大値は対照区のそれより大きかった (Fig. 18; Table 5-1)。殻長 30 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、すべての区域の Net-1 区と Net-2 区、区域 A の Net-3 区の現存量最大値は対照区のそれより大きかった (Fig. 19; Table 5-2)。殻長 32 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、すべての区域の Net-1 区、区域 A, B, C の Net-2 区の現存量最大値は対照区のそれより大きかった (Fig. 20; Table 5-3)。

(2) 漁獲量の損益分岐点

損益分岐点と現存量最大値を比較すると、殻長 25 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、すべての区域の Net-1 区と Net-2 区、区域 A の Net-3 区では損益分岐点 (1.1 kg/m²) を上回った (Fig. 18; Table 5-1)。殻長 30 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、区域 A と B の Net-1 区と Net-2 区、区域 C の Net-1 区において損益分岐点 (0.7 kg/m²) を上回った (Fig. 19; Table 5-2)。殻長 32 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、区域 A と B の Net-1 区と Net-2 区において損益分岐点 (0.5 kg/m²) を上回った (Fig. 20; Table 5-3)。

(3) 現存量が損益分岐点を上回るまでに要した期間

殻長 25 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、網の設

置後に現存量が損益分岐点 (1.1 kg/m²) を上回るまでに要した月数は、Net-1 区が 10–13 か月、Net-2 区が 9–10 か月、Net-3 区が 3 か月であった (Fig. 18; Table 6-1)。殻長 30 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、網の設置後に損益分岐点 (0.7 kg/m²) を上回るまでに要した月数は、Net-1 区が 11–14 か月、Net-2 区が 9 か月であった (Fig. 19; Table 6-2)。殻長 32 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、損益分岐点 (0.5 kg/m²) を上回るまでに要した月数は、Net-1 区が 11–14 か月、Net-2 区が 9–10 か月であった (Fig. 20; Table 6-3)。

(4) 現存量が損益分岐点を連続して上回った期間

殻長 25 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、網の設置後に現存量が連続して損益分岐点 (1.1 kg/m²) を上回った月数は、Net-1 区が 4–9 か月、Net-2 区が 1–8 か月であった (Fig. 18; Table 7-1)。殻長 30 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、網の設置後に現存量が連続して損益分岐点 (0.7 kg/m²) を上回った月数は、Net-1 区が 3–7 か月、Net-2 区が 1–4 か月であった (Fig. 19; Table 7-2)。殻長 32 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合、網の設置後に現存量が連続して損益分岐点 (0.5 kg/m²) を上回った月数は、Net-1 区が 3–7 か月、Net-2 区が 2 か月であった (Fig. 20; Table 7-3)。前述したように区域 A では 2017 年 11 月の調査において Net-1 区で網の大破、Net-2 区と Net-3 区で網の埋没が確認された。その影響により、区域 A では現存量が損益分岐点を上回る期間が区域 B のそれと比べて短くなった (Fig. 18, 19, 20; Table 7-1, -2, -3)。

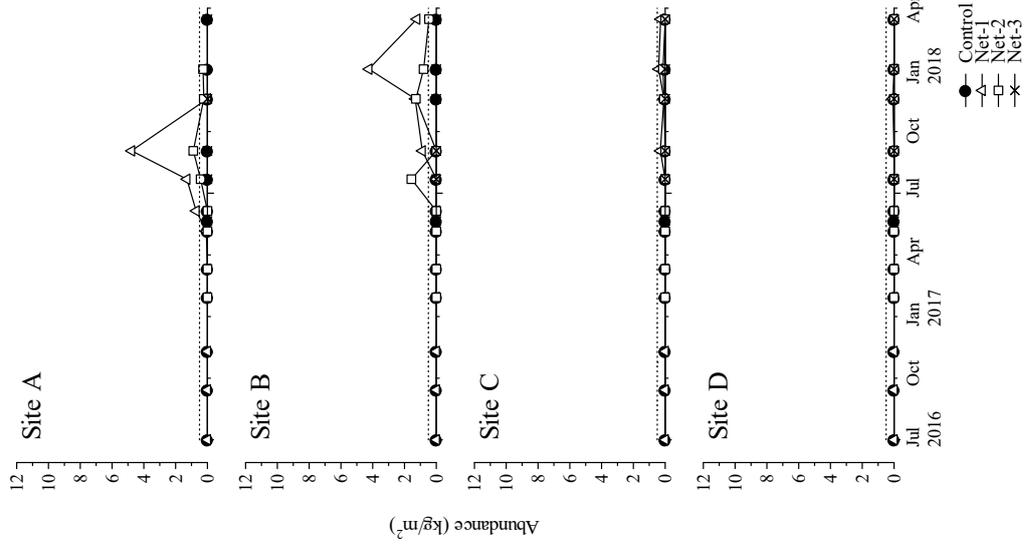


Fig. 18. Abundance of *Ruditapes philinarum* with a shell length ≥ 25 mm. Dotted lines: break even points (1.1 kg/m²).

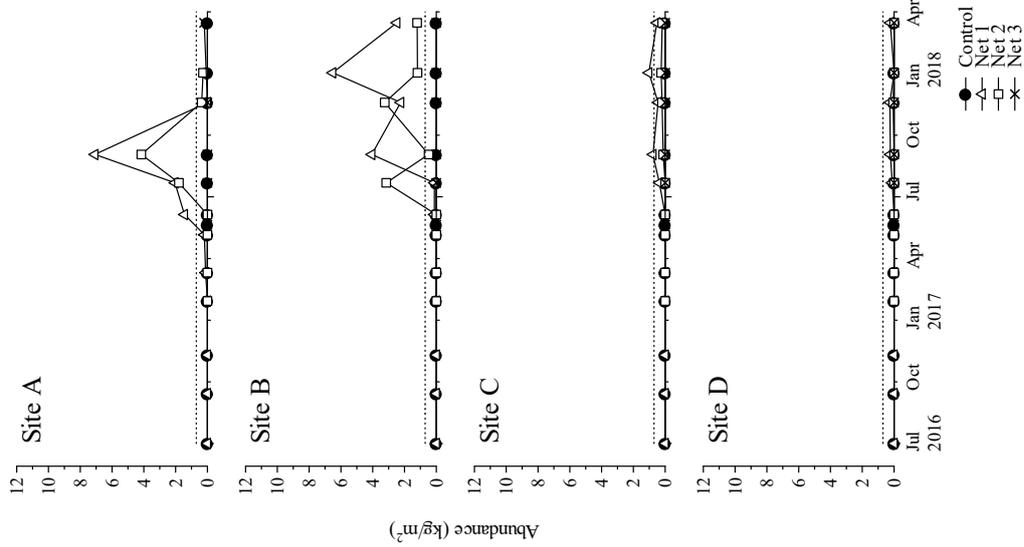


Fig. 19. Abundance of *Ruditapes philinarum* with a shell length ≥ 30 mm. Dotted lines: break even points (0.7 kg/m²).

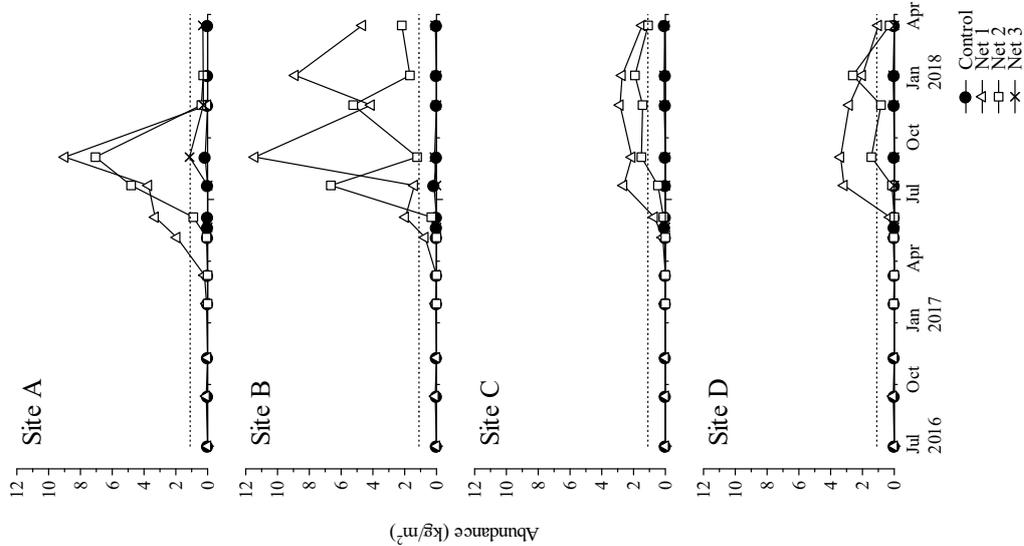


Fig. 20. Abundance of *Ruditapes philinarum* with a shell length ≥ 32 mm. Dotted lines: break even points (0.5 kg/m²).

Table 5-1. Maximum of the abundance (kg/m²) with a shell length ≥ 25 mm in Fig. 18

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	0.2	9.0	7.1	1.1
B	0.2	11.4	6.6	0.1
C	0.0	2.9	1.9	0.1
D	0.0	3.4	2.6	0.1

The break even point: 1.1kg/m².**Table 5-2.** Maximum of the abundance (kg/m²) with a shell length ≥ 30 mm in Fig. 19

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	0.0	7.1	4.2	0.2
B	0.0	6.5	3.2	0.0
C	0.0	1.0	0.3	0.0
D	0.0	0.3	0.1	0.0

The break even point: 0.7kg/m².**Table 5-3.** Maximum of the abundance (kg/m²) with a shell length ≥ 32 mm in Fig. 20

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	0.0	4.8	0.9	0.0
B	0.0	4.2	1.6	0.0
C	0.0	0.4	0.1	0.0
D	0.0	0.1	0.0	0.0

The break even point: 0.5kg/m².**Table 6-1.** Period (months) from the installation of a cover net until the abundance with a shell length ≥ 25 mm exceeded the break even point (1.1 kg/m²) in Fig. 18

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	—	10	9	3
B	—	11	9	—
C	—	13	10	—
D	—	13	10	—

Table 6-2. Period (months) from the installation of a cover net until the abundance with a shell length ≥ 30 mm exceeded the break even point (0.7 kg/m²) in Fig. 19

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	—	11	9	—
B	—	14	9	—
C	—	14	—	—
D	—	—	—	—

Table 6-3. Period (months) from the installation of a cover net until the abundance with a shell length ≥ 32 mm exceeded the break even point (0.5 kg/m²) in Fig. 20

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	—	11	10	—
B	—	14	9	—
C	—	—	—	—
D	—	—	—	—

Table 7-1. Period (months) during which the abundance with a shell length ≥ 25 mm continuously exceeded the break even point (1.1 kg/m²) in Fig. 18

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	—	4	1	—
B	—	9	8	—
C	—	8	4	—
D	—	5	—	—

Table 7-2. Period (months) during which the abundance with a shell length ≥ 30 mm continuously exceeded the break even point (0.7 kg/m²) in Fig. 19

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	—	3	1	—
B	—	7	4	—
C	—	—	—	—
D	—	—	—	—

Table 7-3. Period (months) during which the abundance with a shell length ≥ 32 mm continuously exceeded the break even point (0.5 kg/m²) in Fig. 20

	Control	Net-1	Net-2	Net-3
Site A	—	3	—	—
B	—	7	2	—
C	—	—	—	—
D	—	—	—	—

(5) 初期個体数密度の損益分岐点

Net-1 区における損益分岐点は、殻長 25 mm 以上を漁獲対象サイズとした場合が 576–1110 ind/m²、殻長 30 mm 以上が 226–452 ind/m²、殻長 32 mm 以上が 158–267

ind/m²となった (Table 8-1)。Net-2 区における損益分岐点は、殻長 25 mm 以上が 506–757 ind/m²、殻長 30 mm 以上が 187–257 ind/m²、殻長 32 mm 以上が 110–165 ind/m²となった (Table 8-2)。

Table 8-1. Break even points of the initial density and the parameters used to estimate them in Net-1

x (mm)	w_x ¹⁾ (g)	Y_x ²⁾ (kg/m ²)	S ³⁾ (% per year)	M ⁴⁾	Δt ⁵⁾ (months)	N_{bep} ⁶⁾ (ind/m ²)
25	3.4	1.1	32	1.14	10	835
25	3.4	1.1	32	1.14	13	1110
25	3.4	1.1	50	0.69	10	576
25	3.4	1.1	50	0.69	13	685
30	5.9	0.7	32	1.14	11	340
30	5.9	0.7	32	1.14	14	452
30	5.9	0.7	50	0.69	11	226
30	5.9	0.7	50	0.69	14	269
32	7.1	0.5	32	1.14	11	200
32	7.1	0.5	32	1.14	14	267
32	7.1	0.5	50	0.69	11	133
32	7.1	0.5	50	0.69	14	158

1): Hasegawa and Higano (2010); 2): values in Table 2; 3): minimum and maximum values for sites B, C, D in Table 3; 4): $-\log(S/100)$; 5): minimum and maximum values for sites B, C, D in Table 6-1, 6-2, 6-3; 6): $N_{bep} = Y_x 1000/w_x \exp(M\Delta t/12)$.

Table 8-2. Break even points of the initial density and the parameters used to estimate them in Net-2

x (mm)	w_x ¹⁾ (g)	Y_x ²⁾ (kg/m ²)	S ³⁾ (% per year)	M ⁴⁾	Δt ⁵⁾ (months)	N_{bep} ⁶⁾ (ind/m ²)
25	3.4	1.1	36	1.02	9	695
25	3.4	1.1	36	1.02	10	757
25	3.4	1.1	55	0.60	9	506
25	3.4	1.1	55	0.60	10	532
30	5.9	0.7	36	1.02	9	257
30	5.9	0.7	36	1.02	—	—
30	5.9	0.7	55	0.60	9	187
30	5.9	0.7	55	0.60	—	—
32	7.1	0.5	36	1.02	9	152
32	7.1	0.5	36	1.02	10	165
32	7.1	0.5	55	0.60	9	110
32	7.1	0.5	55	0.60	10	116

1): Hasegawa and Higano (2010); 2): values in Table 2; 3): minimum and maximum values for sites B, C, D in Table 3; 4): $-\log(S/100)$; 5): minimum and maximum values for sites B, C, D in Table 6-1, 6-2, 6-3; 6): $N_{bep} = Y_x 1000/w_x \exp(M\Delta t/12)$.

考 察

1. 被覆網の有効性と経済性

本研究の被覆網区におけるアサリ現存量は、対照区のそれを大きく上回り、損益分岐点も上回った (Fig. 18, 19, 20)。また、その現存量最大値は殻長 25 mm 以上が 11.4 kg/m²、殻長 30 mm 以上が 7.1 kg/m²、殻長 32 mm 以上が 4.8 kg/m² と推定され、これらは、伊勢地区の潮間帯で自然発生したアサリ (殻長 20 mm 以上) の 1960 年代の現存量最大値 5.0 kg/m² や 1970 年代の現存量の最大値 6.5 kg/m² (羽生 2015) と比べて同等以上であった。殻長 25 mm, 30 mm, 32 mm の単価を 200 円/kg, 320 円/kg, 490 円/kg (三重県水産研究所 2011) と仮定し、これらに前述の現存量最大値を乗じた網 1 枚あたりの生産額最大値は 36480 円, 36352 円, 37632 円と試算され、1 枚あたりの収入は本研究で試算した支出 3474 円の 10 倍を超える。これらは期待最大値であり、時期によっては損益分岐点を下回る可能性があるものの、本研究では損益分岐点を上回る区域が複数確認され (Table 5-1, -2, -3)、損益分岐点を上回った期間も数か月間と比較的長期にわたって確認された (Table 7-1, -2, -3)。三渡川河口 (Fig. 1) の潮間帯面積は約 187 ha と広大であるため、本法の普及に期待がかかる。

被覆網区での現存量は、区域 A と B で多く、区域 C と D で少ない傾向があり、大きいサイズのアサリほどのその傾向は顕著であった (Fig. 18, 19, 20)。アサリの成長阻害が生じるとされる水温 25 °C 以上 (磯野ら 1998) の観測割合は、区域 A (32.0%) と B (32.4%) で小さく、区域 C (33.0%) と D (33.7%) で大きい傾向があり、現存量は高水温と負の相関があるものと推測された。また、各区域の地盤高は区域 A (DL+0.6 m) と B (DL+0.5 m) で低く、区域 C (DL+0.7 m) と D (DL+0.9 m) で高かった。水温が気温より低い夏季は地盤高の低い区域ほど地盤表面が高温となる時間が短いと考えられるため、本研究で確認された区域間の水温差もその影響を反映したものと推測される。そのように考えると、殻長 30 mm 以上のアサリの漁獲を目標とする場合、被覆網の設置に適した地盤高は、三渡川河口では区域 A, B より低い地盤高、すなわち DL+0.6 m 以深と推測される。

本研究の対照区におけるアサリコホート 2015a+2016s の個体数密度は、被覆網区のそれより低位・減少で推移し、秋冬季に大きく低下する傾向があった (Fig. 3-A, -B, -C, -D)。本研究の試験海域では秋冬季に波浪による地盤のかく乱が頻発していたことから (Fig. 16)、他海域 (柿野 2006; 生嶋ら 2012) と同様に、秋冬季の減耗には波浪

が大きな影響を及ぼしていた可能性がある。夏季については台風等の強風発生時を除けば地盤のかく乱がほとんど発生していなかったものの (Fig. 16)、本研究の 2 か月に 1 回という少ない調査頻度を考えれば、夏季のアサリの個体数密度の低下が台風等の波浪によるものであった可能性も否定できない。本研究の被覆網の目合は 9 mm であり、角目を仮定すると対角線長は 13 mm である。本研究で採取したアサリの殻高殻長換算式 ($y = 1.3576x - 0.0587$, $r^2 = 0.98$, $n = 16773$) より、殻高 13 mm に対応する殻長は 18 mm (およそ 20 mm) と推定される。目合通過可否の試算方法としては大雑把であるが、殻長 20 mm 以上のアサリは波浪で巻き上げられてもその大部分は目合を通過せず被覆網内にとどまるとすれば、本研究において殻長 20 mm 以上のアサリが対照区ではほとんど認められず被覆網区では周年認められたこと (Fig. 2-A, -B, -C, -D) の説明がつく。本研究の対照区におけるアサリコホート 2016a の生残率は減少傾向にあったが (Table 4)、被覆網区のそれは夏季に徐々に増加する傾向があった (Fig. 3-B, -C, -D; Table 4)。このような対照区と被覆網区の差は、コホート 2016a の殻長組成の推移 (Fig. 2-B, -C, -D) と前述の目合通過可否の殻長に基づけば、被覆網の周囲に生息する殻長 20 mm 未満の個体が突発的な波浪により巻き上げられ被覆網内に流れ着いた後、静穏な期間に殻長 20 mm 以上に成長することにより被覆網の目合を通過しなくなったという網の集積効果によるものとして説明できる。ただし、対照区における 2016a の秋冬季の大きな低下は、区域 A では 2016 年 11 月から 2017 年 1 月までの期間、区域 B, C, D では 2018 年 1-3 月に認められ、区域によってその発生時期がやや異なった。本研究の調査海域では 2017 年 9 月以降、波浪による地盤のかく乱が頻発していたが (Fig. 16)、本研究では各区域で波浪を観測していないため、その区域間の差は不明である。今後、観測例を増やして確認する必要がある。また、本研究の区域 C と D における Net-2 区と Net-3 区では、2018 年 1-3 月に、コホート 2016a の個体数密度が大きく低下した (Fig. 3-C, -D)。区域 B の被覆網区ではそのような傾向が確認されなかったことや (Fig. 3-B)、2018 年 1-3 月は最終調査日のデータに基づいていることから、観測誤差の可能性も否定できない。しかし、2018 年 3 月 1 日に平均風速 13.2 m の西風とそれに伴う強波浪が観測されており、このときの底面せん断応力は、西方向からとしては本研究において最大値を記録した (Fig. 16)。波浪の影響は小さな空間スケールで複雑なものとなっている可能性があるため、波浪の入射方向の相違が被覆網の有効性にどのような影響を及ぼすかを、今後、確認する必要がある。

ある。

本研究の区域 A では 2017 年 9-11 月に被覆網の大破・埋没が確認された。本研究の調査海域では 2017 年の 9 月と 10 月に台風が接近しており (Fig. 16, 17), 9 月の流向流速は欠測であったが、観測できた 10 月の強波浪による底面せん断応力は本研究において最大値を記録し、このときの移流による底面せん断応力も最大値を記録した。ただし、この期間に観測された強い移流は北東に向かう流れであり (Fig. 15, 17), これは、区域 A に近い大きな水門の流軸方向とほぼ一致している (Fig. 1)。また、台風発生時ではない 2018 年 3 月に確認された強い移流は真北に向かう流れであり (Fig. 15, 17), これは三渡川上流からの主流 (東に向かう流れ) とは方向が大きく異なっている。区域 A より上流の区域 B, C, D において網の大破・埋没が確認されなかったことや流向流速計の測点が区域 A に近かったことから、強い移流は区域 A に特異的なものであった可能性が高く、水門からの突発的な排水の影響を反映したものと推測される。また、その最大値は波浪での最大値と比べて小さいため (Fig. 15), 本研究の調査海域における地盤かく乱の主体は移流ではなく波浪によるものと推測される。

本研究の Net-1 区は 2015 年秋産まれの稚貝 (コホート 2015a), Net-2 区は 2016 年春産まれの稚貝 (コホート 2016s) の保護を目的としたが、結果的に 2015a と 2016s の区別が途中で難しいものとなったため (Fig. 2-A, -B, -C, -D), 試験区間の差はコホート間の差を表したものとなっていない。そのため、本研究においてアサリの現存量が損益分岐点を上回るまでの月数は Net-1 区より Net-2 区の方が短い傾向が確認されたものの (Table 6-1, -2, -3), それが生残と成長のいずれに起因するものであったのかの判断は難しい。ただし、2016 年秋産まれのコホート 2016a の保護を目的とした Net-3 区については、漁獲対象サイズまで十分追跡しなかった点 (Table 5-1, -2, -3, 6-1, -2, -3, 7-1, -2, -3) に留意する必要があるものの、平均殻長が対照区と大差がなく (Fig. 2-A, -B, -C, -D), 生残率が対照区より高かったため (Table 4), 被覆網によるアサリの保護効果は成長よりも生残に対する寄与が大きいと推測される。したがって、生残率に対する強波浪の影響の低減を図り、被覆網の有効性を十分なものとするためには、網の設置は、早ければ台風シーズン前の春季から初夏にかけて、そして、遅くとも季節風の北西風が吹き始める秋季までに行う必要があると考えられる。

2. 維持管理の必要性

本研究では、区域 B の Net-3 区においてアサリの競合

生物となるホトトギスガイが 2017 年 9 月以降の秋冬季に比較的高密度で出現した (Fig. 7)。しかし、この期間の区域 B の Net-3 区におけるコホート 2016a の個体数密度は大きく低下していなかった (Fig. 2-B)。区域 B の Net-1 区と Net-2 区においても 2017 年 11 月以降、ホトトギスガイの個体数密度が高い傾向にあったが (Fig. 7), この期間のコホート 2015a+2016s の個体数密度は大きく低下していなかった (Fig. 3-B)。以上より、本研究で確認された個体数密度の範囲内では、ホトトギスガイの人為的な除去は不要と考えられる。

本研究では、ツメタガイが 2017 年 5-7 月に認められた (Fig. 8)。しかし、この期間のコホート 2015a+2016 と 2016a の個体数密度はいずれの試験区でも大きく低下していなかった (Fig. 3-A, -B, -C, -D)。以上より、本研究で確認された個体数密度の範囲内では、ツメタガイの除去は不要と考えられる。カニ類については周年出現したが、その個体数密度はアサリの生残率の低い対照区で低く、被覆網区で高い傾向があった (Fig. 9)。そのため、カニ類によるアサリの捕食も、本研究の調査海域ではアサリの生残率を規定する主要因とは考えにくい。カニ類についても、本研究で確認された個体数密度の範囲内では、人為的な除去は不要と考えられる。

強熱減量と AVS は夏季に上昇し、対照区よりも被覆網区で高い傾向があった (Fig. 11, 12)。しかし、被覆網区における AVS の季節変動は対照区のそれと類似しており、対照区での季節変動も同程度に大きいことから (Fig. 12), 被覆網区の AVS は、被覆網の直接的な影響よりも、水温の上昇 (Fig. 13) やアナアオサの繁茂 (Fig. 10), 波浪による地盤のかく乱頻度の低下 (Fig. 16) の影響により大きく変動すると考えられる。また、被覆網区におけるコホート 2015a+2016s や 2016a の個体数密度は夏季に大きく低下していなかったことから (Fig. 3-A, -B, -C, -D), 本研究で確認された強熱減量と AVS の範囲内では、底質の人為的な改善は不要と考えられる。

本研究において、フジツボ類やカキ類といった網の汚損生物は確認されなかった。また、本研究の試験海域では春季から秋季にかけて紅藻類やアナアオサといった海藻の繁茂が確認されたが、それらが繁茂した季節の被覆網区においてアサリの生残率の低下は確認されなかった (Fig. 3-A, -B, -C, -D)。以上より、本研究の調査海域では網の汚損生物や海藻類の人為的な除去は不要と考えられる。

本研究の区域 A では 2017 年 9-11 月に被覆網の埋没が確認され、その網 1 枚あたりの撤去時間は 1 名で 1 時間を要した。これは、網の引っ張り耐性が低く、土砂が堆

積した状態で網を引き上げることが難しかったためであった。樹脂製モノフィラメントの網は付着生物が付きにくいという維持管理上、大きなメリットがある一方で、埋没時の撤去にかかるコストが高いというデメリットがある。網の埋没対策として、防汚効果と高い強度を併せ持つ網の開発、網の埋没・大破といった被害を受けにくい区域（本研究の B, C, D のような区域）の事前選定が重要と考えられる。

伊勢湾におけるアサリの産卵盛期が春季と秋季の年 2 回（松本ら 2014）と仮定すると、本研究において 2017 年 1-3 月に確認されたアサリの初期稚貝（殻長 1 mm 未満）は、2017 年 5 月の個体数密度・殻長組成の調査で確認された稚貝（平均殻長 4-5 mm）と同一コホート（2016a）である可能性が高い。そのように仮定した場合、2017 年 5 月に確認されたコホート 2016a の個体数密度の対照区における区域間の差（Fig. 6）は、初期稚貝の個体数密度の区域間の差（Fig. 5）とほぼ一致しており、区域という空間スケールでの個体数密度の差は初期稚貝以前の段階で決まっているとの説明が可能である。そのため、被覆網の規模拡大には、稚貝の個体数密度の高い区域の事前探索や、稚貝の個体数密度が低い区域では稚貝移植が必要となる可能性がある。一方、同一区域内では各試験区の初期稚貝の個体数密度に明瞭な差が認められなかったことから（Fig. 5）、稚貝（小型サイズ）の個体数密度の試験区間の差（Fig. 6）は、初期稚貝から稚貝に成長する過程で生じたものとの説明が可能である。Fig. 6 で示したように小型サイズの個体数密度と大型サイズの個体数密度に負の相関があるとすれば、稚貝を安定確保するための維持管理として、大型サイズの定期漁獲、被覆網区での輪採、地盤高による稚貝場・成育場の使い分けなどが必要となる可能性がある。その際に管理目標とする初期個体数密度としては、本研究で算出した Table 8-1, 8-2 が参考となるであろう。

要 約

1. 松阪地区三渡川河口の潮間帯において、被覆網によるアサリの保護・増殖効果を野外試験で確認した。その結果、競合生物の除去、食害生物の除去、底質改善といった維持管理をあえて行わなかったにもかかわらず、損益分岐点を大きく上回る現存量の増加が確認された。
2. 被覆網の効果は、波浪の影響の低減によるアサリの生残率の向上によるものと推測された。
3. 被覆網の有効性と経済性には区域間差が認められ、

その原因の 1 つとして高水温によるアサリの成長阻害が推測された。高水温の影響は地盤高の高い区域ほど大きく、被覆網の設置に適した地盤高は、三渡川河口では DL+0.6 m 以深と推測された。

4. 三渡川河口では、競合生物の除去、食害生物の除去、底質改善といった被覆網区の維持管理は不要と判断された。
5. 被覆網によるアサリの保護・増殖の普及にあたっては、稚貝の個体数密度の事前調査が必要と考えられた。
6. アサリのサイズ間で個体数密度に負の相関が示唆されたため、自然発生する稚貝の安定確保には、大型サイズの定期漁獲、被覆網区の輪採、地盤高による稚貝場・成育場の使い分けなどが必要と考えられた。

謝 辞

野外試験の実施にあたり、試験海域周辺を漁業者が自主禁漁とすることについて松阪漁業協同組合の関係者に便宜を図っていただいた。調査・分析については、鈴鹿水産研究室、松阪市農水振興課、国立研究開発法人水産研究・教育機構水産工学研究所および増養殖研究所（現水産技術研究所）の職員に協力いただいた。本研究で使用した流向流速計のデータは、平成 27-29 年度水産庁水産基盤整備調査委託事業「アサリ資源回復のための母貝・稚貝・成育場の造成と実証」により取得した。

文 献

- 荒川清 (1980): 底質調査法.「新編水質汚濁調査指針」(日本水産資源保護協会編) 恒星社厚生閣, 東京, 237-272.
- 五利江重昭 (2002): MS - Excel を用いた混合正規分布のパラメータ推定. 水産増殖, **50** (2), 243-249.
- 浜口昌己・薄浩則・石岡宏子 (1997): アサリ漁場内の各種生物の相互作用. 水産工学, **3**, 201-211.
- 羽生和弘 (2015): 伊勢湾南部の保護水面におけるアサリ資源量の長期変動. 三重水研報, **24**, 19-36.
- 羽生和弘 (2016): 伊勢湾南部の保護水面におけるアサリの生残と成長. 三重水研報, **25**, 69-85.
- 羽生和弘 (2021): 2019 年度三重県におけるアサリの資源評価. 三重水研報, **27**, 30-39.
- 羽生和弘・国分秀樹・畑直垂・水野知巳・長谷川夏樹・石樋由香・渡部諭史・藤岡義三・日向野純也・井上隆彦・田中良男・工藤倫彰・山田充哉・南部亮元・桑原久

- 実 (2017): 伊勢湾 4 地区におけるアサリ資源量の推定と資源変動要因の抽出. 水産海洋研究, **81 (2)**, 110–123.
- 長谷川夏樹・藤岡義三・石樋由香・渡部諭史・日向野純也・水野知巳・畑直亜・西濱晃道・山川倫徳 (2017): 網袋を使った養殖用アサリの天然採苗の試み. 水産技術, **9 (3)**, 113–117.
- 長谷川夏樹・日向野純也 (2010): 伊勢湾におけるアサリの殻長—重量換算式. 水産増殖, **58 (1)**, 155–158.
- 長谷川夏樹・日向野純也・藤岡義三・石樋由香・水野知巳・丸山拓也・程川和宏・坂見知子・齊藤肇・南部亮元・桑原久実 (2012): 支柱式ノリ養殖施設によるアサリ稚貝の定着促進効果. 水産工学, **49 (2)**, 125–132.
- 日向野純也 (2014): アサリ垂下養殖の現状. 日水誌, **80 (1)**, 121.
- 生嶋登・齊藤肇・那須博史 (2012): アサリ稚貝の定着と生残を促進するための砕石散布と支柱柵設置の水力学的効果に関する干潟での野外実験. 水産技術, **5 (1)**, 75–86.
- 磯野良介・喜田潤・岸田智穂 (1998): アサリの成長と酸素消費量におよぼす高温の影響. 日水誌, **64 (3)**, 373–376.
- 伊藤龍星・小川浩 (1999): ネット被覆によるアサリ人工種苗の育成試験. 大分海水研セ調査研報, **2**, 23–30.
- 柿野純 (2006): アサリの減耗に及ぼす物理化学的環境の影響に関する研究. 水産工学, **43 (2)**, 117–130.
- Kleinhans, M. G. (2005): Phase diagrams of bed states in steady, unsteady, oscillatory and mixed flows. EU-Sandpit end-book, Ed. Leo van Rijn, Aqua Publications, Netherlands, paper Q.
- 小林豊・鳥羽光晴・川島時英 (2012): 被覆網を用いた春から夏季におけるアサリ人工稚貝干潟育成試験. 水産技術, **5 (1)**, 67–74.
- 松本才絵・淡路雅彦・日向野純也・長谷川夏樹・山本敏博・柴田玲奈・秦安史・櫻井泉・宮脇大・平井玲・程川和宏・羽生和弘・生嶋登・内川純一・張成年 (2014): 日本国内 6 地点におけるアサリの生殖周期. 日水誌, **80 (4)**, 548–560.
- 三重県水産研究所. (2011): 三重県アサリ資源管理マニュアル (改訂版). 42pp.
- 西村昭史・井上美佐 (2000): 魚類養殖漁場環境保全調査事業. 平成 11 年度三重科技センター水技セ事業報告, 178–182.
- Nychka, D., Furrer, R., Paige, J. and Sain, S. (2017): fields: tools for spatial data. doi: 10.5065/D6W957CT, R package version 9.7, URL: github.com/NCAR/Fields.
- R Core Team (2018): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- 齊藤英俊・池浦智史・河合幸一郎・今林博道 (2010): 広島県三津湾における放流アサリの生残に及ぼす被覆網の効果. 水産増殖, **58 (4)**, 525–527.
- 酒井明久・関口秀夫 (1992): 河口干潟における二枚貝類の後期浮遊幼生および着底稚貝の同定. 水産海洋研究, **56 (4)**, 410–425.
- 酒井敬一 (2000): 万石浦アサリ漁場におけるサキグロタマツメタガイの食害について. 宮城水研セ研報, **16**, 109–111.
- 佐藤善徳・捧一夫・木全裕昭 (1987): 浅海の底質の強熱減量測定法の改善. 東海区水研報, **123**, 1–13.
- 瀬川直治・服部克也 (1997): 伊勢湾小鈴谷干潟におけるツメタガイによるアサリの食害. 愛知水試研報, **4**, 41–48.
- 柴田輝和・土屋仁 (2002): 被覆網によるアサリ稚貝の高密度分布域の形成. 千葉水研セ研報, **1**, 71–76.
- 柴田輝和・早川美恵・須田隆志 (2001): 干潟での被覆網によるアサリ人工稚貝の中間育成. 栽培漁業技術開発研究, **28 (2)**, 109–114.
- 柴田輝和・石橋賢一 (1999): 被覆網によるアサリの保護・育成—冬季のアサリ減耗と対策. さいばい, **90**, 38–40.
- 水産庁 (2008): 干潟生産力改善のためのガイドライン. 206pp.
- 山口県 (2012): アサリ. 栽培漁業のてびき (改訂版), 95–107.
- 山内雄介 (2001): 冬季の東京湾盤洲干潟における浮遊砂生成機構および短期地形変動について. 土木学会論文集, **677/II-55**, 129–140.
- 全国沿岸漁業振興開発協会 (1997): 沿岸漁場整備開発事業増殖場造成計画指針 ヒラメ・アサリ編平成 8 年度版. 316pp.