

## 砕石基質の粒度組成がアサリの潜砂行動, 生残及び肥満度に与える影響

和地柚貴・武田和也・荒川純平・曾根亮太・谷川万寿夫

(2025年12月12日受付, 2026年2月6日受理)

### The influence of crushed stone grain size composition on burrowing behavior, survival rate and condition factor of Asari (Manila) clam, *Ruditapes philippinarum*

WACHI Yuki<sup>\*1</sup>, TAKEDA Kazuya<sup>\*1</sup>, ARAKAWA Jumpei<sup>\*2</sup>, SONE Ryota<sup>\*1</sup>, and TANIKAWA Masuo<sup>\*1</sup>

**Abstract:** This study investigated how the grain size of crushed stone substrates influences the burrowing behavior of the Asari (Manila) clam (*Ruditapes Philippinarum*) and evaluated the effectiveness of scattering these substrates for clams in laboratory and field experiments. In the laboratory experiment, clams placed on small grain size (No. 7 (grain diameter range: 2.5~5mm), No. 6 crushed stone (5~13mm) and native sediment (<2mm)) showed higher burrowing rate with shorter time than those in large grain size (No. 5 (13~20mm) and No. 4 crushed stone (20~30mm)). The condition factor of burrowed individuals was lower in treatments with small grain size and Mixed-size crushed stone (containing grain size from No. 7 to No. 4), and the result suggests that Mixed-size crushed stone allowed burrowing even for clams with relatively low condition. However, the shell length of clams may be a factor limiting the burrowing behavior of clams in Mixed-size crushed stone with large grain size. In the field experiment, although survival rates did not differ significantly among treatments, crushed-stone substrates raised the condition factor more rapidly and maintained it at a high level for longer period compared with native sediment, finally Mixed-size crushed stone remaining significantly higher at the end of the experiment. Hydrodynamic observations indicated that crushed stone substrates provided higher stability than native sediment. These results suggest that substrate with a wide grain size distribution such as Mixed-size crushed stone can reconcile improved burrowing performance for low-condition clam with high substrate stability, offering a practical approach for habitat enhancement of Asari clam under wave-exposed and food scarcity environments.

キーワード ; アサリ, 砕石, 粒度組成, 潜砂率, 生残率, 肥満度

アサリ (*Ruditapes philippinarum*) は, 日本沿岸の干潟生態系における重要な構成種であり, 沿岸漁業資源として高い経済的価値を有する。愛知県の海面漁業において, アサリは非常に重要な漁獲対象種であり, 2004年から2013年にかけては愛知県の海面漁業生産量の21%前後(11,867~16,063 t), 金額では27%前後(33~46億円)を

占めていた(農林水産省, 海面漁業生産統計調査: [https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen\\_gyosei/index.html](https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/kaimen_gyosei/index.html), 2025年12月4日)。しかし, 愛知県におけるアサリの漁獲量は2014年以降顕著に減少し, 2017年には1,635 tと直近のピークである2008年の19,278 tの1割以下にまで落ち込み, その後も低迷が続いている。ア

\* 1 愛知県水産試験場 (Aichi Fisheries Research Institute, Miya, Gamagori, Aichi 443-0021, Japan)

\* 2 公益財団法人愛知県水産業振興基金栽培漁業部 (Aichi Prefectural Sea Farming Center, Konakayama, Tahara, Aichi 441-3618, Japan)

サリ資源の減少要因としては、貧酸素水塊や食害など様々な要因が指摘されてきた。その一つに、波浪によりアサリが砂中から放出され、次第に衰弱して潜砂が不可能となり減耗することが指摘されており、特にアサリの活力が低下する秋冬期に顕著であるとされる。<sup>1)</sup> さらに、三河湾では栄養塩類やクロロフィル *a* 濃度の経年的な減少が確認されており、餌不足やアサリ肥満度の低下が資源減少につながっていることが指摘されている。<sup>2, 3)</sup> 特に、肥満度の低いアサリは潜砂率が低くなることが分かっており、<sup>4-6)</sup> 近年では肥満度が長期的に低下していることからアサリの潜砂行動に悪影響を及ぼし、波浪等による減耗がより生じやすい可能性も示唆される。<sup>3)</sup> このような状況に対し、粒径の大きい礫分画以上の碎石を敷設した漁場では、波浪等の物理的攪乱からアサリが保護されるため、生残率等が高まる効果があることが三河湾や豊前海などで明らかにされている。(例えば日比野ら<sup>7)</sup> 水産庁も「碎石を利用したアサリ漁場造成の手引き」(水産庁：[https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko\\_gyozyo/g\\_gideline/index.html](https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_gideline/index.html), 2025年12月4日)としてとりまとめ、本県はじめ三重県(伊勢湾)や千葉県(東京湾)では造成事業として実施され、効果も認められている。一方で、碎石覆砂では地盤が固まる可能性も指摘されており(水産庁、二枚貝漁場環境改善技術導入のためのガイドライン：<https://www.jfa.maff.go.jp/j/kenkyu/pdf/3-1.pdf>, 2025年12月4日)、底質の硬度が増すことで潜砂速度が低下するなどアサリの生息に不適となる可能性も報告されている。<sup>8, 9)</sup> 特に餌不足下において長期的にも肥満度の低下が見られる<sup>3)</sup> 近年の漁場環境においては、期待される効果が低くなる可能性も考えられる。そのため、アサリの餌料環境が良好ではない現状において、碎石等の礫分画の基質を用いたアサリ漁場造成の効果をより高める手法が求められている。

これまでの研究では、砂分画以下(中央粒径値<2 mm)での基質に着目したアサリの潜砂行動への影響については検討されてきた(例えば中山ら<sup>9)</sup>)。その結果では、中央粒径が小さく、淘汰度が高い(粒度範囲が広い)ほど底質の貫入抵抗が増大し、アサリの潜砂を阻害する可能性が示されている。<sup>9)</sup> これらの結果を基にすれば、粒径が大きいかつその範囲が規格化された碎石は潜砂を阻害しないことになるが、礫分画以上の碎石基質における粒度組成と潜砂行動との関係については十分に明らかにされていない。さらに、ダム貯水池や河川における自然堆積砂もアサリの現存量を高める上で効果がある干潟造成材とされるが、<sup>10)</sup> 砂から礫まで多様な粒径が混合しているのが一般的であり、粒径が混合した場合の機能性につ

いても評価することは、不足する造成材を持続的に確保する上でも重要な側面となる。

そこで本研究では、碎石基質の粒度組成がアサリの潜砂行動に与える影響を明らかにすることを目的として、粒度の異なる単粒度碎石とこれらを混合した碎石を用いた室内試験を実施した。また、室内試験の結果を踏まえ、野外試験を実施し、単粒度碎石及び複数規格を混合した碎石覆砂の有効性を検証した。

## 材料及び方法

### 室内試験

碎石基質の粒度組成がアサリの潜砂行動に与える影響を把握するため、複数の碎石基質を用いた潜砂試験を行った。試験は、愛知県水産試験場(Fig. 1)において2024年8月9日、8月26日及び9月30日の計3回実施した(Table 1)。供試したアサリは愛知県蒲郡市に位置する竹島周辺の漁場において採取し、試験の2~3日前に天然海砂を敷設した飼育槽で潜砂することを確認した個体のみを使用した。試験区には日本産業規格(JIS A 5001)に定める7号(粒径範囲:2.5~5 mm)、6号(5~13 mm)、5号(13~20 mm)及び4号(20~30 mm)の4種類の単粒度碎石を使用した碎石区及びこれらを同率で混合した碎石区を設定した(Table 2)。対照区には2 mm目合いのふるいを透過した天然海砂を用いた。試験はコンテナ(縦34 cm、横45 cm、高さ17 cm)に基質を7 cmの厚さで敷き詰め、濾過海水を基質上から5 cmの高さとなるように注水し、試験開始前に水温と塩分を測定し、各試験区にアサリ15個体を基質上に静置した。試験開始後、デジタルカメラ(RICOH製 WG-70)を使用して1分間隔で静止画を撮影し、90分間観察を行った。5, 10, 15, 30, 45, 60, 90分後の潜砂状況を目視で確認し、殻全体が基質内に位置していたものを潜砂個体、殻の一部でも基質上から出ていたものを非潜砂個体と判断して計数した。なお、潜砂率は以下の式にて算出した。

$$\text{潜砂率 (\%)} = \text{潜砂個体数} / \text{供試個体数} \times 100$$

試験終了後、潜砂個体及び非潜砂個体を回収し、それぞれの殻長、殻高、殻幅及び軟体部湿重量を測定した。以下の式に基づいて肥満度を算出した。

$$\text{肥満度} = \{ \text{軟体部湿重量 (g)} / [\text{殻長 (mm)} \times \text{殻高 (mm)} \times \text{殻幅 (mm)}] \} \times 10^5$$

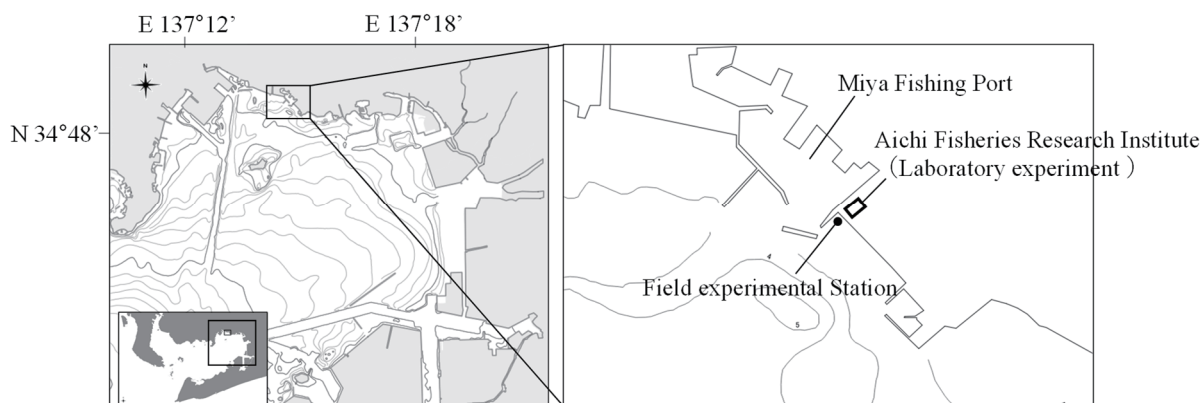


Fig. 1 Map showing the field experimental station near Miya fishing port in Mikawa Bay. The laboratory experiment was conducted at Aichi fisheries research institute.

Table 1 Summary of the laboratory measurements of three trials, including range of water temperature and salinity during each experiment, and condition factor and shell length of Asari clam used.

| Date              | Water temperature (°C) | Salinity  | Number of individuals | Condition factor | Shell length (mm) |
|-------------------|------------------------|-----------|-----------------------|------------------|-------------------|
| 9 August 2024     | 30.1~30.5              | 26.1~26.3 | 15inds each           | 9.5~14.7         | 23.4~37.7         |
| 26 August 2024    | 30.4~30.6              | 30.0~30.1 | 15inds each           | 5.8~14.3         | 25.0~38.9         |
| 30 September 2024 | 29.2~29.6              | 26.6~27.2 | 15inds each           | 5.6~12.0         | 23.6~34.6         |

Table 2 The grain diameter range and analyzed median grain diameter (D50) for each substrate type used in the laboratory experiment.

| Treatments                           | No. 7 crushed stone | No. 6 crushed stone | No. 5 crushed stone | No. 4 crushed stone | Mixed-size crushed stone                | control (native sediment) |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|---------------------------|
| grain diameter range                 | 2.5~5mm             | 5~13mm              | 13~20mm             | 20~30mm             | No. 7:No. 6:No. 5:No. 4 =1:1:1:1 weight | < 2mm                     |
| analyzed median grain diameter (D50) | 3.75mm              | 9mm                 | 16.5mm              | 25mm                | 16.25mm                                 | -                         |

## 野外試験

実際の海域でのアサリの生残等に対する砕石の有効性を検証するため、野外試験を実施した。試験は、2025年6月11日から同年8月22日まで愛知県蒲郡市地先(CDL+0.5 m)で実施した (Fig. 1)。試験には、室内試験で用いた基質の内、6号砕石、4号砕石及び混合砕石の3種類に加え、試験海域の基質を対照として用い、計4試験区 (6号砕石区、4号砕石区、混合砕石区、対照区) を設定した。各試験区とも基質をコンテナ (縦 37.5 cm, 横 35 cm, 高さ 13 cm) の上端まで充填した。また、コンテナ内を実海域に敷設された状態に近づけるため、野外試験に先立ち6月11日から6月27日までの期間、各試験区5個ずつ、計20個のコンテナを埋設し、馴致を行った

(Fig. 2)。埋設にあたっては、コンテナの上端が現地盤と同じ高さになるように設置した。埋設期間終了後、コンテナを現地盤から掘り起こし、埋設せずに現地盤上に再設置し試験を開始した。この際、試験区にはカラーペンで印を付けたアサリ30個体を1cmの深さで配置した。供試したアサリは、愛知県蒲郡市に位置する竹島周辺の漁場において採取した個体であり、平均殻長16.1mm、平均肥満度9.5であった。

試験区 (コンテナ) の回収は、7月10日、7月23日、8月8日、8月22日の計4回行い、岸側から1列ずつ回収した (Fig. 2)。回収したコンテナ内のアサリの生残個体数を計数し、試験区ごとの生残率を算出した。また、各個体の殻長、殻高、殻幅及び軟体部湿重量を測定し、

肥満度を算出した。なお、8月22日では、6号砕石区及び対照区のコンテナがそれぞれ1つ消失したため、残りの6区をすべて回収した。また、コンテナ設置期間中に台風等の大きな気象イベントは無かったため、各試験区における波浪による相対的な影響を評価できると考え、試験コンテナを回収した後ではあるが、2025年8月26日から同月29日まで小型メモリー電磁流向流速計（JFEアドバンテック製 INFINITY-EM）を試験区付近の海底に埋設して海底直上の流動環境を測定した。測定間隔は20分毎とし、各測定時には0.5秒の測定時間で600回測定した。取得した観測データは、TS-Editor ver. 4.6.5及びTS-Master ver. 6.6（川俣茂，2007；<https://www.vecto.r.co.jp/soft/dl/win95/business/se193021.html>，2025年12月4日）を用いて移流成分と変動成分に分離した。また、アサリ稚貝の移動限界判定エクセルファイルVer3.1<sup>11</sup>）を用い、流向流速データから海底のせん断応力を算出し、流動環境下における各基質の安定性を比較した。変動成分のせん断応力の計算には、変数として流速振幅の1/3有義成分（ $U_{1/3}$ ）を用いた。流向流速計観測時の水深は、三河港内で観測された毎時実測潮位から求めた。移動限界を算出する際に用いた堆積物の中央粒径は、6号砕石区、4号砕石区及び混合砕石区ではTable 2に記載した各基質における粒度の中央値とし、対照区では実測値である0.9 mmとした。また、アサリの殻長は6月27

日に測定した値（16.1 mm）を用いた。

### 統計解析

室内及び野外試験で得られた結果を基に、砕石基質の粒度組成がアサリの潜砂率、生残率及び肥満度に与える影響を統計的に評価した。室内試験では、アサリの潜砂率に対する試験区間の差異を検討するため、一般化線形混合モデル（GLMM）を用いて解析を行った。目的変数は潜砂个体数と非潜砂个体数をペアとして集計した2項データ（binominal data）で、二項分布に従うと仮定し、link関数はlogitを用いた。説明変数は経過時間（min）、試験区（treatment）及びそれらの交互作用とし、試験回次はランダム効果として考慮した。各説明変数については尤度比検定を行い、試験区間で有意差が認められた場合にはGLMMにより算出された推定平均値を用いて多重比較（Holm-Bonferroni法）を行った。次に、各試験区の潜砂群と非潜砂群の平均肥満度の差を検証するために、Mann-Whitney *U*検定を実施した。野外試験では、試験区間でのアサリの生残率を評価するため、GLMMを用いて解析を行った。目的変数は生残数と死亡数をペアとして集計した2項データ（binominal data）で、二項分布に従うと仮定し、link関数はlogitを用いた。説明変数は回収日（date）及び試験区（treatment）として、各試験区の設置位置はランダム効果として考慮した。各説明変数については尤度比検定を行った。試験区間の平均肥満度についてはKruskal-Wallis検定で比較し、有意差が認められた場合にはSteel-Dwass検定による多重比較を行った。以上の統計解析には、R version 4.5.2（R Core Team, 2025）を用いた。

## 結果

### 室内試験

#### (1) 潜砂率

3回の試験における平均潜砂率をFig. 3に示した。対照区では試験開始10分後から潜砂率の上昇が見られ、試験開始30分に44.4%、試験終了時には57.8%であった。7号砕石区、6号砕石区、4号砕石区及び混合砕石区では試験開始15分後から上昇し、試験開始30分には35.6%、33.3%、8.9%、22.2%となり、試験終了時にはそれぞれ66.7%、57.8%、22.2%、51.1%であった。一方、5号砕石区では試験開始30分後まで潜砂率の上昇は確認されず、試験終了時には31.1%であった。試験開始30分以降、7号砕石区、6号砕石区、混合砕石区及び対照区の潜砂率は、5号砕石区及び4号砕石区より高く推移した。GLMMによる解析の結果、潜砂率は経過時間と試験区で有意差が認められた（Table 3）。また、試験区間の推定平

| onshore side              |                           |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| No. 6 crushed stone       | Mixed-size crushed stone  | No. 4 crushed stone       | control (native sediment) |
| 10-Jul.                   | 10-Jul.                   | 10-Jul.                   | 10-Jul.                   |
| control (native sediment) | No. 6 crushed stone       | Mixed-size crushed stone  | No. 4 crushed stone       |
| 23-Jul.                   | 23-Jul.                   | 23-Jul.                   | 23-Jul.                   |
| No. 4 crushed stone       | control (native sediment) | No. 6 crushed stone       | Mixed-size crushed stone  |
| 8-Aug.                    | 8-Aug.                    | 8-Aug.                    | 8-Aug.                    |
| Mixed-size crushed stone  | No. 4 crushed stone       | control (native sediment) | No. 6 crushed stone       |
| 22-Aug.                   | 22-Aug.                   | 22-Aug.                   | ND                        |
| No. 6 crushed stone       | Mixed-size crushed stone  | No. 4 crushed stone       | control (native sediment) |
| 22-Aug.                   | 22-Aug.                   | 22-Aug.                   | ND                        |
| offshore side             |                           |                           |                           |

Fig. 2 Layout of field experimental plots (upper) and sampling date (lower) from 27 June to 22 August 2025 in field experiment. ND indicates no data due to loss of the experimental plots by runoff.

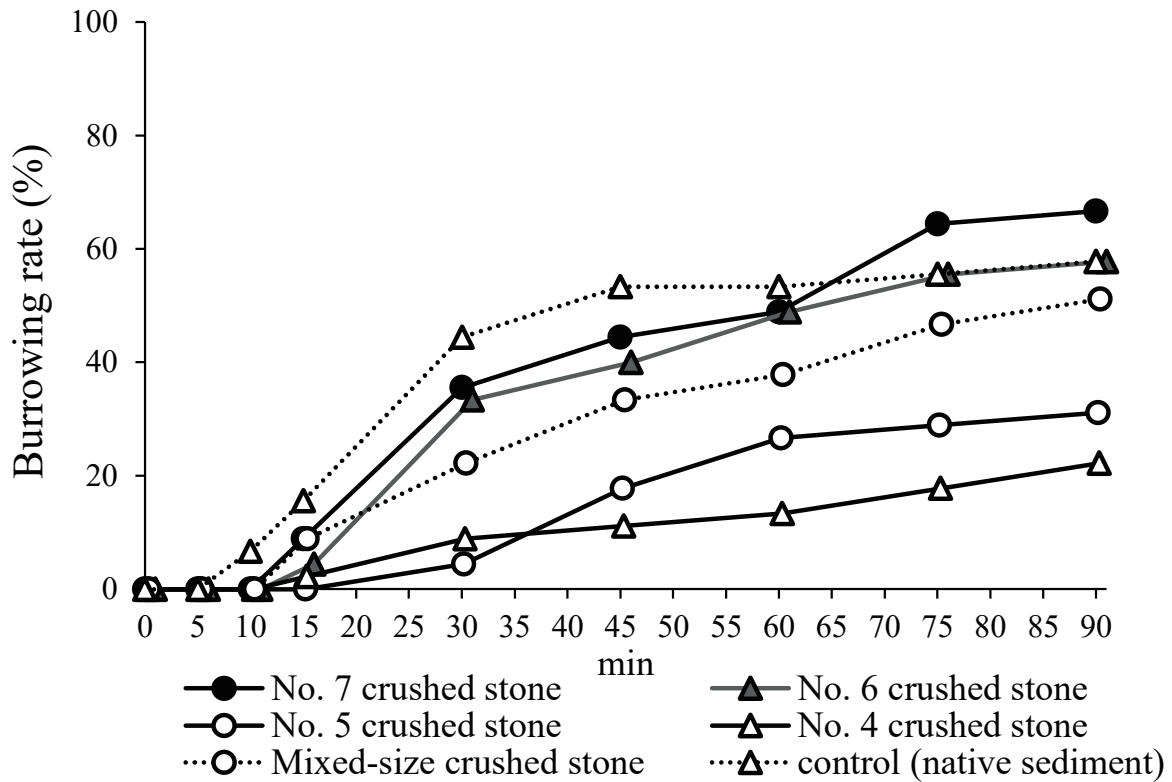


Fig. 3 Time series of the mean burrowing rate of clams among sediment grain size during the laboratory experiment.

Table 3 Result of likelihood ratio (LR) test with a generalized linear mixed model examining the effects of min, treatment, and those interaction on burrowing rate in the laboratory experiment.

| Variable               | df | LR $\chi^2$ | <i>p</i> -value |
|------------------------|----|-------------|-----------------|
| min                    | 1  | 540.84      | < 0.01          |
| treatment              | 5  | 157.13      | < 0.01          |
| min $\times$ treatment | 5  | 4.67        | 0.46            |

均値について多重比較した結果 (Fig. 4), 4号砕石区及び5号砕石区は7号砕石区, 6号砕石区, 混合砕石区及び対照区より, 混合砕石区は対照区より低かった (Holm-Bonferroni test,  $p < 0.01$ ).

#### (2) 肥満度

3回の試験における潜砂個体と非潜砂個体の平均肥満度を Fig. 5 に示した。7号砕石区, 6号砕石区, 5号砕石区, 4号砕石区及び対照区では, 潜砂個体の肥満度が非潜砂個体より高い傾向が見られ, 7号砕石区 (Mann-Whitney  $U$  test,  $p < 0.05$ ) 及び4号砕石区 (Mann-Whitney  $U$  test,  $p < 0.01$ ) では有意差が認められた。一方, 混合砕石区では潜砂個体の肥満度と非潜砂個体に差は見

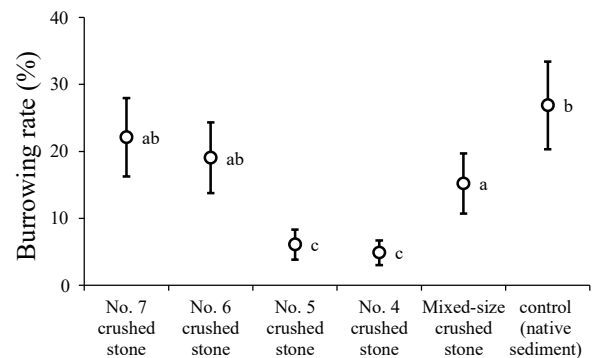


Fig. 4 Result of Holm-Bonferroni adjusted pairwise comparison of burrowing rates among treatments based on GLMM-estimated marginal means in the laboratory experiment. Each value denotes the mean with standard deviation indicated by a vertical bar. Values identified with the same roman letter are not significantly different. (Holm-Bonferroni method,  $p < 0.01$ ).

られなかった (Mann-Whitney  $U$  test,  $p = 0.75$ )。7号砕石区, 6号砕石区, 5号砕石区及び4号砕石区の中央粒径と潜砂個体の平均肥満度, 及び全潜砂個体データから得た回帰直線, 並びにその線形回帰から推定された95%信頼

区間を Fig. 6 に示した。なお Fig. 6 において、混合碎石区の平均肥満度は別プロットとし回帰からは除いている。各碎石区の中央粒径は基質粒度の中央値を用いた (Table 2)。碎石の中央粒径が大きくなるほど、潜砂個体の肥満度が高くなる傾向が見られた。一方、混合碎石区の平均肥満度は、7 号碎石区から 4 号碎石区を用いた 95%信頼区間を含む線形回帰の予測値より低かった。

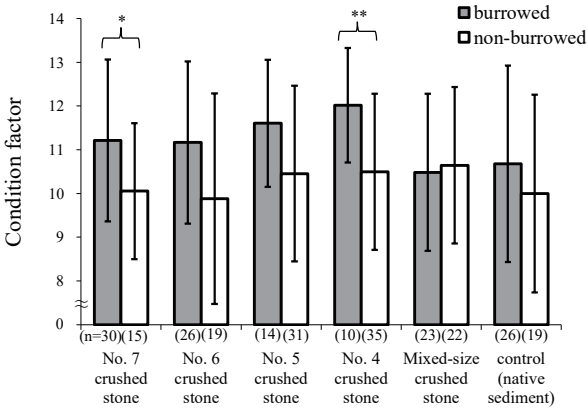


Fig. 5 Comparison of mean condition factor between burrowed and non-burrowed clams under different sediment grain size in the laboratory experiment. Error bars show standard deviation. \*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$  (Mann-Whitney  $U$ -test).

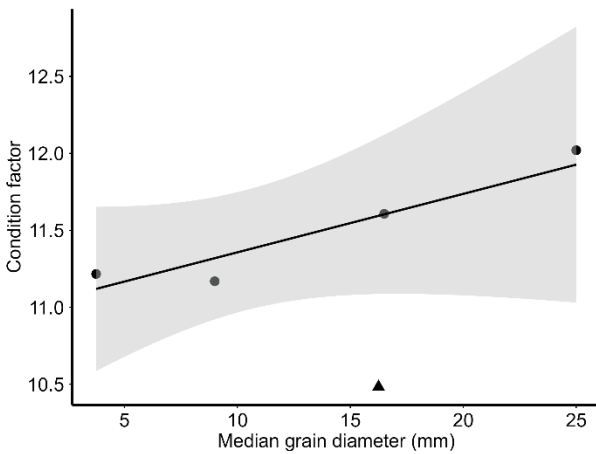


Fig. 6 Condition factor of burrowed clams in relation to median grain diameter of crushed stone in the laboratory experiment. Solid circles and triangle symbol indicate the mean condition factor of No. 4-7 crushed stone treatments and the Mixed-size crushed stone treatment, respectively. The straight line and the gray dashed band represent regression line for No. 4-7 crushed stone and 95% confidence interval estimated those linear regression, respectively.

### (3) 殻長

3 回の試験における潜砂個体と非潜砂個体の平均殻長を Fig. 7 に示した。混合碎石区では、潜砂個体の殻長が非潜砂個体より低かった (Mann-Whitney  $U$  test,  $p < 0.05$ )。一方、混合碎石区以外の試験区では潜砂個体の殻長と非潜砂個体に差は見られなかった (Mann-Whitney  $U$  test,  $p = 0.23 \sim 0.97$ )。

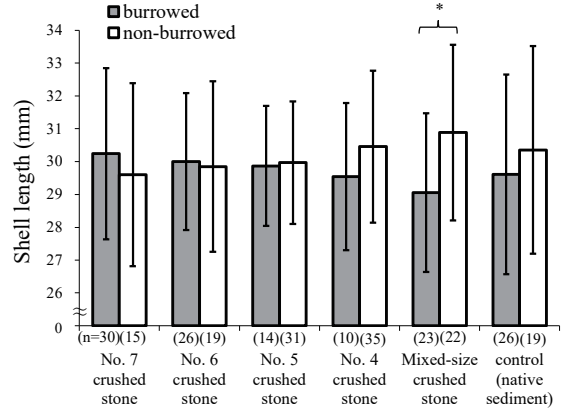


Fig. 7 Comparison of mean shell length between burrowed and non-burrowed clams under different sediment grain size in the laboratory experiment. Error bars show standard deviation. \*  $p < 0.05$  (Mann-Whitney  $U$ -test).

### 野外試験

#### (1) 生残率

各試験区の生残率の推移を Fig. 8 に示した。なお、8 月 22 日の 4 号碎石区及び混合碎石区の生残率及び肥満度は、回収した 2 コンテナの平均値とした。6 号碎石区で

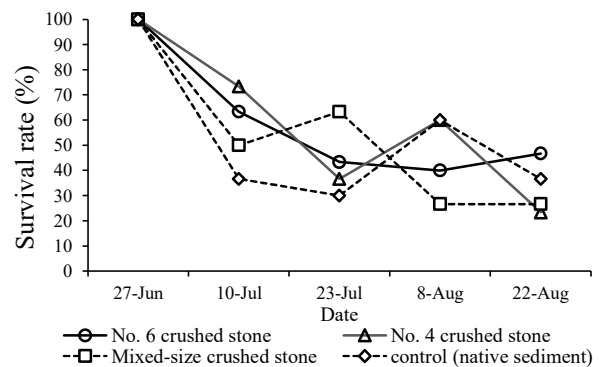


Fig. 8 Survival rate of clams among different sediment grain size on each sampling date in the field experiment from 27 June to 22 August 2025. Each Value in No. 4 and Mixed-size crushed stone treatments on 22 August denotes the mean values calculated from two sampled containers.

は7月10日に63.3%，7月23日に43.3%まで低下し，その後は横ばいで推移し，8月22日には46.7%であった。4号砕石区では7月10日に73.3%と4区の中で最も高かったが，7月23日に36.7%へ低下し，8月8日には60.0%と高かったが，8月22日には23.3%まで低下した。混合砕石区では7月10日に50%，7月23日には63.3%と高かったが，その後は低く推移し，試験終了時には26.7%であった。対照区では7月10日に36.7%と4区の中で最も低い値であった。8月8日に60.0%と一時的に高い値を示したが，8月22日には36.7%となった。GLMMによる解析の結果，回収日には有意差が見られたが，試験区間の有意な差は見られなかった (Table 4)。

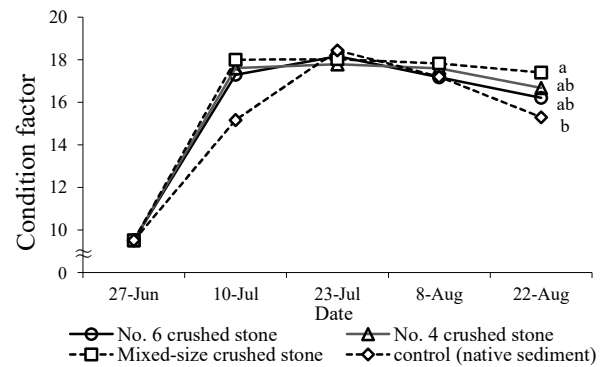
**Table 4** Result of likelihood ratio (LR) test with a generalized linear model examining the effects of date and treatment on survival rate in the field experiment.

| Variable  | df | LR $\chi^2$ | p-value |
|-----------|----|-------------|---------|
| date      | 3  | 15.79       | < 0.01  |
| treatment | 3  | 2.31        | 0.51    |

## (2) 肥満度

各試験区の平均肥満度の推移を Fig. 9 に示した。7月10日には，6号砕石区，4号砕石区及び混合砕石区はそれぞれ17.3，17.6，18.0と，試験開始約2週間で対照区より速やかに上昇する傾向が認められ，8月22日には，それぞれ16.2，16.7，17.4と高く維持された。対照区では7月10日に15.2，7月23日には18.4と他区と同程度まで上昇したものの，その後若干低下し，8月22日には15.3であった。6号砕石区，4号砕石区及び混合砕石区の砕石区はいずれも，対照区に比べ肥満度の上昇が早く，長い期間維持される傾向が見られた。8月22日には混合砕石

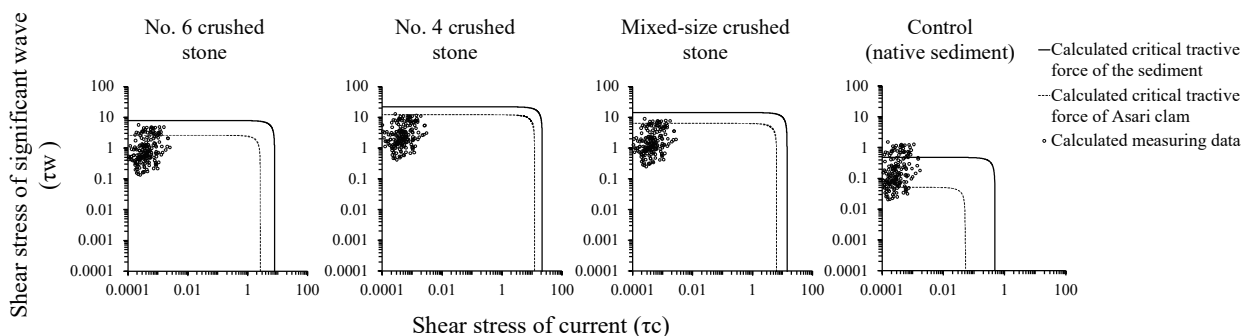
区が対照区より高い肥満度を示した (Steel-Dwass test,  $p < 0.01$ )。



**Fig. 9** The mean condition factor of clams among different sediment grain size on each sampling date in the field experiment from 27 June to 22 August 2025. Each Value in No. 4 and Mixed-size crushed stone treatments on 22 August denotes the mean values calculated from two sampled containers. Values identified with the same roman letter are not significantly different. \*  $p < 0.01$  (Steel-Dwass test) .

## (3) 波浪環境

流動観測により得られた底面せん断応力と推定した供試アサリ及び基質の限界せん断応力を Fig. 10 に示した。砕石の中央粒径が大きくなるほど基質の移動限界せん断応力が高くなる傾向が見られた。試験海域の波浪環境は，移流成分より変動成分が主体であることが確認された。また，観測データのうち，アサリの限界せん断応力を越える変動成分の割合は，6号砕石区，4号砕石区，混合砕石区，及び対照区でそれぞれ17.1，0.5，6.0，84.8%であった。同様に，基質の限界せん断応力を越える変動成分の割合は，砕石区 (6号砕石区，4号砕石区，混合砕石



**Fig. 10** Diagrams show the shear stress of current and significant waves, with the critical tractive force of different sediment grain size and experimental clams in the field experimental station from 26 to 29 August 2025.

区)では0%であったのに対し、対照区では18.9%であった。

## 考 察

### 砕石基質の粒度組成がアサリの潜砂行動に与える影響

室内試験の結果、今回用いた砕石規格のうち粒度の小さい基質(7号砕石区, 6号砕石区)及び対照区では潜砂率が高く、短時間でアサリが潜砂することが確認された一方で、より粒度の大きい基質(5号砕石区, 4号砕石区)では潜砂率が低かった(Figs. 3, 4)。既報によれば、砂分画以下では中央粒径が大きいほど底質の貫入抵抗が小さくなり潜砂しやすくなるとされるが、<sup>9)</sup>中央粒径4mmの礫では砂分画に比べ潜砂率が低くなり、<sup>12)</sup>礫分画では粒度が大きいと貫入抵抗に比例するせん断抵抗力が高くなる。<sup>13)</sup>これらの知見は、シルトから砕石に至るまでの基質粒度の変化と潜砂率の応答は非線形の関係であることを示唆しており、一定の粒度より大きい礫ではアサリの潜砂行動が阻害される可能性がある。本研究の結果からは、中央粒径9mm(6号砕石)以下であれば、対照とした砂泥(中央粒径2mm以下)と比較してもアサリの潜砂を阻害することはないと考えられた。一方で、5号や4号砕石が含まれる混合砕石区の潜砂率は、7号砕石区や6号砕石区よりはやや低いものの有意な差は見られなかった(Figs. 3, 4)。また、混合砕石区のみで、潜砂個体の殻長は非潜砂個体に比べ有意に小さいという特徴が見られた(Fig. 7)。これらの理由として、殻長10~30mmの範囲では小型ほど潜砂率が高いことに加え、<sup>12)</sup>大粒径砕石の間に分布する小粒径基質への潜砂は小型個体のほうが物理的な制限を受けにくかったことが推測される。

混合砕石区を除くすべての砕石区及び対照区では、潜砂個体の肥満度は非潜砂個体より高くなる傾向が見られた(Fig. 5)。これまでも肥満度の低いアサリほど潜砂率が低いことが分かっているが、<sup>4-6)</sup>基質に砕石を用いた本試験でも同様の結果となった。また、基質の粒度が大きくなるにつれ、潜砂行動を行うためにより高い肥満度が必要となると考えられた(Fig. 6)。これらのことは、潜砂にはエネルギーを要し、基質の粒度が大きいほどその必要量が大きくなることを示唆している。一方、混合砕石区では潜砂個体の肥満度が他試験区に比べ低い傾向が見られたことから(Fig. 6)、粒度分布の広い砕石基質は低肥満度の個体でも潜砂しやすい可能性が考えられた。砂分画以下での基質に着目したアサリの潜砂行動については、中央粒径が小さく、淘汰度が高い(粒度範囲が広い)ほど底質の貫入抵抗が増大し、アサリの潜砂を阻害する可能性が示されている。<sup>9)</sup>この知見に基づけば、混

合砕石区の潜砂率は、中央粒径の近い5号砕石区以下まで低下すると予想されるが、本試験では混合砕石区の潜砂率は有意に高く(Fig. 4)、肥満度が低くても潜砂が可能であった(Fig. 5)。アサリは潜砂の際には最初に斧足を底質内に挿入して自らの体を倒立させており<sup>14)</sup>、この体の倒立には相当なエネルギーを必要とすると推測される。粒度の大きい5号や4号砕石が含まれる混合基質では表面に凹凸が形成され、倒立姿勢がとりやすくなることでエネルギー消費が抑えられ、さらに、大きい粒度の基質の間に小さい粒度の基質が分布することも潜砂促進の要因と推察される。

以上のことから、粒度分布が広い混合砕石は粒径の大きい基質の影響を緩和し、肥満度によるアサリの潜砂能力の差を軽減することが示唆された。慶野ら<sup>6)</sup>は、肥満度及びグリコーゲン含量の低下が潜砂不能や這い出しを引き起こし、冬季波浪による減耗に影響を及ぼすと指摘している。低肥満度のアサリでも短時間で潜砂が可能であることは、基質からの露出時間を短縮し、波浪による洗掘や捕食リスクを低減する上で重要である。一方、粒度と殻長の大きさとの関係が潜砂制限の要因と考えられ、今後はアサリの貝殻の形態的特性を考慮した検討も必要であると考えられる。

### 野外試験における混合砕石の有効性の検証

野外試験における各試験区の生残率は、全ての試験区において7月10日までに大きく低下し、7月23日以降は概ね安定しており(Fig. 8)、試験全体を通じて大きな差は認められなかった(Table 4)。初期の生残率の低下について、試験開始時のアサリの平均肥満度は9.5であり、減耗が起きる可能性があると考えられる肥満度12(水産庁、干潟生産力改善のためのガイドライン：[https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko\\_gyozyo/g\\_gideline/index.html](https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_gideline/index.html), 2025年12月4日)を大きく下回っていたことから、この期間に低肥満度に起因した減耗が生じていたと推察される。その他の生残率の変動要因として環境条件の影響も考えられるが、調査地点近傍で取水した水産試験場の海水の1日平均水温は、6月27日から7月10日は26.0~28.9℃と概ね適水温範囲内<sup>15)</sup>であり、また貧酸素水塊が湧昇する苦潮も確認されなかったことから、これらの環境要因が生残率に大きく影響した可能性は低いと考えられた。室内試験においても、初期の低肥満度に起因するへい死が一定程度発生した後、肥満度の回復に伴い生残率の低下が抑制された事例が報告されている<sup>16)</sup>。肥満度は混合砕石区を含む砕石区で早期に上昇し、7月23日以降には肥満度が安定したため、各試験区の生残率が安定した可能性がある。一方で、流動環境

の観測結果から、アサリの移動限界を超えた観測値は、対照区では全体の80%を越えていたが、砕石区では中央粒径が大きいほどその割合は小さくなる傾向が見られ、混合砕石区では10%未満と6号砕石区と4号砕石区との中間的な値を示した (Fig. 10)。また、実際の野外試験期間において、対照区では4回の回収いずれにおいても一部基質の流出が確認されたのに対し、4号砕石区及び混合砕石区では基質の流出は確認されなかった。これらのことから、調査期間中は対照区のアサリや基質の移動限界せん断応力を超える波浪が恒常的に生じていたが、混合砕石区を含む砕石区では移動限界を下回っていたと推測された。7月10日の生残率は対照区が最も低く (Fig. 8)、対照区における生残率の低下は初期の低肥満度に加え、波浪の影響を受けた可能性が高い。一方、砕石区が生残率は対照区より高い傾向が見られ (Fig. 8)、初期の低肥満度によるへい死は防げないものの、基質安定性による波浪の影響を抑制したと考えられた。

野外試験において混合砕石区、単粒度砕石区及び対照区が生残率には差は見られなかったものの (Fig. 8)、混合砕石区と対照区の肥満度には差が認められたことから (Fig. 9)、混合砕石においてもこれまで報告されている単粒度を用いた砕石覆砂 (例えば日比野ら<sup>7)</sup>) による肥満度を高める効果が見込めるものと考えられた。柴田ら<sup>1)</sup> は、摂餌量が一定であればアサリの運動量が小さいほど肥満度が高くなると報告している。すなわち、混合砕石区を含む砕石基質は、基質の安定により波浪に対する攪乱を直接的に抑制するとともに、アサリのエネルギー消費を軽減し、<sup>17)</sup> 肥満度の速やかな回復や維持を通じて生残に間接的にも寄与する可能性が高いと考えられた。

#### おわりに

室内試験及び野外試験の結果を総括すると、小さい粒径の砕石は流動に対しても安定性が高くかつ潜砂しやすい一方で、大きい粒径の砕石は安定性が極めて高くなるものの潜砂率が低く、潜砂にはより高い肥満度を要することが示唆された。これらのことから、砕石基質においてアサリの潜砂率と基質安定性は基本的にトレードオフの関係にあると考えられた。一方で、粒度組成の広い混合砕石では肥満度の低いアサリでも潜砂しやすいことが示唆され、基質安定性との両立が示唆された。さらに、単粒度砕石と同程度以上のアサリの肥満度の維持にも寄与する可能性が示された。これらのことから、粒度分布の広い砕石基質の利用は低肥満度個体の潜砂を阻害せず、波浪による攪乱から保護する有効な手法となり得る可能性が考えられた。また、ダム貯水池や河川では、流域地質や洪水時の供給土砂量、流況の変化により、多様な粒

径をもつ砂礫が大量に堆積しており、これが治水・利水機能の低下を招くことから、除砂・排砂による適切な管理が不可欠となっている。愛知県では国土交通省と連携してダムや河川の堆積砂を活用した干潟・浅場造成の取組が進められている (愛知県: <https://www.pref.aichi.jp/soshiki/suisan/higata.html>, 2025年12月4日)。本研究により、これらの混合粒径の自然堆積砂の漁場造成への利用は、長期的な肥満度低下が認められる本県海域のアサリの漁場造成にとっては、合理的な手法になると考えられた。

「砕石を利用したアサリ漁場造成の手引き」(水産庁: [https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko\\_gyozyo/g\\_gideline/index.html](https://www.jfa.maff.go.jp/j/gyoko_gyozyo/g_gideline/index.html), 2025年12月4日) では、6号砕石または7号砕石の使用が推奨されているが、これは漁業者が通常使用する漁具が使用できるようにするためである。この点において、本研究で用いた混合砕石基質では漁具利用の支障の可能性が残るため、今後は混合する砕石基質の粒度組成を検討していくことも課題である。また、本研究では試験区ごとの波浪影響や捕食圧などの環境要因を十分に制御できていない点も課題であり、今後は現場の波浪条件や漁場環境を踏まえた砕石基質の組み合わせや覆砂厚などの応用の検討を進めるとともに、河川堆積砂などを含めた様々な造成材の活用可能性についても検討することが重要である。

#### 要約

砕石基質の粒度組成がアサリの潜砂行動に与える影響を明らかにするため、粒度の異なる単粒度砕石とこれらを混合した砕石を用いた室内試験を実施した。また、砕石覆砂の有効性を検証するため、野外試験を実施した。室内試験では、粒度の小さい基質 (7号・6号砕石及び砂) は粒度の大きい基質 (5号・4号砕石) よりアサリの潜砂率が高く、短時間で潜砂する傾向が見られた。また、潜砂個体の肥満度は粒度の小さい基質と混合砕石で低い傾向が見られ、特に混合砕石では低肥満度の個体でも潜砂しやすい可能性が考えられた。一方で、大粒径砕石を含む混合砕石では、アサリの殻長が潜砂の制限要因となる可能性が推測された。野外試験では、試験区間の生残率に差は見られなかったが、砕石区は対照区に比べて肥満度が早期に上昇し高く維持され、流動に対する安定性も高い傾向が見られた。これらのことから、粒度分布の広い砕石基質の利用は、低肥満度のアサリの潜砂を阻害せず、アサリの餌料環境が良好ではない現状においても波浪による攪乱から保護する有効な手法となり得る可能性が考えられた。

## 謝 辞

本稿を改善するにあたり、国立研究開発法人水産研究・教育機構の井上誠章氏、愛知県農業水産局水産課の日比野学氏には有益なご助言を賜った。ここに記して深く感謝申し上げます。

## 文 献

- 1) 柴田輝和・柿野 純・村上亜希子 (1997) 冬期の漁場における砂の流動に対するアサリの定性ならびに餌料量・運動量とアサリの活力との関係. 日本水産工学会誌, 33 (3), 231-235.
- 2) 蒲原 聡・芝 修一・鶴島大樹・鈴木輝明 (2021) 三河湾のアサリ *Ruditapes philippinarum* の成育と全窒素・全リン濃度の経年変化との関連. 水産海洋研究, 85 (2), 69-78.
- 3) 服部宏勇・松村貴晴・長谷川拓也・鈴木智博・黒田拓男・和久光靖・田中健太郎・岩田靖宏・日比野学 (2021) 愛知県内アサリ漁場における秋冬季のアサリ肥満度の変動と減耗. 愛知水試研報, 26, 1-16.
- 4) 柿野 純・鳥羽光晴・兼子昭夫・深山義文 (1992) 東京湾木更津地先における冬季のアサリへい死の特徴. 千葉水試県報, 50, 21-30.
- 5) 市原聡人 (2023) 異なるアサリの肥満度が潜砂行動に及ぼす影響. 愛知水試研報, 28, 41-43.
- 6) 慶野英生・杉山清泉・西沢 正・鈴木輝明 (2005) 冬季波浪時におけるアサリの潜砂行動とエネルギー消費過程に関する実験的研究. 水産工学, 42 (1), 1-7.
- 7) 日比野学・松村貴晴・服部宏勇・長谷川拓也・阿知波英明・石樋由香・三輪正毅 (2021) 三河湾におけるアサリの漁場造成手段としての碎石覆砂の効果と環境要因との関連. 愛知水試研報, 26, 17-30.
- 8) 阿久津孝夫・山田俊郎・佐藤 仁・明田定満・谷野賢二 (1995) アサリの生息と底質の硬度, 粒度との関係について. 開発土木研究所月報, 503, 22-30.
- 9) 中山威尉・福田裕毅・秦 安史・阿部英治・櫻井 泉 (2009) 底質の貫入抵抗がアサリの潜砂行動に及ぼす影響. 日本水産工学会誌, 46 (1), 29-36.
- 10) 本田是人・青山裕晃・和久光靖・向井良吉・石田基雄 (2011) 人工干潟域の基盤材料としてのダム堆積砂の適正評価. 愛知水試研報, 16, 9-19.
- 11) 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所 (2009) 敷設材によるアサリ稚貝の定着促進に関する評価方法について. 37.
- 12) 高橋清孝・佐藤陽一・渡辺 競 (1986) アサリの生存限界に関する実験的検討. 宮城水試研報, 11, 44-58.
- 13) 横山雄三・森 芳信・梅村 順・原 勝重 (2003) 相似粒度に調整した礫質材料のせん断特性に及ぼす粒径と粒子形状の影響. 地盤工学研究発表会発表講演要旨集, 547-548.
- 14) 佐々真志・渡部要一 (2007) アサリの潜砂限界強度について. 海岸工論文集, 54, 1196-1200.
- 15) 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. 日本水産学会誌, 64 (3), 373-376.
- 16) 和地柚貴・鈴木智博・長谷川圭輔・荒川純平・曾根亮太 (2026) 飼育実験による肥満度と給餌条件がアサリの生残や産卵に与える影響. 愛知水試研報, 31, 93-95.
- 17) Shindo A, Hibino M (2025) Review of the decline in Asari (Manila) clam (*Ruditapes philippinarum*) stocks and contributing factors in Mikawa Bay, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 317: 109207.