

原著論文

アサリ稚貝の着底と生残を促進するための碎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

生嶋 登^{*1}・齊藤 肇^{*2}・那須博史^{*3}

A Field Experiment in a Tidal Flat on Hydrodynamic Effects of Scattering Artificial Gravels and Setting Up Fences That Enhance Settlement and Survival of Juvenile Short-neck Clam *Ruditapes philippinarum*

Noboru IKUSHIMA, Hajime SAITO and Hirofumi NASU

To compare the hydrodynamic effects of scattering gravel and setting up fences to enhance the settlement and survival of juvenile short-neck clam *Ruditapes philippinarum*, field experiments were conducted for two years in a tidal flat along the Ariake Sound, Kumamoto, Japan. The bulk of the gravel was quickly removed from the experimental plot by waves and covered with sediment, while less gravel was moved in another plot shaded behind the fence. Factorial analyses demonstrated that the shading treatment with the fence had significantly positive effects on juvenile abundance, while the capping treatment with gravel had limited effects. The critical shear stress of the substrate decreased as the gravel within it was removed and/or buried followed by a decline in the median diameter of the substrate. In the plot shaded by the fence, the shear stress less frequently exceeded the critical level of gravel and juveniles than in the plot without the fence. In practice, the settlement and survival of juveniles would be improved by installing fences in the open tidal flat.

2011年10月3日受付, 2012年3月9日受理

序 論

熊本県におけるアサリ *Ruditapes philippinarum* の漁獲量は、1977年にそれまでの最大となる65,732トンを記録したが、1997年以降は急激に減少し、1,009～6,877トンで増減を繰り返している。このため熊本県は、1987～2004年の間に約50億円を投入して覆砂や作潒によるアサリ漁場の造成事業を推進した¹⁾。特に、干潟の底質改善と地盤安定を目的として海砂による覆砂が数多く実施され、その中には、覆砂後10年間にわたり、周辺漁場と比較して多くのアサリ稚貝が出現する増殖効果が確認された成功事例もある²⁾。これを受けて、アサリ増殖

のため覆砂を要望する漁業者の声は強いが、近年、海砂の大量採取は周辺海域の生態系へ悪影響を及ぼすとの懸念から、海砂の調達が難しくなっており、海砂と同等の効果を期待できる他の覆砂材を見出すことが急務となっている。

海砂以外の覆砂材の開発では、高炉水砕スラグの有効性と問題点が報告されている³⁾。また、碎石等の石材を干潟に散布することにより、アサリ稚貝の着底促進効果が見られた事例⁴⁾、アサリ初期稚貝が碎石へ付着することで減耗が軽減される効果を示唆した事例⁵⁾、人工転石帯で多くのアサリ初期稚貝が出現した事例⁶⁾などが報告されている。ただし、石材の散布によって生じる海底

*1 熊本県水産研究センター

〒869-3603 熊本県上天草市大矢野町中2450-2

Kumamoto Prefectural Fisheries Research Center, 2450-2 Naka, Ooyano, Kamiamakusa, Kumamoto 869-3603, Japan

ikushima-n@pref.kumamoto.lg.jp

*2 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所

*3 熊本県水産振興課

の流動条件の変化を測定し、同時に稚貝の出現状態を石材の散布直後から長期にわたって調査した事例は殆どなかった。

一方、全国各地の干潟のアサリ漁場では、竹などの遮蔽物の設置により波浪を緩和してアサリ稚貝の定着を促進する手法の開発が進められており、熊本県でも同様の目的で樹脂製の棒材を林立させる大規模な野外実験が行われたが、その効果を環境条件の変化との関係から調べ、碎石散布の効果と比較した研究事例はなかった。

そこで本研究では、碎石の散布と棒材の林立（以後、支柱柵と表記する）がアサリ稚貝の定着を促進する効果、また、定着後のアサリ稚貝の減耗を軽減する効果を主として水力学観点から明らかにすることを目的として、干潟での野外実験を行った。

方 法

実験区の造成 2006年8月、熊本県宇土市の緑川河口域に位置する長浜地区の地先（D.L.+0.3m）に実験区を造成した（図1）。実験区には、①5mm大（中央粒径3.75mm、比重2.64g/cm³）の碎石を厚さ20cmになるよう散布した碎石区（沿岸方向10m×岸沖方向20m）、②波・流れを緩和するためFRP製のノリ養殖用支柱（直径42mm、長さ6m）または孟宗竹等の棒材（直径150～200mm程度、長さ約6m）を林立させて支柱柵とした支柱区、③碎石と支柱を複合させた碎石+支柱区、④何も設置しない無処理区を約30mの間隔で沿岸と平行に並列させて設置した。支柱柵は15～20cm程度の間隔で、満潮時に必ず施設の一部が水面上に出るように設置し、2006年8月に孟宗竹、2007年5月に孟宗竹外縁にノリ養殖用支柱を使用した。また、無処理区には近傍

の実験区からアサリ等生物が拡散あるいは移動してくる可能性があることから、碎石区から南西方向へ約200m離れた場所に対照区を設けた。実験区の造成後月1回の頻度で、目視により各区の施設、材質の変化の状況を調べた。

アサリ生息状況調査 実験区ごとに殻長1mm未満と殻長1mm以上に分けて以下のようにアサリ稚貝を採集した。

1. **殻長1mm未満** 2007年2月19日から2008年12月12日までの間でアサリ浮遊幼生の主な着底期にあたる4月～8月および10月～2月の任意月の干潮時に殻長1mm未満のアサリを採集した。採集地点は各実験区の中に3または5箇所を無作為に配置した。次いで、各採集地点の近傍から無作為に場所を選択し、内径29mmの塩化ビニール製円筒で深さ約2cmまでの堆積物を3点採取し、それらを混合して1標本とした。標本は0.125mm目の篩でふるい分け、篩上に留まった稚貝の中からモノクローナル抗体を用いた蛍光抗体法⁷⁾⁻⁹⁾でアサリを同定し、個体数の計数と殻長の計測を行った。

2. **殻長1mm以上** 2006年12月5日から2008年12月12日まで、ほぼ毎月1回干潮時に殻長1mm以上のアサリを採集した。採集地点は各実験区の中に無作為に4箇所を選んで配置した。次いで、各採集地点の近傍約1m以内の範囲から無作為に選んだ場所で、ステンレス製方形枠（縦10×横10×高さ10cm）を用いて4点の堆積物を採取し、それぞれを1標本とした。ただし、2006年12月と2007年2月の採集では、4点を混合し1標本とした。標本は個別に1mm目の篩でふるい分け、ローズベンガルを添加した10%中性ホルマリンで固定して実験室に持ち帰った。実体顕微鏡を用いて標本からアサ

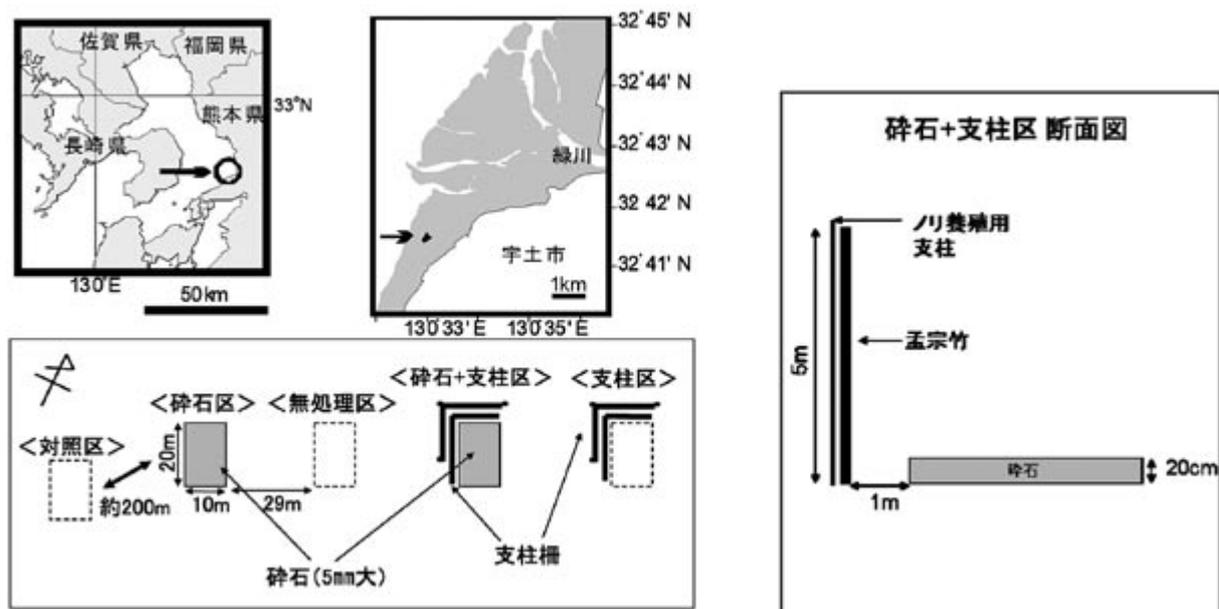


図1. 実験場所と実験区の配置

りを分別し、個体数の計数と殻長の計測を行った。なお、殻長頻度分布に基づき、実験区造成以前から生息していたと判断される大型の個体は計数から除外した。

また、2007年5月以降、碎石区では波による移動で散布場所での碎石の量が少なくなったため、碎石が移動、集積した場所の中央付近で各種の採集調査を行った。

碎石・支柱柵による効果の解析 碎石と支柱柵および両者の複合がアサリ個体数の維持に与えた効果の有無を判断するため、対照区を除いた4実験区のデータを用いて因子分析を行った。各標本のアサリ個体数 x は $\log(x+1)$ で対数変換してから各種の統計的解析を行った。なお、殻長1mm以上のアサリを各採集地点から4回繰り返しサンプリングして4標本とした場合はネスト化分散分析(nested ANOVA)を行い、近傍の4標本ごとに1組にグループ化したユニット間の個体数の変動を無視して多重比較を行った。また、ユニットの平均平方を分母として各因子の平均平方との分散比(F 値)を求めた。以上の計算処理には、統計計算言語環境 R ver. 2.13.1¹⁰⁾を使用した。

底質調査 碎石散布および支柱柵設置後の実験区の底質の変化を把握するため、アサリの採集時に各実験区の中央部において内径44mmの塩化ビニール製円筒を用いて深さ約10cmまでの堆積物を採集した。試料は氷温にて持ち帰り、 -30°C で凍結保存して底質の粒度組成および酸揮発性硫化物量を測定した。粒度組成はWentworthの粒度スケールにあわせ0.062~2mm目の篩を使用した湿式篩分法で測定し、酸揮発性硫化物量(AVS)はヘドロテック-S用検知管(ガステック社製)を用いて定法で測定した。

流動環境調査 支柱柵設置後の実験区での流動環境の変化を把握するため、碎石+支柱区および碎石区内の各1点に電磁流向流速計(Compact-EM: JFEアドバンテック株式会社)を球状センサー部の中心が海底から10cm上側になるように設置し、2007年11月13日~11月29日、2008年5月13日~6月3日、2008年10月21日~11月12日に流向・流速の連続観測を行った。電磁流向流速計は2時間の間歇作動(バースト)に設定し、バースト毎に0.5秒間隔で5分間、流向・流速データを記録した。得られた流向・流速データは、TSEdior ver.4.12*およびTSMaster ver.6.6*を用いて移流成分(主に潮汐による一様流)と変動成分(波による往復流および他の残差成分)に分離した。

底質とアサリ稚貝の移動限界判定 桑原¹¹⁾のアサリ稚貝の移動限界判定エクセルファイル Ver.3.1¹²⁾を用い、流

動環境調査で得られた計算データから海底のせん断応力を求めてアサリ稚貝、碎石、堆積物粒子の理論的な限界せん断応力と比較し、アサリ稚貝が流動によって移動させられる可能性の有無を判定した。これらの計算に用いたアサリ稚貝の比重は、動画解析によりアサリ稚貝の沈降速度を計測した実験結果(齊藤 未発表)をもとに、粒径(殻長)に対する沈降速度の関係を近似するように求めた比重パラメータ値 $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ を採用した。なお、このモデルではアサリの潜砂行動による抗流効果は考慮されていない。

結 果

実験区の底質変化調査 実験区の底質の変化状況について図2に示した。碎石区と碎石+支柱区においては、設置後4ヶ月を経過した2006年12月から碎石の移動と拡散が見られ、2007年5月の碎石区では碎石は散布した範囲に殆ど見られず、南東方向へ20m以上移動していた。移動した碎石は、一部が砂漣の凹部に露出していたが、大部分は砂に埋没していた。一方、同時期の碎石+支柱区では、支柱の基部が洗掘され、大部分の碎石が実験区の外側に拡散していたが、一部は散布した範囲内に残っていた。また、碎石上への顕著な砂の堆積はなく、砂漣も殆ど見られなかったが、若干量の泥が堆積していた。また、2007年9月以降、碎石+支柱区では、ホトトギスガイやコケガラスガイが低密度で分布し、パッチ状のマットを形成していた。さらに2008年7月以降、碎石+支柱区、支柱区ともに高い密度でホトトギスガイが分布し、広範囲にマットを形成していた。一方、碎石区、無処理区では、顕著なマットの形成は見られなかった。

アサリ生息状況調査

1. 殻長1mm未満 2007年2月には、全ての実験区と対照区で2006年秋期発生群と推測される初期稚貝が出現したが、個体数は $101\sim 1,009$ 個/ m^2 で少なかった(図3)。2007年7月には支柱区と碎石+支柱区の2区で2007年春期発生群と推測される初期稚貝が $4,374\sim 13,121$ 個/ m^2 と多数出現したが、無処理区および碎石区では見られなかった。2007年11月から2008年1月にかけては、全ての実験区と対照区で2007年秋期発生群と推測される初期稚貝が出現し、12月に $908\sim 52,888$ 個/ m^2 出現した。2008年4~8月には、支柱区と碎石+支柱区の2区を中心に2008年春期発生群と推測される初期稚貝が出現したが、個体数は4月で各 606 個/ m^2 と $1,817$ 個/ m^2 で少なかった。一方、2008年12月には、無処理区を含む全ての実験区で2008年秋期発生群と推測される初期稚貝が $32,399\sim 548,255$ 個/ m^2 出現したが、対照区では $3,634$ 個/ m^2 とやや少なかった。

* 川俣 茂 (<http://cse.fra.affrc.go.jp/matasan/home-page.html>)

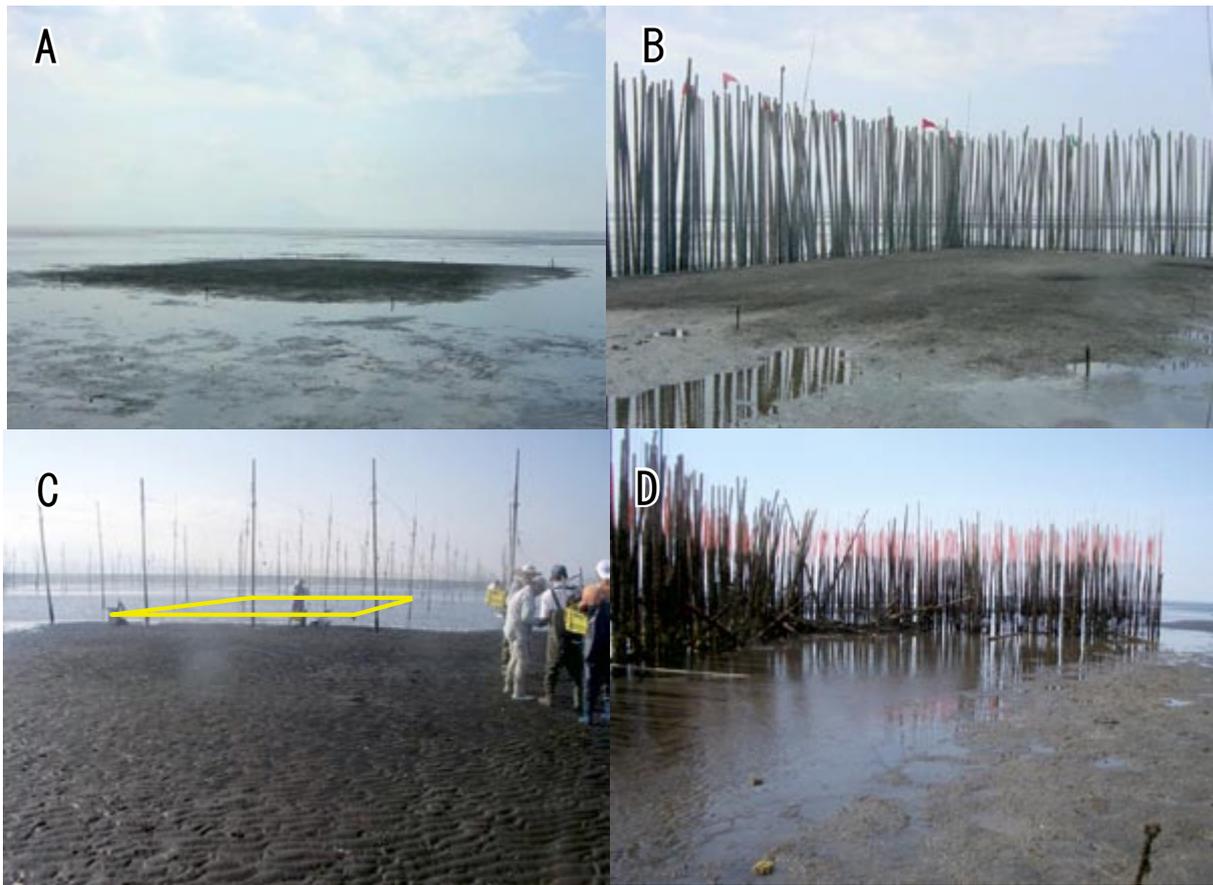


図2. 実験区の底質の変化状況

A: 碎石区 2006年8月9日(造成直後) B: 碎石+支柱区 2006年8月9日(造成直後)
 C: 碎石区 2007年9月27日(黄枠は碎石の当初散布場所を示す) D: 碎石+支柱区 2008年8月1日

2. 殻長1mm以上 殻長1mm以上のアサリ稚貝は、無処理区と対照区では調査期間中殆ど採集されなかった。碎石区、支柱区、碎石+支柱区では2007年4月に2006年秋期発生群と推測される稚貝が69~500個/m²出現した。7月には支柱区および碎石+支柱区で2007年春期発生群と推測される稚貝が各75個/m², 81個/m²確認されたが、8月以降は全ての実験区で稚貝は殆ど見られなくなった。2008年4月以降、支柱区と碎石+支柱区を中心に2007年秋発生群および2008年春発生群と推測される稚貝が出現し、8月は731~1,538個/m²と多数出現した。

なお、支柱区および碎石+支柱区では、2007年に出現したアサリ稚貝の一部は残存し、2008年12月の最終調査時には最大殻長24mmに成長した。また、ここでは試験場所に残存したアサリについて「生残」とした。

碎石、支柱策の効果の解析

1. 殻長1mm未満 殻長1mm未満のアサリ初期稚貝の個体数変動について碎石散布、支柱柵の有無を要因とした因子分析を行った(表1)。2007年6月と7月は碎石の有無、支柱柵の有無および一方の因子による効果が他方の因子に依存することを示す交互作用、2007年11

月から2008年1月までは支柱柵の有無による効果が初期稚貝の個体数に対して有意であった($p<0.05$)。また、2008年春期発生群が加入した2008年4~5月は支柱の有無による効果が初期稚貝の個体数に対して有意であった。

対照区を含んだ分散分析と多重比較の結果によると、2007年2月は各区の個体数の間に有意差がなかったが、6月は碎石+支柱区、7月と11月は支柱区と碎石+支柱区、12月は支柱区の各個体数が無処理区の個体数より有意に高かった(Tukey HSD $p<0.05$)。2008年1月は碎石+支柱区と支柱区、2008年4月は碎石+支柱区の各個体数が無処理区の個体数より有意に高かったが、2008年11月までは各区とも無処理区との間に個体数の有意差はなかった。

なお、2008年12月を除く上記の全ての期間で無処理区と対照区の間には個体数の有意差はなかったため、他の実験区から無処理区へのアサリの拡散は無視できると判断された。

2. 殻長1mm以上 殻長1mm以上のアサリ稚貝の個体数変動について碎石散布、支柱柵の有無を要因とした因子分析を行った(表2)。2007年4月は碎石の有無による効果が稚貝の個体数に対して有意($p<0.05$)であっ

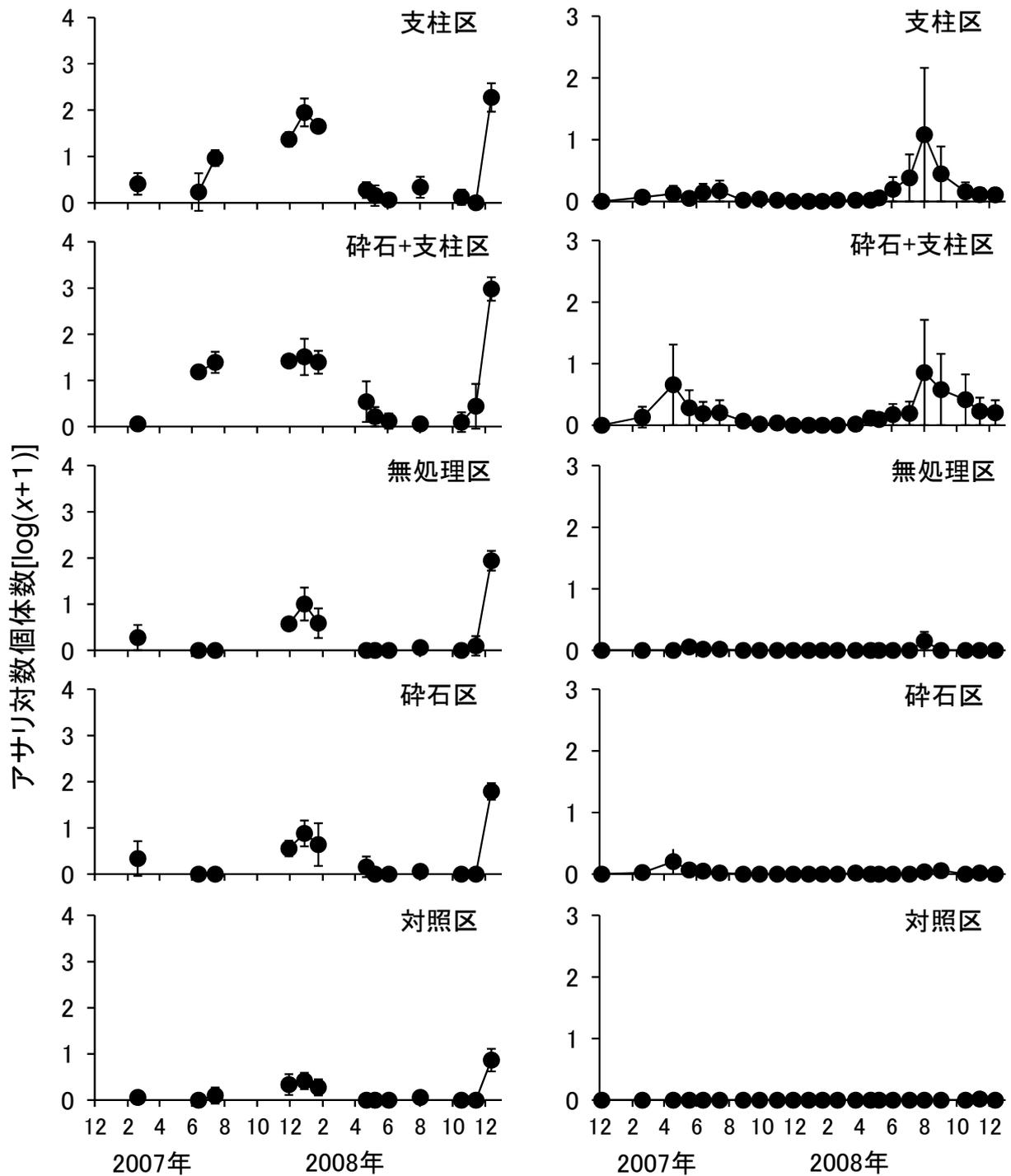


図3. アサリの対数個体数 $[\log(x+1)/\text{標本}]$ の推移
 左列：殻長 1mm 未満、右列：殻長 1mm 以上
 エラーバーは標準偏差を示す
 採取面積は 1 標本あたり 100cm^2

たが、翌月 5 月には有意ではなくなった。2007 年の 6 月と 7 月、2008 年の 5 月を除く 4～12 月は支柱柵の有無による効果が有意であった。また、同年の 4 月と 10 月は碎石の有無による効果も有意であった。

対照区を含んだ分散分析と多重比較の結果によると、2007 年の 4 月と 5 月の碎石 + 支柱区の個体数は無処理区の個体数より有意に高かったが (Tukey HSD $p <$

0.05)、碎石区、支柱区の個体数は無処理区の個体数に対して有意差がなかった。6 月以降は実験区の間には個体数の有意差は見られなかった。2008 年の 4 月と 9～12 月の碎石 + 支柱区、および 7～9 月と 11～12 月の支柱区の個体数は無処理区の個体数に対して有意に高かった。同年 10 月は支柱 + 碎石区の個体数が支柱区の個体数に対して有意に高かったが、碎石区の個体数は無処理

表 1. 殻長 1mm 未満のアサリ初期稚貝に関する統計検定結果

調査日	効果	因子分析 (対照区を除外)				分散分析 (対照区を含む)				多重比較 (Tukey HSD) ($p < 0.05$)						
		自由度 (分子)	自由度 (分母)	F 値	P 値	自由度 (分子)	自由度 (分母)	F 値	P 値							
2007/2/19	碎石	1	16	1.414	0.252											
	支柱	1	16	0.365	0.553	4	20	2.0757	0.122							
	交互作用	1	16	2.854	0.111											
2007/6/13	碎石	1	8	16.087	0.004 **							有	無	無	有	対照
	支柱	1	8	35.769	<0.001 ***	4	10	23.468	0.000 ***			有	有	無	無	対照
	交互作用	1	8	16.087	0.004 **											
2007/7/13	碎石	1	8	6.655	0.033 *							有	無	対照	有	無
	支柱	1	8	202.623	<0.001 ***	4	10	55.691	0.000 ***			有	有	対照	無	無
	交互作用	1	8	6.646	0.033 *											
2007/11/29	碎石	1	16	0.096	0.760							有	無	無	有	対照
	支柱	1	16	207.103	<0.001 ***	4	20	54.166	0.000 ***			有	有	無	無	対照
	交互作用	1	16	0.341	0.568											
2007/12/28	碎石	1	16	3.472	0.081							無	有	無	有	対照
	支柱	1	16	27.561	<0.001 ***	4	20	18.202	0.000 ***			有	有	無	無	対照
	交互作用	1	16	1.122	0.305											
2008/1/23	碎石	1	16	0.527	0.478							有	無	有	無	対照
	支柱	1	16	41.662	<0.001 ***	4	20	19.992	0.000 ***			有	有	無	無	対照
	交互作用	1	16	1.223	0.285											
2008/4/22	碎石	1	16	3.231	0.091							有	無	有	無	対照
	支柱	1	16	7.997	0.012 *	4	20	4.658	0.008 **			有	有	無	無	対照
	交互作用	1	16	0.217	0.648											
2008/5/8	碎石	1	16	0.194	0.665							有	無	有	無	対照
	支柱	1	16	7.397	0.015 *	4	20	2.895	0.048 *			有	有	無	無	対照
	交互作用	1	16	0.194	0.665											
2008/6/3	碎石	1	16	0.400	0.536											
	支柱	1	16	3.600	0.076	4	20	1.600	0.213							
	交互作用	1	16	0.400	0.536											
2008/8/1	碎石	1	16	3.598	0.076							無	有	無	有	対照
	支柱	1	16	3.598	0.076	4	20	3.072	0.040 *			有	有	無	無	対照
	交互作用	1	16	3.598	0.076											
2008/10/17	碎石	1	16	0.043	0.838	4	20	1.228	0.331							
	支柱	1	16	3.203	0.092			14.485	0.000							
	交互作用	1	16	0.043	0.838			14.485	0.000							
2008/11/13	碎石	1	16	2.137	0.163	4	20	3.267	0.032 *			無	無	有	有	対照
	支柱	1	16	2.137	0.163			51.198	0.000			有	無	有	無	対照
	交互作用	1	16	5.150	0.037 *			51.198	0.000							
2008/12/12	碎石	1	16	6.445	0.022 *	4	20	49.658	0.000 ***			有	無	無	有	対照
	支柱	1	16	48.870	<0.001 ***			6.582	0.003			有	有	無	無	対照
	交互作用	1	16	15.554	0.001 **			6.582	0.003							

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

多重比較では個体数の多い実験区を左から記載した

下線はサブグループを示す

区の個体数に対して有意差がなかった。

一方、上記の全ての期間で、無処理区と対照区との間に個体数の有意差はなかったため、他の実験区から無処理区へのアサリ稚貝の拡散は無視できると判断された。

底質調査 碎石区では 2007 年 2 月、3 月を除いて碎石

を含む粒径 2mm 以上の土砂が 10 ~ 40% 程度継続して分布していたものの、中央粒径は 0.2 ~ 0.3mm 前後で推移した (図 4)。碎石 + 支柱区では粒径 2mm 以上の土砂が 20 ~ 60% 程度継続して分布していたが、冬季は 4% 以下に減少した。また、同区の中央粒径は調査開始か

表2. 殻長1mm以上のアサリ稚貝に関する統計検定結果

調査日	効果	因子分析 (対照区を除外)				分散分析 (対照区を含む)				多重比較 (Tukey HSD) ($p < 0.05$)				
		自由度 (分子)	自由度 (分母)	F 値	P 値	自由度 (分子)	自由度 (分母)	F 値	P 値					
2007/2/19	碎石	1	12	0.674	0.428	4	15	1.644	0.215					
	支柱	1	12	3.339	0.093									
	交互作用	1	12	0.035	0.856									
2007/4/17	碎石	1	12	14.209	0.027 *	4	15	9.695	0.000 ***	有	有	無	無	対照
	支柱	1	12	8.844	0.116			9.695	0.000	有	無	有	無	対照
	交互作用	1	12	2.849	0.117			9.695	0.000					
	ユニット	12	48	4.050	<0.001 ***	15	60	4.050	0.000 ***					
2007/5/18	碎石	1	12	4.688	0.051	4	15	4.738	0.011 *	有	有	無	無	対照
	支柱	1	12	3.364	0.092			4.738	0.011	有	無	無	有	対照
	交互作用	1	12	3.887	0.072			4.738	0.011					
	ユニット	12	48	1.914	0.056	15	60	1.914	0.039					
2007/6/13	碎石	1	12	0.535	0.479	4	15	2.566	0.081					
	支柱	1	12	5.906	0.032 *			2.566	0.081					
	交互作用	1	12	0.006	0.938			2.566	0.081					
	ユニット	12	48	2.195	0.027 *	15	60	2.195	0.016 *					
2007/7/14	碎石	1	12	0.089	0.071	4	15	3.759	0.026 *	有	無	有	無	対照
	支柱	1	12	9.114	0.017 *			3.759	0.026	有	有	無	無	対照
	交互作用	1	12	0.089	0.771			3.759	0.026					
	ユニット	12	48	2.230	0.025 *	15	60	2.230	0.015					
2008/4/22	碎石	1	12	8.262	0.014 *	4	15	11.106	0.000 ***	有	無	有	無	対照
	支柱	1	12	15.893	0.002 **			11.106	0.000	有	有	無	無	対照
	交互作用	1	12	8.262	0.014 *			11.106	0.000					
	ユニット	12	48	0.406	0.954	15	60	0.406	0.972					
2008/5/8	碎石	1	12	0.222	0.646	4	15	1.472	0.260					
	支柱	1	12	3.555	0.084			1.472	0.260					
	交互作用	1	12	0.222	0.646			1.472	0.260					
	ユニット	12	48	3.000	0.003 **	15	60	3.000	0.001 **					
2008/6/3	碎石	1	12	0.032	0.861	4	15	2.664	0.073					
	支柱	1	12	7.051	0.021 *			2.664	0.073					
	交互作用	1	12	0.032	0.861			2.664	0.073					
	ユニット	12	48	5.125	<0.001 ***	15	60	5.125	0.000 ***					
2008/7/4	碎石	1	12	3.017	0.108	4	15	12.195	0.000 ***	無	有	有	無	対照
	支柱	1	12	27.492	<0.001 ***			12.195	0.000	有	有	無	無	対照
	交互作用	1	12	3.017	0.108			12.195	0.000					
	ユニット	12	48	1.586	0.128	15	60	1.586	0.105					
2008/8/1	碎石	1	12	1.937	0.189	4	15	21.763	0.000 ***	無	有	無	有	対照
	支柱	1	12	52.118	<0.001 ***			21.763	0.000	有	有	無	無	対照
	交互作用	1	12	0.214	0.652			21.763	0.000					
	ユニット	12	48	6.055	<0.001 ***	15	60	6.055	0.000 ***					
2008/9/1	碎石	1	12	1.384	0.262	4	15	14.485	0.000 ***	有	無	有	無	対照
	支柱	1	12	35.782	<0.001 ***			14.485	0.000	有	有	無	無	対照
	交互作用	1	12	0.229	0.641			14.485	0.000					
	ユニット	12	48	3.181	0.002 **	15	60	3.181	0.001 ***					
2008/10/17	碎石	1	12	6.670	0.024 *	4	15	51.198	0.000 ***	有	無	有	無	対照
	支柱	1	12	31.780	<0.001 ***			51.198	0.000	有	有	無	無	対照
	交互作用	1	12	6.670	0.024 *			51.198	0.000					
	ユニット	12	48	1.771	0.081	15	60	0.921	0.546					
2008/11/13	碎石	1	12	2.856	0.117	4	15	6.582	0.003 **	有	無	有	対照	無
	支柱	1	12	15.500	0.002 **			6.582	0.003	有	有	無	対照	無
	交互作用	1	12	1.482	0.247			6.582	0.003					
	ユニット	12	48	0.890	0.562	15	60	0.896	0.573					
2008/12/12	碎石	1	12	1.144	0.306	4	15	4.999	0.009 **	有	無	有	無	対照
	支柱	1	12	11.428	0.005 **			4.999	0.009	有	有	無	無	対照
	交互作用	1	12	1.144	0.306			4.999	0.009					
	ユニット	12	48	2.064	0.038 *	15	60	2.064	0.025 *					

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

多重比較では個体数の多い実験区を左から記載した。下線はサブグループを示す

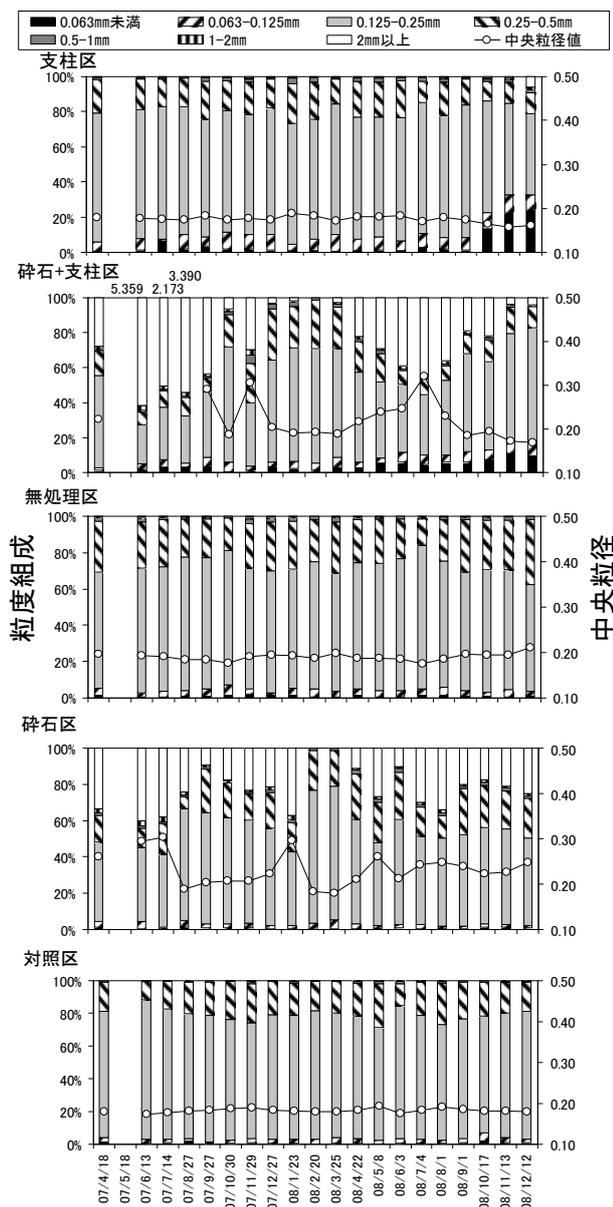


図4. 底質の粒度組成の推移

ら数ヶ月間2～5mmと大きな値を示したが、ホトトギスガイのマットが形成された2007年9月以降は0.2～0.3mmと大きく低下し、特に2008年8月以降は0.2mm以下となり、他の実験区と大差なくなった。

泥分率（粒径0.063mm未満の粘土の割合）は、碎石+支柱区が0.7～11.0%、支柱区が0.6～23.5%で、0.0～2.2%であった他の実験区より高く、ホトトギスガイのマットが形成された2007年9月以降は増加傾向を示した。

酸揮発性硫化物量（AVS）は、支柱区と支柱+碎石区で0.02mg/g乾泥を超え、ホトトギスガイのマットが形成された2008年7月以降は0.02～0.11mg/g乾泥と大きく上昇した（図5）。一方、その他の区では殆ど検出されなかった。

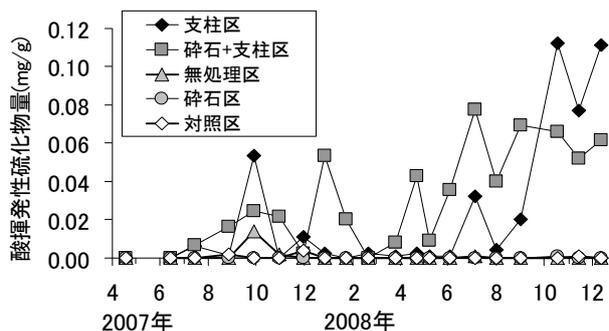


図5. 酸揮発性硫化物量の推移

底質とアサリ稚貝の移動限界の判定 2007年11月13日～11月29日の碎石+支柱区および碎石区の流向・流速データから求められたせん断応力とアサリ初期稚貝並びに底質の限界せん断応力とを比較した（図6）。限界せん断応力を計算する条件として、底質の粒径は碎石を散布した直後の中央粒径である3.75mm、アサリ稚貝のサイズは平均的な初期稚貝の殻長とされる0.2mmを採用した。流速成分のうち、主に波による変動成分のせん断応力を計算するに当たっては、変数として変動成分の2乗平均平方根 U_{rms} 、1/3有義成分 $U_{1/3}$ および1/10有義成分 $U_{1/10}$ を使用した（図7）。この計算モデルでは、相対的に大きな粒子が小さな粒子を流動から遮蔽する効果が考慮されており、碎石の間隙に隠れたアサリ稚貝は、碎石が移動しない限り移動しないので、碎石の限界せん断応力が稚貝の限界せん断応力になっている。

変動成分の限界せん断応力を超える流動状態が観測された頻度は、計算で採用する変数によって大きく異なり、 U_{rms} 、 $U_{1/3}$ 、 $U_{1/10}$ の順で多くなった。一方、移流成分によるせん断応力が底質と初期稚貝の限界せん断応力を超えることはなく、碎石の移動・拡散、アサリ稚貝の減耗には、潮汐による移流よりも波浪による変動成分が大きく関与していると判断された。なお、その他2回の観測期間のデータに関しても同様の計算を行ったが、2007年11月13日～11月29日の結果と近似した結果が得られた。

次いで、底質の中央粒径が3.75mmの場合と各調査時の中央粒径の場合とに分け、変動成分によるせん断応力がアサリ初期稚貝および底質の限界せん断応力を超えた観測頻度の割合を求めた。

1. 底質中央粒径3.75mmの場合 変動成分によるせん断応力がアサリ初期稚貝および碎石を含む底質の限界せん断応力を超える観測頻度の割合は観測期間によって異なり、波浪の状況に大きく左右された（表3）。変動成分を表す変数が U_{rms} の場合、いずれの観測期間でも底質は全く移動しないことを示す計算結果が得られた。 $U_{1/10}$ の場合、2007年11月13日～11月29日の単一の観測期間ではあるが、碎石区の方が碎石+支柱区よりもせん断応力がアサリ初期稚貝および底質の限界せん

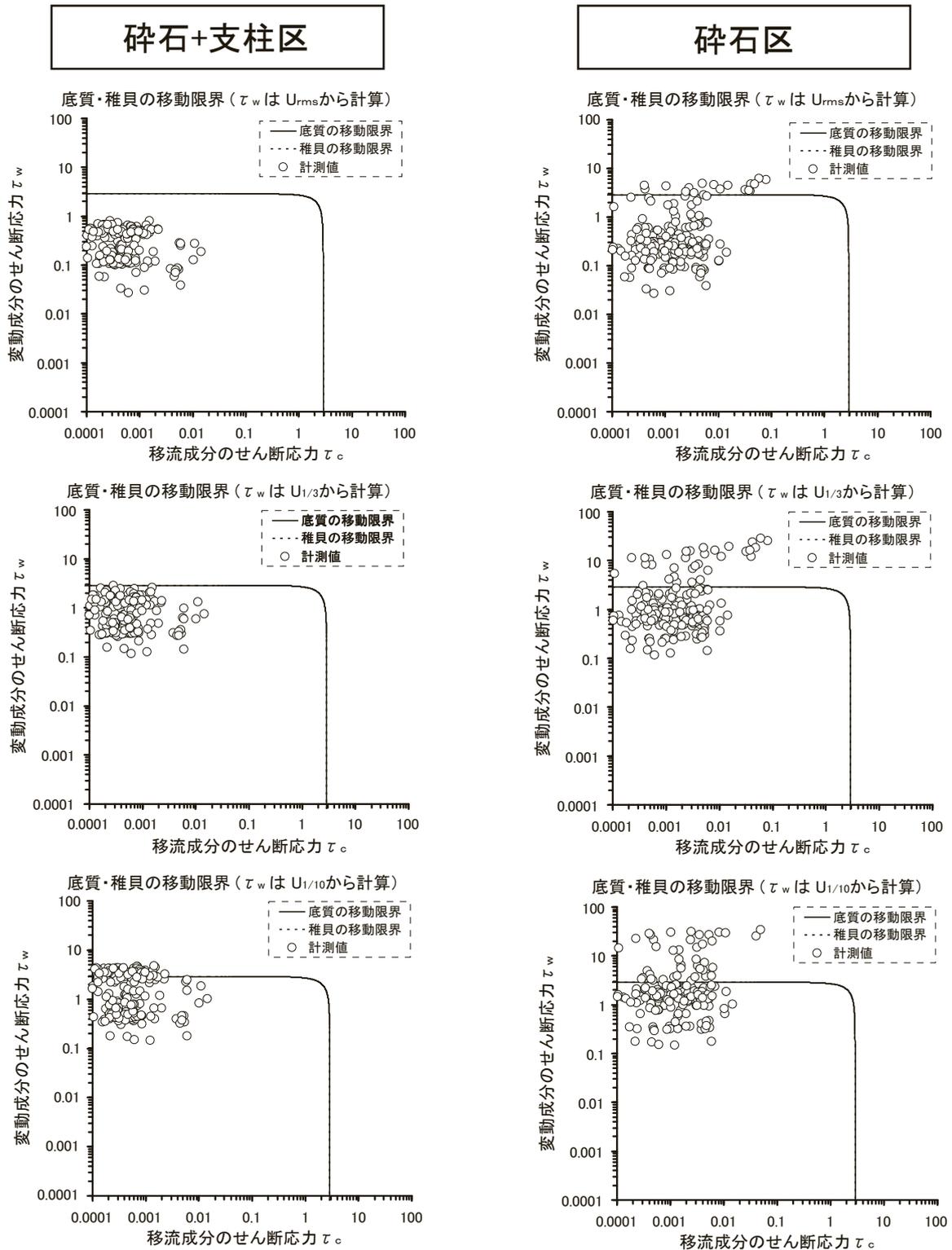


図 6. 流動によるせん断応力とアサリ初期稚貝と碎石を含む底質の限界せん断応力の比較
 左列：碎石+支柱区、右列：碎石区。計算条件は中央粒径 3.75mm、アサリ 0.2mm
 観測期間：2007 年 11 月 13 日～11 月 29 日
 底質の遮蔽効果により、稚貝の移動限界は底質の移動限界と同値であった

断応力を超える観測頻度の割合が低い計算結果が得られた。しかしながら、実際には碎石区では碎石が大きく移動・拡散したのに対し、碎石+支柱区では大部分の碎石が実験区内にとどまっていた。これらの点から、計算に

用いる流速変数として、 $U_{1/3}$ が実験区の流動現象を比較的よく反映すると看做された。 $U_{1/3}$ の場合、実際のせん断応力が碎石の限界せん断応力を超えた観測頻度の割合は、碎石+支柱区では 1.2～0.4% と非常に低かったが、

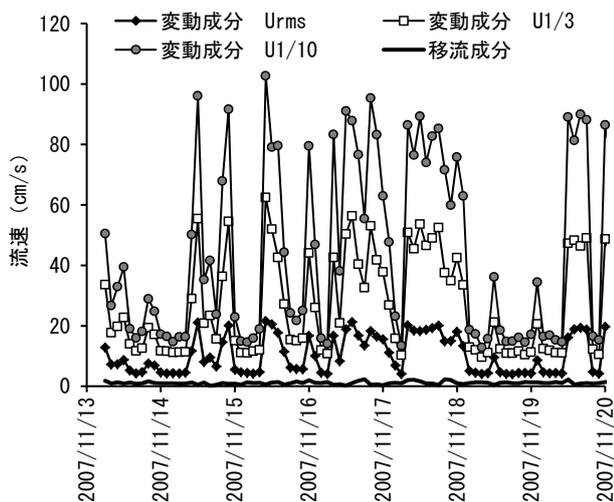


図7. 観測された移流成分と変動成分の推移例
観測期間：2007年11月13日～11月29日の一部

碎石区では2007年11月13日からの調査期間において、16.5%と高い値であった。碎石が大きく移動・拡散した2006年冬季に流動観測を行っていないため詳細は不明であるが、波浪条件によっては、碎石と支柱柵を併用することにより、碎石の移動頻度が減少する可能性が示された。

2. 各調査時の底質中央粒径の場合 各調査時における中央粒径(表4)を底質の粒径として、アサリ初期稚貝の限界せん断応力を計算し、各実験区におけるせん断応力がアサリ初期稚貝および底質の限界せん断応力を超えた観測頻度の割合を求めた(表5)。2007年11月13日～11月29日の観測で実際のせん断応力が初期稚貝の限界せん断応力を超えた観測頻度の割合は、支柱区が56.6%、碎石+支柱区が51.9%であったのに対し、碎石区では79.7%、無処理区では82.1%と非常に大きく、支柱柵を設置した2区の方が23.1～30.2%小さかった。2008年5月13日～6月3日および2008年10月21日～11月12日の観測で、せん断応力が初期稚貝の限界せん断応力を超えた観測頻度の割合は、支柱区が42.8～47.8%、碎石+支柱区が42.0～45.0%であったのに対し、碎石区が43.4～47.4%、無処理区が44.2～50.2%で、支柱柵の有無による差は0.6～5.2%と小さかった。碎石が移動・拡散して中央粒径が小さくなった底質の限界せん断応力が低下し、アサリ初期稚貝が安定した遮蔽物を失って定着が困難になった可能性が示された。

考 察

実験区の調査データの統計検定およびせん断応力の計算により、干潟での碎石散布、支柱柵の設置とアサリ稚貝の定着、生残効果との関係について知見を得ることができた。まず、碎石散布によるアサリ稚貝の生残促進効果は、実験のごく初期を除き、ほとんど確認されなかつ

表3. 変動成分によるせん断応力がアサリ初期稚貝および碎石を含む底質の限界せん断応力を超えた観測頻度の割合

観測期間	対象	碎石+支柱区			碎石区		
		Urms	U _{1/3}	U _{1/10}	Urms	U _{1/3}	U _{1/10}
2007/11/13-11/29	底質	0.0%	0.5%	30.2%	8.0%	16.5%	21.6%
	初期稚貝	0.0%	0.5%	30.2%	8.0%	16.5%	21.6%
2008/5/13-6/3	底質	0.0%	1.2%	6.4%	0.0%	4.0%	8.4%
	初期稚貝	0.0%	1.2%	6.4%	0.0%	4.0%	8.4%
2008/10/21-11/12	底質	0.0%	0.4%	0.7%	0.0%	0.4%	2.3%
	初期稚貝	0.0%	0.4%	0.7%	0.0%	0.4%	2.3%

計算条件は中央粒径を3.75mmとし、アサリの大きさを0.2mmとした

表4. アサリおよび底質の限界せん断応力の計算に使用した中央粒径(mm)

観測期間	支柱区	碎石+支柱区	無処理区	碎石区
2007/11/13-11/29	0.178	0.306	0.191	0.207
2008/5/13-6/3	0.181	0.239	0.188	0.260
2008/10/21-11/12	0.164	0.194	0.195	0.224

表5. 変動成分によるせん断応力がアサリ初期稚貝および碎石を含む底質の限界せん断応力を超えた観測頻度の割合

観測期間	対象	支柱区	碎石+支柱区	無処理区	碎石区
2007/11/13-11/29	底質	42.0%	42.5%	52.8%	53.3%
	稚貝	56.6%	51.9%	82.1%	79.7%
2008/5/13-6/3	底質	31.9%	31.9%	37.5%	37.9%
	稚貝	47.8%	45.0%	50.2%	47.4%
2008/10/21-11/12	底質	24.2%	24.5%	27.0%	27.0%
	稚貝	42.8%	42.0%	44.2%	43.4%

計算条件は観測時の実際の中央粒径(表4)を用い、アサリの大きさを0.2mmとした

た。せん断応力を計算した結果では、碎石の限界せん断応力と碎石で遮蔽されたアサリ初期稚貝の限界せん断応力は同じであると看做された。即ち、足糸で碎石に付着した初期稚貝は、波・流れによって碎石とともに動くと考えられる。碎石が大量に移動・拡散した2006年冬季には流動観測を行っていないため、碎石にどの程度のせん断応力が発生したかは不明であるが、碎石区では、実験を開始した2006年から2007年に亘る冬季に碎石が大量に移動・拡散し、底質の中央粒径が堆積物に近い値へ低下した。これらのことから、2007年春季以降、基質の安定性に乏しい碎石区はアサリの浮遊幼生の着底や稚貝の生残にとって、厳しい条件であったことが示唆された。干潟への碎石散布によってアサリ浮遊幼生の着底と初期稚貝の生残を促進するには、碎石の埋没を防止するために、使用する碎石の粒径の見直し、散布する面積と厚さの拡大、波浪を緩和するための支柱柵の設置等の工夫が必要と考えられる。

一方、支柱+碎石区では、当初に碎石を散布した区画に碎石が残っていたことから、アサリ浮遊幼生の着底時に当たる2007年6～7月にかけて、初期稚貝の着底を

促進させる効果があったと推察される。また、表5に示したとおり、海底の流動条件を観測した2007年11月では、せん断応力が底質と初期稚貝の限界せん断応力を超えた観測頻度の割合が、支柱柵のある支柱区、碎石+支柱区の方が支柱柵のない碎石区、無処理区よりも底質の場合には最大11.3%、初期稚貝の場合には30.2%低くなっている。これらのことから、支柱柵の設置は波浪による海底の攪乱を緩和して基質を安定させ、初期稚貝の着底を促進する効果をもたらすと考えられる。

実験期間中に現れた初期稚貝は、支柱区、碎石+支柱区では1mm以上の稚貝へと成長したことが確認され、2008年12月の最終調査時には最大で殻長24mmまで成長した。他方、対照区やその周辺でアサリは殆ど見られなかったことから波浪による海底の攪乱が緩和されない場所では、着底し、生残できる初期稚貝は極めて少ないと考えられる。また、支柱区、碎石+支柱区の2区ではコケガラスガイやホトトギスガイのマットが形成された。ホトトギスガイのマットの下では底質の泥分率や全硫化物量が増加し、アサリ等の底生動物を窒息死させることが報告されており¹³⁾本研究でもマットが形成された2区では泥分率や酸揮発性硫化物の増加が確認された。しかしながら、この2区ではアサリ稚貝の生残効果が認められていることから、マットが干潟の表面を覆ってアサリや底質の移動を抑制する効果を発揮した可能性が示唆される。

なお、底質の調査に当たっては干潟の表面から深さ10cmまでの堆積物を採集したため、埋没した碎石も試料中に含まれており、表層の堆積物の中央粒径を過大評価している可能性がある。せん断応力の計算モデルを本研究に厳密に適用するためには、流動によるせん断応力を直接受ける干潟の表面から深さ1cm程度までの底質の中央粒径を求めて計算に用いるべきであった。また、ホトトギスのマットのように物理的性質が堆積物と異なるものによって底面が被覆された場合、流動によるせん断応力と粒子の限界せん断応力を対比することには注意が必要である。今後はこれらの点を検討するとともに、アサリ稚貝の定着や生残が良好な他の人工および天然の漁場においてアサリ稚貝の着底期を中心とする流動環境の観測を十分に行い、得られた結果を比較検討していくことが重要と考えられる。

最後に、今回の野外実験では、厳密なデータ解析を行う上で、いくつかの問題点がある。まず、殻長1mm未満のアサリでは、複数の試料を混合した標本をデータ単位として統計的解析を行ったが、同じ条件で繰り返し採取したときの個体数データのばらつき方(誤差構造)を変形させてしまうため、今後は混合しないようにすべきである。次に、各実験区の中で採集地点や標本採集が反復されているが、これは互いに独立ではない不完全な反復標本採集であるので、将来、さらに大規模な野外実験を行う場合には是正しなければならない。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、実験区を設置するために漁場の一部を快く提供いただいたうえ、支柱柵の設置等の現場作業に御協力をいただいた網田漁業協同組合の皆様へ深謝する。また、本研究を推進するに当たり、アサリ資源全国協議会を構成する他の道県、独立行政法人水産総合研究センター等の研究者各位との情報交換が大きな励みになった。特に、水産工学研究所の桑原久実博士には、流動環境の測定とデータ解析について詳しく御指導を賜った。以上の関係各位に心より謝意を表す。最後に、匿名の査読者の御指摘により、本稿の内容が大きく改善された。心よりお礼申し上げる。

なお、本研究は、水産庁の水産基盤整備調査委託事業「アサリ稚貝の定着を促進する海底境界層の物理環境の解明」(平成18-20年度)および熊本県の予算による調査の成果である。

文 献

- 1) 那須博史・生嶋 登・鳥羽瀬憲久・中原康智(2008) 熊本県のアサリ漁業の現状と課題. 熊本水研研報, 8, 89-99
- 2) 那須博史(2005) 緑川河口域アサリ漁場における課題と対策. 「平成17年度水産工学関係試験研究推進特別会水産基盤整備分科会報告書」(桑原久美), 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所, 茨城3-6 pp.
- 3) 本田是人・石田基雄・家田喜一・武田和也・山田安幸・鈴木輝明(2005) アサリ(*Ruditapes philippinarum*) 浮遊幼生の着底状況を指標とした高炉水砕スラグの機能評価. 愛知水試研報, 11, 51-58
- 4) 網尾 勝(1982) アサリの増殖について. (社)日本水産資源保護協会月報, 217, 4-10
- 5) 中川浩一・長本 篤・江藤拓也・佐藤利幸(2007) 吉富干潟における杭打ち・投石によるアサリ稚貝減耗防止効果. 福岡水技研報, 17, 51-59
- 6) 三代和樹・福田祐一・齊籐 肇・秋山吉寛(2011) アサリ資源回復にむけての人工転石帯の有効性. 大分農水研指研報(水産研究部編), 1, 23-27
- 7) 浜口昌巳(1999) 貝類浮遊幼生の免疫学的特性の解明. 「魚介類の初期生態解明のための種判別技術の開発」, 農林水産技術会議事務局, 東京, 21-31 pp.
- 8) 浜口昌巳(1999) 瀬戸内海アサリ漁場生態調査における適用方法の開発. 「魚介類の初期生態解明のための種判別技術の開発」, 農林水産技術会議事務局, 東京, 66-77 pp.
- 9) 松村貴晴・岡本俊治・黒田伸郎・浜口昌巳(2001) 三河湾におけるアサリ浮遊幼生の時空間的分布-間接蛍光抗体法を用いた解析の試み-. 日本ベントス学会誌, 56, 1-8.
- 10) R Development Core Team(2011). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria, R Foundation for Statistical Computing.

- 11) 桑原久実 (2009) 底質の安定性からみた好適アサリ生息場環境. 「アサリと流域圏環境－伊勢湾・三河湾での事例を中心として」(生田和正・日向野純也・桑原久実・辻本哲郎 編), 恒星社厚生閣, 東京, 61-70 pp.
- 12) 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 pp.
- 13) 伊藤信夫・梶原 武 (1981) 横須賀港におけるホトトギスガイの生態－I 分布, 個体数変動および生息域底質の全硫化物. 付着生物研究, **3** (1), 37-41