

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

本田是人・石田基雄・家田喜一・武田和也・山口安幸・鈴木輝明

Functional evaluation for granulated blast furnace slag based on the settlement of planktonic larvae of Japanese Littleneck Clam (*Ruditapes philippinarum*)

HONDA Yoshito^{*1}, ISIDA Motoo^{*1}, IEDA Kiichi^{*1}, TAKEDA Kazuya^{*1}
YAMAGUCHI Yasuyuki^{*2}, and SUZUKI Teruaki^{*1}

Abstract : The possibility of using granulated blast furnace slag was investigated in the present study, because in the near future it may become more difficult to obtain marine sand on a massive scale. Granulated blast furnace slag is a by-product from the manufacturing of iron. It can act as an alternative material to marine sand for constructing artificial tidal flats and shallows. These studies were conducted in a 30L tanks for short-term experiment (28 days and 46 days after hatching) and long-term experiment (295 days). The effect of five kinds of granulated blast furnace slag, including mixture by natural sand was assessed on larval settlement, post-settlement survival of the Japanese Littleneck Clam, *Ruditapes philippinarum*. The effects were compared to five different kinds of natural sand. In the short-term experiment, there was significant correlation in the larval settlement and post-settlement survival of *Ruditapes philippinarum* between the granulated blast furnace slag group and the natural sand group. On the other hand, a higher larval settlement and post-settlement survival of juveniles was observed in the large-sized granulated blast furnace slag compared to the natural sand. In the long-term experiment, there was no significant difference in the growth of juveniles. From the results of these two experiments, the possibility to used the granulated blast furnace slag as an alternative material to marine sand was suggested.

キーワード; 高炉水砕スラグ, アサリ, 着底, 干潟

干潟や浅場はアサリ (*Ruditapes philippinarum*) 等の有用水産生物の成育場・漁場である。さらに、干潟・浅場は底生生物現存量が多いため、水中の有機懸濁物除去速度、すなわち水質浄化能に優れ、湾全体の物質循環に良好な影響を与えている。¹⁻³⁾ また、魚類にとって幼稚仔の保育場⁴⁾、貧酸素からの逃避場⁵⁾としても機能している。しかし、全国的に干潟や浅場は埋め立て等により大きく減少している。⁶⁾ 三河湾においても1970年代だけで約1200haの大規模な埋め立てが行われ、それによる干潟・浅場の消失によって赤潮の多発、貧酸素水塊の拡大、苦潮の発生による漁業被害が顕著化した。⁷⁾ さらに近年で

は、埋め立て用の土取り浚渫跡に発生する無酸素水の湧昇によるアサリ等の大量斃死も起きるようになってきている。⁸⁾ 従って三河湾の環境を改善するためには、残された干潟・浅場を保全するとともに新たな干潟・浅場の造成や浚渫跡の埋め戻しといった修復事業が必須である。

1998年から2004年までの計画で、三河湾では航路浚渫砂を利用した大規模な干潟・浅場造成事業が実施されており、600ha程度の修復が実現したが、環境改善効果を発現するためには、少なくとも1970年代の喪失干潟域1200haの修復が必要であり、さらに600ha程度の修復が必要と考えられている。⁹⁾ しかし、全国的に海砂採取を

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

*2 JFE エンジニアリング株式会社 (JFE Engineering Incorporation, Marunouchi, Chiyoda, Tokyo, 100-0005, Japan)

環境保全のために抑制する動向もあって、良質な海砂の入手は今後極めて困難な見通しとなっている。このため、三河湾では海砂に替わる造成材料の開発が急務となっており、著者らは量的確保、経済性、安全性の面で優れていると思われる製鉄過程の副産物である高炉水砕スラグに注目した。

高炉水砕スラグは、高炉から鉄と同時に生成した溶融状態の高炉スラグを圧力水で急冷粒状化したものであり、その成分は CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO の他、少量の Mn, Fe の化合物, S 等を有し、粒子形状は比較的均一である。¹⁰⁾ 2002 年度の高炉スラグの国内生産量は約 2400 万 t, そのうち水砕スラグは 1830 万 t で水砕化比率は増加傾向にあり、その用途は高炉セメント原料、コンクリート混和材、土工用材、コンクリート用細骨材、珪酸石灰肥料および土壌改良材となっており、¹¹⁾ 重金属の溶出等安全性に関する従来の様々な検討結果でも、問題が指摘された例はない。¹²⁻¹⁴⁾

高炉水砕スラグの海域における利用研究はいくつかみられ、間隙水中の H₂S の発生を抑制し、生物の生息環境を向上する底質改善効果、¹⁵⁻¹⁷⁾ 鉄鋼スラグの中の製鋼スラグを成形した炭酸固化体試験では藻類の付着促進効果¹⁸⁾ 等が報告されている。そこで本研究は、干潟・浅場の造成材料としての高炉水砕スラグの有用性を、干潟・浅場の優占種であるアサリ (*Ruditapes Philippinarum*) 浮遊幼生の着底状況によって検討することを目的とした。アサリ浮遊幼生では底質を能動的に選択することが報告されており、¹⁹⁾ 本稿では造成材料の粒径による差異についても検討を加えた。また、今後、三河湾の干潟造成事業におけるスラグ適正使用の基礎資料とするため、天然砂とスラグの混合についても検討した。

材料及び方法

1 実験材料

実験区は高炉水砕スラグ区（以下スラグ区と称す）と天然砂区からなり、天然砂区は粒径の異なる 5 種類の区 (NA, NB, NC, ND, NE) とした。それぞれの中央粒径 D₅₀ は 0.19 mm (NA), 0.30 mm (NB), 0.65 mm (NC), 0.95 mm (ND) 及び 1.2 mm (NE) である。NB のみ種子島産の山砂で、その他は海砂であった。高炉水砕スラグについては川崎製鉄株式会社水島製鉄所（現 JFE スチール株式会社西日本製鉄所）の副産物を用いた。篩により粒径が異なる 2 種類 (SS, SL) のスラグを調整し、SS と SL を単独で用いた SS 区、SL 区及び、SS に天然砂 ND を 50%、SL に ND を 25%、50% それぞれ添加混合した SSN50 区、SLN75 区、SLN50 区の 5 区を設置した。それぞれの中央

粒径 D₅₀ は 0.49 mm (SS), 0.65 mm (SL), 0.72 mm (SSN50), 0.73 mm (SLN75), 0.8 mm (SLN50) であった。なお、天然砂とスラグの混合区については、多くの区画を設定できなかったため、混合率は 25%、50% とした。Table 1 にスラグの化学組成を、Fig.1 に各造成材料の粒度組成を示した。

Table 1. Chemical composition of granulated blast furnace slag

constituent	CaO	SiO ₂	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	S	MnO
%	41.0	33.4	0.4	6.0	14.5	1.0	0.7

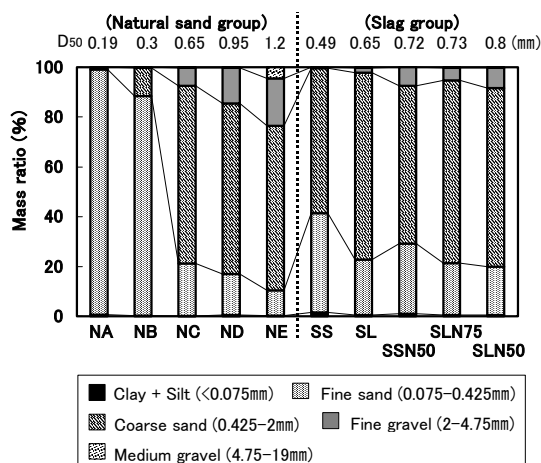


Fig.1 Grain size compositions and Median diameter (D₅₀) of each construction material. NA, NB, NC, ND and NE are natural sands, SS and SL are granulated blast furnace slags. SSN50 is the mixture having the ratio of SS to ND is 1:1. SLN75 is the mixture having the ratio of SL to ND is 3:1. SLN50 is the mixture having the ratio of SL to ND is 1:1.

浮遊幼生を得るための母貝は三河湾で採捕した殻長 3~4cm のものを用い、産卵に供するまで実験室内の水槽で 20 日間流水飼育した。産卵誘発は 2002 年 5 月 15 日に行った。放精、放卵は母貝を 12°C と 28°C に設定した精密濾過海水に浸漬する温度刺激法²⁰⁾ によった。受精卵は精密濾過海水で洗浄した後、500L のポリカーボネイト水槽に収容しふ化させた。受精 2 日後の D 型幼生変態後はこれらを 120µm のプランクトンネットで濃縮し、13 m³ 水槽に 3~5 個体 ml⁻¹ の飼育密度になるよう移槽した。飼育水は精密濾過海水とし 1 日約 2 回の換水率で流水飼育した。餌料は人工培養した *Pavlova lutheri* (パプロバ) を用い 1 日に 1 回 2~3×10⁴ cells ml⁻¹ になるよう与えた。

2 着底実験

30L の円形ポリカーボネイト水槽を 2 個用い、一方は、ふ化後 28 日（試験区 I）の着底直後、もう一方は、ふ化

結 果

1 着底実験

全ての実験区における着底数(生残数と死亡数の合計)と殻長の関係を Fig.2 に示した。試験区 I (ふ化後 28 日)では着底数と殻長との間には相関がなく、18 日経過した試験区 II (ふ化後 46 日)では負の関係を示す傾向にあった。これらのことは殻長という指標は密度効果的な要素により着底数に強く影響されることを示しており、造成材料そのものの適正比較には、Fig.3 に示す着底数と生残数との相関の比較が重要であると考えられた。

後 46 日(試験区 II)の着底初期の状況を調べた。水槽の中央部にプラスチック板を使い 5 cm×5 cm の区画を 25 区画作成し、その中に無作為に各造成材料を 7 cm 層厚で設け、実験区周囲の空所には天然砂 ND を敷き詰めた。全てについて複数の区を設けることが困難なため、同じ造成材料の着底量の相違については、一色干潟の粒径と類似する天然砂 ND とスラグ SL で観測した。試験区 I では ND を 2 区、SL を 3 区、試験区 II では ND を 4 区としたが、両試験区の相違については考慮していない。水槽中央にエアーストーンを吊し、緩やかに通気し微弱な流れを作った。実験区の設置は浮遊幼生投入の 2 日前に行い、実験開始まで精密濾過海水は入れなかった。区画にはスラグ、天然砂以外の造成材料も検討のため設置したが、本稿ではそれらについての評価は除く。

2002 年 5 月 24 日にふ化後 8 日目の浮遊幼生(平均殻長 171 μ m)を 1×10^5 個体ずつ 2 槽(試験区 I, 試験区 II)に収容した。餌料の種類、量は前述と同様であり、稚貝を採取するまで与えた。飼育水には精密濾過海水を用い、浮遊幼生の底層移行確認後は 1 日に 1 回、3 分の 1 を換水した。試験区 I ではふ化後 28 日の 6 月 13 日に、試験区 II はふ化後 46 日の 7 月 1 日に、それぞれの水槽から内径 27 mm (採取面積 5.7 cm^2) のコアを用いて砂を深さ 3 cm 採取し、3% 中性ホルマリンで固定した後、冷蔵保存した。生存個体と死亡個体の稚貝を計数した後、それぞれの殻長を測定した。

3 成長実験

着底実験とは別に着底後の稚貝の成長を比較するための実験を行った。造成材料は着底実験と同様、一色干潟の粒径と類似する天然砂 ND とスラグ SL としたが、施設の関係でこれ以外の材料については行わなかった。30L の円形ポリカーボネート水槽を 2 個用い、それぞれに 10 cm 層厚(砂面積 1,000 cm^2)で敷き詰めた。

2002 年 6 月 5 日にふ化後 20 日(平均殻長 235 μ m)の稚貝をそれぞれ 1×10^4 個体収容した後、実験室内で 295 日間生海水により無給餌で流水飼育し成長を比較した。飼育開始 54 日後の 7 月 29 日には水温が 29.6 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇し稚貝の斃死が確認されたため、水温が下降する 9 月 10 日までは 25 $^{\circ}\text{C}$ に設定した恒温室に水槽を収容し、2~3 日毎に飼育水の半量を交換した。それぞれの水槽からプラスチックシャーレを用い、複数ヶ所の砂を採取して生存稚貝の殻長を計測した。なお、収容後 35 日までの計測は 50 個体としたが、50 日以降は殻長に個体差が大きくなったため 100 個体計測した。また、収容 231 日後と 295 日後には内径 27 mm のコアで砂を深さ 5 cm、3 ヶ所採取し、稚貝の生残率を比較した。

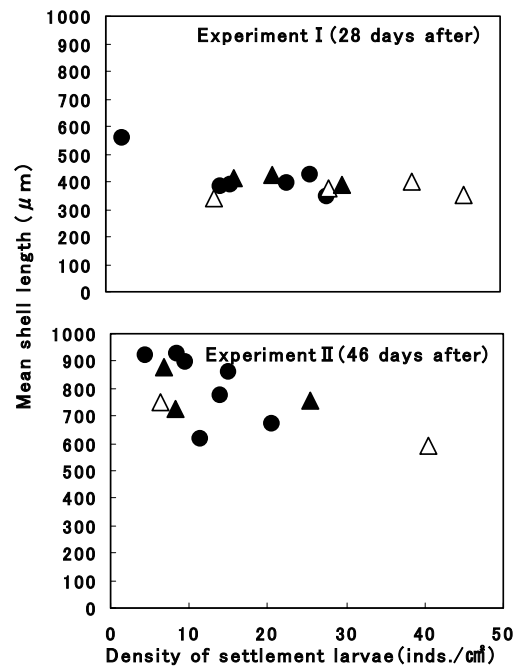


Fig.2 Relation to the shell length to the density of settlement larvae settled on each construction material. Upper figure shows result on 28 days after hatching (experiment I), lower figure shows result on 46 days after hatching (experiment II). Marks shows, ●, natural sand; ▲, slag alone; △, slag mixed with natural sand (ND).

試験区 I 及び試験区 II の全ての実験区における着底数と生残数の関係を Fig.3 に示した。ふ化後 28 日(試験区 I), 46 日(試験区 II)のいずれの試験区も天然砂区と同様、スラグ区には有意な正の相関がみられ($P < 0.001$), それぞれの実験区は一次直線($y = ax$)で近似できた。

次に、スラグ区と天然砂区における生残稚貝の密度と、粒径の相違による密度を Fig.4 に示した。なお、同一造成材料の複数区における生残数は平均値及び上限値、下限値を示し、スラグ区と天然砂区は t -検定により両区の差を検定した。

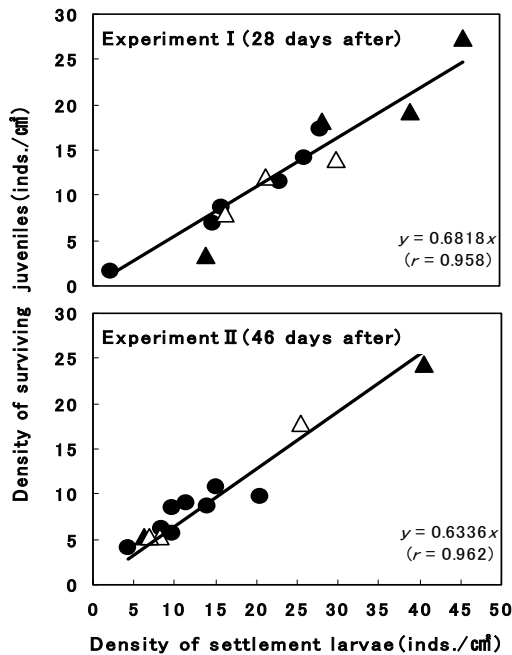


Fig.3 Relation to the density of surviving juveniles to the density of settlement larvae settled on each construction material. Upper figure shows result on 28 days after hatching(experiment I), lower figure shows result on 46 days after hatching (experiment II). Marks shows, ●, natural sand; ▲, slag alone; △, slag mixed with natural sand (ND).

各実験区の生残数をスラグ区、天然砂区ごとに平均すると、試験区 I ではスラグ区(14.6 個体 cm⁻²), 天然砂区(10.0 個体 cm⁻²), 試験区 II はスラグ区(11.6 個体 cm⁻²), 天然砂区(7.8 個体 cm⁻²)で、いずれの試験区もスラグ区が天然砂区より高い傾向がみられたが、両区間に統計的に有意な差はなかった ($P>0.05$)。

実験区ごとにみると、天然砂区の試験区 I では $ND>NC>NE>NA>NB$ であり、試験区 II では $ND>NE>NB>NC>NA$ の順であった。両試験区とも粒径の大きな砂で生残数が多い傾向にあったが、試験区 I の NB は他の砂より顕著に少なかった。

スラグ単独の SS, SL 及び、これらに粒径が最も類似している天然砂 NC の生残数を比較をすると、試験区 I では $SL>NC>SS$ の順で、SL は NC の 1.8 倍であった。一方、SS では SL の 15%, NC の 29%で、スラグの粒径の相違によって大きな差が生じた。試験区 II でも生残数は $SL>NC>SS$ の順で、SL は NC の 4.3 倍、SS では SL の 22%, NC の 94%であり、試験区 I と同様な傾向を示したが、SS はほぼ NC と同じ値であった。

次に、スラグに天然砂 ND を添加した実験区をみると、試験区 I の SS は $ND>SSN50>SS$ の順で、ND 添加により ND には及ばないものの着底が促進される傾向がみら

れた。試験区 II では $ND>SSN50=SS$ で、ND 添加による変化はみられなかった。SL に ND を添加した実験区の生残数は、試験区 I では $SL>ND>SLN75>SLN50$ の順で、SL の添加率を高めるに従い減少した。試験区 II でも同様な傾向がみられたが、いずれの試験区においても SLN50 は ND より低い値であった。

2 成長実験

Fig.5 にスラグ SL と天然砂 ND で飼育した平均殻長の経時的变化を、Fig.6 に生残数を示した。飼育期間中、造成材料の相違によって殻長に差はみられなかった。しかし、生残数をみると顕著な差が生じ、231 日目の生残数は SL が ND の約 2 倍であった。ND ではその後も多数の稚貝が斃死し、295 日目の生残数は 70 日間で 81%減少した。一方、SL ではこの間の生残数の低下は 24%に留まった。最終の生残率を生残密度から推定すると、それぞれ 33%, 3%となり、SL が ND を大きく上回った。

考 察

人工干潟が漁場や水質浄化の場として機能するためには、特にアサリ等有用二枚貝類の浮遊幼生が加入・着底し成長する好適な底質材料の存在が不可欠である。本実験では、アサリ浮遊幼生の着底状況に視点を置いて製鉄過程の副産物である高炉水砕スラグの利用可能性を検討した。

浮遊幼生の着底を指標に造成材料の適正を評価するには、Fig.2 に示したように密度効果の影響を受ける成長ではなく、着底数と生残数との相関関係を天然砂と比較することが適当であると考えられた。Fig.3 に示した天然砂区とスラグ区に着底した実験区の着底数と生存稚貝数の関係をみると、強い相関があり一次直線に近似できた。これらのことは天然砂区、スラグ区の実験区では着底量に関わらず着底稚貝の生存に及ぼす影響に差が小さいことを示しており、造成材料として両者には質的な相違はないことが示唆された。

自然界における二枚貝類成員の分布が浮遊幼生による着底基質の能動的選択によるものか、捕食等のそれ以外の要因も関与しているのかについては議論がある。²¹⁻²³⁾ しかし、少なくとも浮遊幼生の着底は受動的ではなく、能動的であるとの見解が一般的である。^{24,25)} Fig.4 に示した着底実験の中で同一造成材料に着底した生残数を見ると、試験区 I の二つの ND 区では 14,17 個体 cm⁻², SL 3 区では 18,19,27 個体 cm⁻², 試験区 II の ND 4 区では 9,9,10,11 個体 cm⁻²であり、変動幅は小さかった。このことは着底が単なる確率的過程によるものではなく、着底初期における能動的選択の存在を示唆している。これま

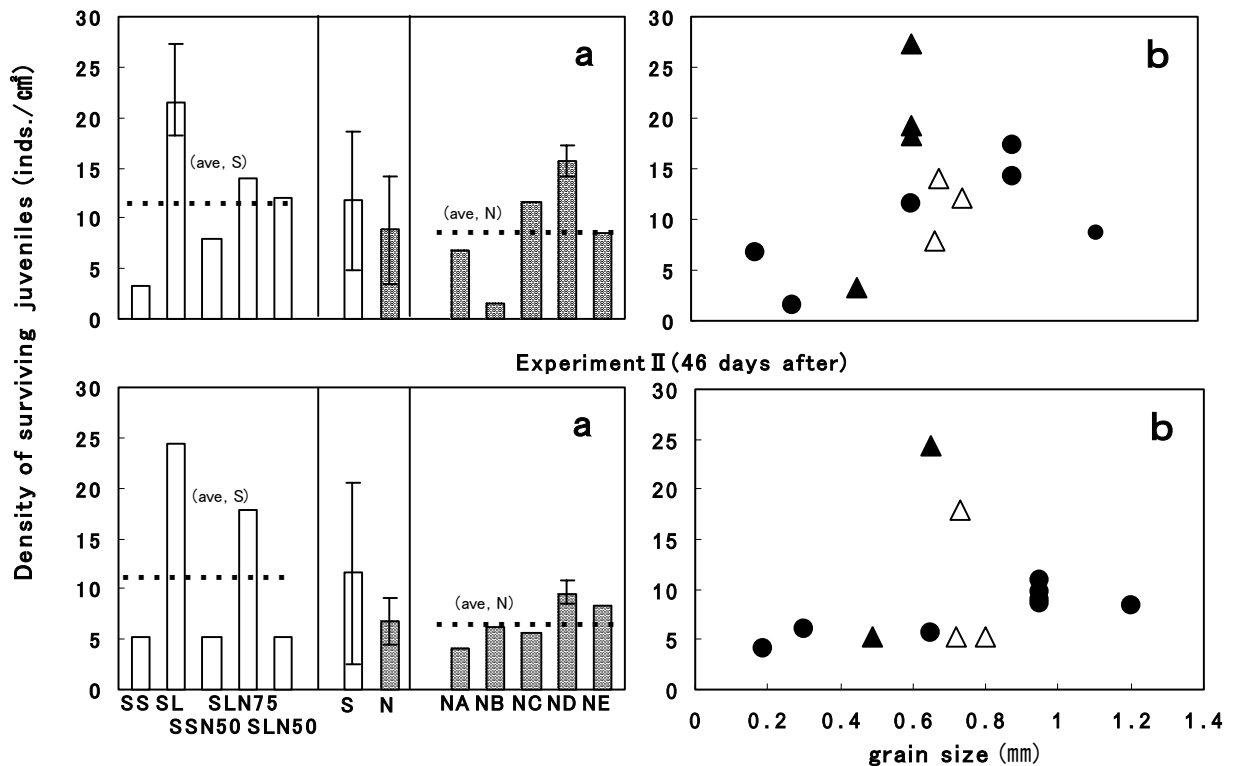


Fig.4 Density of surviving juveniles settled on each construction material. Left figure (a) show the mean density of surviving juveniles settled on slag group (S) and natural sand group (N), and the density for each construction material. (S) shows the mean and standard deviation on slag group (SS, SL, SSN50, SLN75, SLN50), and (N) shows the mean and standard deviation on natural sand group (NA, NB, NC, ND, NE). The dotted lines show mean value in each group. Values in ND are the average of 2 (experiment I) and 4 (experiment II), and SL is the average of 3. Vertical bars in ND and SL indicate the ranges in density of surviving juveniles. Right figure (b) show the density of surviving juveniles for each construction material based on grain size. Marks shows, ●, natural sand; ▲, slag alone; △, slag mixed with natural sand (ND).

での室内での飼育実験によれば、多くの浮遊幼生において選択的な観察がみられ、天然砂を用いた室内実験（止水）ではアサリ幼生が底生生活に移行する際、底質の粒径を選択し好適な基質に着底することが報告されており、¹⁸⁾ 粒径 1 mm前後が最も好適であるとされている。

本実験においても粒径の相違により着底数に差がみられ、Fig.4 に示したように天然砂での試験区 I, II のいずれにおいても中央粒径 0.95 mm の ND で着底数が最も多く、中央粒径の大きな砂ほど着底数が多い傾向にあり、柳橋¹⁸⁾ の行った実験結果と良く一致した。試験区 I で中央粒径 0.3 mm の NB への着底数が極端に少なかった原因は不明である。

Fig.3 に示した着底数と生残数の相関直線を見ると、スラグ単独の SL 及び SL と天然砂 ND を混合した実験区で着底量が相対的に高い傾向にあることから、アサリ浮遊幼生が能動的にスラグを選択している可能性が示唆された。

詳細にみると、Fig.4 に示したようにスラグの内でも粒径の大きい SL が粒径の小さい SS に比べ生残数が多く、

さらに SL は粒径の類似する天然砂 NC 及び天然砂全体の平均よりも着底数が多く、何らかの着底促進要因があるものと推測された。この傾向はふ化後 28 日でもふ化後 46 日でも同様にみられた。逆に SS は浮遊幼生投入 20 日後程度の初期には着底阻害効果を有することが示された。このような着底促進要因、着底阻害要因の存在はスラグと天然砂との混合 (Fig.3) により天然砂に近づく傾向があることから推測できる。

コケムシ類やホヤ類の幼生では銅、鉄、亜鉛の重金属塩が変態を促進し、カルシウム、マグネシウム等の無機イオンでは変態が促進あるいは抑制されることが報告されている。²⁶⁾ また、多くの海産無脊椎動物では、幼生の誘引因子に砂表面に付着する微生物、被膜物質及び、これらに由来する化学物質²⁷⁻²⁹⁾ の存在が知られており、スラグにも何らかの着底促進物質が存在する可能性は高い。高炉水砕スラグに由来する生物的・化学的な着底促進作用については不明であるが、今後、実験的な検討を加える必要があると思われる。

小粒径のスラグ(SS)では着底数が SL より少なく、ま

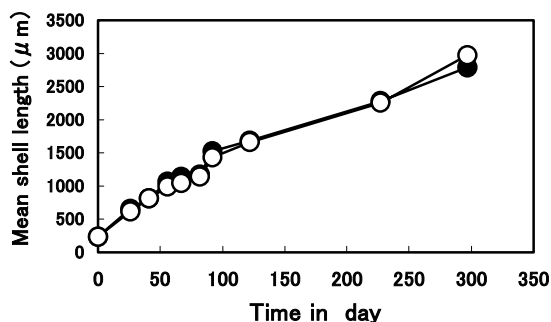


Fig.5 Changes in growth of juveniles on slag (SL) and natural sand (ND). Marks shows, ○, mean shell length in SL; ●, mean shell length in ND.

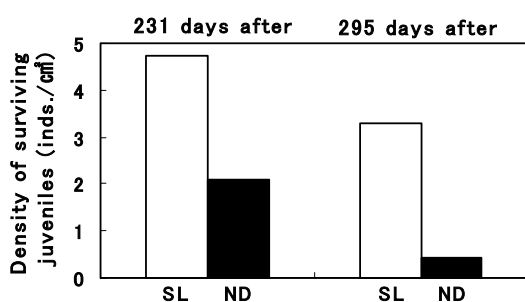


Fig.6 Density of surviving juveniles on slag (SL) and natural sand (ND) on 231 days and 295 days after raising.

た、粒径の類似する天然砂 NC と比べてもふ化後 28 日の試験区 I では少なく、SL とは逆に初期の段階で着底を阻害する傾向がみられた。この原因としては SS 区では粒子全体の表面積が SL 区より増加するため、スラグ表面からの Ca^{2+} 溶出が大きく、pH の上昇がより顕著に現れると考えられる。ムラサキガイ (*Mytilus Edulis*) では着底直前の変態期ベリジャー幼生 (pediveriger) の成長がアルカリ側で遅れ、ベラムの退化が進み斃死することが報告されている。³⁰⁾ アサリについてもアルカリ性側に対しては抵抗力が弱いことが指摘されている。³¹⁾ 清水港奥部での実験ではスラグ投入の直後から間隙水の pH が上昇し、4 週間後に最大 9.6 を示し、その後低下したことが報告されている。^{15,16)} 干満や流動に伴う間隙水の移動がない小規模実験の区画では pH の上昇がより顕著に現れると予想され、そのことが SL で推測された何らかの着底促進要因よりも、より忌避的に作用した可能性が考えられた。しかし、清水港奥部における実験の結果から 4 週間後には pH が急激に低下する^{15,16)} ことから、ふ化後 46 日の試験区 II では高 pH の影響が消え SS の生残数が天然砂 NC の値に近づいたと考えられた。

Fig.5 に示したように、着底稚貝の長期飼育では天然砂と高炉水砕スラグの殻長に差はみられなかった。しかし、天然砂では高水温期に稚貝の大量斃死が起こったが、スラグでは顕著でなかった。宮田ら¹⁵⁾ は高炉水砕スラグの沿岸海域の底質改善効果に関して夏季成層期に H_2S の発生が抑制されたことを報告している。この要因としては水砕スラグにより硫酸還元菌の活性が抑制されたこと、スラグ中の Ca 成分や Fe 成分により底泥から溶出する硫化物イオンが吸着されたことを挙げている。また、夏季に H_2S の発生が抑制されたことによって間隙水の COD が低下し DO も増加したこと等も挙げ、水砕スラグは底生生物の生息環境として好ましいと述べている。Fig.6 に示した今回の高炉水砕スラグと天然砂との生残率の差は、このような水砕スラグの持つ底質改善効果によって稚貝の腐敗に起因する二次的な斃死が抑制されたためと考えられた。

本稿ではアサリ浮遊幼生の着底状況を指標として、人工干潟・浅場造成材料としての高炉水砕スラグの利用可能性を検討した。その結果、水砕スラグ特に粒径の大きなスラグが天然砂よりも着底基質として有用であることが示唆された。しかし、浮遊幼生が着底・定着し最終的に底生個体群に加入するまでの間には、生物相互の関係も含めさまざまな過程が介在することが指摘されており、^{21,22,32)} 短期的な実験だけでは評価が困難である。従来の二枚貝類幼生の基質選択に関する実験の多くも小規模な空間で行われたものであって、^{24,33)} 自然条件下でも室内での着底機構が作用しているか否かは明確でなかった。そのため現実的な流動条件下での実験の必要性が指摘され、³⁴⁾ Snelgrove *et al.*³⁵⁾ は二枚貝類の一種である *Spisula solidissima* の着底実験を流動条件下で行った。その結果、自然海域での生息場所である砂質を能動的に選択するが、止水では泥質にも大きな着底がみられ、底質との間に何らの関係も得られなかったことを明らかにし、基質選択に関しては現場の海況にできるだけ忠実な現実主義的実験の重要性を指摘した。また、着底後の漂流による再移動^{36,37)} が重要であり、最初の幼生の着底場所と稚貝の生息場所とは異なることも知られており、³⁸⁾ ほとんど止水に近い、微弱かつ均一な流動条件の小規模室内実験や自然の底生生物群集が形成されない小規模室内実験では、得られた結果が自然の系で実際に作用するかを確認することができないことも指摘されている。

このため、本田ら³⁹⁾ は干潟環境条件を再現するメソコスムを利用した実験により高炉水砕スラグの利用可能性を検討し、スラグにおいても天然砂とほとんど同じ底生生物群集が構築されること、アサリ浮遊幼生の加入・

着底実験の結果では投入直後から約1年後まで生残数に有意な差がないことを報告している。本実験のような小規模な室内実験のみでは評価できないが、長期的かつ現場再現型のメソコスム実験の結果と併せて評価すると、天然砂に替わる造成材料としての高炉水砕スラグの利用可能性が示唆された。

小規模な実験では多くの実験区を同時に設定できないため、差の統計的検定が十分にできず、その結果の評価に多くの曖昧さを残す。今後は、統計的な検定精度をさらに高めるように個別実験区を増やし、高炉水砕スラグの持つ特性を検討したい。

要 約

干潟・浅場造成に必要な海砂の確保が今後困難になることが予測されるため、天然砂の代替材料として製鉄過程の副産物である高炉水砕スラグの利用可能性を検討した。大量培養したアサリ (*Ruditapes philippinarum*) 浮遊幼生を用い、浮遊幼生の着底や稚貝の成育状況を天然砂と比較し、時間スケールの異なる2種類の実験から明らかにした。

30Lのポリカーボネート水槽を使った小規模な短期の着底実験と長期の飼育実験を行い天然砂と比較した。天然砂区と高炉水砕スラグ区に着底した実験区の総個体数と生存稚貝数には強い相関があり一次直線に近似できた。また、大粒径 (D_{50} 0.65 mm) の高炉水砕スラグは天然砂よりも高い着底数が観察され、295日間の飼育では成長に差がみられなかった。これらの実験結果から干潟・浅場造成材料としての高炉水砕スラグの利用可能性が示唆された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、高炉水砕スラグの搬入に多大な労力を提供して頂いた川崎製鉄株式会社渡辺重世氏 (現 JFE エンジニアリング株式会社)、有益な御助言を賜った日本鋼管株式会社高橋達人博士 (現 JFE スチール株式会社) 並びに本稿の御校閲を頂いた日本シジミ研究所中村幹雄博士に厚くお礼申し上げます。また、実験遂行に協力して頂いた愛知県水産試験場研究員並びに水質調査船「しらなみ」の乗務員諸氏に深謝の意を表します。本研究は川崎製鉄株式会社 (現 JFE スチール株式会社) との共同研究の成果であり、ここに記して感謝致します。

文 献

1) 鈴木輝明, 青山裕晃, 甲斐正信, 畑 恭子. 貧酸素

化の進行による底生生物群集構造の変化が底泥-海水間の窒素収支に与える影響-底生生態系モデルによる解析-. *J. Adv. Mar. Sci. Tech. Soci.* 1998; 4: 65-80.

- 2) 佐々木克之. 干潟域の物質循環. 沿岸海洋研究ノート 1989; 26: 172-190.
- 3) 青山裕晃, 今尾和正, 鈴木輝明. 干潟域の水質浄化機能-一色干潟を例にして-. 月刊海洋 1996; 28: 178-188.
- 4) Yamashita Y, Yamada H, Tamaki H, Kawamura T, Tsuruta Y. Occurrence, distribution and utilization of nursery grounds of settling and new settled flounder *Platichthys bicoloratus*, in Sendai Bay. *Bull. Tohoku Natl. Fish. Res. Inst.* 1999; 62: 61-67.
- 5) Llanso RJ. Effects of hypoxia on estuarine benthos: the lower Rappahannock River (Chesapeake Bay), a cases study. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 1992; 35: 491-515.
- 6) 菊池泰二. 干潟は、いま: 総論. 海洋と生物 2000; 129: 300-307.
- 7) Suzuki T. Oxygen-deficient waters along the Japanese coast and their effects upon the estuarine ecosystem. *J. Environ. Qual.* 2001; 30: 291-302.
- 8) 武田和也, 石田基雄. 土砂採取に伴う浚渫窪地における顕著な貧酸素化現象について. 愛知水試研究報告 2003; 10: 7-14.
- 9) 鈴木輝明, 武田和也, 本田是人, 石田基雄. 三河湾における環境修復事業の現状と課題. 海洋と生物 2003; 146: 187-199.
- 10) 財団法人沿岸開発技術センター. 港湾工事用水砕スラグ利用手引書, 社団法人鉄鋼スラグ協会, 東京. 1989.
- 11) 社団法人鉄鋼スラグ協会. 鉄鋼スラグ統計年報, 社団法人鉄鋼スラグ協会, 東京. 2003.
- 12) 社団法人日本海難防止協会. 製鉄鉱さい利用の安全性に関する調査報告書, 社団法人日本海難防止協会, 東京. 1977.
- 13) 財団法人沿岸開発技術研究センター. 平成7・8年度鉄鋼スラグの覆砂材としての適用技術の調査・研究報告書, 社団法人鉄鋼スラグ協会, 東京. 1997.
- 14) 中田 等, 山内 学, 森西義章, 増田 薫. 鉄鋼スラグ添加による栄養塩, 金属元素およびフッ素の海水中への溶出挙動. 鉄と鋼 2003; 89: 393-400.
- 15) 宮田康人, 沼田哲始, 高橋達人, 豊田恵聖, 佐藤義夫. 鉄鋼スラグを用いた沿岸環境改善. 海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発

- 表論文集 2002; 37-42.
- 16) 沼田哲始, 宮田康人, 豊田恵聖, 佐藤義夫, 小田 静.
高炉水砕スラグの海域適用性. 日本海水学会第 52
年会講演要旨集 2001; 43-44.
 - 17) 宮田康人, 沼田哲始, 豊田恵聖, 佐藤義夫, 小田 静,
岡本 隆. 高炉水砕スラグの底質改善効果. 海洋開
発論文集 2000; 16: 345-350.
 - 18) 高橋達人. 新材料としての製鋼スラグ炭酸固化体.
コンクリート工学 2000; 38: 3-9.
 - 19) 柳橋茂昭. アサリ幼生の着底場選択性と三河湾にお
ける分布量. 水産工学 1992; 29: 55-59.
 - 20) 鳥羽光晴, 深山義文. アサリ産卵誘発方法の比較.
水産増殖 1992; 40: 303-311.
 - 21) Huxham M, Richards M. Can post-larval bivalves select
sediment type during settlement? A field test with
Macoma balthica (L.) and *Cerastoderma edule*(L.). *J.
Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2003; 288: 279-293.
 - 22) Olafsson EB, Peterson CH, Ambrose WG. Dose
Recruitment limitation structure populations and
communities of macro-invertebrates in marine soft
sediments: The relative significance of pre- and
post-settlement processes. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann.
Rev.* 1994; 32: 65-109.
 - 23) Woodin SA. Recruitment of infauna: Positive or negative
cues? *Amer. Zool.* 1991; 31: 797-807.
 - 24) Butman CA. Larval settlement of soft-sediment
invertebrates: the spatial scales of pattern explained by
active habitat selection and the emerging role of
hydrodynamical processes. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann.
Rev.* 1987; 25: 113-165.
 - 25) Todd CD. Larval supply and recruitment of benthic
invertebrates: do larvae always disperse as much as we
believe? *Hydrobiology.* 1998; 375/376: 1-21.
 - 26) Lynch. WF. Extrinsic factors influencing metamorphosis
in bryozoan and ascidian larvae. *Amer. Zool.* 1961; 1:
59-66.
 - 27) Wilson DP. The role of micro-organisms in the settlement
of *Ophelia bicornis* Savigny. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*
1955; 34: 531-543.
 - 28) Gray JS. Substrate selection by the archiannelid
Protodrilus hypoleucus Armenante. *J. Exp. Mar. Biol.
Ecol.* 1967; 1: 47-54.
 - 29) Scheltema RS. Metamorphosis of the veriger larvae of
Nassarius obsoletus (Gastropoda) in response to bottom
sediment. *Biol. Bull.* 1961; 120: 92-109.
 - 30) Bayne BL. Growth and the delay of metamorphosis of
the larvae of *Mytilus edulis*(L.). *Ophelia.* 1965; 2:
1-47.
 - 31) 倉茂栄次郎. アサリの生態研究, 特に環境要素につ
いて. 「水産学集成」(松本文夫編) 東京大学出版会,
東京, 1957; 639-645.
 - 32) 関口秀夫, 木村妙子. 初期生活史, 二枚貝類. 「軟
体動物学概説下巻」(波部忠重, 奥谷喬司, 西脇三郎
編) サイエンティスト社, 東京, 1999; 48-64.
 - 33) Jonsson PR, Andr C, Lindegarth M. Swimming
behaviour of marine bivalve larvae in a flume
boundary-layer flow: evidence for near-bottom
confinement. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1991; 79: 67-76.
 - 34) Snelgrove PVR, Butman CA. Animal-sediment
relationships revisited: cause versus effect. *Oceanogr.
Mar. Biol. Ann. Rev.* 1994; 32: 111-177.
 - 35) Snelgrove PVR, Grassle JP, Butman CA. Sediment
choice by settling larvae of the bivalve, *Spisula
solidissima*(Dillwyn), in flow and still water. *J. Exp.
Mar. Biol. Ecol.* 1998; 231: 171-190.
 - 36) Lane DJW, Beaumont AR, Hunter JR. Byssus drifting
and the drifting threads of the young post-larval mussel
Mytilus edulis. *Mar. Biol.* 1985; 84: 301-308.
 - 37) Armonies W. Migratory rhythms of drifting juvenile
molluscs in tidal waters of the Wadden Sea. *Mar. Ecol.
prog. Ser.* 1992; 83: 197-206.
 - 38) de Montaudouin X. Potential of bivalves' secondary
settlement differs with species: a comparison between
cockle(*Cerastoderma edule*) and clam (*Ruditapes
philippinarum*) juvenile resuspension. *Mar. Biol.* 1997;
128: 639-648.
 - 39) 本田是人, 石田基雄, 家田喜一, 武田和也, 山口安
幸, 鈴木輝明. 底生生物群集の構造およびアサリ
(*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. *J. Adv. Mar. Sci.
Tech. Soci.* 2004; 10(2): 19-33.

