（３）有明海の干潟底質改善における発泡ガラス材の有効性

牛原裕司[1]*・林重徳[2]・原裕[1]・松尾保成[1]・杜延軍[2]・
末次大輔[2]・M. Azizul MOQSUD[3]

[1]日本建設技術株式会社　技術研究所（〒847-1201佐賀県唐津市北波多徳須恵1417-1）

[2]佐賀大学　低平地研究センター（〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地）

[3]佐賀大学大学院　工学系研究科　博士後期課程（〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地）

＊ E-mail: *ushihara@nkg-net.co.jp*

本研究では，近年，干潟底質の環境悪化が見られる有明海において，アゲマキ養殖の再生を目的とした底質改善を実施した．底質改善材料には，廃ガラスを原料として作られた発泡ガラス材と海砂を使用し，それぞれの改善効果を室内および現地試験により検証した．

干潟底質の現状は，夏季になるとバクテリアの活動により水産用水基準を超える硫化物が生成し，底棲生物の棲息が困難な環境となっている．本論文では，発泡ガラス材や海砂を底質改善材料として底質に耕耘・混合することで，底質に含まれる有機物や硫化物の濃度が低下すること，さらに発泡ガラス材を使用することで台風・波浪による分級現象が緩和されることや，間隙水の移動が促進されることを示した．

Key Words : *Foamed Glass, ARIAKE sea, mud improvement, classification, hydraulic gradient*

1. はじめに

有明海は，長崎・佐賀・福岡・熊本の4県に囲まれ，南から北に向かって深く入り込んだ九州最大の内湾（面積1,700km^2，平均水深約20m）であり，島原半島南端と天草下島の間の早崎瀬戸（幅約5km）を通じて東シナ海とつながっている閉鎖的な海域である[1)]．また，我国の干潟の40%にも達する約8,600haの広大な干潟域を有し，かつてはアゲマキやタイラギなど多種にわたる底棲生物が数多く生息する豊かな海域であった．しかし，近年では海苔の不作や魚介類の不漁が続いており，特に2枚貝の漁獲量は激減している．有明海の環境維持に重要な役割を担ってきた２枚貝類の減少と底質悪化に関する報告もなされており[2)]，干潟を含む底質環境の改善は有明海再生のための重要な課題である．

一方では，廃棄物問題も大きな社会・環境問題である．本研究で用いる廃ガラスは，ワイン容器の有色ガラスおよび建設廃材の板ガラス等である．これらは再資源化が困難であり，埋立処分の問題がある．そこで，廃ガラスの有効利用のために，発泡ガラス材が開発された．発泡ガラス材は産業分野では断熱材として広く使われており[3)]，近年では発泡ガラス材の新たな用途として，非吸水性（独立気孔）のものは軽量盛土材，軽量骨材などに，吸水性（連続気孔）のものは岩盤斜面や屋上緑化用軽量保水材などに利用している[4),5),6)]．

著者らは，発泡ガラス材を用いて，かつて有明海の特産品であったアゲマキの養殖場再生を目的とした干潟域の底質改善実証試験を実施した．アゲマキは，泥質の堆積物中に棲息し，鉛直方向に1m程度移動するため，表層から深度1mまでの底質を改善する必要がある．従来の底質改善においては，覆砂や耕耘を行うことで底質内の有機物濃度を低下させ，DO消費量や硫化物濃度を低下させることが目的とされてきた[7)]．近年では，底質中に気泡が存在する場合には，干満により底質中に鉛直流が発生することが知られており[8)]，鉛直流を増幅させることが可能となれば，底質内部の酸化反応が促進されることが期待できる．本研究では，底質改善材料として，海砂と発泡ガラス材を底質に耕耘・混合することによる，有機物濃度の低下や鉛直流の増幅といった改善効果ついて，実証試験区の現地観測および室内試験より検証した．

2. 発泡ガラス材の特徴

発泡ガラス材は，廃ガラスと発泡剤を混合したものを800～900℃の炉で焼成することにより製造される．発泡ガラス材は，ミクロンオーダーの気孔を有し（**図-1** 参照），比重（0.4～1.5）および粒径（最大 50mm）の調整が可能である．主要元素はケイ素であり，溶出試験により安全性を確認している．底質改善材料として使用する発泡ガラス材は，浮力による浮上が生じないよう，乾燥させた海砂をガラスパウダーに調合することで，比重を1.5 程度に調整したものである．粒径は，最大粒径 8mm，平均粒径 0.18mm のものを使用した（**図-2,3**）．

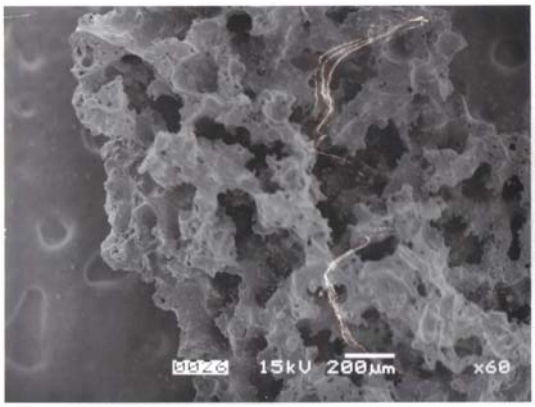

図-1 発泡ガラス材内部の電子顕微鏡写真

図-2 粒径 8mm 以下に粉砕した発泡ガラス材

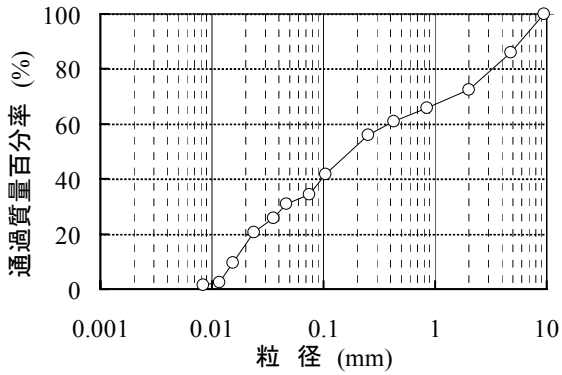

図-3 発泡ガラス材の粒径加積曲線

3. 現地での底質改善の効果

(1) 底質改善の概要

近年，底質環境の悪化が確認されている[9]佐賀県鹿島市飯田地先の干潟において，平成18年3月にアゲマキ養殖場の再生を目的とした底質改善の実証試験を実施した（**図-4**参照）．改善区の面積は0.2haで，周囲には大型土嚢を設置し囲繞堤とした（**図-5, 6**参照）．囲繞堤内区域をH17A，H17Bの2ケースに分け，H17Aには底質改善材

図-4 実証試験区位置

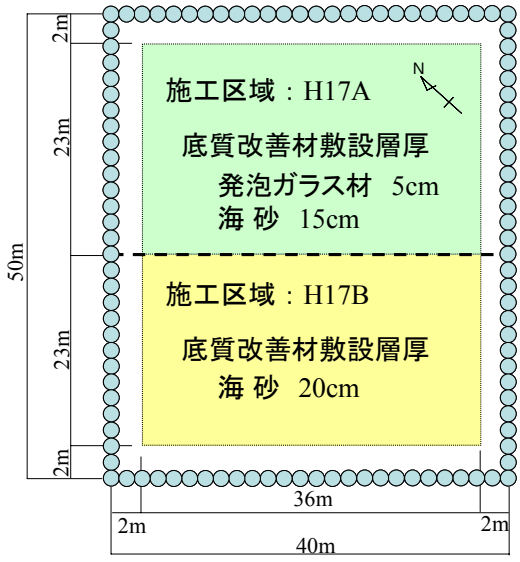

図-5 実証試験区域平面

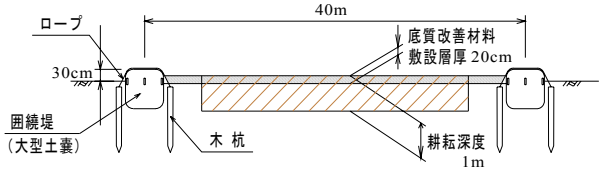

図-6 実証試験区域断面

料として発泡ガラス材5cmと海砂15cm，H17Bには海砂20cmを敷設し，その後耕耘機を用いて深度1mまでの耕耘を行い，干潟底質と底質改善材料が均一に分布する様に混合した．

(2) 底質改善による底質の変化

非改善区域（Blank）と改善区域（H17A，H17B）から，シンウォールチューブサンプラー(H=1m，ϕ=75mm)を用い底質を採取した．採取した底質を，1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60cmの深度でスライスカットしAVS, pH, ORP, 塩分, TOC, T-N, T-Pなどの試験を行った．

a) TOC, T-N, C/N比

TOC（総有機態炭素）はCNコーダー法に，T-N（総窒素）は底質調査方法Ⅱ.18.1に準拠して測定した．底質耕耘・混合半年後における底質中のTOC，T-N，C/N比の深度分布を**図-7**に示す．Blankでは，TOC，T-Nとも深度とともに低下する傾向にあった．また，改善材料を混合した底質については，Blankに比べてTOCとT-Nの濃度が希釈効果により低下する傾向にあった．C/N比はいずれの底質においても類似した深度分布を示しており，改善材料を混合することによる有機態窒素と無機態窒素のバランスに変化は見られなかった．

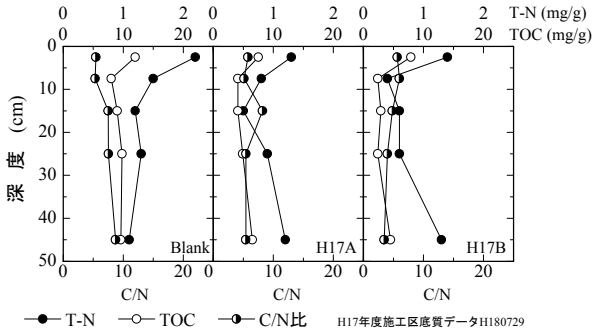

図-7 底質改善区内外における T-N，TOC，C/N の深度分布

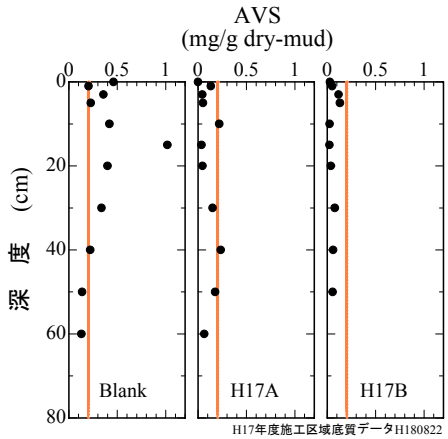

図-8 底質改善区内外における AVS の深度分布

b) AVS

AVS（酸揮発性硫化物）は，金属元素（主に鉄）や水素元素と結合した硫化物で[10]，新編水質汚濁指針法11. 2検知管法により測定した．**図-8**に，平成18年8月の改善区域内外における底質中のAVS深度分布を示す．Blankでは，AVSが1.0 mg/g dry-mudを超える硫酸還元層が形成されているのに対し，H17AとH17Bでは，概ね水産用水基準値である0.2 mg/g dry-mud以下の値となっていることを確認した．このことは，改善材料を底質に混合したことによる希釈効果と，有機物濃度の低下により硫酸還元作用が低下したことが要因と推察する．

(3) 台風・波浪による底質分級

平成18年9月17日に佐賀市での最大瞬間風速が50.7mという大変強い勢力を持った台風13号が有明海上空を通過した．**図-9**に台風通過前後の改善区域内における底質深度ごとのコーン指数分布を示す．改善材料として発泡ガラス材を混合しているH17Aにおける底質のコーン指数は，台風通過前後で大きな変化が見られない．これに対し，砂のみを混合しているH17Bでは，コーン指数が台風通過前に比べて極端に高くなる層がある．これは，底質内で砂層が形成されたもので，分級が生じた直後の9

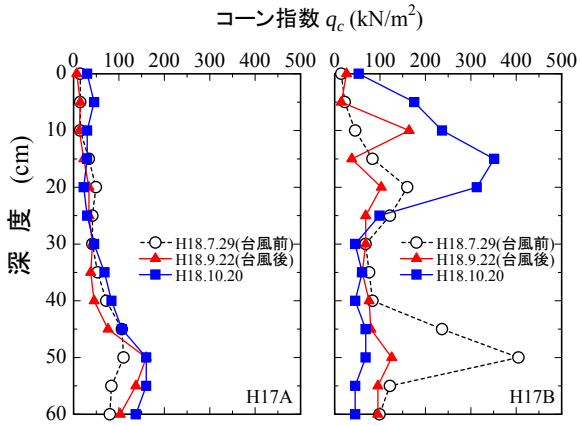

図-9 台風通過前後の底質深度ごとのコーン指数

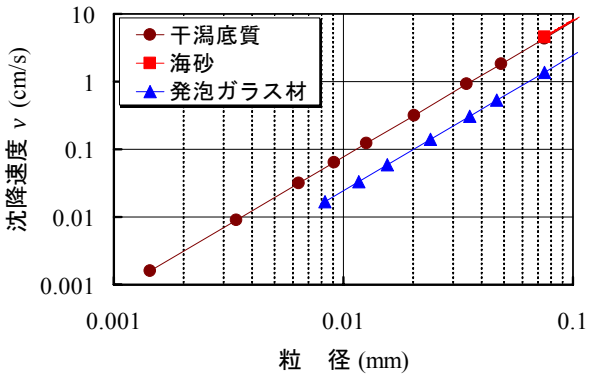

図-10 沈降速度と粒径の関係

月よりも1ヵ月経過した10月の方が高いコーン指数を示した．この現象から，潮位変動により形成された砂層において“水締め”が生じていることが窺える．このようにコーン指数が高くなる（底質が硬くなる）砂層が形成されると，対象生物としているアゲマキの潜泥に影響を及ぼすことが推察される．

このことは，**図-9**に示すように，ストークスの法則（式(1)参照）によると，海砂は，粘土粒子に比べて土粒子の密度が近似しているため，粒径の差異から，巻上げ時に分級現象が生じやすい．一方，発泡ガラス材は，土粒子の密度が1.5程度と小さいため，粒径が大きくても沈降速度は低く，巻上げによる分級・砂層の形成が抑制されたものと推察する．

$$v = \frac{g_n(\rho_s - \rho_w)d^2}{18\eta} \qquad (1)$$

ここに，v：沈降速度，g_n：標準の重力加速度，ρ_s：土粒子の密度，ρ_w：水の密度，η：水の粘性係数，d：粒子の直径である．

4. 発泡ガラス材を混合した時の底質への影響

干潟底質の間隙水圧を深度別に測定すると，満ち潮から引き潮に掛けてのピークの出現に時間的なズレ（以下タイムラグと呼ぶ）が生じており，そのため鉛直方向での動水勾配が発生し，満ち潮時には上向きの，引き潮時には下向きの浸透流が生じることを確認している[11]．また，底質中に気泡が存在する場合には，潮位変動により気泡が圧縮（満ち潮時）・膨張（引き潮時）することで，間隙水の鉛直流が発生することが知られている．そこで，発泡ガラス材を底質に混合することで，底質内部の気泡量が増加し，底質内部で生じる鉛直方向動水勾配が増幅されることを室内試験および現地観測にて検証した．

(1) 底質の圧縮試験

発泡ガラス材を混合した時の底質に含まれる気泡量の変化を，三軸セルを用いた圧縮による体積変化から検証した．

a) 実験手順

佐賀県鹿島市飯田地先の干潟より採取した底質に，発泡ガラス材の混合比率（0, 2, 4, 6, 8, 10%；体積比）を変えて混合した．準備した試料を，500mlずつ三角フラスコに充填した．さらに，底質上部に蒸留水を空気が入らないように充填し，体積目盛りが付いたガラス管を連結させたゴム栓を装着した．前述のように準備した供試体を，三軸セル内に設置し，0～50kPaの圧力をかけ体積変化を測定した（**図-11**参照）．

b) 実験結果と考察

式(2)を用いて任意の圧力をかけた時の底質の圧縮率を算定した．**図-12**には，発泡ガラス材の混合比率別に三軸セル内の圧力と圧縮率の相関を示している．発泡ガラス材を混合することで，底質の圧縮率が増加しており，さらに，混合比率の増加とともに相関の勾配が増加する傾向が見られる．発泡ガラス材や土粒子および間隙水が非圧縮性であることを踏まえると，前述のような傾向から，底質内に存在する気泡を，発泡ガラス材が有する連続した気孔に内包していることが窺える．また，発泡ガラス材を混合しない試料においては，加圧に伴う圧縮率の変化は微量であったものの，圧縮率がゼロでないことから，干潟の底質には気泡が存在していることが窺える．

$$\text{圧縮率}(\%) = \frac{\triangle V}{V} \times 100 \qquad (2)$$

$\triangle V$：加圧による体積変化量
V：供試体の容量(500ml)

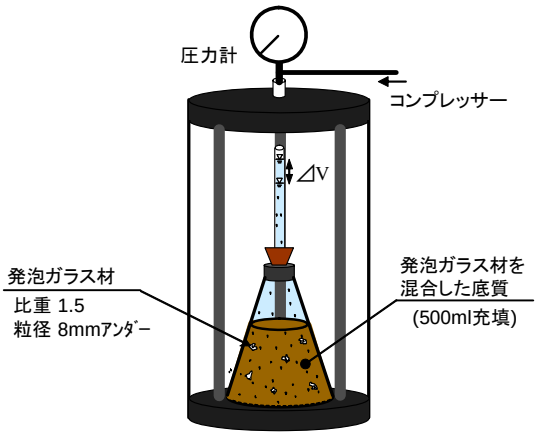

図-11 三軸セルを用いた圧縮試験の概略

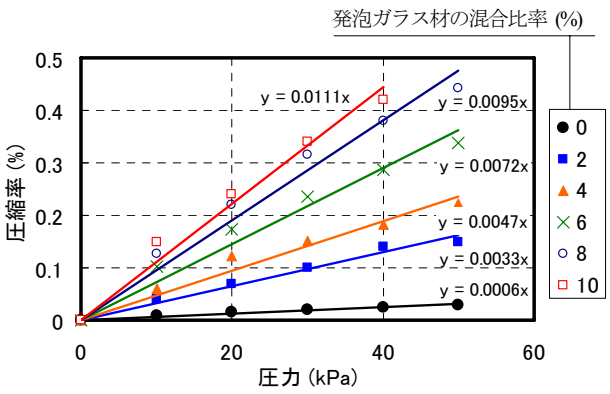

図-12 発泡ガラス材を比率別に混合した底質の三軸セル内圧力と圧縮率の相関

(2) 底質内間隙水圧の現地観測

前述の底質改善区内外にて，底質表面と深度50cmにおける水圧を測定し，底質内部で生じる鉛直方向の動水勾配を検証した．

a) 測定機器の設置

測定に用いた機器は，東京測器社製の水圧センサーKPD-200KPA，チャンネルボックスCSW-5A，データロガーDIGITAL STRAIN METER TC-31Kである．水圧センサーをBlank，H17A，H17Bの3箇所に設置し，チャンネルボックスとデータロガーはフロートに付属した保護ボックス内に設置した．この時，フロートはガイドパイプを通じて上下に移動できるようにし，データロガーのタイムインターバルは1分に設定した．（**図-13**参照）

b) 観測結果と考察

図-14に，平成18年12月4日から5日（大潮）にかけて測定した，底質表層部と深度0.5mにおける水圧の経時変化を示す．また，水圧センサーにより測定した圧力水頭は，式(3)を用いて全水頭に換算したものを**図-15**に示す．全水頭への換算に当たって，基準面を底質の表面とした．また，速度水頭は位置水頭や圧力水頭に対して微小であるためゼロとした．

$$h_n = z_n + \frac{u_n}{\gamma_w} \qquad (3)$$

ここに，h_n：基準面（底質表面）からの深度nにおける全水頭，z_n：基準面からの深度nにおける位置水頭，u_n/γ_w：基準面からの深度nにおける圧力水頭である．

底質表面と深度0.5mにおける全水頭の経時変化を比較すると，満ち潮から引き潮にかけてのピークの出現にタイムラグが生じていることが確認できる．Blankでは，このタイムラグが7分あり，そのために深さ0.5mの底質内部に，満ち潮時には負の過剰間隙水圧が，また引き潮時には正の過剰間隙水圧が生じる．このことは，満ち潮時には下向きの，引き潮時には上向きの浸透流が発生することになる．H17Bでは，タイムラグが6分に短縮された．これに対し，H17Aでは，タイムラグが12分に増幅した．**表-1**には，式(4)を用いて動水勾配を求めた値（最大値）を示しており，最大となる動水勾配が発生した時間を**図-15**に示す．

$$i = \frac{(h_0 - h_{0.5})}{\Delta L} \qquad (4)$$

ここに，i：動水勾配，h_0, $h_{0.5}$：基準面からの深度0mと0.5mにおける全水頭，ΔL：0.5mである．発泡ガラス材を混合した改善区域では，底質内部で生じる動水勾配が非改善区域や海砂のみを混合した改善区域に比べて1.4倍程度に増幅されたことが確認できた．

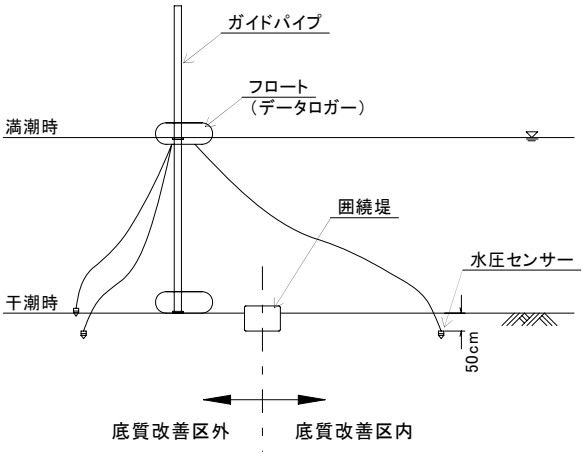

図-13 間隙水圧測定の概略

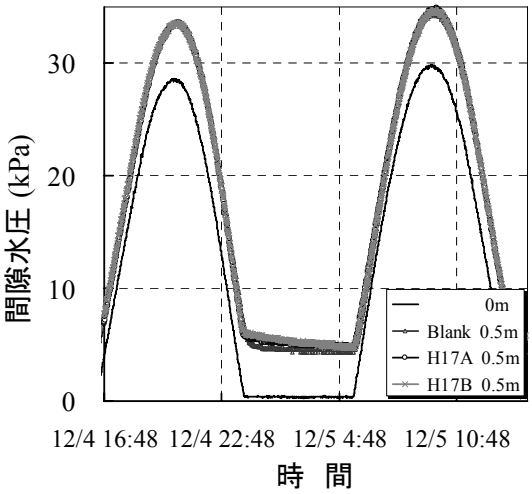

図-14 間隙水圧の経時変化

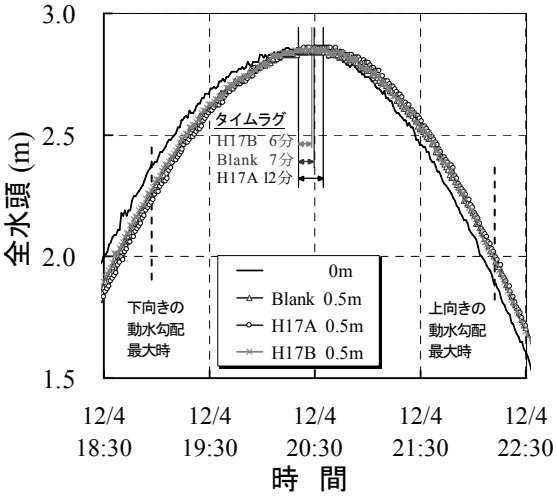

図-15 全水頭の経時変化

表-1 底質内部で生じる鉛直方向動水勾配

		Blank	H17A	H17B
底質改善材混合比率（体積比）		非改善区域	発泡ガラス材5% 海砂15%	海砂20%
動水勾配	下向き（満ち潮時）	0.34	0.46	0.32
	上向き（引き潮時）	0.22	0.26	0.22

5. 結　論

発泡ガラス材や海砂を干潟底質に耕耘・混合することで，①有機物濃度が低下されたこと，②夏季におけるAVSの値が抑制されていることを確認した．

さらに発泡ガラス材には，①巻き上による分級現象を抑制すること，②底質内鉛直方向における動水勾配を増幅させることなど，底質改善材料として極めて重要な効果があることを確認した．動水勾配が増幅されることで，間隙水の鉛直流が促進されるため，底質内の酸化反応が助長されることが想定される．この効果は，底質内に生息する生物の活動により発生するガスを多孔質な発泡ガラス材に内包することで生じているため，底質内が還元状態となった時に，発泡ガラス材の底質改善材料としてのより高い効果が発揮され，底質改善効果が持続するものと期待される．

今後も調査を継続し，改善効果の長期的な持続性を把握することで，アゲマキ養殖場としての耐用年数および採算性を検証するためのバックデータとする．

謝辞

本研究は，文部科学省の委託研究である科学技術振興調整費の重要課題解決型研究等の推進における「有明海生物生息環境の俯瞰的再生と実証試験」の一環で執り行ったものである．記して関係各位に謝意を表する．

参考文献

1) 佐藤正典：有明海の生きものたち，株式会社海遊舎，pp.9-19, 2000.
2) 伊藤史郎：有明海における水産資源の現状と再生，佐賀県有明水産振興センター研究報告 22，pp.69-80，2004.
3) 根正之他：ガラス工学ハンドブック，株式会社朝倉書店，pp. 649-666，1999.
4) 鬼塚克忠，横尾磨美，原裕，吉武茂樹：発泡廃ガラス材の工学的特性と有効利用の一例，地盤工学会，土と基礎，Vol.47, No.4，pp.19-22，1999.
5) 原裕，鬼塚克忠，佐藤磨美，桃崎節子：環境に配慮した斜面緑化の事例 －発泡廃ガラス材を用いた緑化 －，土と基礎，Vol.49，No.10，pp.13-15，2001.
6) 原裕，鬼塚克忠，原眞由美，桃崎節子：発泡廃ガラス材のクラスター構想 －屋上緑化への有効利用－，地盤工学会，土と基礎，Vol.51，No.6，pp.27-29，2003.
7) 平野敏行　監修：沿岸の環境圏，株式会社フジ・テクノシステム，pp.1147-1158，1998.
8) 楠田哲也，巌佐庸：生態系とシミュレーション，株式会社朝倉書店，p13，2002.
9) 田中誠，林重徳，末次大輔，杜延軍：有明海湾奥部干潟域および深水域における底質調査，第 7 回地盤改良シンポジウム論文集，pp.197-200，2006.
10) 竹内　均　監修：地球環境調査計測事典 第 3 巻 沿岸域編，株式会社フジ・テクノシステム，pp.233-236，2003.
11) 奥園健吾，林重徳，杜延軍，末次大輔，牛原裕司：潮位変動による底泥間隙水圧伝達のメカニズムに関する研究，平成 17 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.557-558，2006.

(2007.5.25 受付)

The Effect of Foamed Glass in Mud Improvement of the ARIAKE Sea

Yuji USHIHARA[1], Shigenori HAYASHI[2], Yutaka HARA[1], Yasunari MATSUO[1]
Yan.Jun.Du[2], Daisuke SUETSUGU[2] and M.Azizul MOQSUD[3]

[1]Technical Research Institute, Nihon Kensetsu Gijutsu Co., Ltd.
[2]Institute of Lowland Technology, Saga University
[3]Graduate School, Saga University

In this study, mud improvement test to restore the *Sinonovacula constricta* culture was carried out in the ARIAKE gulf where environmentally polluted, recently. Foamed Glass which is recycled from waste glass, and sea sand were used as mud improvement materials. The effect of mud improvement materials were investigated at both in-situ and laboratory test.

The present condition of ARIAKE gulf mud is difficult to live for benthos, because concentration of sulfide has exceeded favorable limit due to increasing of active bacteria in summer time. In this paper, it was shown that the concentration of TOC and AVS decreased by mixing mud improvement material with mud. And also found that the classification with typhoon and wave was controlled, and the movement of pore water was promoted by mixing foamed glass with mud.