

石炭灰造粒物の人工干潟の表面覆砂材としての適用性に関する研究

守田 悠究¹

¹中国地方整備局 広島港湾・空港整備事務所 工務課 (〒734-0011 広島市南区宇品海岸3-10-28)

港湾工事で発生する浚渫土砂の有効活用の一つとして、埋立等により減少した干潟の再生が挙げられ、尾道糸崎港周辺に造成された4つの人工干潟において、アサリの生息場として有効に活用されている。本研究では、人工干潟の表面覆砂材として、環境修復材である石炭灰造粒物に着目し、浚渫土砂に石炭灰造粒物を覆砂した試験干潟を造成し、干潟材料の栄養供給（溶出イオン量）、付着珪藻・底生生物の生産性を検討した。その結果、石炭灰造粒物が浚渫土砂から栄養塩を吸着し、付着珪藻を増殖させることで、アサリの生息場として適した環境を形成し得ることが明らかとなった。

キーワード 石炭灰造粒物, 浚渫土砂, 栄養塩, 珪藻, アサリ

1. はじめに

港湾工事で発生する浚渫土砂の有効活用の一つとして、埋立等により減少した干潟の再生（人工干潟の造成）が挙げられる。中国地方整備局広島港湾・空港整備事務所では、1984年より尾道糸崎港周辺において4つの人工干潟を造成した実績を有しており、これらは現在においても、アサリの生息場として有効に活用されている。

一方、石炭火力発電所から発生する石炭灰を造粒して製造された環境修復材である石炭灰造粒物（図-1）は、自然砂と異なり、海底面に散布すると、石炭灰造粒物から溶出されるカルシウムイオン（ Ca^{2+} ）による化学反応や、石炭灰造粒物が有する微細な空隙による物理的吸着によって、栄養塩（リン酸イオン（ PO_4^{3-} ）・アンモニウムイオン（ NH_4^+ ））を吸着して海底面の生物生息環境を良好にする効果があることが、福山内港地区における現地実験等から明らかになっている。なお、石炭灰造粒物のコストは自然砂と概ね同等である。本論文では、人工干潟の表面覆砂材として、従来使用されている自然砂に加えて石炭灰造粒物を使用することで、より一層アサリ等の生物生息に適した環境が実現可能か、現地実証実験によりその適用性と効果について考察する。現地実証実験場は広島湾奥部に位置する海田湾瀬野川河口部である。

現地実証実験では、石炭灰造粒物の人工干潟の表面覆砂材としての適用性について考察するために、①付着藻類の繁茂特性と生物生息環境の検討、②石炭灰造粒物による水質、底質への影響特性の検討、③石炭灰

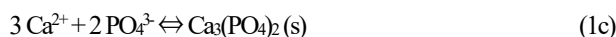
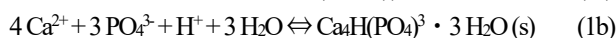
造粒物による浚渫土砂内の栄養塩の有効利用の可能性の検討、④アサリの生息環境の把握の検討を行った。

2. 実証実験の概要

(1) 実証実験に使用した石炭灰造粒物, 浚渫土砂

a) 石炭灰造粒物の特性

石炭灰造粒物は、石炭灰を燃焼したフライアッシュとセメントを適量の加水によって混合・造粒した環境修復材である。近年では、ヘドロ化した沿岸域の底泥に散布されるなどの利用が進んでおり、中国地方整備局では2011年に、ヘドロ化した福山内港の底泥に石炭灰造粒物を散布し、生態系が再生されている。玉井ら¹⁾は、有機泥が堆積した海底に石炭灰造粒物を被覆することで、被覆層内間隙水中の栄養塩類（ NH_4^+ 、 PO_4^{3-} ）濃度が低くなると述べており、石炭灰造粒物が栄養塩類を吸着することを示している。一方、森本ら²⁾は石炭灰造粒物から溶出する Ca^{2+} はリン酸と反応してリン酸カルシウム化合物やリン酸水素カルシウム（ヒドロヒドロシキアパタイト）化合物等を生成すると明らかにしている。本実験で使用した石炭灰造粒物は粒径0～40mm、湿潤密度は1.4t/m³程度、せん断抵抗性は $\phi > 35^\circ$ である。



b) 浚渫土砂

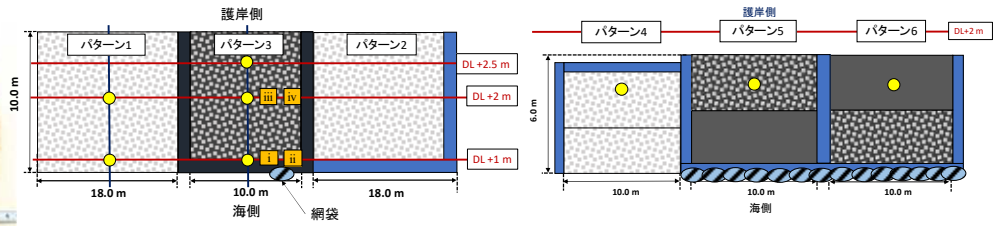


図-1 石炭灰造粒物

図-2 試験干潟平面図

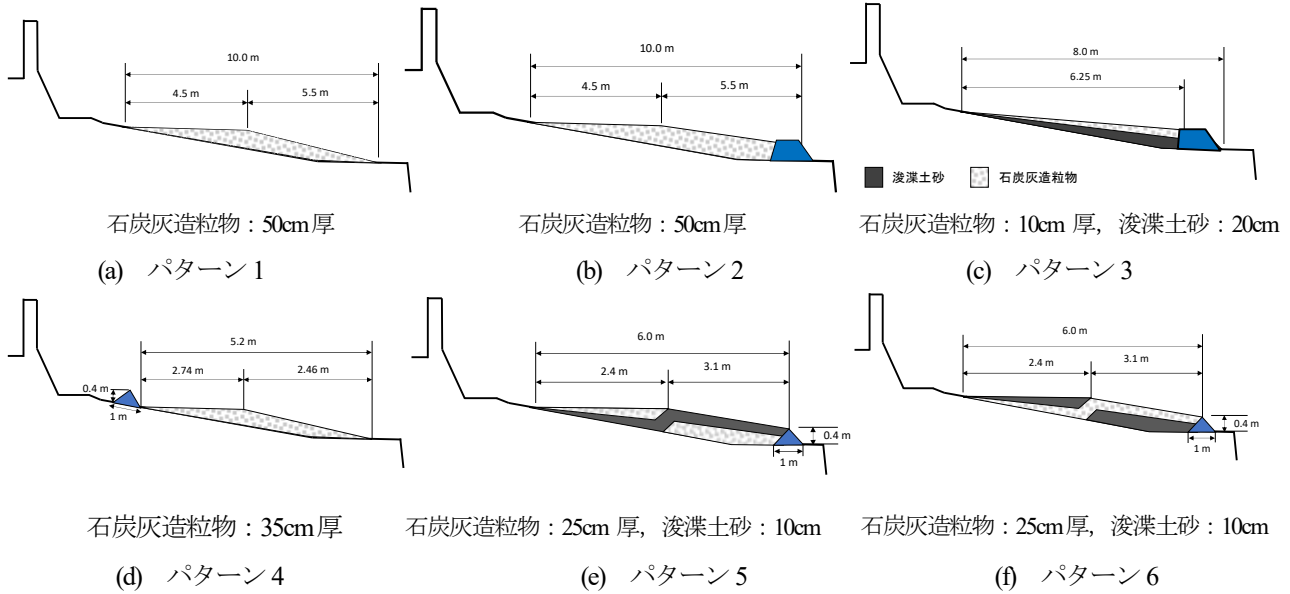


図-3 護岸上に施工した試験干潟の概要

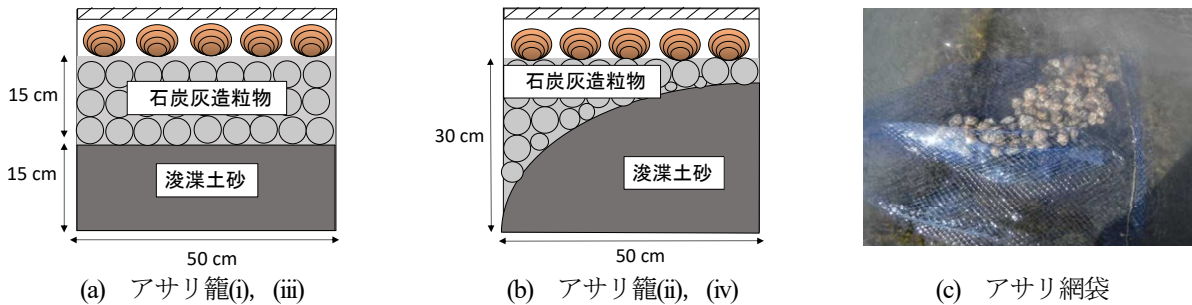


図-4 アサリ籠実験の概要

浚渫土砂は、福山港で2019年と2020年に採取したものを使用した。2019年に採取された浚渫土砂の間隙水中の栄養塩濃度は、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} がそれぞれ約18mg/L、6mg/Lであったが、2020年に採取された浚渫土砂の間隙水中の栄養塩濃度は NH_4^+ 、 PO_4^{3-} がそれぞれ約7mg/L、1mg/Lであった。

(2) 試験干潟の概要

広島湾奥部に位置する海田湾瀬野川河口部の既存護岸前面に、2019年9月に10m×50m規模、2020年10月に6m×30m規模の、石炭灰造粒物を覆砂材とする人工干潟を試験施工した(図-2)。石炭灰造粒物のみを材料とし

たパターン1, 2, 4, 浚渫土砂上に石炭灰造粒物を覆砂したパターン3, 石炭灰造粒物と浚渫土砂の覆砂順序を断面途中で入れ替えたパターン5, 6の計6パターンを試験施工した(図-3)。既存護岸前面の勾配は1.44m/10mで石畳状である。

パターン1~3は2019年9月末に施工し、パターン4~6は2020年10月中旬に施工した。

(3) 実験概要

a) 付着藻類の繁茂特性と生物生息環境の検討

2020年1月、8月と2021年1月に付着藻類(種類、細胞数)調査を行った。付着藻類量調査は、2020年9月から

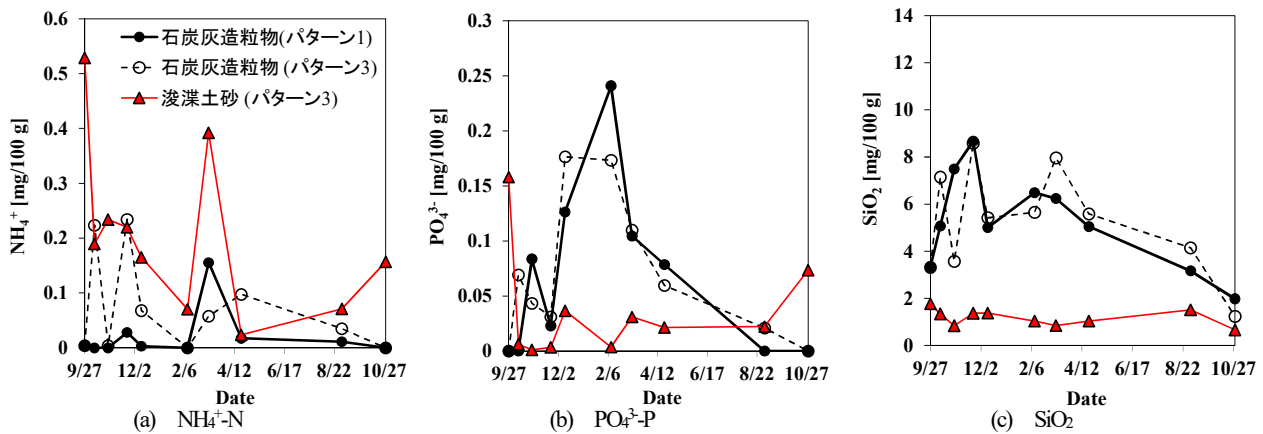


図5 干潟材料からの栄養塩の溶出実験結果

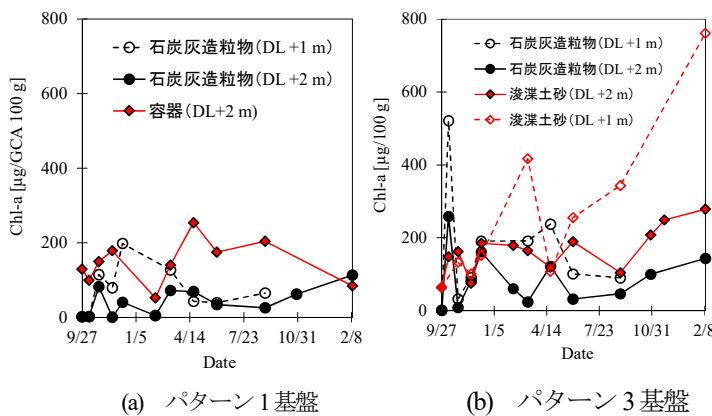


図6 付着珪藻量の経時変化

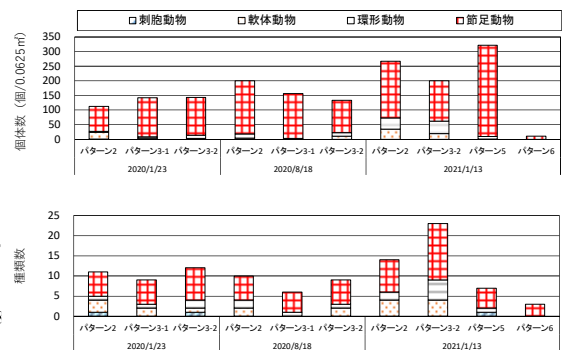


図7 底生生物生息状況

2021年2月にかけて行った。試料はパターン1, 3から採取した。

藻類調査では種類と細胞数を調べたが、種によって細胞構造が大きく異なるため、細胞数を質量に換算することが困難である。そのため本論文では、藻類の総付着量をChl-a量で表した。藻類にはChl-a以外のクロロフィルが含まれるが、藻類共通に含まれるChl-aを付着藻類総量とした。付着藻類の総量と考えられるChl-a量は次の方法により抽出した。石炭灰造粒物100gを90%アセトン100ml、浚渫土砂（湿潤状態）10gをアセトン30mlにより24時間の抽出を行った。抽出後、抽出液の吸光度を分光光度計（日本分光、V-730）により測定した。海洋環境調査法に示された換算式により吸光度からChl-a量を算出した。また、2020年8月、1月、2021年1月に生物調査を行った。試料はパターン2, 3, 5, 6から採取した。

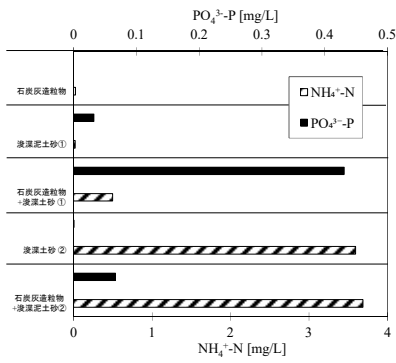
b) 石炭灰造粒物による水質・底質への影響特性の検討

現地に試験施工した干潟パターンについて、石炭灰造粒物、海水、浚渫土砂中の栄養塩類（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ）の各種成分量の経時的変化をモニタリングし、石炭灰造粒物の化学的・物理的特性による水質・底質改善効果を検証した。パターン1から石炭灰造粒物、パター

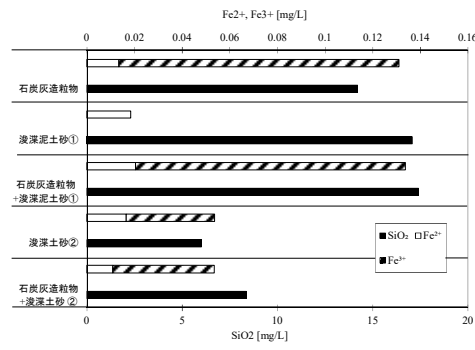
ン3, 5, 6から石炭灰造粒物と浚渫土砂を採取した。試料はMSLを基準にDL+1, 2mから採取した。採取した石炭灰造粒物と浚渫土砂の分析では、浚渫土砂（湿潤状態）500gを純水500mL、石炭灰造粒物100gを純水1Lに混合し、約200rpmで6時間攪拌後、溶液を0.45µmのメンブレンフィルターに通過させて試料水とした。試料水の栄養塩（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ）、二酸化ケイ素（ SiO_2 ）、鉄イオン（ $\text{Fe}^T, \text{Fe}^{2+}$ ）、pH、ORP分析を行った。

c) アサリの生息実験

水浸時間が変化するように、パターン3のDL+1mとDL+2mに、アサリを投入した籠A ((i), (iii)), B ((ii), (iv))の計4籠と網袋の検体（図4）を設置した（図2）。籠Aには浚渫土砂を水平、籠Bには浚渫土砂に傾斜をつけて実験籠を作成した。また、水深の違う2地点（DL+1m, DL+2m）にアサリ籠を設置することで、水浸時間の違いがアサリの生存個体数に影響があるかを調べた。各籠にはアサリ100個体を投入した。3ヶ月に1回の調査を基準として、アサリの生存個体数とアサリの成長度を測定した。籠内のアサリは全個体を採取できていない場合があり、その場合の採取率は80~95%である。成長度は生存個体の内20個体を抽出して殻長、殻幅、殻高、湿重量を測定した。



(a) 栄養塩 (NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P)



(b) SiO₂, Fe²⁺, Fe³⁺

図-8 石炭灰造粒物, 浚渫土砂からの栄養塩溶出実験

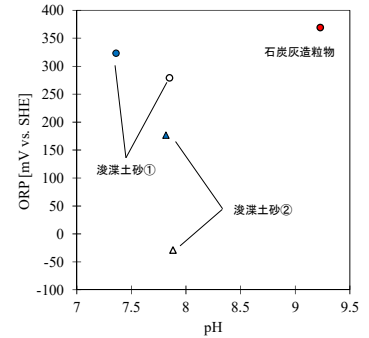


図-9 pH-ORP 関係

3. 石炭灰造粒物の人工干潟の表面覆砂材としての適用性

(1) 石炭灰造粒物への藻類付着と生物生息状況

図-5にはDL+2m地点のパターン1, 3の石炭灰造粒物, 浚渫土砂100g当りから溶出した(a)NH₄⁺-N, (b)PO₄³⁻, (c)SiO₂量を示している。石炭灰造粒物は珪藻の発生に必要なシリカを溶出することが明らかとなった(図-5(c))。また, パターン1に比べ, パターン3の石炭灰造粒物の方が溶出される栄養塩が多く検出された(図-5(a)(b))ことから, 石炭灰造粒物が浚渫土砂から栄養塩(PO₄³⁻, NH₄-N)を吸着することが示唆された。

図-6には干潟試験施工後の石炭灰造粒物に付着したChl-a量の経時変化が示されている。図-6(a)には石炭灰造粒物基盤(パターン1), 図-6(b)には浚渫土砂上に石炭灰造粒物を覆砂したパターン3への付着藻類量(Chl-a量)を示している。これまでの付着藻類調査とChl-a測定から石炭灰造粒物への付着藻類(Chl-a量)は珪藻であることが明らかにされている³⁾。珪藻は水域において重要な一次生産者であり, 食物連鎖の根底をなしている。珪藻は魚や貝などの水生生物に多く利用されることが知られている。付着珪藻は干潟試験施工後約2週間で石炭灰造粒物100g当り100μg付着している。特にパターン3のDL+1m地点では, 石炭灰造粒物100g当り500μgの珪藻が付着しており, 石炭灰造粒物単体のパターン1と比較して高い値をとっている。パターン3では浚渫土砂からの栄養塩を獲得する(図-5(a)(b), 図-8(a))ことで, 設置後2週間以内に付着した珪藻の増殖があったと推定される。浚渫土砂上に石炭灰造粒物を覆砂したパターン3では, 石炭灰造粒物単体のパターン1と比較して, 浚渫土砂に対する珪藻の付着量も多くなっており, 珪藻の付着に浚渫土砂が有効であることがわかる。設置後1年程度で石炭灰造粒物からの栄養塩(PO₄³⁻, NH₄⁺-N)の溶出量が低下した(図-5)のは, 珪藻により栄養塩が利用され石炭灰造粒物への栄養塩の吸着が少なく

なったことが推定される。一方, 波の影響を受けない容器内の石炭灰造粒物は試験干潟の石炭灰造粒物と比較して, 珪藻の付着量が多い(図6(a))ことから, 石炭灰造粒物の流動性(安定性)が付着珪藻の剥離を引き起こすことが考えられる。

試験干潟の生物生息状況は, 図-7に示すとおりである。底生生物の種類は節足動物の占める割合が高く, 主にイソガニ属, シロスジフジツボ等が確認された。一方で個体数は少ないが, 軟体動物ではアサリ, ホトトギスガイ等, 環形動物ではアシナガゴガイ, スナイソゴガイ等が確認された。底生生物の個体数は, パターン2及びパターン3-1(浚渫土砂量>石炭灰造粒物量)で冬季(2020年1月)から夏季(2020年8月)にかけてやや増加傾向を示していた。2020年1月と2021年の1月を比較すると生物量の増加が顕著である。

生物量の増加は主にフジツボ, イソガニ(節足動物)と牡蠣(軟体動物)であり, これらの動物の発生は石炭灰造粒物基盤での特性である。パターン3においても同様な動物相になったのは, 浚渫土砂の減量(巻き上がり)によって石炭灰造粒物が基盤に残留したためである。浚渫土砂量が多いパターン5では石炭灰造粒物と浚渫土砂の相互作用によりコツブムシ, ヨコエビ, ドロクダムシ等の魚類の餌となる節足動物が増加しており, 生態系の下部が形成されている。

アサリは浚渫土砂に石炭灰造粒物を覆砂したパターン3-2(浚渫土砂量<石炭灰造粒物量)で出現率が高く, 石炭灰造粒物基盤であるパターン2でも数個体出現している。周辺海域にアサリの生息域はなく, 稚貝の数密度は小さいと推定されるが, 個体は8月から翌年1月に増加しており, 石炭灰造粒物基盤にアサリは定着し易い基盤と考えられる。稚貝の定着には礫等の大粒径基盤が適することも報告されており, 本実験でも粒径の大きい石炭灰造粒物基盤で稚貝の定着が確認された。

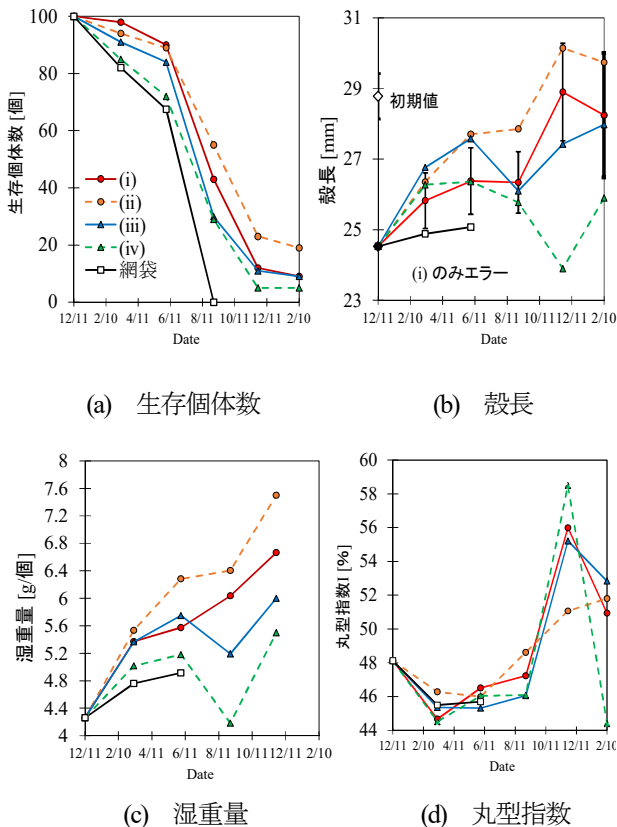


図-10 アサリの生息状況の経時変化

(2) 石炭灰造粒物による浚渫土砂内の栄養塩利用

図-8には石炭灰造粒物、浚渫土砂から溶出した栄養塩 ((a)NH₄⁺-N, PO₄³⁻-P, (b)SiO₂, Fe²⁺, Fe³⁺) 量を示している。実験に使用した浚渫土砂は、2019年9月に福山港で採取し浚渫土砂を1年間常温で保存したもの(浚渫土砂①)、パターン3に敷設されて1年が経過したもの(浚渫土砂②)である。石炭灰造粒物や石炭灰造粒物混合前の浚渫土砂からのNH₄⁺-N, PO₄³⁻-Pの溶出量は、各々0.02mg/Lと0~0.03mg/L程度しかないが、浚渫土砂に石炭灰造粒物を混合することで栄養塩は数10~数100倍程度溶出しており、石炭灰造粒物が浚渫土砂からの栄養塩の溶出を促進することが分かる。石炭灰造粒物と浚渫土砂を混合する前では、鉄イオンは主に石炭灰造粒物から溶出(約0.13mg/L)されるが、SiO₂は石炭灰造粒物、浚渫土砂①ともに同程度の溶出(約15mg/L)がある。1年経過した浚渫土砂②に石炭灰造粒物を混合した溶出実験では、鉄イオンの溶出量が低下することから、石炭灰造粒物から溶出した鉄イオンは浚渫土砂②へ吸着、結合されたと考えられる。

浚渫土砂との攪拌により、石炭灰造粒物のpHは7.3~8.0の範囲まで低下している(図-9)。石炭灰造粒物は有機物表面に結合するH⁺を脱離(金属イオンとしての弱酸遊離反応)させることにより、pHを低下させている。石炭灰造粒物からの金属イオン等の溶出は、浚渫

土砂に付着する有機物の吸脱着等、不活性状態にある浚渫土砂を活性化させる機能を有する。本実験においても浚渫土砂周辺のORPが変化し、浚渫土砂からのSiO₂や金属イオンの溶出が促進されることが示唆された。

4. アサリの生息環境の把握

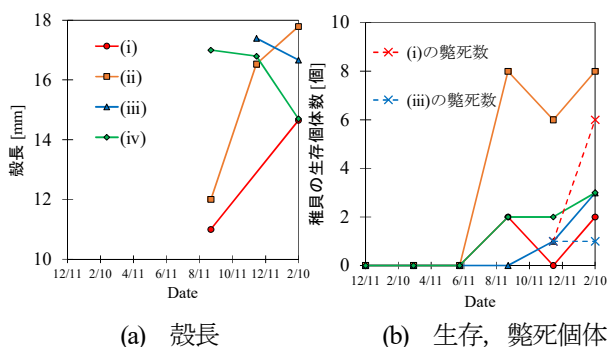
(1) アサリの生存と成長

図-10にはアサリの生息状況の経時変化、(a)生存個体数、(b)殻長、(c)湿重量、(d)丸型指数(=殻幅/殻長*100)を示している。凡例の(i)~(iv)、網袋は図-2、図-4(c)に示したアサリの設置法に対応している。アサリ生存率はDL+1mでの生存数がDL+2mより常に高く、水浸時間の長い条件が夏期以外でもアサリの生息環境として良いことが推定される。地盤高が低いDL+1mに設置された装置(i)、(ii)では、アサリの生存率が高く継続した成長(殻長、湿重量)が確認されるが、DL+2mに設置された装置(iii)、(iv)では生存率と同様に9月以降、成長度もDL+1mと比較して低い値を示している。

DL+1m付近に直接設置した網袋ケースでは、餌の供給が海水から直接、または袋に付着した餌の供給に限定されることや波の影響を直接受けることにより成長度、生存率が低いと考えられる。以上の結果から、アサリの生息環境に地盤高や干潟材料は重要な要素となり、生存率の高い条件で成長度が高く(殻の大きさに対して重量が大きくなる傾向が確認された。

6月以降、アサリの生存率の低下が見られ、生存率の低下は日照、地盤温度に依存すると予想される。夏を迎える前(6月3日)までは、全ての設置条件で60%以上の生存率であったが、夏を越えると(9月~11月)、生存率が急激に低下した。丸型指数は生存率の高い9月1日より前の季節では45程度であるが、生存率の低くなった11月になると60近くに上昇している。丸型指数は柿野により提案されたアサリの成長評価手法であり、値が低いほどアサリの身入りが良いことが確認されている⁴⁾。DL+1mにおいても夏の日差しを直接受ける網袋では、9月1日の時点で全滅している。8月上旬にはDL+1mでの干潟温度が30℃を下回らず、アサリにとって過酷な温度となっていた。網袋では干出中、直接日照を受けることが死滅の原因と考えられることから、干潟材料の熱伝導性や干潟材料内への潜り易さにも影響されることが示唆される。11月以降、アサリの生存率が高くなり、顕著な湿重量の増加と丸型指数の低下が見られる。地盤温度がアサリの生存に危険を及ぼさない条件では、石炭灰造粒物、浚渫土砂基盤において夏期を乗り越えたアサリの生存率、成長度が回復している。図-5では、DL+1mにおいて石炭灰

造粒物への珪藻付着量が多く、年間を通して200 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 程度の珪藻（餌）の供給があり、藻類の供給能力は高いといえる。夏期の日照、温度を緩和できれば石炭灰造粒物基盤でのアサリ生産能力は高いと判断できる。



(a) 殻長 (b) 生存、斃死個体
図-11 新たに定着した稚貝の成長

(2) 稚貝の定着

図-11に新たに定着した稚貝の生長状態を示している。稚貝は目視によって確認された個体を計数したため、定着した全個体数を確認できていない。装置(ii)には9月1日と2月10日に8個体が確認され、殻長は12 mmから17 mmまで生長している(図-11(a))。2月10日には6個体の斃死(死亡)アサリも確認されており、浚渫土砂に石炭灰造粒物を覆砂した層にアサリが定着する環境が形成されていることがわかる(図-11(b))。

(3) 石炭灰造粒物層へのアサリの潜入

日照等を緩和するための地盤への潜入はアサリ生産向上のための必須要件である。アサリは毎調査時、基盤上に散布しており、潜入深さはアサリ自身による潜入深さである。アサリの多くは石炭灰造粒物層(6 cm深)、一部は石炭灰造粒物と浚渫土砂混合層まで潜入できており、石炭灰造粒物がアサリの潜入を阻害しないことが明らかになった。

(4) アサリの生息環境

アサリ生産力は、水深に加え干潟材料の熱伝導性、微細藻類の増殖性に依存することが確認された。干潟材料に用いた石炭灰造粒物の特性として熱伝導性が低いこと⁵⁾、微細藻類(珪藻)の増殖性が高いことは明らかになっている(図-6)。石炭灰造粒物の被覆により浚渫土砂からの栄養塩の溶出が促進され(図-8)、アサリの餌となる珪藻の増殖が期待できる。地盤の潜入においても日照等を緩和するための石炭灰造粒物層がアサリ生産を高める可能性が高いことが確認できた。

5. おわりに

本実験結果から以下の4点が明らかになり、石炭灰造粒物を人工干潟の表面覆砂材として使用することにより、浚渫土砂に含まれる栄養塩類が石炭灰造粒物に吸着され、付着珪藻の発生、生育を促進し、アサリ等の生物生育環境をより一層良好にできることが明らかになった。

(1) 石炭灰造粒物と浚渫土砂の相互層は浚渫土砂からの窒素、リンの溶出を活性化させた。

(2) 浚渫土砂上に石炭灰造粒物層を設置した断面では、石炭灰造粒物単体より付着珪藻量は多かった。石炭灰造粒物の栄養塩の吸着効果と浚渫土砂からの栄養塩溶出効果は付着珪藻に栄養塩、シリカを供給し、珪藻量を増加させている。

(3) 石炭灰造粒物と浚渫土砂により構築した地盤環境で、アサリの生存と成長が確認された。DL+2m深に比較して冠水時間の長いDL+1m深において、殻長に対して重量が大きい等、生存率、湿重量が共に高いことが確認できた。

(4) 地盤からの餌供給がなく、夏の日照を直接受ける網に入れたアサリでは、成長率が低く、夏季に全滅した。干潟地盤が温度上昇を和らげるとともに、地盤からの活発な栄養塩の供給がアサリの生息を促進する。

(5) パターン3に代表されるように、栄養塩供給効果がある浚渫土砂上に、栄養塩吸着効果がある石炭灰造粒物を覆砂する構造が、浚渫土砂と石炭灰造粒物双方がもつ効果を一番引き出すことが示された。

謝辞：本論文の作成に当たり、国立大学法人広島大学の皆様にご尽力・ご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 玉井和久, 小畑健二, 芳倉勝治, 日比野忠史, 首藤啓, 山本祐視, 三戸勇吾: 石炭灰造粒物の海底被覆による中・長期的な海域環境改善効果, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, I_829-I_897, 2013.
- 2) 森本優希, TOUCH NARONG, 日比野忠史: 石炭灰造粒物(GCA)によるリン酸固定化機構の考察, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.73, No.2, I_941-I_946, 2017.
- 3) Yuki Morimoto, Narong Touch, Manaka Okabe & Tadashi Hibino (2018): Dissolution characteristics of granulated coal ash in different saline water conditions, Chemical Engineering Communications, 2018.
- 4) 柿野純: 丸型指数を指標とした籠試験によるアサリの成長と生残の特性, 日本水産学会誌, 62(3), 376-383, 1996.
- 5) 日比野忠史, トウナロン, 今川昌孝, 木村道夫, 斎藤直: 海底高間隙層内に形成される温度勾配と熱拡散係数の推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.67, No.2, pp.856-860, 2011