軽石の覆砂材としての利用に関する実験的研究

井上 徹教*・藤田 勇**

要 旨

本稿は"Water"で出版された論文"Application of drifted pumice stone as a sand-capping material"を日本 語訳したものに加筆したものである。

2021 年 8 月 13 日の小笠原諸島の福徳岡ノ場における海底火山の噴火により発生した大量の軽石は 各地の海岸に漂着し,船舶の航行や漁業等に影響を与え,漂着した軽石の処分も問題となっている. 本稿では,軽石の有効利用の一つとして,富栄養化した堆積物への覆砂材としての利用の可否につい て室内実験により検討した.

破砕した軽石を覆砂材として利用した場合,堆積物による酸素消費速度を低減させる効果が得られ ることが確認された.この傾向は覆砂材中の軽石の割合が多いほど顕著であり,軽石のみを覆砂した 場合,堆積物による酸素消費速度は最大で 61%の低減が見られた.栄養塩溶出についても同様の傾向 がみられ,NH4-N 溶出速度は最大で 25%の低減、PO4-P 溶出速度は最大で 82%の低減が見られた. この NH4-N と PO4-P の差は,PO4-P は軽石に顕著に吸着するのに対し,NH4-N はほとんど吸着が認め られないことによるものと考えられた.また,粉砕した軽石を懸濁させた海水中でのアサリの培養実 験の結果から,軽石に特有の悪影響は認められず,同濃度のカオリンよりも死亡率は低い結果となっ た.この違いは,懸濁粒子の粒径の違いによる鰓への付着および閉塞状況の違いによるものであると 推察された.

以上から,粉砕の作業が必要となるものの,軽石は覆砂材として有効な材料であり,堆積物の酸素 消費や栄養塩抑制を期待できるとの知見が得られた.

キーワード:軽石、覆砂、酸素消費、栄養塩溶出、生物影響

^{*} 海洋環境制御システム研究領域 海洋汚染防除研究グループ グループ長

^{**} 海洋環境制御システム研究領域 領域長 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研 究所

電話:046-844-5064 Fax:046-844-0575 E-mail:inoue-t@p.mpat.go.jp

Experimental study on application of drifted pumice stone as sand capping material

Tetsunori INOUE* Isamu FUJITA**

Synopsis

This paper is a Japanese translation of the article "Application of drifted pumice stone as a sandcapping material" published in "Water" with additions.

A large amount of pumice stone generated by the eruption of a submarine volcano at Fukutoku Okanoba in the Ogasawara Islands on August 13, 2021 has drifted ashore in many areas, affecting ship navigation and fishing. In this paper, we investigate the possibility of using pumice as a sand capping material for eutrophic sediments using laboratory experiments.

It was confirmed that the use of crushed pumice as a sand cover material was effective in reducing the rate of sedimentary oxygen consumption. This trend was more pronounced the higher the pumice content in the sand capping material, and the sedimentary oxygen consumption rate was reduced by up to 61% when the sand cover consisted only of pumice. A similar trend was observed for nutrient release from sediment, with up to 25% reduction in NH₄-N release rate and up to 82% reduction in PO₄-P release rate. This difference between NH₄-N and PO₄-P was thought to be due to the fact that PO₄-P is significantly adsorbed on the pumice, while NH₄-N is hardly adsorbed at all. The results of the bivalve exposure experiments in seawater suspending crushed pumice showed no adverse effects specific to pumice, and mortality was lower than that of kaolin at the same concentration. This difference was attributed to differences in gill accumulation and blockage due to differences in particle size of the suspended particles.

These results suggest that pumice is an effective material for sand covering, although crushing is required, and that it can be expected to suppress oxygen consumption and nutrients release from the sediments.

Key Words: Pumice, sand capping, oxygen consumption, nutrients release, biological effects

^{*} Head of Marine Pollution Management Group, Marine Environment Control System Department,

 ^{**} Director of Marine Environment Control System Department
3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan Phone : +81-46-844-5064
Fax : +81-46-844-0575
Fort and Airport Research Institute E-mail : inoue-t @p.mpat.go.jp

目

次

要	남 ······	28
1. はし	こめに	31
2. 方流	£ ·····	31
2.1	軽石の破砕	31
2.2	酸素消費実験	32
2.3	栄養塩溶出実験	32
2.4	栄養塩吸着実験	32
2.5	アサリ培養実験	33
3. 結身	₹	35
3.1	使用した軽石	35
3.2	酸素消費実験	35
3.3	栄養塩溶出実験	35
3.4	栄養塩吸着実験	35
3.5	アサリ培養実験	40
4. 考察	× ·····	42
4.1	軽石の吸着速度係数	42
4.2	軽石の覆砂材としての使用	43
4.3	鰓の汚損状況	43
4.4	アサリ培養実験におけるアンモニアの影響	43
4.5	軽石中の気泡が酸素消費に与える影響	43
5. おね	っりに	45
謝辞		45
参考文	献	45
付録		46

1. はじめに

2021 年 8 月 13 日に、小笠原諸島の福徳岡ノ場におけ る海底火山の噴火により、大量の軽石の海面漂流が発生 した (Maeno et al., 2022). 軽石は各地の海岸に漂着し, 船舶の航行や漁業等に影響を与えたが (Ohno et al., 2022), 漂着した軽石の処分も問題となっている. このような海 底火山による軽石の生成,およびそれらの漂着は,従来 より報告例(本間 1925, 諏訪 1953, 加藤 1988, 中野・ 川辺 1992 など) がある.海上保安庁海洋情報部の海域 火山データベースによると、1900年以降、日本近海では 236 件の噴火が記載されており、そのうち明確に軽石の 発生の記載があるものは15件に上る.また、このような 大量の軽石の発生や漂流は,海外においても,ニュージ ーランド沖 (Carey et al., 2018), サウスサンドウィッチ 諸島 (Risso et al., 2002), トンガ沖 (Bryan et al., 2012) などでも報告はあり,今後も起こりえることを考えると, その有効利用法を検討しておくことは意義があると考え る.

軽石の性状はその生成条件により変化するが (Ohno et al., 2022), 一般的には多孔質であり, 見かけの比重は小 さいが, 概ね直径 0.5 mm 以下に砕くと海水中でも沈降 する.しかし, それでも海底堆積物の粒子よりは比重が 小さいため, 堆積物中に潜り込むリスクが低く, 比較的 施工が容易な覆砂材として利用可能ではないかと思われ る.また, 多孔質であるため高い吸着能が期待でき, 堆 積物からの栄養塩の溶出を抑制 (吸着) できる可能性が ある.これらの意味で, 軽石は覆砂材として有望なので はないかと考えた.一方, 現場での適用を考えると, 覆 砂した軽石が再懸濁し, 周辺の生物に対し悪影響を及ぼ す可能性についても検討する必要がある.

本稿では,軽石の有効利用の一つとして,富栄養化し た堆積物への覆砂材としての利用について検討した.ま ず漂着した軽石を用いて,富栄養化した堆積物への覆砂 を模擬した酸素消費・栄養塩溶出実験に関する室内実験 を行った.併せてリン,窒素の吸着実験を行い,覆砂材 としての有用性について検討を行った.また,破砕・覆 砂した軽石の生物への影響を検討する端緒として,アサ リを用いた培養実験も行ったので報告する.

2. 方法

2.1 軽石の破砕

本実験に用いた軽石は,沖縄県北東部に位置する安田 港(北緯26°44.49',東経128°19.12')に漂着したものを 実験室に持ちかえり使用した. 採取した軽石は実験室に 持ち帰り,破砕機(ラボネクト株式会社, 20-KP-7919) を用いて, 30,000rpm, 3 分間粉砕し,目視により粒径 0.5 mm 以下になっていることを確認し,以下の実験に用い た.

2.2 酸素消費実験

破砕した軽石を覆砂材として利用した場合の底質改 善効果を検討する目的で,堆積物コアを用いた培養実験 を行った.

実験には、大阪港北港南地区航路(水深 16 m, 北緯 34°29.56'、東経 135°21.80')の位置で採取された浚渫泥 を用いた. 底質は有機質シルトで、目視では暗オリーブ 灰色を呈し、硫化水素臭が確認された. 使用した浚渫泥 の性状を表-A.1 に示す.

この堆積物を、内径 10 cm,高さ 50 cmの円筒形アク リルパイプに、堆積物高さが約 28 cm 程度に、かつ均一 になるように詰めたものを 3 本準備した(それぞれ CORE1,2,3 とする). その状態で 2 日間静置し、圧密に よる界面の低下を待ったが、目視ではほとんど低下する 様子は見られなかった.その後、同じ堆積物を 49.07g採 取し、CORE1の表面に均一に敷設した(軽石重量比 0%). CORE2 には、粉砕した軽石 23.03gと堆積物 26.97g(湿 重量)を良く混合したもの(軽石重量比 46%)を計 50.00 g 調整し、表面に均一に敷設した. CORE3 には、粉砕し た軽石のみ 49.38g 採取し、表面に均一に敷設した(軽石 重量比 100%).

次に、アクリルパイプ内側断面の形状に合わせて円形 に切り取った気泡緩衝材を, 堆積物表面に静かに置き, その上から人工海水(大阪薬研製マリンアート SF-1 を使 用, 35 psu に相当する)を, 堆積物を巻き上げないよう に静かに注入した.人工海水注入後は、気泡緩衝材を除 去し、コア内に気泡が残らないように注意してシリコン 栓で密閉し、水温23℃に保たれたウォーターバスに設置 した. このシリコン栓には、フッ素樹脂プロペラ (PTFE ストレートブレード, 型番 FLSPI, 株式会社アズワン, 大阪、日本)、ブラシレスモーター (BMU230A-15-2、オ リエンタルモーター株式会社,東京,日本),磁気駆動方 式の真空撹拌装置(PTFE 磁石式真空撹拌装置, 型番 F-24/40,株式会社アズワン、大阪、日本)を組み合わせた 装置が取り付けられている.これを使用することで,密 閉状態で外気に触れることなく,任意の回転数でコア内 の直上水を撹拌することができる. その結果, コア内の 直上水を十分に混合するとともに, コア内の流動条件を 制御することができる (Inoue & Nakamura, 2009). また,

シリコン栓には溶存酸素計(WA-2017SD, FUSO, Tokyo, Japan, 以下, 溶存酸素は DO と表記)のプローブ部分も 設置されており,継続的に直上水の酸素濃度を測定でき るようになっている(Inoue & Hagino, 2022; 図-2.1).

本実験では、プロペラの回転数は 20rpm とし、半日程 度馴養した後、DO モニターを開始した.実験期間中は、 コアは遮光カーテンで遮光し、光にさらされないように した. 直上水の DO 濃度は 10 分毎に測定した.



図-2.1 酸素消費実験・栄養塩溶出実験の模式図

堆積物による酸素消費速度 (Sedimentary Oxygen Demand, SOD)は,直上水中のDO濃度の低下速度から, 次式により計算した.

$$SOD = -\frac{V}{A}\frac{dC_{DO}}{dt} \tag{1}$$

ここで, V はコア内の直上水容積, A は堆積物コア断面 積, C_{DO}は直上水中のDO濃度, t は実験経過時間を表す.

2.3 栄養塩溶出実験

堆積物からの栄養塩溶出実験は、上述の酸素消費実験 で使用した堆積物コアを用いて,酸素消費実験終了後(酸 素濃度低下後)も引き続き培養を6日間継続することで 行った.実験水温や撹拌速度などの実験条件は,酸素消 費実験と同様とした.

上述のシリコン栓には、密栓された採水口及び注水口 が設置されており、シリンジを用いてコア内の水の採水 と脱気した人工海水の注水を同時に行うことで、直上水 が外気に触れることなく、採水を行うことができる (Inoue & Hagino 2022, 図-2.1).実験期間中、計3回の 採水を行った.採水したサンプルは、直ちにディスポー ザルフィルター (孔径 0.45 μm, Minisalt SM16555K, Sartorius Co, Goettingen, Germany) でろ過を行った.

ろ過した試料は,酸洗浄したポリプロピレン製ボトル に注ぎ,さらに化学分析を行うまで-25℃で保存した.採 取した試料は,連続流れ分析装置(QuAAtro39,ビーエル テック株式会社製,東京,日本)を用い,アンモニア態 窒素(以下,NH4-Nと表記)はインドフェノール青発色 Continuous Flow Analysis (CFA)法,リン酸態リン(以下, PO4-P と表記)はモリブデン青発色 CFA 法で測定した

(Hydes et al., 2010). 堆積物からの栄養塩溶出速度 (Nutrient Release Rate, NRR)は、直上水中の栄養塩濃度 の増加速度から、次式に基づいて算出した(Inoue and Nakamura, 2012).

$$NRR = \frac{V}{A} \frac{dC_{nut}}{dt}$$
(2)

ここで、Cnut は直上水中の栄養塩濃度を表す.

栄養塩溶出実験終了後,底質分析を行うため,1.0 cm 厚の表層堆積物を採取した.これを100mL容器に入れ, -25℃で保存した.後日,強熱減量(600℃強熱・重量法), 全有機炭素(塩酸処理後, CHN 元素分析装置 (JMA1000HCN, ジェイサイエンス, 東京, 日本) によ る測定), 化学的酸素要求量(過マンガン酸カリウム・ア ルカリ法による酸素消費量),全硫化物(水蒸気蒸留-メ チレンブルー法),全窒素(CHN 元素分析装置 (JMA1000HCN, ジェイサイエンス, 東京, 日本) によ る測定), 全リン (硝酸・硫酸分解-モリブデン青吸光光 度法 (QuAAtro39, ビーエルテック株式会社製, 東京, 日 本)),全鉄(硝酸・硫酸分解-フレーム原子吸光法,Z-2000, 日立ハイテク, 東京, 日本), 全マンガン (硝酸・ 硫酸分解-フレーム原子吸光法, Z-2000, 日立ハイテク, 東京,日本)について分析を行った.これらの分析結果 については、付録に示す.

2.4 栄養塩吸着実験

容量 1L のビーカーを 3 個用意し,人工海水に NH4-N (アンモニア性窒素標準液,NH4-N 1000,関東化学株式 会社,東京,日本), PO4-P(りん標準液, PO4-P 1000,関 東化学株式会社,東京,日本)をそれぞれ 0.2 mg L⁻¹程度 になるように添加したものを、IL 注水した. そのうち2 つのビーカーには粉砕した軽石をそれぞれ 30g 添加し、 一方を栄養塩濃度測定用ビーカー、もう一方を水温・pH・ ORP 測定用ビーカーとした. 残りの1つのビーカーは軽 石を投入しないコントロールとし、後述の栄養塩測定の み行った.

実験中は、ビーカー内の人工海水は撹拌子を用いて継続 的に撹拌し、粉砕した軽石は常に懸濁した状態を維持し た. 栄養塩濃度測定用ビーカーからは、軽石投入前、直 後、1 分後、2 分後、5 分後、10 分後、20 分後、30 分後、 1 時間後、2 時間後、3 時間後、6 時間後に、樹脂製シリ ンジ (テルモシリンジ 10mL、テルモ、東京、日本)を用 いて、20 mL 採水し (図-2.2)、孔径 0.45 μm のシリンジ フィルター(SupraPure Syringe Filter 0.45 μm、直径 30 mm、

PTFE, Recenttec, 東京, 日本) でろ過し, 10 mL のスピ ッツ管 (エコノスピッツ PS, 10mL, サンプラテック, 大 阪, 日本) 2 本にろ液を採取した (図-2.3). 採取したろ 液は一旦冷凍保存し, 連続流れ分析装置 (QuAAtro39, ビ ーエルテック株式会社製, 東京, 日本) を用い, NH4-N は インドフェノール青発色 CFA 法, 亜硝酸態窒素 (以下, NO₂-N と表記) はナフチルエチレンジアミン発色 CFA 法, 硝酸態窒素 (以下, NO₃-N と表記) は銅カドミウム還元 カラムによる還元後ナフチルエチレンジアミン発色 CFA 法, PO4-P はモリブデン青発色 CFA 法で測定した (Hydes et al., 2010).

水温・pH・ORP 測定用ビーカーには、pH 電極(HM-60S,東亜 DKK,東京,日本),ORP 電極(IM-40S,東亜 DKK,東京,日本)を挿入しておき,栄養塩測定用ビーカーからの採水と同じタイミングで水温・pH・ORP を測定した.

対象区については実験開始前,1時間後,3時間後,6 時間後に上述の方法で20 mL 採水し,孔径 0.45 µm のシ リンジフィルターでろ過し,10 mL のスピッツ管に採取 した.これらも冷凍保管後,上述と同様の手法により,後日 NH4-N, NO2-N, NO3-N, PO4-P を測定した.

2.5 アサリ培養実験

覆砂した軽石の再懸濁に伴うアサリへの影響を検討 するため,粉砕した軽石を懸濁させた状態でのアサリの 培養実験を行った.また比較のため,カオリンを懸濁さ せた状態でのアサリの培養実験も実施した.

実験は1Lビーカーに人工海水を1L入れたもので行っ た.まず,それぞれの懸濁物濃度を5段階(25,100,400, 1600,6400 mg L⁻¹) に調整した人工海水を用意した.また, 懸濁物を添加しない対照区も用意した(表-2.1).そこに, 殻に損傷がなく、水管が確認された健全なアサリを1個 体ずつ投入した.投入前には,全ての個体について殻長, 湿重量,肥満度を計測し,各実験条件間で差がないこと を確認した.実験期間中は、粉砕した軽石及びカオリン の懸濁状況が一定になるようにスターラーで撹拌し、エ アレーションも行った (図-2.4, 図-2.5, 図-2.6). アサ リは樹脂製メッシュで作成した台座に置くことで、回転 するスターラーチップにあたらないようにした(図-2.7). これらアサリの培養実験に使用するビーカーは、各条件 毎に5個ずつ用意した.また、実験に使用したアサリに ついては、すべての個体について殻長、湿重量、肥満度 を測定した.

培養は、水温 20℃で 168 時間行い、1 日に 2 回生存状 況の確認を行った.換水は、1 日に 1 回行った.試験期 間中は試験水の水温(CT-410WR,カスタム、東京、日本)、 pH (HM-60S、東亜 DKK、東京、日本)、DO (DO-21P、 東亜 DKK、東京、日本)、濁度(採水後、波長 660 nm に て透過光濁度を測定、DR-2800、HACH、東京、日本) について、全てのビーカーで 1 日 2 回の観測を行った. また、SS 及び NH4-N、NO2-N、NO3-N、PO4-P について、 実験終了時またはアサリ斃死時に、全てのビーカーから



図-2.2 採水の様子



図-2.3 ろ過の様子

懸濁物	アサリ投入数	懸濁物濃度(mg L ⁻¹)	数量 (式)
	1個体	25	5
	1個体	100	5
	1個体	400	5
粉砕した軽石	1個体	1600	5
	1個体	6400	5
	0個体	400	2
	0個体	6400	2
	1個体	25	5
	1個体	100	5
	1個体	400	5
カオリン	1個体	1600	5
	1個体	6400	5
	0個体	400	2
	0個体	6400	2
無し (対照区)	1個体	0	5

表-2.1 懸濁物へのアサリの暴露実験における実験区一覧



図-2.4 軽石添加の実験区の状況



図-2.5 カオリン添加の実験区の状況



図-2.6 対照区の状況

図-2.7 アサリ培養実験の様子

採水して分析を行った.

また, 懸濁物の添加による水質変化を調べる目的で, 懸 濁物濃度を2段階(400,6400 mg L⁻¹)に調整し, アサリは 投入しないものも2個ずつ用意した.全窒素,全リン, NH4-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P, フッ素については1日目に2個 のビーカーから, 懸濁物の粒度組成については1日目に1 個のビーカーから採水して分析を行った.分析方法は前述 に拠った.

3. 結果

3.1 使用した軽石

粉砕した軽石は,まず海水中に懸濁させ,一部粉砕が十 分でなかったものは浮上したため除去した後,沈降するこ とが確認された粒子を以下の実験に使用した.

3.2 酸素消費実験

目視によると、実験期間中は堆積物粒子の再懸濁は観察 されなかった.酸素消費実験における、コア内直上水中の DO 濃度の変化の様子を図-3.1に示す.図中 CORE1(軽石 重量比 0%)、CORE2(軽石重量比 46%)、CORE3(軽石重 量比 100%)の間で初期の酸素濃度が異なるのは、半日程度 の馴養期間中に酸素が消費されているためである.

この結果から、式(1)を用いて、酸素消費速度を計算した 結果を図-3.2 に示す. CORE1 (軽石重量比 0%) での酸素 消費速度(1日当たりの酸素消費量) は 0.57 gm⁻²d⁻¹であっ たのに対し、CORE2 (軽石重量比 46%)の酸素消費速度は 0.51 gm⁻²d⁻¹ と CORE1 と比較して 11%の低減が見られた. さらに、CORE3 (軽石重量比 100%)の酸素消費速度は 0.22 gm⁻²d⁻¹ と CORE1 と比較して 61%の低減が見られた.これ は、粉砕した軽石を堆積物表層に敷設することで、表層の 有機物量が減少し、堆積物表面近傍での酸素消費速度が減 少したためであると考えられる.

以上の結果から,富栄養化した堆積物表面に粉砕した軽 石を覆砂することで,堆積物による酸素消費速度を低減さ せる効果が得られることが確認された.

3.3 栄養塩溶出実験

栄養塩溶出実験における,コア内直上水中の栄養塩濃度 の変化の様子を図-3.3 に示す.直上水中の栄養塩濃度は, 実験期間中,堆積物からの溶出により単調に増加している. 図中 CORE1(軽石重量比0%),CORE2(軽石重量比46%), CORE3(軽石重量比100%)の間で初期のNH4-N濃度が異 なるのは,酸素消費実験の期間中における溶出量の差によ るものであると考えられる.一方,すべてのコアで初期の PO_{4} -P 濃度がほぼ 0 であったのは,好気条件下ではリンの 溶出はほとんど起こらないことが理由であると考えられる. この結果から,式(2)を用いて,栄養塩溶出速度を計算した 結果を図-3.4 に示す. PO₄-P の溶出速度について,CORE1 (軽石重量比 0%) での PO₄-P 溶出速度は 11 mg m⁻² d⁻¹ であ ったのに対し,CORE2 (軽石重量比 46%)の PO₄-P 溶出速 度は 7 mg m⁻² d⁻¹ と CORE1 (軽石重量比 0%)と比較して 36%の低減が見られた.さらに,CORE3 (軽石重量比 100%) の PO₄-P 溶出速度は 2 mg m⁻² d⁻¹ と CORE1 (軽石重量比 100%) と比較して 82%の低減が見られた.これは,粉砕した軽石 を堆積物表層に敷設することで,表層での PO₄-P 吸着量が 増加し,堆積物下方から拡散により供給された PO₄-P を軽 石が吸着し溶出速度が減少したためであると考えられる.

一方,NH4-Nの溶出速度について,CORE1(軽石重量比0%)でのNH4-N溶出速度は73 mg m⁻² d⁻¹であったのに対し,CORE2(軽石重量比46%)のNH4-N溶出速度は71 mg m⁻² d⁻¹ とCORE1(軽石重量比0%)と比較して3%の低減しか見られなかった.さらに,CORE3(軽石重量比100%)のNH4-N溶出速度は55 mg m⁻² d⁻¹ とCORE1(軽石重量比0%)と比較して25%の低減であった.これは,粉砕した軽石を堆積物表層に敷設することで,表層でのNH4-N含有量が低下したためと考えられるが,後述のように,軽石にはNH4-N吸着能は認められないことから,その効果がほとんどなかったものと考えられる.

3.4 栄養塩吸着実験

実験期間中,水温は積極的なコントロールを行わず室温 に設置していたため、18.6℃から 20.6℃の範囲内で推移し ていた.また,pH は投入前に 8.2 であったが,軽石の投入 後わずかに低下し、6 時間後は 8.0 であった.ORP は、実験 開始時において 391 mV を示しており、その後単調な増加 を示し、2 時間後には 400 mV の値をとっているが、その後 減少に転じ 6 時間後には元の 391 mV に戻っていた.以上、 水温、pH、ORP はそれぞれわずかに変動しているが、栄養 塩の吸脱着に影響を与えるほどの変化はなかったと判断し た(付録参照).

NH4-N は軽石投入前には 0.207 mg L⁻¹であったのに対し, 軽石投入直後には 0.228 mg L⁻¹に, 1 分後には 0.271 mg L⁻¹ に増加したが, その後は 0.26 mg L⁻¹ 前後で推移した(図-3.5(a)). また, NO₃-N は軽石投入前には 0.009 mg L⁻¹であ ったのに対し, 軽石投入直後には 0.011 mg L⁻¹に, 1 分後に は 0.012 mg L⁻¹に増加したが, その後は 0.012 mg L⁻¹前後で 推移した(図-3.5(b)). これらについては軽石に含まれて いたものが人工海水中に回帰したものと考えられる. しか し, その時間スケールは 1 分程度で,後述する PO₄-P の吸











図-3.3 コア内直上水中の栄養塩濃度の変化の様子



(b) NH4-N 図-3.4 単位面積当たりの栄養塩溶出速度の計算結果



脱着過程とは異なるものと考えられる.また,それらのイ オンの脱着があったとしても,その量は多くはなく,窒素 に関する吸脱着はそれほど重要な過程ではないものと判断 された.なお,NO₂-N は実験期間中通じて,検出限界以下 であった.

PO₄-P は軽石投入前には 0.196 mg L⁻¹であったのに対し, 軽石投入直後には 0.150 mg L⁻¹になり,その後は単調に減少 し,6時間後に 0.071 mg L⁻¹にまで低下した(図-3.5(c)).

以上の結果から,粉砕した軽石は, PO4-P に対してのみ吸 着効果を示すことが分かった.

3.5 アサリ培養実験

3.5.1 実験に使用したアサリの状態

粉砕した軽石を懸濁させた培養実験に用いたアサリの平 均殻長は、25 mg L⁻¹では 41.24 mm、100 mg L⁻¹では 39.69 mm、400 mg L⁻¹では 39.28 mm、1600 mg L⁻¹では 39.20 mm、 6400 mg L⁻¹では 39.98 mm、対照区は 39.15 mm であった. また、カオリンを懸濁させた培養実験に用いたアサリの平 均殻長は、25 mg L⁻¹では 39.60 mm、100 mg L⁻¹では 39.00 mm、400 mg L⁻¹では 39.60 mm、1600 mg L⁻¹では 39.67 mm、 6400 mg L⁻¹では 38.45 mm であった. また、対照区(懸濁物 無しで人工海水のみ)のアサリの平均殻長は 39.15 mm であ り、すべての間に有意な差はなかった(Kruskal-Wallis test, n=5, p=0.14).

また,粉砕した軽石を懸濁させた培養実験に用いたアサ リの平均湿重量は,25 mg L⁻¹では13.96 g,100 mg L⁻¹では 13.00 g,400 mg L⁻¹では12.11 g,1600 mg L⁻¹では12.18 g, 6400 mg L⁻¹では11.81 g であった.また,カオリンを懸濁さ せた培養実験に用いたアサリの平均湿重量は,25 mg L⁻¹で は11.97 g,100 mg L⁻¹では11.85 g,400 mg L⁻¹では11.97 g, 1600 mg L⁻¹では13.01 g,6400 mg L⁻¹では11.32 g であった. また,対照区のアサリの平均湿重量は12.21 g であり,すべ ての間に有意な差はなかった (Kruskal-Wallis test, n=5, p=0.13).

粉砕した軽石を懸濁させた培養実験に用いたアサリの肥 満度は、25 mg L⁻¹では 32.32、100 mg L⁻¹では 31.33、400 mg L⁻¹では 30.94、1600 mg L⁻¹では 31.73、6400 mg L⁻¹では 30.94 であった.また、カオリンを懸濁させた培養実験に用いた アサリの肥満度は、25 mg L⁻¹では 33.56、100 mg L⁻¹では 33.22、400 mg L⁻¹では 33.76、1600 mg L⁻¹では 33.80、6400 mg L⁻¹では 33.49 であった.また、対照区のアサリの肥満度 は 32.51 であり、すべての間に有意な差はなかった (Kruskal-Wallis test、n=5、p=0.07).いずれも十分に成長した個体で あった.

3.5.2 粉砕した軽石を用いた培養実験

粉砕した軽石を用いた培養実験の結果,25 mg L⁻¹及び 100 mg L⁻¹では7日目(実験終了時)まで生存率 100%(生存: 5個体, 斃死:0個体)のままであった.400 mg L⁻¹及び 1600 mg L⁻¹は試験開始2日目に1個体の斃死が確認され,7日目 での生存率は80%(生存:4個体, 斃死:1個体)となった. 6400 mg L⁻¹では,試験開始5日目に1個体の斃死が確認さ れ,7日目は生存率80%(生存:4個体, 斃死:1個体)と なった.一方,対照区は,7日目まで生存率100%(生存: 5個体, 斃死:0個体)のままであった(図-3.6).

水質分析の結果,いずれの実験区も対照区の人工海水と 比較して,水温(19.8℃~20.0℃),pH (7.97~8.00)及び DO (6.9 mg L⁻¹~7.0 mg L⁻¹)にほとんど差はみられなかった. アサリが生存していた系では,NH4-N は 0.109 mg L⁻¹~0.439 mg L⁻¹, NO₂-N は 0.004 mg L⁻¹~0.013 mg L⁻¹, NO₃-N は定量 下限値未満(<0.005 mg L⁻¹)~0.021 mg L⁻¹, PO₄-P は定量下 限値未満(<0.003 mg L⁻¹)~0.016 mg L⁻¹の範囲で推移して いた.しかし,アサリが死亡した系では,NH4-N は 2.29 mg L⁻¹, PO₄-P は 0.142 mg L⁻¹にまで上昇していた.

フッ素は,400 mg L⁻¹ 及び 6400 mg L⁻¹ のいずれも 1.3 mg L⁻¹で,定量下限値(0.1 mg L⁻¹)と比較して,高い値であった.400 mg L⁻¹での粒度組成は,粒径範囲が 0.564~159 μm,中央粒径が 25.2 μm であった.

3.5.3 カオリンを用いた培養実験

カオリンを用いた培養実験の結果,25 mg L⁻¹は試験開始 2 日目に斃死が確認され,100 mg L⁻¹及び 400 mg L⁻¹は試験 開始 4 日目に斃死が確認された.いずれも7 日目には生存 率 80%(生存:4 個体,斃死:1 個体)となった.1600 mg L⁻¹及び 6400 mg L⁻¹は試験開始1日目に斃死が確認され,7 日目には 1600 mg L⁻¹は生存率 40%(生存:2 個体,斃死: 3 個体),6400 mg L⁻¹は生存率 20%(生存:1 個体,斃死: 4 個体)となった(図-3.7).

水質分析の結果,いずれの実験区も対照区の人工海水と 比較して,水温(19.8℃~20.1℃),pH (7.94~8.00)及び DO (6.9 mg L⁻¹~7.1 mg L⁻¹)にほとんど差はみられなかった. アサリが生存していた系では,NH4-N は 0.042 mg L⁻¹~0.410 mg L⁻¹, NO₂-N は定量下限値未満 (<0.001 mg L⁻¹)~0.013 mg L⁻¹, NO₃-N は定量下限値未満 (<0.005 mg L⁻¹)~0.020 mg L⁻¹, PO4-P は定量下限値未満 (<0.003 mg L⁻¹)~0.305 mg L⁻¹の範囲で推移していた.しかし,アサリが死亡した系で は,NH4-N は 5.78 mg L⁻¹, PO4-P は 0.397 mg L⁻¹にまで上昇 していた.

フッ素は,400 mg L⁻¹及び 6400 mg L⁻¹のいずれも 1.3 mg L⁻¹で,定量下限値(0.1 mg L⁻¹)と比較して,高い値であっ



た. 粒度組成は,400 mg L⁻¹では粒径範囲が 0.356~31.7 µm, 中央粒径が 5.83 µm であった.

3.5.4 懸濁粒子による生存率の差

軽石とカオリンへの暴露実験における生存率の時間変化から、Cox比例ハザードモデルによる解析を行った(図-3.8)。その結果、斃死の影響が出るまでに時間がかかる遅延型のため、比例ハザードは不成立ではあるものの、濃度に関するP値は0.0033、物質(軽石はまたカオリン)に関するP値は0.0237となり、それぞれ1%有意、5%有意と言える結果となった。





4. 考察

4.1 軽石の吸着速度係数

本節では軽石による PO4-P の吸着に関するメカニズムに ついて、下記の2つのモデルによって検討する.

まず,軽石による PO4-P の吸着速度は,時々刻々の PO4-P 濃度と吸着平衡に達した場合の PO4-P 濃度との差に比例 すると仮定し,次式で表現する(以下,単一吸着層モデルと する).

$$V\frac{dC}{dt} = -k(C - C_{eq})M\tag{3}$$

ここで, *V* は吸着実験に使用した溶媒の容積(L), *C* は溶媒 中の PO4-P 濃度(mg L⁻¹), *t* は経過時間(min), *k* は吸着速度 定数(Lg⁻¹ min⁻¹), *C*_{eq} は吸着が平衡状態に達したときの PO4-P 濃度(mg L⁻¹), *M* は実験に使用した軽石の量(g)である.こ こで,実験初期の PO4-P 濃度を *C*_{ini} とすると,

$$C - C_{eq} = C_{ini} \exp\left(-\frac{kM}{v}t\right) \tag{4}$$

と表現できる. 平衡状態に達したときの PO₄-P 濃度は C_{eq} =0.060 (mg L⁻¹)と仮定,吸着速度定数は実験初期の濃度低 下から算出しk=2.0×10⁻³ (Lg⁻¹ min⁻¹)として,吸着実験の結 果と上式による計算値を示したものが,図-4.1(a)中の破線 である.単一吸着層モデルにおける理論式は実験結果を合 理的に再現することができておらず,実験結果の方がゆっ くりではあるが継続して濃度減少,すなわち吸着を呈して いることがわかる.

Froelich (1988)は、このような吸着動態を、2 段階の相互 作用として解釈している. すなわち、第1段階は、PO4-Pが 吸着媒体の表面に吸着する速い過程であり、第 2 段階は吸 着した PO4-P が吸着媒体内部へ拡散する遅い過程である. そこで、2 つ目の検討として、吸着相は複数の層が積み重な ったものと見做し、各層は隣接する層との間で物質伝達を 行ない、各層の物質伝達は次式に従うものと仮定する(以 下、二重吸着層モデルとする).

$$V\frac{dC}{dt} = -k_0(C - C_1)$$
 (溶媒層) (5)

$$v_1 \frac{dC_1}{dt} = k_0 (C - C_1) - k_1 (C_1 - C_2) \quad (\text{ ff } 1 \text{ } \text{ ff }) \quad (6)$$

$$v_2 \frac{dC_2}{dt} = k_1 (C_1 - C_2)$$
 (第 2 層) (7)

ここで, k₀, k₁はそれぞれ溶媒層から第1層,第1層から第 2層への吸着速度定数(L min⁻¹), C₁, C₂はそれぞれ第1層, 第2層における PO₄-P 濃度(mg L⁻¹), v₁, v₂はそれぞれ第1 層,第2層における溶媒層に対する相対的・仮想的な PO₄-P 吸着容量(L)を表す.

ここで、実験およびモデル計算結果から得られた溶媒中の PO4-P 濃度 C の自乗偏差の和を評価関数として、これを 最小化するパラメータとして求めた次の値、 $k_0=2.22\times10^{-2}$ (L min⁻¹)、 $k_1=2.66\times10^{-3}$ (L min⁻¹)、v=1.00 (L)、 $v_1=2.53\times10^{-1}$ (L)、 $v_2=1.25$ (L)とした場合の計算値を示したものが、図-4.1(a)中の実線である。単一吸着層モデルと比較して、二 重吸着層モデルでは実験結果の再現性が大幅に向上してい ることがわかる。このような、軽石による PO4-P 吸着にお いては、2 段階の吸着、拡散過程が組み合わさった過程によ り吸着反応が進んでいた可能性があり、多孔質に特有の現 象であることが示唆される。

また,図-4.1(b)には第1層と第2層におけるPO₄-P 濃度 の時間変化を示す.実験開始後,第1層における濃度は急 激に上昇するが,その後第2層への移行に伴い漸減する様 子がわかる.それを受け,第2層の濃度は緩やかに上昇す る. 今回のケースではviとv2の比は概ね17:83となっており, 軽石の17%において速い吸着が行われ,残りの83%が遅い 吸着を担うという,軽石の吸着に関する仮想的な内部構造 に関する知見が得られた.これらの知見は,吸着動態の時 定数にかかわる特性であるため,実務において利用する際 には必要不可欠な情報であると考えられる.

4.2 軽石の覆砂材としての使用

いわゆるヘドロと称される有機質の堆積物の酸素消費, 栄養塩溶出を抑制する手法としては,良質な砂の使用など が検討されてきた.しかし,それらの材料は有機質堆積物 と比較して比重が大きく,実際の施工上においては,有機 質堆積物の上にきれいに砂等を覆砂することは困難であっ た.

一方,今回検討した軽石は比重が小さく,現場の施工に おいても,他の覆砂材と比較して,堆積物表面に層状に覆 砂することは容易ではないかと推測される.上記室内実験 においても,破砕した軽石は有機質の堆積物中に埋もれる ことなく,表面に覆砂することは容易であった.

破砕した軽石は,有機質の堆積物に比べて粒子間の粘着 性が少ないため,低密度であることも相まって,巻き上が りやすいことも危惧される.その場合には,今回の室内実 験でも行ったように,一定の有機質堆積物を混合すること で,巻き上げを抑制できるのではないかと考えられる.

4.3 鰓の汚損状況

中央粒径については、カオリンの方が粉砕した軽石より も1桁程度小さくなっており、中央粒径の小さいカオリン の生存率、生存状況は、比較的中央粒径の大きい粉砕した 軽石の場合よりも悪い結果となった(図-3.6,図-3.7).実 験後、殻を剥いて軟体部を観察したところ、付録図-A.4~ 図-A.13に示すとおり、生存していた個体と斃死した個体 では、鰓の汚損状況が明らかに異なっていた.このことか ら、アサリの斃死誘因については、粉砕した軽石及びカオ リンの化学性状による影響ではなく、SS 濃度や粒径といっ た物理性状による影響のほうが大きいと考えられた.以上 のことから、懸濁状況が続く場所で SS が高濃度となった場 合には、特に懸濁粒子の粒径が小さい場合に、鰓つまりな ど底生生物への悪影響がみられる可能性が高いと予想され た.

関連する文献を調査すると、相良(1981)には、「浮遊土の 濃度が 0.5%の場合には、2~3 カ月間の飼育で異常が現われ ない」との記述がある.これは、本実験での濃度 5 に相当 する SS であると考えられるが、用いられた「浮遊土」の粒 径が本実験に使用した粒子に比べて大きなものだったので はないかと思われる.また,千葉・大島(1957)は最大1000 mgL⁻¹濃度のベントナイト(粒径の範囲は2-30µm)を用い て,アサリ,ハマグリ,マガキ,ムラサキイガイの濾水速度 を求めている.しかし,斃死に関する記述はなく,どの程度 のSSで斃死に至るかに関する知見は得られなかった.一方 で,岸岡(2015)によると,カオリンの添加により,少なく とも着底初期においてはアサリの成長が促進されるという 正の効果が得られることが示されている.このように,浮 遊粒子の影響についてはいまだ未解明なことが多く残って おり,網羅的な実験的研究の余地が残っている.

4.4 アサリ培養実験におけるアンモニアの影響

粉砕した軽石及びカオリンを用いた培養試験では,アン モニアがアサリの斃死誘因であることを除外するために, 徹底した管理を行った.

まず,採取時は,熊本県のアサリ養殖業者に健全なアサ リの選別と砂抜きを指示した.輸送されてきたアサリは, 物理的損傷がないか,衰弱したものがないかすぐに確認し, 生存していても殻に破損があるものは除外した.さらに, 馴化前に水管等の軟体部や殻の開閉が確認できなかったも のを除外した.

次に、馴化を複数の水槽で行い、頻繁に換水を行った. 馴 化時及び実験開始後に糞、擬糞(尿)が大量に排泄されて実 験に影響することがないように給餌しなかった.また、実 験に用いるアサリを選ぶ際、馴化中に斃死がみられた水槽 のアサリは除外し、水管等の軟体部や殻の開閉が確認でき たものを選別して用いた.この管理によって、粉砕した軽 石の実験区は、NH4-N では水産用水基準(0.89 mg L⁻¹、 (pH=8.0、水温 20℃,塩分 30 のとき))未満を維持し、NO₂-

N, NO3-N についてもほとんど検出されなかった.

このため,懸濁物の存在下でのアサリの培養実験では, アサリが斃死した場合でもNH4-Nが実験中のアサリの斃死 誘因ではないと結論付けた.また,フッ素は1.3 mgL⁻¹が検 出されたが,その化学性状として窒素分及びリン分はほと んど含まれず,化学的に悪影響はないと考えられた.

4.5 軽石中の気泡が酸素消費に与える影響

上述のように,軽石は多孔質であり,内部に多くの気泡 を有している.酸素消費実験に使用した粉砕した軽石にも この気泡は含まれており,気泡中に酸素が混入している場 合には,これが酸素消費実験の結果に影響を及ぼす可能性 がある.そこで,以下のように,代表的な物性値を用いて考 察を行った.

まず,実験に使用した堆積物の粒子密度を 2.6g cm-3とする. また,水温 23℃,塩分 35 psu での海水密度は 1.024 g



cm⁻³であるから, 堆積物の間隙率が 0.85 であったと仮定す ると, 堆積物の見かけの比重は 1.260 g cm⁻³となる.

一方,今回の酸素消費実験に使用した粉砕した軽石の比 重測定は行っていないが,海水には沈み,堆積物表面に留 まっていたことから,ここでは海水密度と堆積物密度の中 間値である1.1420gcm³であったと仮定する.そうすると, 軽石内部の空隙率は0.561と計算され,CORE3(軽石重量 比100%)の覆砂層に存在する気泡の容積は,4.20×10⁴m³ m²となる.

この気泡中の酸素分圧は水中の酸素濃度と平衡状態にあるとすると、実験中に気泡から海水中に供給される酸素量は0.0161gm²d⁻¹となる.これは、CORE3(軽石重量比100%)について算定された酸素消費速度0.22gm²d⁻¹の7.33%の値であった.したがって、軽石中の気泡が空気と同様の組成であった場合、上述に記載した「CORE3 での酸素消費速度は61%の低減が見られた」との結論は、「54%程度の低減」と補正する必要があり得るが、本稿の全体としての結論には、定性的には影響しないものと判断した.

一般的には,軽石内部の気泡は周囲の海水に触れること はないため酸素が移動する可能性は低いこと,軽石中の気 泡は水蒸気によって生じており,その中に酸素が含まれる 可能性は低いこと(鈴木・中田,2002)などから,酸素消費 実験に影響を書耐える可能性は極めて低いものと判断する.

5. おわりに

今回,令和3年8月に小笠原諸島・福徳岡ノ場の海底火山が噴火しており,近時のトピックとして注目される材料でもある軽石について,その有効利用の一環として覆砂材としての利用可否について検討した.その結果,粉砕して粒径を小さくすることで見かけの比重を大きくし海底に沈むようにすれば,覆砂材として有効利用できることが示された.今回検討に使用した軽石については,化学的な性状としては生物への悪影響はないと考えられる.しかし,諏訪(1953)は強い酸性を示す軽石の存在なども報告しており,その利用に際しては個別の検討が必要になることも考えられる.一方,1000 mg L⁻¹を超えるような異常な懸濁濃度になる場合には,底生生物の鰓つまりの原因となる可能性が指摘されたため,現地に投入する際には注意を必要とすることも示された.

2021 年 8 月 13 日に小笠原諸島の福徳岡ノ場における海 底火山の噴火により発生した軽石の海面漂流の事例におい ては,一時東京湾や大阪湾への流入が懸念されたものの, 結果としては大きな問題は生じなかった.したがって,本 稿のような有機汚染を受けた堆積物への有効利用という視 点は、実務上は当を得たものとはならなかった.一方、本技 術は、有機汚染を受けた堆積物だけではなく、重金属汚染 や化学物質汚染、底質改良などの観点からも応用は可能で あると考えれるため、関連する知見として成果を残すこと には意義があると考えている.

軽石は海面を漂流・漂着するため海中への光を遮り,植 物プランクトンの光合成に影響を与える可能性が指摘され ている.本研究からは,長期にわたる滞留により細粒化し て海底に沈降・堆積することで底生生物に影響することも 予想されたため,この成果は重要な知見を示していると考 えられる.

(2023年4月25日受付)

謝辞

本研究に使用した堆積物の採取にあたっては,国土交通 省近畿地方整備局の関係各位にご支援いただいた.ここに 記して謝意を表する.

参考文献

- Bryan, S. E., Cook, A. G., Evans, J. P., Hebden, K., Hurrey, L., Colls, P., Jell, J. S., Weatherley, D., and Firn, J. (2012) Rapid, long-distance dispersal by pumice rafting. PloS One, 7(7), e40583.
- Carey, R., Soule, S. A., Manga, M., White, J. D. L., McPhie, J., Wysoczanski, R., Jutzeler, M., Tani, K., Yoerger, D., Fornari, D., Fabio Caratori-Tontini, Houghton, B., Mitchell, S., Ikegami, F., Conway, C., Murch, A., Fauria, K., Jones, M., Cahalan, R., and McKenzie, W. (2018) The largest deepocean silicic volcanic eruption of the past century. Science Advances, 4(1), e1701121.
- Hydes, D.J.; Aoyama, M.; Aminot, A.; Bakker, K.; Becker, S.; Coverly, S.; Daniel, A.; Dickson, A.G.; Grosso, O.; Kerouel, R.; van Ooijen, J.; Sato, K.; Tanhua, T.; Woodward, E.M.S.; Zhang, J.Z. Determination of dissolved nutrients (N, P, Si) in seawater with high precision and inter-comparability using gas-segmented continuous flow analysers. In: The GO-SHIP Repeat Hydrogra-phy Manual: A Collection of Expert Reports and guidelines. IOCCP Report No 14, ICPO Publication Series No. 134, version 1, 2010 (UNESCO/IOC).

https://archimer.ifremer.fr/doc/00020/13141/

Inoue, T., & Nakamura, Y. (2009). Effects of hydrodynamic conditions on sediment oxygen demand: Experimental study based on three methods. Journal of Environmental Engineering, 135(11), 1161–1170. https://doi.org/ 10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:11(1161)

- Inoue, T.; Nakamura, Y. Response of benthic soluble reactive phosphorus transfer rates to step changes in flow velocity. J. Soil. Sed. 2012, 12(10), 15591567. https://doi.org/10.1007/s11368-012-0593-y
- Inoue, T., & Hagino, Y. (2022). Effects of three iron material treatments on hydrogen sulfide release from anoxic sediments. Water Science and Technology, 85(1), 305–318.
- Maeno, F., Kaneko, T., Ichihara, M., Suzuki, Y., Yasuda, A., Nishida, K., & Ohminato, T. (2022) First timeseries record of a large-scale silicic shallow-sea phreatomagmatic eruption. Research Square. https:// doi. org/10. 21203/ rs.3. rs- 12728 55/ v1
- Ohno, Y., Iguchi, A., Ijima, M., Yasumoto, K., & Suzuki, A. (2022). Coastal ecological impacts from pumice rafts. Scientific Reports, 12, 11187. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14614-y
- Risso, C., Scasso, R. A., & Aparicio, A. (2002). Presence of large pumice blocks on Tierra del Fuego and South Shetland Islands shorelines, from 1962 South Sandwich Islands

eruption. Marine Geology, 186(3-4), 413-422.

- 加藤祐三 (1988). 福徳岡の場から琉球列島に漂着した灰色 軽石. 火山. 第 2 集, 33(1), 21–30.
- 海上保安庁海洋情報部:海域火山データベース, 2023 年. https://www1.kaiho.mlit.go.jp/kaiikiDB/list-2.htm
- 中野俊,川辺禎久 (1992). 1991 年,琉球列島西表島に漂着 した軽石.火山, 37(2), 95–98.

本間不二男 (1925). 硫黃島地質見聞記. 地球, 4(4), 290-309.

- 諏訪彰. (1953). 明神礁の海底噴火について. 地學雑誌, 62(3), 100-110.
- 相良順一郎 (1981). アサリ ハマグリの生理生態. 海洋と生物, 13, 102–105.
- 千葉健治,大島泰雄 (1957). アサリを主とする海産二枚貝の濾水・摂餌に及ぼす濁りの影響.日本水産学会誌, 23(7-8),348-353.
- 岸岡正伸 (2015). アサリ着底稚貝におけるカオリンの成長 促進効果.山口県水産研究センター研究報告, 12, 25-28.
- 鈴木由希,中田節也 (2002). 気泡組織・サイズ分布から見た, 有珠山 2000 年噴火でのマグマ上昇と発泡プロセス (< 特集> 2000 年有珠山噴火(3)). 火山, 47(5), 675-688.

付録

酸素消費・栄養塩溶出実験

表-A.1 酸素消費・栄養塩溶出実験における底質分析結果										
	強熱減量	TOC	CODsed	硫化物	全窒素	全リン	全鉄	全マンガン		
	(%乾泥)	(mg/g乾泥)	(mg/g乾泥)	(mg/g乾泥)	(mg/kg乾泥)	(mg/kg乾泥)	(mg/kg乾泥)	(mg/kg乾泥)		
CORE1	15.5	18.2	10.6	0.42	2110	500	39300	830		
CORE2	14.0	12.1	7.0	0.20	1480	400	26800	560		
CORE3	14.3	1.97	2.1	0.04	470	240	9200	200		

栄養塩吸着実験





アサリ培養実験期間中の水質等

π -A.Z <i>初催しに戦力を用いた境後美阙期間中の</i> 水偏()	表-A.2	粉砕した軽石を用いた培養実験期間中の	水温(°C	;)
---	-------	--------------------	-----	----	----

佰日	0d		1d		2	2d		3d		4d		d	6d		7d	
- 項日	AM	PM														
濃度1	20.1	19.9	19.8	19.5	20.2	19.7	19.5	19.8	19.5	19.6	19.9	19.7	19.8	19.6	20.2	19.9
濃度2	20.5	20.0	19.6	19.6	20.1	19.5	19.8	20.2	19.8	19.9	19.7	19.9	19.7	19.9	20.0	20.2
濃度3	19.6	20.3	19.8	19.6	20.5	19.8	20.1	20.1	19.9	19.7	20.3	20.1	20.3	20.4	20.2	20.2
濃度4	19.9	20.4	20.3	19.6	20.5	19.8	19.9	20.0	19.8	20.3	20.1	20.0	20.0	20.0	19.9	20.3
濃度5	20.0	20.3	20.2	19.6	20.5	20.4	19.6	20.3	19.6	19.8	19.8	19.9	19.7	19.5	20.1	20.0
対照区	20.3	20.1	19.6	19.7	19.7	20.3	19.7	19.6	19.6	19.6	19.9	19.8	19.6	19.6	19.8	20.1

表-A.3 粉砕した軽石を用いた培養実験期間中のpH

百日	0d		1d 2d		3d		4d		5d		6d		7d			
項目	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
濃度1	8.00	7.84	8.08	8.06	8.05	7.85	8.22	7.94	8.14	7.65	8.03	7.78	8.13	7.84	8.15	7.84
濃度2	8.03	7.88	8.07	8.00	8.06	7.86	8.23	7.94	8.15	7.70	8.07	7.77	8.14	7.84	8.15	7.89
濃度3	8.03	7.89	8.11	7.94	7.93	7.85	8.20	7.99	8.05	7.74	8.07	7.79	8.12	7.86	8.12	7.85
濃度4	7.99	7.87	8.10	8.00	7.96	7.84	8.24	7.91	8.09	7.73	8.08	7.79	8.16	7.83	8.13	7.86
濃度5	7.95	7.84	8.08	7.95	8.05	7.84	8.22	7.90	8.04	7.73	8.06	7.77	8.15	7.84	8.14	7.86
対照区	7.96	7.86	8.11	7.97	8.09	7.86	8.17	7.93	8.15	7.86	8.04	7.80	8.16	7.93	8.15	7.94

表-A.4 粉砕した軽石を用いた培養実験期間中の DO (mg L-1)

百日	0	d	1	d	2	d	3	d	4	łd	5	d	6	id	7	d
項日	AM	PM														
濃度1	6.8	7.0	6.9	7.0	7.1	7.0	7.1	6.7	7.0	6.8	7.0	6.7	7.1	6.6	6.9	6.9
濃度2	7.0	7.0	7.0	7.1	7.2	7.0	7.1	6.7	7.2	7.0	7.1	6.6	7.0	6.7	7.1	7.0
濃度3	7.0	7.1	7.1	7.2	7.1	7.0	7.2	6.7	7.0	6.9	6.9	6.7	7.0	6.7	7.1	7.0
濃度4	7.0	7.0	7.2	7.0	7.1	7.0	7.0	6.7	7.1	6.9	7.0	6.7	7.2	7.0	7.3	7.2
濃度5	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	6.9	6.7	7.0	6.8	6.9	6.6	7.0	6.7	7.1	7.1
対照区	6.9	6.9	7.0	7.0	7.1	6.7	6.9	6.7	7.0	6.7	6.9	6.8	7.0	6.8	6.9	6.9

表-A.5 粉砕した軽石を用いた培養実験期間中の濁度(度)

百日	0d		1d 2d		d	3d		4d		5d		6d		7d		
- 須日	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM
濃度1	3.6	1.1	2.2	1.3	2.4	0.9	1.3	1.6	1.3	3.1	1.3	2.7	1.3	3.1	0.2	1.6
濃度2	3.8	1.3	2.7	4.0	2.2	1.6	1.1	1.8	1.3	4.0	0.7	4.9	0.9	4.0	0.0	1.6
濃度3	20.3	6.2	12.4	13.3	4.0	11.8	1.6	2.7	1.3	18.0	1.1	17.6	1.1	18.0	0.9	2.4
濃度4	62.6	86.5	76.4	92.8	42.2	82.9	6.7	71.1	137.0	100.6	41.0	124.0	46.7	20.1	24.9	123.2
濃度5	285.7	396.1	265.6	381.1	350.4	21.1	488.0	471.4	784.2	360.1	471.5	139.2	958.6	90.0	877.0	879.5

軽石の覆砂材としての利用に関する実験的研究

表-A.6 粉砕した軽石を用いた培養実験期間中の NH4-N

項目		生存個体	斃死個体	備考
	濃度1	0.191	_	生存個体:5個体、斃死個体:0個体
	濃度2	0.141	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体
NHN (mg/L)	濃度3	0.303	14.8	生存個体:4個体、斃死個体:1個体
Mig/L/	濃度4	0.109	3.71	生存個体:4個体、斃死個体:1個体
	濃度5	0. 439	2. 29	生存個体:4個体、斃死個体:1個体
	対照区	0.245	_	生存個体:5個体、斃死個体:0個体

注1:生存個体、斃死個体別に平均値を算出した。

注2:定量下限値未満(<0.005mg/L)の場合は0.0025mg/Lとして平均値を算出した。

注3: 平均値が0.005mg/L未満の場合は定量下限値未満(<0.005mg/L)とした。

注4:表中の「-」は斃死個体がないため平均値がないことを示す。

表-A.7	粉砕した軽石る	を用いた培養	≶実験期間中の	NO ₂ -N
12, 1. /		こ 川 V ノニ・旧 良	こ 大阪大戸川町 「 ~ ~	1102-1

項目		生存個体	斃死個体	備考				
	濃度1	0.004	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体				
	濃度2	0.004	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体				
NON (mg/L)	濃度3	0.004	0.010	生存個体:4個体、斃死個体:1個体				
102 1 (mg/ L)	濃度4	0.004	0.006	生存個体:4個体、斃死個体:1個体				
	濃度5	0.006	0.003	生存個体:4個体、斃死個体:1個体				
	対照区	0.013	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体				

注1:生存個体、斃死個体別に平均値を算出した。

注2:定量下限値未満(<0.001mg/L)の場合は0.0005mg/Lとして平均値を算出した。

注3: 平均値が0.001mg/L未満の場合は定量下限値未満(<0.001mg/L)とした。

注4:表中の「-」は斃死個体がないため平均値がないことを示す。

表-A.8 粉砕した軽石を用いた培養実験期間中の NO3-N

	- X /		12/11 72-11 及入	
項目		生存個体	斃死個体	備考
	濃度1	0.011	_	生存個体:5個体、斃死個体:0個体
	濃度2	0.009	_	生存個体:5個体、斃死個体:0個体
NO _c -N (mg/L)	濃度3	0.013	0.011	生存個体:4個体、斃死個体:1個体
1103 11 (118/11)	濃度4	0.012	0.014	生存個体:4個体、斃死個体:1個体
	濃度5	0.021	0.020	生存個体:4個体、斃死個体:1個体
	対照区	0.018	_	生存個体:5個体、斃死個体:0個体

注1:生存個体、斃死個体別に平均値を算出した。

注2:定量下限値未満(<0.005mg/L)の場合は0.0025mg/Lとして平均値を算出した。

注3:平均値が0.005mg/L未満の場合は定量下限値未満(<0.005mg/L)とした。

注4:表中の「-」は斃死個体がないため平均値がないことを示す。

表-A.9	粉砕し	、た軽石を用い	いた培養実験期間中の	PO ₄ -P
-------	-----	---------	------------	--------------------

項目		生存個体	斃死個体	備考			
	濃度1	0.005	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体			
	濃度2	0.006	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体			
PO - P (mg/L)	濃度3	0.010	0.009	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
104 1 (mg/L)	濃度4	0.009	0.029	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
	濃度5	0.016	0.142	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
	対照区	0.010	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体			

注1:生存個体、斃死個体別に平均値を算出した。

注2:定量下限値未満(<0.003mg/L)の場合は0.0015mg/Lとして平均値を算出した。

注3:平均値が0.003mg/L未満の場合は定量下限値未満(<0.003mg/L)とした。

注4:表中の「-」は斃死個体がないため平均値がないことを示す。

区間別分布



図-A.2 粉砕した軽石の粒度組成

軽石の覆砂材としての利用に関する実験的研究

衣 れ マ を用いた相義天候別的中の小価(C)																
項目	0d		1d		2	2d		3d		4d		d	6d		7d	
-	AM	PM														
濃度1	19.8	20.4	19.6	19.5	19.5	19.7	20.1	19.9	20.1	20.1	20.3	20.0	20.1	20.2	20.1	20.2
濃度2	19.9	20.1	19.5	19.6	19.7	19.5	20.3	20.0	20.4	20.2	20.1	20.0	20.4	20.1	20.2	20.3
濃度3	19.9	20.5	19.6	19.7	19.7	20.5	20.4	19.5	20.3	20.3	20.0	20.0	20.3	20.1	20.2	20.1
濃度4	20.0	20.2	19.5	19.7	19.8	19.8	20.0	19.8	20.3	20.2	20.3	20.0	20.3	20.2	20.1	20.5
濃度5	20.0	20.3	20.2	19.6	20.5	20.4	19.6	20.3	19.6	19.8	19.8	19.9	19.7	19.5	20.1	20.0
対照区	20.3	20.1	19.6	19.7	19.7	20.3	19.7	19.6	19.6	19.6	19.9	19.8	19.6	19.6	19.8	20.1

表-A.10 カオリンを用いた培養実験期間中の水温(℃)

表-A.11 カオリンを用いた培養実験期間中の pH

項目	0d		1d		2d		3d		4d		5d		6d		7d	
供日	AM	PM	AM	PM	AM	PM	AM	PM								
濃度1	7.99	7.85	8.08	7.92	8.10	7.85	8.23	7.89	8.03	7. 73	8.06	7.80	8.15	7.83	8.13	7.86
濃度2	8.00	7.86	8.09	7.94	8.10	7.86	8.22	7.89	8.02	7. 73	8.07	7.78	8.12	7.85	8.13	7.87
濃度3	7.98	7.84	8.07	7.95	8.10	7.85	8.23	7.87	8.00	7.81	8.06	7.77	8.12	7.84	8.12	7.87
濃度4	7.94	7.85	8.08	7.93	8.07	7.84	8.23	7.86	8.01	7.81	8.05	7.77	8.12	7.82	8.12	7.89
濃度5	7.99	7.81	8.02	7.97	8.08	7.86	8.18	7.80	7.91	7.84	8.00	7.79	8.07	7.75	8.07	7.83
対照区	7.96	7.86	8.11	7.97	8.09	7.86	8.17	7.93	8.15	7.86	8.04	7.80	8.16	7.93	8.15	7.94

表-A.12	カオリンを用	いた培養実際	験期間中の D	O (mg L ⁻¹)	
1d	2d	3d	4d	5d	

百日	0d		1d		2d		3d		4d		5d		6d		7d	
"其日	AM	PM														
濃度1	6.9	7.0	7.1	7.0	7.1	7.2	7.0	6.8	7.1	6.7	7.0	6.8	7.1	6.9	7.2	7.1
濃度2	7.0	7.0	7.1	7.0	7.1	7.1	6.9	6.7	7.2	6.7	6.9	6.8	7.1	6.9	7.2	7.1
濃度3	7.0	7.1	7.1	7.0	7.1	7.1	7.0	6.7	7.2	6.7	7.0	6.6	7.3	6.8	7.3	7.2
濃度4	7.0	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.1	6.7	7.0	6.7	7.1	6.7	7.2	6.7	7.2	7.2
濃度5	7.2	7.2	7.1	7.1	7.3	7.3	7.3	6.7	7.3	6.7	7.1	6.8	6.8	7.0	7.1	6.9
対照区	6.9	6.9	7.0	7.0	7.1	6.7	6.9	6.7	7.0	6.7	6.9	6.8	7.0	6.8	6.9	6.9

百日	0d		1d		2d		3	3d		4d		5d		6d		7d	
供日	AM	PM															
濃度1	4.0	3.1	2.0	5.8	1.8	3.1	2.2	5.1	4.9	7.1	0.7	11.1	0.7	7.1	0.4	1.6	
濃度2	33.3	21.5	2.9	21.0	4.2	11.6	9.6	21.8	1.3	11.3	1.3	22.9	2.2	11.3	2.4	3.6	
濃度3	85.1	58.5	22.1	245.2	6.7	15.6	12.8	28.8	5.8	31.6	1.3	32.1	1.6	31.4	2.7	13.6	
濃度4	978.7	1223.3	634.8	1053.9	735.2	963.6	757.8	942.3	832.2	658.7	535.7	701.3	591.8	658.7	478.0	888.3	
濃度5	1952.1	3949.7	3538.2	2258.3	4727.7	3909.6	6931.2	5616.1	3488.9	1676.0	3011.1	4577.2	4070.2	1676.0	4260.9	4250.9	

表-A.13 カオリンを用いた培養実験期間中の濁度(度)

表-A.14 カオリンを用いた培養実験期間中の NH4-N

項目		生存個体	斃死個体	備考				
	濃度1	0.251	0.585	生存個体:4個体、斃死個体:1個体				
	濃度2	0.141	5.78	生存個体:4個体、斃死個体:1個体				
NHN (mg/L)	濃度3	0.303	0.007	生存個体:4個体、斃死個体:1個体				
Mig/L/	濃度4	0.042	4.30	生存個体:2個体、斃死個体:3個体				
	濃度5	0. 410	0.449	生存個体:1個体、斃死個体:4個体				
	対照区	0.245	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体				

注1:生存個体、斃死個体別に平均値を算出した。

注2:定量下限値未満(<0.005mg/L)の場合は0.0025mg/Lとして平均値を算出した。

注3:平均値が0.005mg/L未満の場合は定量下限値未満(<0.005mg/L)とした。

注4:表中の「-」は斃死個体がないため平均値がないことを示す。

表-A.15	カオリン	を用い	いた培養実験期間中のNO2-N
--------	------	-----	-----------------

項目		生存個体	斃死個体	備考			
	濃度1	0.005	0.003	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
	濃度2	0.002	0.004	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
NON (mg/L)	濃度3	0.003	<0.001	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
1102 11 (mg/ L)	濃度4	0.002	0.006	生存個体:2個体、斃死個体:3個体			
	濃度5	0.008	0.006	生存個体:1個体、斃死個体:4個体			
	対照区	0.013	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体			

注1:生存個体、斃死個体別に平均値を算出した。

注2:定量下限値未満(<0.001mg/L)の場合は0.0005mg/Lとして平均値を算出した。

注3:平均値が0.001mg/L未満の場合は定量下限値未満(<0.001mg/L)とした。

注4:表中の「-」は斃死個体がないため平均値がないことを示す。

表-A.16 カオリンを用いた培養実験期間中の NO3-N

項目		生存個体	斃死個体	備考			
	濃度1	0.011	0.010	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
	濃度2	0.005	0.010	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
NO ₂ —N (mg/L)	濃度3	0.011	0.005	生存個体:4個体、斃死個体:1個体			
103 N (mg/L)	濃度4	0.007	0.014	生存個体:2個体、斃死個体:3個体			
	濃度5	0.020	0.023	生存個体:1個体、斃死個体:4個体			
	対照区	0.018	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体			

注1:生存個体、斃死個体別に平均値を算出した。

注2: 定量下限値未満(<0.005mg/L)の場合は0.0025mg/Lとして平均値を算出した。

注3: 平均値が0.005mg/L未満の場合は定量下限値未満(<0.005mg/L)とした。

注4:表中の「-」は斃死個体がないため平均値がないことを示す。

軽石の覆砂材としての利用に関する実験的研究

表-A.17 カオリンを用いた培養実験期間中の PO₄-P

項目		生存個体	斃死個体	備考					
	濃度1	0.011	0.051	生存個体:4個体、斃死個体:1個体					
	濃度2	0.012	0.198	生存個体:4個体、斃死個体:1個体					
POP (mg/L)	濃度3	0.030	0.052	生存個体:4個体、斃死個体:1個体					
104 I (iiig/L)	濃度4	0.120	0.101	生存個体:2個体、斃死個体:3個体					
	濃度5	0.305	0.397	生存個体:1個体、斃死個体:4個体					
	対照区	0.010	-	生存個体:5個体、斃死個体:0個体					

注1:生存個体、斃死個体別に平均値を算出した。 注2:定量下限値未満(<0.003mg/L)の場合は0.0015mg/Lとして平均値を算出した。

注3:平均値が0.003mg/L未満の場合は定量下限値未満(<0.003mg/L)とした。

注4:表中の「-」は斃死個体がないため平均値がないことを示す。



区間別分布

図-A.3 カオリンの粒度組成

アサリ培養実験における実験後の鰓の状況



図-A.4 斃死個体の鰓 (粉砕した軽石添加(6400 mg L⁻¹))

図-A.5 斃死個体の鰓 (カオリン添加(6400 mg L⁻¹))



図-A.6 斃死個体の鰓 (粉砕した軽石添加(1600 mg L⁻¹))

図-A.7 斃死個体の鰓 (カオリン添加(1600 mg L⁻¹))



図-A.8 斃死個体の鰓 (粉砕した軽石添加(400 mg L⁻¹))

図-A.9 斃死個体の鰓 (カオリン添加(400 mg L⁻¹))



図-A.10 生存個体の鰓 (粉砕した軽石添加(100 mg L⁻¹))

(粉砕した軽石添加(25 mg L⁻¹))

図-A.11 生存個体の鰓 (カオリン添加(100 mg L⁻¹))



図-A.13 生存個体の鰓 (カオリン添加(25 mg L⁻¹))