

調査課題名：水砕スラグの覆砂材への利用に関する調査

福岡県水産林務部水産振興課 長本 篤
福岡県水産海洋技術センター豊前海研究所 佐藤利幸

調査実施年度：平成 16 年度～ 18 年度

緒言

覆砂は、漁場の底質改善に最も有効な手法であるが、使用する海砂の採取については漁業や海域環境への悪影響が懸念され、全国的にも採取を禁止・削減する動きが広がっている。今後、覆砂事業を継続するにあたり、天然砂の代替材を確保することが急務となっている。そこで、海砂の代替材として、製鉄過程で生成される水砕スラグ（磨砕処理水砕スラグ、未処理スラグ）の利用の可能性について検討するため、生物・環境への影響等を主体に調査研究を行ったので報告する。

調査方法

水砕スラグの安全性・覆砂材としての有用性等を把握するため、まず室内試験にて水産有用生物に与える影響等（生残、蛸集、固結等）を調査した。室内試験結果等を踏まえ、安全性等を確認した後、漁業者同意のうえで、福岡県豊前市地先の実海域において水砕スラグを用いた小規模な実証試験区を造成し、実海域における底質改善効果、生物蛸集効果等について調査を行った。さらに工事施工方法等市場性についても調査を行い、覆砂材としての利用の可能性について検討した。各試験及び調査方法は以下に示した。

なお、当調査には水砕スラグのうち、未処理の水砕スラグ（以下「未処理スラグ」という。）、磨砕処理を施した水砕スラグ（以下「磨砕スラグ」という。）、炭酸化処理を施した水砕スラグ（以下「磨砕炭酸化スラグ、軽磨砕炭酸化スラグ」という。）等を用いた。

1) 生残試験（16 年度）

クルマエビ、ガザミ、マコガレイ、アサリを対象に、30 l 円形水槽に濾過海水を 20 l 入れ、未処理スラグ、磨砕スラグ及び海砂を基質として 0.002 m³ 敷き、約 20 日間止水、エアレーション、無給餌条件下で生残状況を観察した。なおアサリについては、70 l 角型水槽を用い、基質を 0.01 m³ 敷き、パブロバ (*Pavlova lutheri*) を給餌しながら流水条件下で試験を行った。

2) 蛸集性比較試験（16、17 年度）

クルマエビ、ガザミ、マコガレイ、シャコを対象に、1 t 円形水槽に水砕スラグや海砂等 2 種類の基質を 1/4 円づつ交互に敷き、一定期間、流水、無給餌、遮光条件下で各基質に対する蛸集状況を観察した。

17 年度は 16 年度調査結果を踏まえ、磨砕スラグに海砂を混合することにより、蛸集等の問題がどの程度解消されるか把握するため、スラグ混合砂を基質に用いて蛸集性試験を

行った。

3) 成長及び重金属蓄積試験 (16年度)

2トン角型水槽に磨砕スラグまたは海砂を 0.2 m^3 敷き、平成16年7月26日から約5ヶ月間、流水、エアレーション、配合餌料給餌条件下でクルマエビ稚エビ200尾を飼育し、その成長と重金属蓄積状況を調べた。

4) 魚体観察 (16、17年度)

各試験に用いた水産生物を無作為で抽出し、実体顕微鏡等を用いて鰓及び消化管等の観察を行い、水砕スラグの取り込み状況等を調べた。

5) 固結試験 (17年度)

磨砕スラグに海砂を10%割合毎に混合し、全部で11通りの試験砂を調製した。各試験砂を3つに分け、それぞれ30Lプラスチック製容器に入れ (0.03 m^3)、室内2t角型水槽中に投入し、平成17年5月16日から約6ヶ月間、流水、エアレーション条件下で固結状況等を測定した。

6) 実海域における小規模実証試験 (18年度)

福岡県豊前市宇島地先干潟域に、水砕スラグと海砂を以下に示す割合毎に混合し、 0.2 m^3 づつステンレス製の試験枠 (0.1 mm メッシュ、 $1.0 \times 0.6 \times 0.3 \text{ m}$) に敷設した小規模な実証試験区を造成し、定期的に底質、生物環境等を調べた。

試験区：磨砕スラグ100%、磨砕スラグ50%混合砂、以下30%、20%、10%、海砂100%、磨砕炭酸化スラグ100%、磨砕炭酸化スラグ70%混合砂、以下50%、30%、軽磨砕炭酸化スラグ100%、軽磨砕炭酸化スラグ70%混合砂、以下50%、30%、現地盤砂100%

測定項目：水温、pH、土壌強度(山中式土壌硬度計を使用)、COD、硫化物、マクロベントス等

7) クルマエビ鰓黒化再現性調査 (18年度)

17年度室内試験でクルマエビにみられた鰓黒化の再現性試験を以下のとおり行った。1t円形水槽4基にそれぞれ磨砕スラグ100%、磨砕スラグ50%混合砂、20%混合砂、海砂100%を 0.1 m^3 敷き、クルマエビ(平均146mm、35g)各15尾を10月下旬に投入し、流水、遮光、無給餌条件下で飼育し、60日後の鰓黒化有無を目視観察により調べた。

8) 工事施行方法による市場性の検討 (18年度)

覆砂の代替材として磨砕スラグ20%混合砂を使用した際の覆砂工事の直接工事費を試算し、海砂100%を使用した通常工法と比較した。混合砂の覆砂工法として混合工程及び海底からの直接覆砂工程を加えることとし、海上混合・密閉式グラブ覆砂と海上混合・コンベヤバージ覆砂の2通りについて検討した。

調査結果

1) 生残試験 (16年度)

試験に用いたクルマエビ、ガザミ、マコガレイ、アサリの4魚種すべて顕著な斃死はなく、基質による生残差はみられなかった(図1)。海水中のpHは止水で試験を行った試

験区でスラグ投入区が海砂区より 0.2 ~ 0.8 程高い値で推移した。

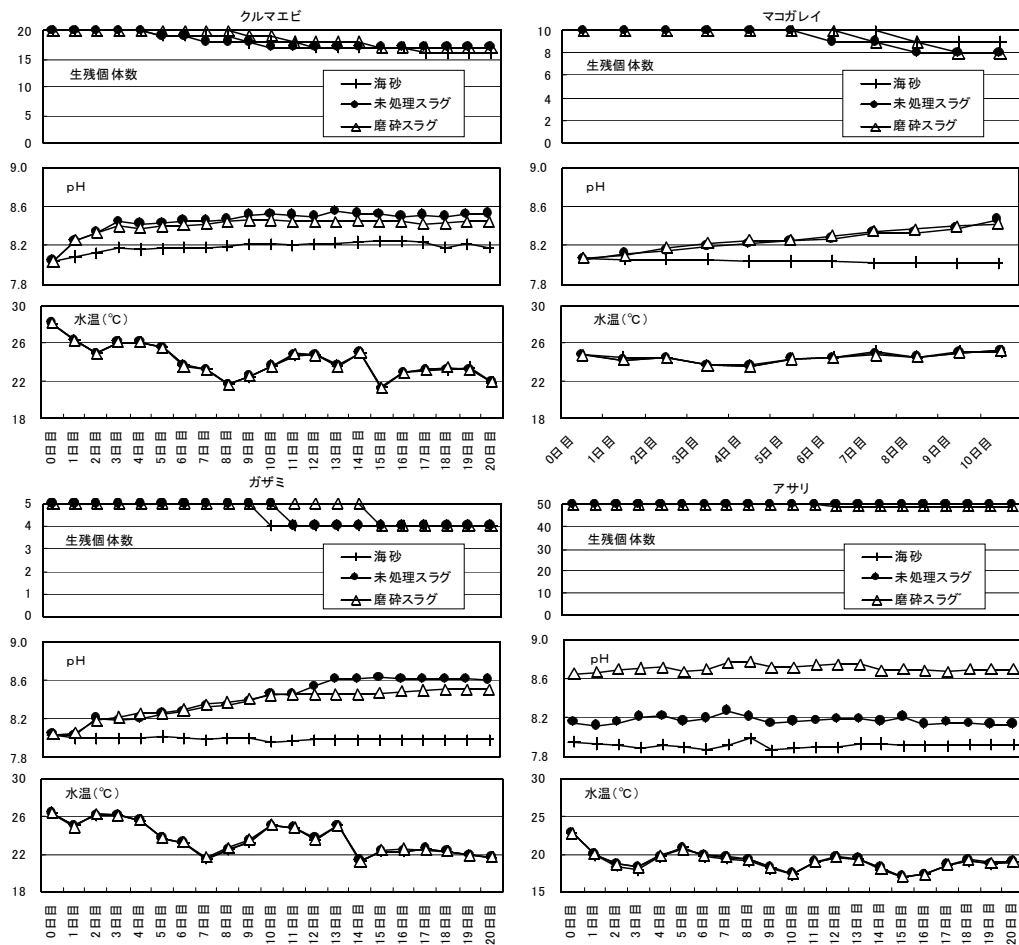


図 1. 各魚種の生残試験結果

2) 蛸集性比較試験 (16、17 年度)

ガザミ、カレイ類及びクルマエビの蛸集は、海砂が最も蛸集効果が高く、次いで磨砕スラグ、未処理スラグの順で、水砕スラグと海砂との蛸集差は大きかった (図 2)。シャコについては蛸集差はみられなかった。また、16 年度調査期間中に水槽内で水砕スラグが固結する現象が確認され、固結した水砕スラグは山中式土壌硬度計で 20mm 以上の値を示し、生物の潜砂行動等に影響を及ぼす程硬かった。

17 年度、クルマエビを用いて磨砕スラグ混合砂に対する蛸集試験を行った結果、磨砕スラグ 10 及び 20 % 混合砂は海砂と同レベルの蛸集効果を示した (図 3)。

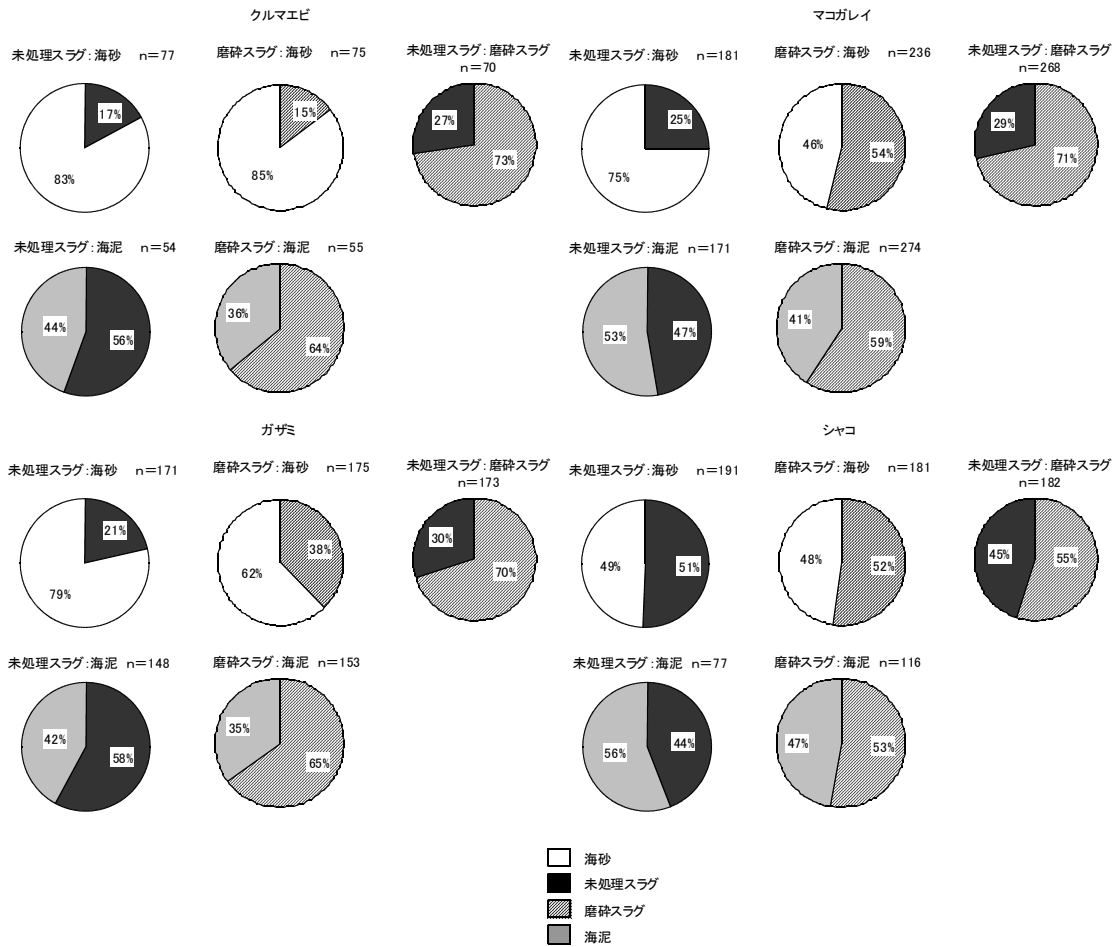


図 2. 各基質への蠕集差

クルマエビ(磨砕スラグ20%混合砂:海砂) n=284

クルマエビ(磨砕スラグ10%混合砂:海砂) n=294

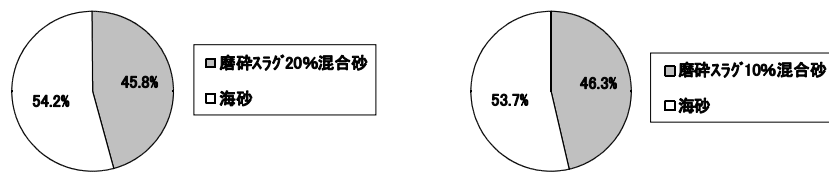


図 3. 磨砕スラグ混合砂の蠕集差

3) 成長及び重金属蓄積試験 (16年度)

磨砕スラグを敷設した試験区で約5ヶ月間飼育したクルマエビ稚エビは、体長、体重及び生残率ともに海砂で飼育した試験区と同等であった(表1)。さらに、カドミウム、総水銀、鉛、ヒ素、総クロム、セレンの重金属類6項目についても差がみられなかった(表2)。

表1. クルマエビ稚エビの成長、生残結果

	磨砕スラグ		海砂	
	平均体長(mm)	平均体重(g)	平均体長(mm)	平均体重(g)
8月	33.63		0.52	33.63
12月	76.08		6.02	74.38
生残率	55%		53%	

表2. 重金属類分析結果

試験項目	磨砕スラグ	海砂	定量限界	試験方法
カドミウム	ND	ND	0.1ppm	原子吸光光度法
総水銀	0.03	0.03	0.01ppm	還元気化原子吸光光度法
鉛	ND	ND	1ppm	原子吸光光度法
ヒ素	ND	ND	1ppm	原子吸光光度法
総クロム	ND	ND	0.2ppm	原子吸光光度法
セレン	ND	ND	1ppm	原子吸光光度法

4) 魚体観察 (16、17年度)

水砕スラグによる魚体の損傷等は確認されなかったが、水砕スラグは海砂と同様に、クルマエビやアサリ等の鰓部への付着や消化管内への取り込みが確認された(表3、4、図4、5)。

また、室内試験で水砕スラグで飼育した一部のクルマエビに鰓黒化が確認された。

表3. クルマエビの観察結果

試験区	検体	検体数	平均体長 (mm)	平均体重 (g)	スラグの有無 (有り数/全数)		海砂の有無 (有り数/全数)		その他
					エラ	消化管	エラ	消化管	
磨砕スラグ10%混合砂	クルマエビ	11	169	44.2	0/11	8/11	0/11	10/11	なし
磨砕スラグ20%混合砂	クルマエビ	10	157	36.3	2/10	9/10	1/10	9/10	エラ部黒化(8/10)



図4. クルマエビ消化管内で観察されたスラグと鰓黒化したクルマエビ

表4. アサリ及びアカガイの観察結果

試験区	検体	検体数	平均体長 (mm)	平均体重 (g)	スラグの有無 (有り数/全数)		その他
					エラ	消化管	
磨砕スラグ100%	アサリ	10	32.3	6.4	3/10	10/10	なし
磨砕スラグ100%	アカガイ	10	80.3	150.0	5/10	2/10	なし



図5. アサリ消化管内で観察されたスラグ

5) 固結試験 (17年度)

各試験区3本立て(図6には磨砕スラグ100%は100%①~③で表示)で固結試験を行った結果、磨砕スラグ100~50%混合砂までの試験区で開始30日以内に土壌強度10mmを越え、固結が確認された。間隙水もpH11を越える値が測定された。また、磨砕スラグ40~30%混合砂も緩やかに土壌強度が上がり、開始60日以内に固結が確認された。間隙水もpH10を越える値が測定された。さらに、磨砕スラグ20%混合砂も60日を過ぎた頃から緩やかに土壌強度が上がり、100日以降に固結が確認された。その間隙水のpHも土壌強度とともに上昇する傾向がみられた。一方、磨砕スラグ10%混合砂及び海砂は固結が確認されず、期間中の間隙水のpHも9未満で推移した。

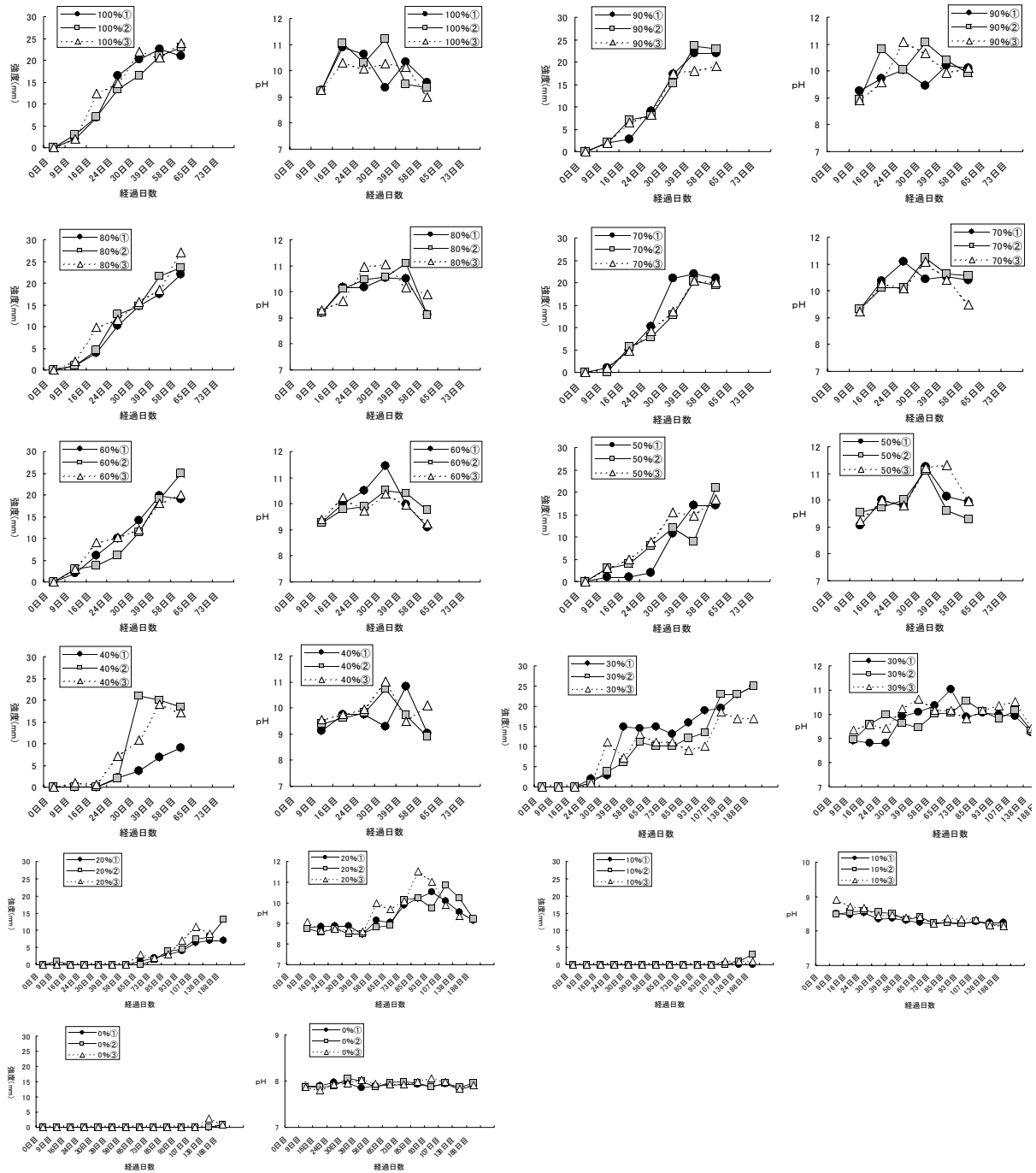


図6. 磨砕スラグ混合砂の土壌強度及びpHの推移

6) 実海域における小規模実証試験 (18年度)

実海域においても磨砕スラグ 100%～30%混合砂まで固結した(図9)。一方、磨砕スラグ 20%及び10%混合砂は固結しなかった。炭酸化処理を施した磨砕炭酸化スラグ及び軽磨砕炭酸化スラグも前者で100%～50%混合砂、後者で100%～70%混合砂まで固結した。pHはスラグ割合の多い程高めの値を示し、その後徐々にpH 8付近まで低下する傾向を示した。底質のCODは全試験区3.0mg/g乾泥以下であり、水産用水基準(20mg/g乾泥以下)を満たした(図10)。しかし、硫化物はスラグ割合の多い程高めの値を示し、水産用水基準(0.2mg/g乾泥以下)を大きく上回った(図11)。一方、マクロベントスは個体数及び種類数ともに海砂と比較して顕著な差はみられなかった(図12,13)。



図7. 実証試験区域



図8. 試験枠 (0.1mmメッシュ)

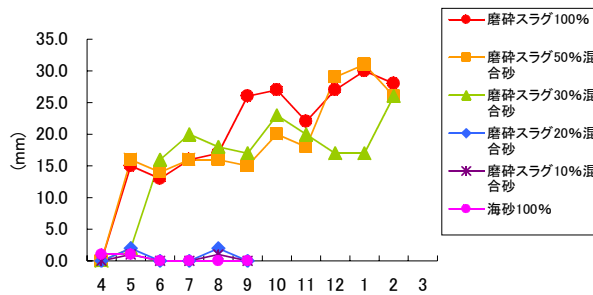


図9. 土壌強度 (山中式土壌硬度計)

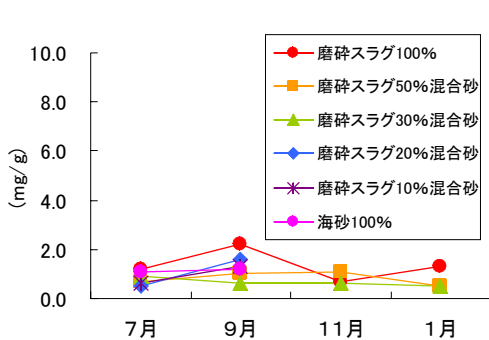


図10. COD

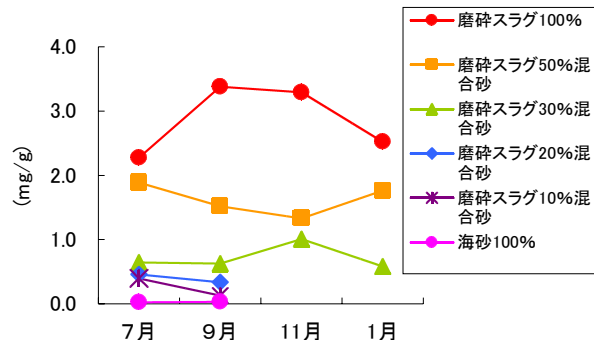


図11. 硫化物

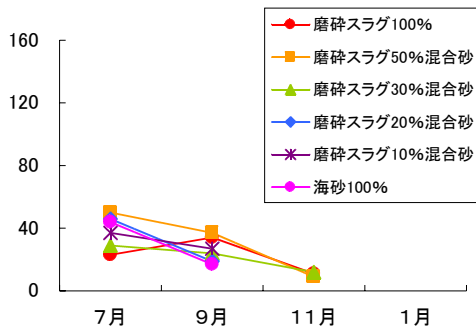


図 12. マクロベントス個体数

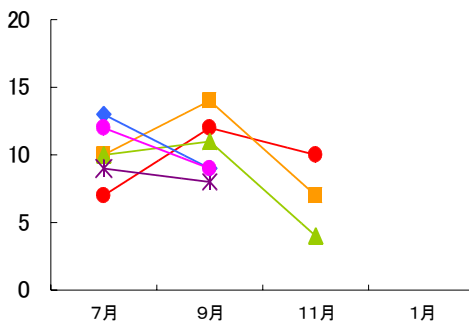


図 13. マクロベントス種類数

7) クルマエビ鰓黒化再現性調査 (18 年度)

再現性調査においても、磨砕スラグ 100 %、磨砕スラグ 50 %混合砂で明確な鰓黒化個体が確認された (図 14、表 5)。一方、海砂 100 %で飼育したクルマエビは明確に鰓黒化した個体はみられなかった。

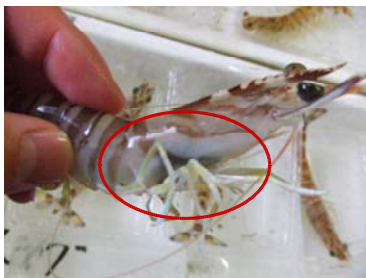


図 14. 鰓黒化したクルマエビ

表 5. 目視による鰓観察(クルマエビ)

試験区	鰓の黒色化有無(無し、若干有り、有り)	5個体中
磨砕スラグ100%	無し	0
	若干有り	1
	有り	4
磨砕スラグ50%混合砂	無し	0
	若干有り	2
	有り	3
磨砕スラグ20%混合砂	無し	3
	若干有り	2
	有り	0
海砂100%	無し	3
	若干有り	2
	有り	0

8) 工事施行方法による市場性の検討 (18 年度)

100 m × 500 m = 50,000 m²、厚さ 30 cm の覆砂工事の場合、スラグ混合砂は通常工法に比べ、混合や覆砂などより高度な工法が必要になることから、通常工法の 1.57 ~ 1.85 倍の工事費がかかる試算となった (図 15)。

考察

これまで覆砂の代替材としての水砕スラグに関する調査研究については、水産土木建設技術センターや愛知県と共同体制で調査を実施してきた。調査開始当初、水砕スラグは安定して相当量生産されており、形状等海砂に類似し、問題となる毒性等も無く海水中でも固結しないと言われ、海砂の代替材として非常に期待されていた。

16 年度調査結果からも、水砕スラグは水産有用生物の生残には特に問題はないと推察された。しかしながら、調査を行ってゆく中で、海水中で固結しやすいことが判明し、海砂に比べ水産有用生物に対する蝟集性がやや劣ることが推察された。これらのことから、水砕スラグ単体での覆砂事業は困難と考えた。

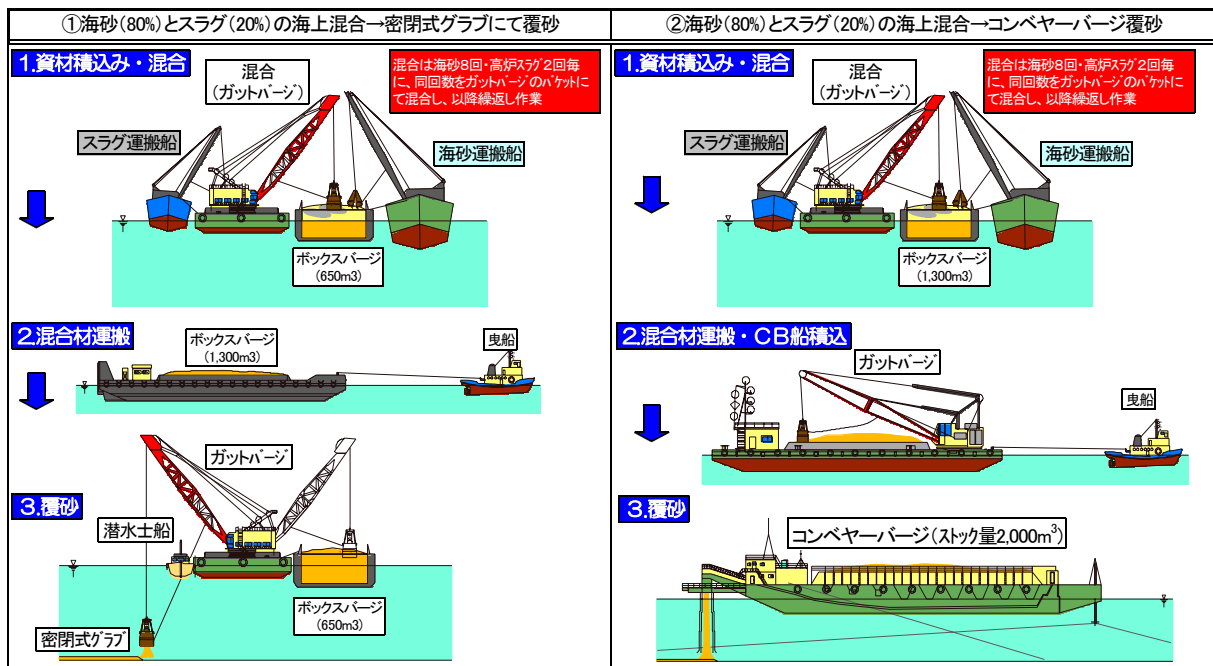


図 15. 検討に用いた水砕スラグ混合砂の覆砂工法

そのため、17年度から海砂と混合することにより覆砂材の増量材として利用できないか検討した。磨砕スラグ混合砂を用いた室内試験及び実海域での小規模実証試験の結果、磨砕スラグが20%程度までであれば固結や蛸集等の問題がないことが推察された。しかし、新たに磨砕スラグで飼育したクルマエビの鰓が黒色化したり、スラグ自体に相当量の硫化物が確認される等の新たな問題点もみつかった。

さらに、磨砕スラグ20%混合砂を用いて覆砂工事を行った場合、覆砂工事費用が通常工事の約2倍程高額になる試算となり、このことから現状では実用化は困難と考えられた。

しかしながら、現状では海砂に代わる代替材がないことになり変わらず、水砕スラグは残された問題点をクリアすれば有益な代替材となりうることから、今後も活用に向けた調査研究を行うことが望ましい。またメーカー側の技術開発等にも期待したい。

摘要

1) まとめ

- ・室内生残試験の結果、クルマエビ、ガザミ、マコガレイ及びアサリの短期的な生残は海砂と差が無く、影響はみられなかった。
- ・約5ヶ月間、磨砕スラグ敷設水槽で飼育したクルマエビ稚エビは、体長、体重、生残及び重金属類6項目(カドミウム、総水銀、鉛、ヒ素、総クロム、セレン)の蓄積、いずれも海砂と差がなく、影響はみられなかった。
- ・ガザミ、マコガレイ及びクルマエビを用いた蛸集性比較試験の結果、海砂が最も蛸集効果が高く、水砕スラグは海砂に比べ蛸集性が劣る傾向を示した。一方、シャコについては蛸集差はみられなかった。また、水砕スラグ混合砂を用いた場合、海砂との蛸集差は

小さくなる傾向を示し、磨砕スラグ 10 及び 20 %混合砂で海砂と同レベルの蛸集効果を示した。

- ・水砕スラグ敷設水槽で飼育したクルマエビやアサリの鰓や消化管内で、海砂と同じように水砕スラグ片の取り込みが観察された。
- ・磨砕スラグ割合の高い混合砂で飼育したクルマエビに、鰓が黒化した個体が確認された。鰓黒化したクルマエビは商品価値が下がるものと思われた。鰓黒化の原因は不明。
- ・固結試験の結果、室内では磨砕スラグ 100 ~ 20 %混合砂まで固結し、実海域では磨砕スラグ 100 ~ 30 %混合砂まで固結した。このことから、磨砕スラグ 20 ~ 10 %混合砂であれば、覆砂材として使用できる可能性を示した。
- ・実海域での実証試験から、磨砕スラグ混合砂は、底質の COD やマクロベントスの出現については海砂と差がみられなかったが、pH と硫化物が海砂より高めの値で測定された。特に硫化物は水産用水基準を大きく上回る値が測定され、実用化の際は留意する必要がある。
- ・磨砕スラグ 20 %混合砂で覆砂工事を実施した場合、 $100 \text{ m} \times 500 \text{ m} = 50,000 \text{ m}^2$ 、厚さ 30 c m のケースで、海砂のみの通常工法に比べ約 2 倍の工事費がかかる試算となった。

2) 残された問題点等

- ・水砕スラグは単体で使用すると、固結、蛸集や硫化物等に問題がある。
- ・水砕スラグは海砂と混合することで、ある程度固結や蛸集等の課題が解決されるが、安価で均一に混合する覆砂工事技術が無く、その費用は高額になることから実用化は困難と思われる。
- ・しかし、依然として覆砂材としての海砂代替材はない。
- ・現在生産されている水砕スラグは固結、蛸集や硫化物等に問題があるが、これらの問題点をクリアすれば有益な代替材となりうることから、今後も活用に向けた調査研究を行うことが望ましいと思われる。またメーカー側の技術開発等にも期待したい。