

水砕スラグの覆砂材としての機能評価

俵積田 貴彦・佐藤 利幸^a・江藤 拓也・中川 浩一
(豊前海研究所)

本研究は鉄鋼生成過程の副産物として生成される水砕スラグを用いて、覆砂代替材となりうるか室内試験及び小規模実証試験を通して検討した。その結果、スラグ上で飼育した生物の生残性や重金属類蓄積などの安全性は確認されたが、スラグが海水中で固結する現象がみられ、また、生物蛸集性に海砂との差が大きく、さらにスラグ中の全硫化物が水産用水基準値を上回るなどの課題が残された。固結現象や生物蛸集性は海砂との混合によって海砂に近づく結果が得られたが、現段階では水砕スラグは単体で使用するには固結等課題があることから、使用に際してはさらに改良が必要であると結論づけた。

キーワード：水砕スラグ，覆砂代替材，安全性，固結等課題

覆砂は現在、漁場や底質改善などに有効であることから県内海域を含め、全国的に幅広く行われている。しかし、覆砂に使用する砂はそのほとんどが海域より採取されたものであり、採取海域周辺漁場への影響などが懸念されており、海砂の代替材の開発・検討が急務となっている。

代替材の候補としては鉄鋼製造過程の際に副産物として生成される鉄鋼スラグがある。鉄鋼スラグのなかでも急冷処理で生成される高炉水砕スラグ(以下水砕スラグ)は図1に示しているように粒径が天然の砂に近く、大量に生産されている¹⁾。また、表1に水砕スラグの成分を示している¹⁾。

そこで、本研究ではこの水砕スラグを用いて覆砂材として活用が可能であるかを室内試験及び小規模実証試験を通して検証した。

方 法

1. 室内試験

本試験は生成直後の未処理水砕スラグ(中央粒径値1.021mm, 以下未処理スラグ)、生成後磨砕処理、針状砕及び粒子の角を除去した磨砕処理水砕スラグ(中央粒径値0.648mm, 以下磨砕スラグ)及び玄海灘産の海砂(中央粒径値0.485mm, 以下海砂)を用いた。

(1) 生残試験

試験に使用した底生生物は豊前海産のクルマエビ20尾

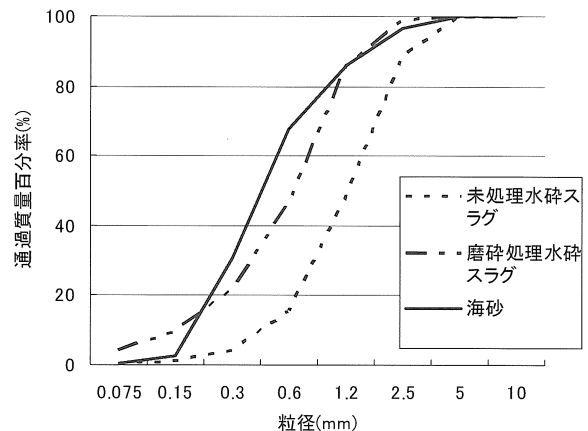


図1 スラグ粒径

表1 スラグ成分 (%)

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

(平均体長74mm)、マコガレイ10尾(平均体長50mm)及びガザミ5尾(平均甲幅長142mm)で約1週間の馴致後、直径38cmの30L円形水槽を各試験区で1基ずつ使用した。各水槽内には未処理、磨砕スラグ及び海砂0.003 m³を水槽別に敷きこれら底生生物を飼育した。飼育条件は海水20Lずつの止水、弱通気、無給餌とし、期間は約20日間とした。また、豊前海産のアサリ50個体(平均殻長32mm)を70L角形水槽(内径44×60×25cm)に水深20cm

^a現所属：漁政課

として未処理、磨砕スラグ及び海砂それぞれを0.02m³敷き、微流水、弱通気及び給餌（*Pavlova lutheli*, 給餌量10⁶cells/日）条件下で約20日間飼育した。試験期間には生残数、pH及び水温を測定した。

（2）成長及び重金属類蓄積試験

試験は2t角型水槽内（内径249×152×100cm）に水深80cmとして厚さ5cmになるように磨砕スラグを敷き吉富漁港で中間育成していた平均体長33.6mmの放流用のクルマエビ約200尾を微流水、弱通気、給餌（配合飼料、給餌量20g/日）条件下で約5ヵ月間飼育した。重金属測定は試験終了時に表4に示す方法で行い、海砂を用いて同様に飼育したクルマエビ（平均体長33.6mm）に対して成長及び重金属量を比較した。

（3）魚体観察

上記（1）及び（2）の試験で用いた水産生物のうち、80個体を無作為に抽出した。これらの生物のエラ及び消化管等を実態顕微鏡などを用いて観察を行った。

（4）固結試験

室内試験を実施している期間中、図2のようにスラグが時間を経るにつれて固結する現象が確認された。そこで磨砕スラグと海砂を混合することによって固結抑制を検証した。試験はスラグ密度を0～100%に10%割合ごとに海砂と混合し、11通りの混合砂を試作した。混合砂を0.03m³ずつ直径31cmの20Lプラスチック製バケツに入れ、2t角型水槽内（概要は上記と同様）に收容し、一定期間、バケツが浸る程の深さで流量30L/分の流水及び通気量10L/分の条件下にて放置した。試験は固結を早期に確認したものに関しては約60日間、60日以内に固結が確認されない試験区に関しては約140日間継続し、土壌強度及びpHを測定した。土壌強度の測定には山中式土壌硬度計を使用した。

（5）蝟集性試験

試験は豊前海産のクルマエビ（平均体長157mm）を直径145cmの1t円形水槽内にて未処理、磨砕スラグ、磨砕スラグ含有10、20%混合砂及び海砂等5種類の基質から2種類を1/4円ずつ交互に厚さ5cmずつ敷き、一定期間、微流水、弱通気、無給餌及び暗幕を用いた遮光条件下にて飼育した。水深は60cmとした。40日間継続し、ほぼ毎日クルマエビの蝟集状況を観察し延べ尾数によって蝟集率を算出した。試験区概要は表2に示した。

2. 小規模実証試験

2006年4月14日に3種類の水砕スラグ及び海砂を表3に示す割合で混合し、豊前市宇島地先干潟域に設置したステンレス製枠（0.1mmメッシュ、100×60×30cm）に、それぞれ約0.2m³（厚さ約30cm）ずつ投入して試験区を造成した。3種類のスラグはそれぞれ磨砕、磨砕スラグ

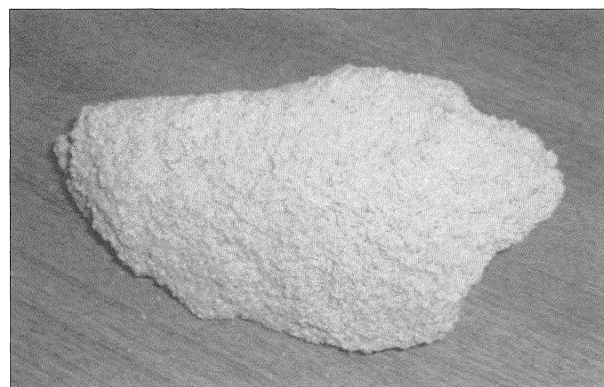


図2 固結したスラグ

表2 蝟集性試験区概要

試験区	磨砕スラグ	未処理スラグ	磨砕スラグ含有20%	磨砕スラグ含有10%	海砂	使用エビ数
1	○				○	75
2		○			○	77
3	○	○				70
4			○		○	284
5				○	○	294
6			○	○		292

表3 小規模実証試験区概要（%）

試験区NO.	海砂	磨砕スラグ	磨砕炭酸化スラグ	軽磨砕炭酸化スラグ	原地盤砂
①	0	100			
②	50	50			
③	70	30			
④	80	20			
⑤	90	10			
⑥	100				
⑦	0		100		
⑧	30		70		
⑨	50		50		
⑩	70		30		
⑪				100	
⑫	30			70	
⑬	50			50	
⑭	70			30	
⑮					100

に炭酸化処理を施したスラグ（中央粒径値1.021mm、以下磨砕炭酸化スラグ）及び生成直後のスラグに軽く磨砕処理を施し、炭酸化処理を施したスラグ（中央粒径値0.790mm、以下軽磨砕炭酸化スラグ）とした。スラグの固結機構はpHがアルカリ性に偏ることでスラグ成分中のケイ素が溶出することに原因があり、炭酸化処理をすることで表面を覆い、pH上昇抑制により固結抑制を試みるためメーカー側が開発し、覆砂材の機能を検証するため使用した。固結状況を確認するため、調査を毎月上旬の干潮時に計12回行い、間隙水の水温、土壌強度及びpHを測定した。さらに底質調査として7、9、11及び翌年1月の計4回、COD、全硫化物及びアサリ稚貝数の測定を行った。アサリ稚貝同定は各試験区のスラグ混合砂もしくは海砂を2kg採取し、目合2mmで篩ったものをサンプルとした。

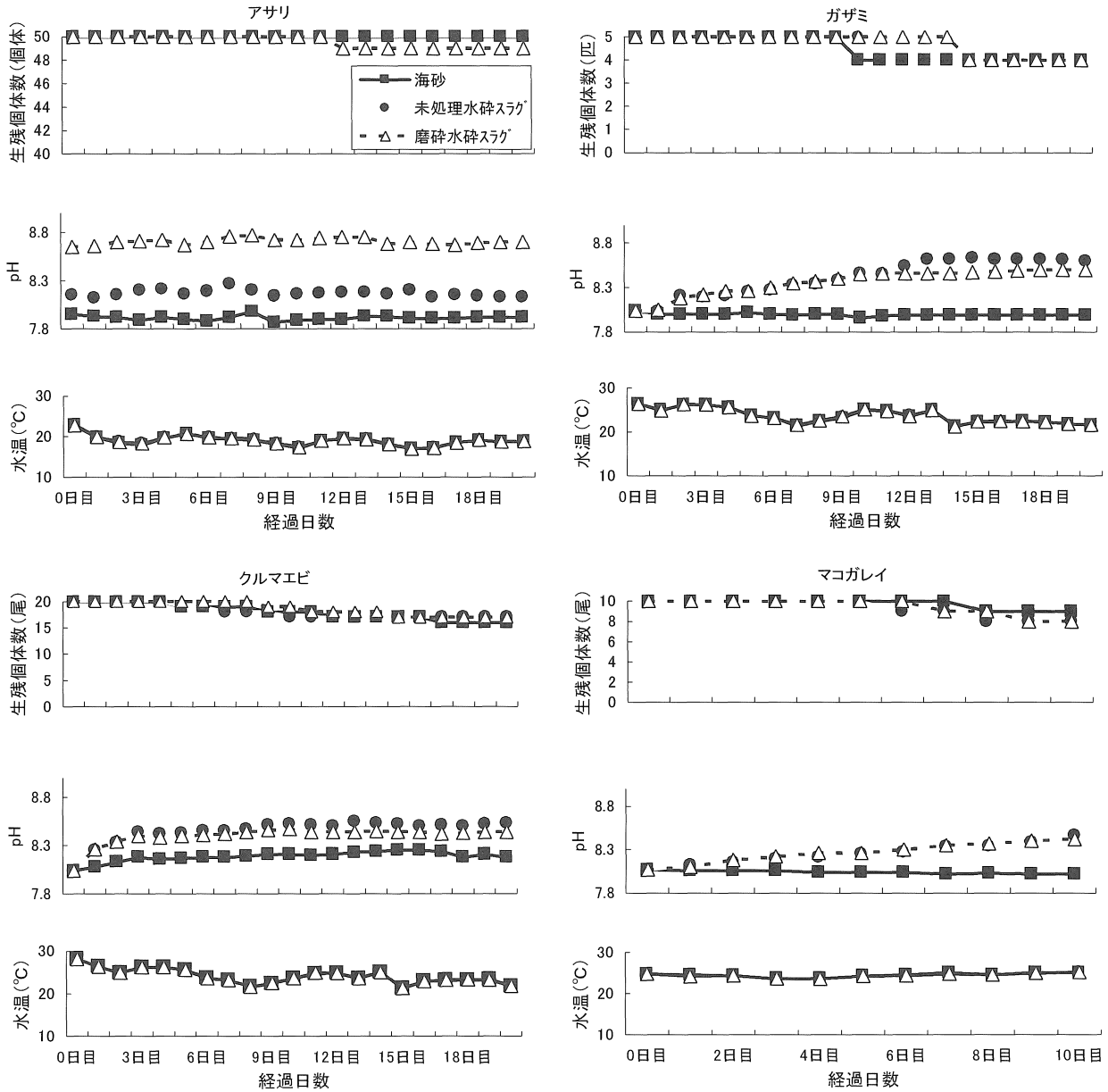


図3 生残試験における生残数、pH及び水温推移

結果

1. 室内試験

(1) 生残試験

生残試験結果を図3に示した。水温は各試験区でほとんど差がなかった。試験に用いた4魚種すべてにおいて顕著な斃死は確認されず、基質による生残率に差は見られなかった。

pHは止水で試験を実施したクルマエビ、ガザミ及びマコガレイ試験区で、試験開始翌日から未処理及び磨砕スラグ区と海砂区で差がみられ、両スラグ区では海砂区の平均pH8.07に対して0.2程度高い値で推移した。また、

流水で試験を実施したアサリ試験区では、試験開始当日から両スラグでは海砂区の平均pH7.91に対して0.2~0.7程度高い値で推移した。

(2) 成長及び重金属類蓄積試験

クルマエビの成長及び生残結果を表3に、重金属類分析結果を表4に示した。磨砕スラグを敷設した試験区で約5ヵ月飼育したクルマエビは、体長及び体重ともに、海砂で同様に飼育した試験区と同等の成長がみられた。生残率も前者で55%、後方で53%であり、生残率に差はなかった。カドミウム、鉛、総水銀、総クロム、ヒ素及びセレンの6項目の重金属量についても海砂で飼育したクルマエビとの差はみられなかった。

表4 スラグ及び海砂飼育クルマエビ成長比較

	磨砕処理水砕スラグ		海砂	
	平均体長(mm)	平均体重(g)	平均体長(mm)	平均体重(g)
8月	33.6±0.9	0.5±0.04	33.6±0.9	0.5±0.04
12月	76.1±8.0	6.0±1.8	74.4±11.4	5.9±2.6
生残率(%)	55.0		53.0	

表5 スラグ及び海砂飼育クルマエビ重金属量

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

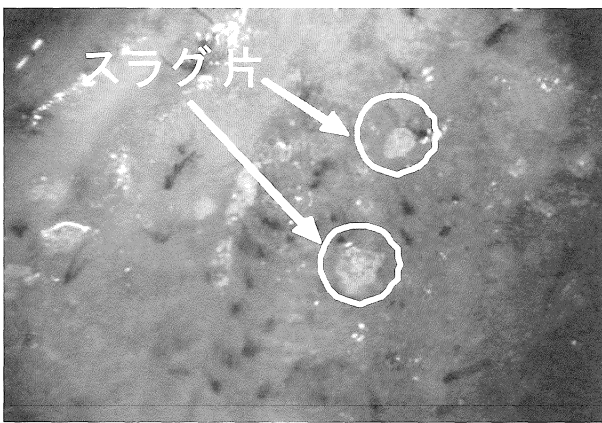


図4 クルマエビのエラ内に残留したスラグ片

(3) 魚体観察

クルマエビ及びマコガレイで、図4のように一部個体でエラに付着したスラグ片や消化管内に取り込まれたスラグ片が観察された。一方、ガザミ及びアサリではスラグ片の付着、消化管内への取り込み等は観察されなかった。また、全ての個体において体表や消化管等への直接的な損傷は観察されなかった。

(4) 固結試験

固結試験結果を図5及び6に示した。期間中の水温は17.8~28.7℃の範囲であった。

磨砕スラグ含有100~50%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。スラグ含有100%区では間隙水の最大pHが11.22となった。また、磨砕スラグ含有40~30%までの試験区でも緩やかに土壌強度が上がり、開始60日以内に10mmを越え、固結が確認された。間隙水のpHも10や11を越える数値が測定された。さらに磨砕スラグ含有20%の試験区では開始から60日以降緩やかに強度を増し、100日以降に10mmを上回る試験区がみられた。pHも開始60日までは9を下回る値で

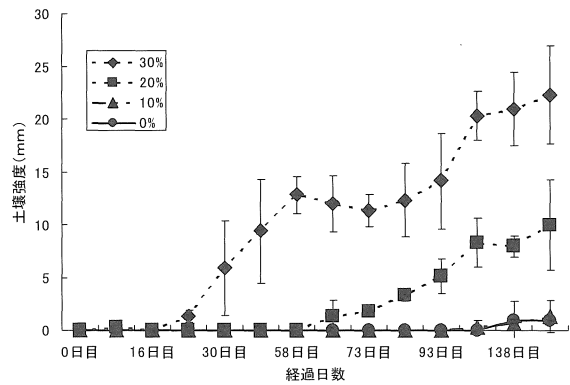
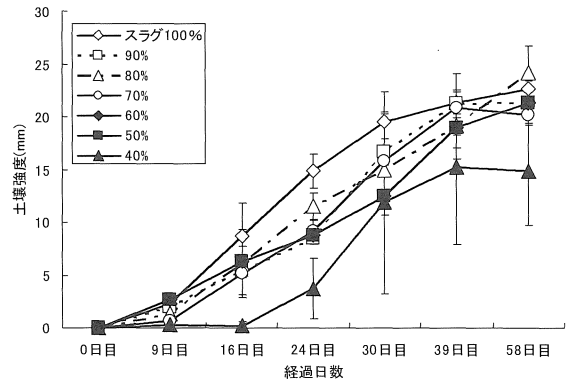


図5 磨砕スラグ及びスラグ混合砂土壌強度推移

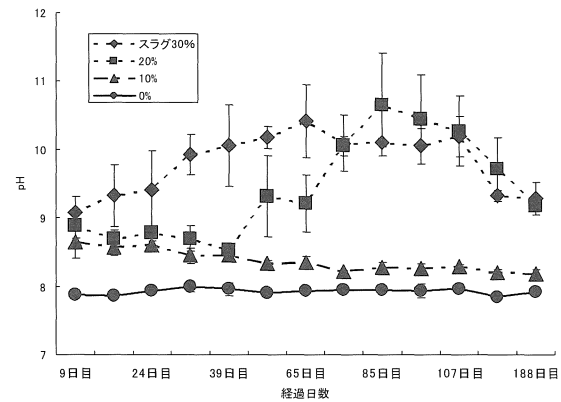
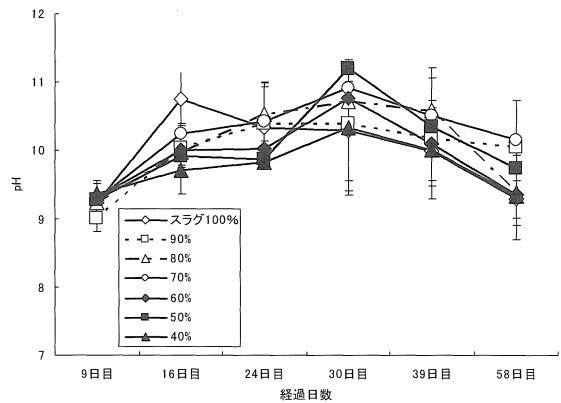


図6 固結試験におけるpH推移

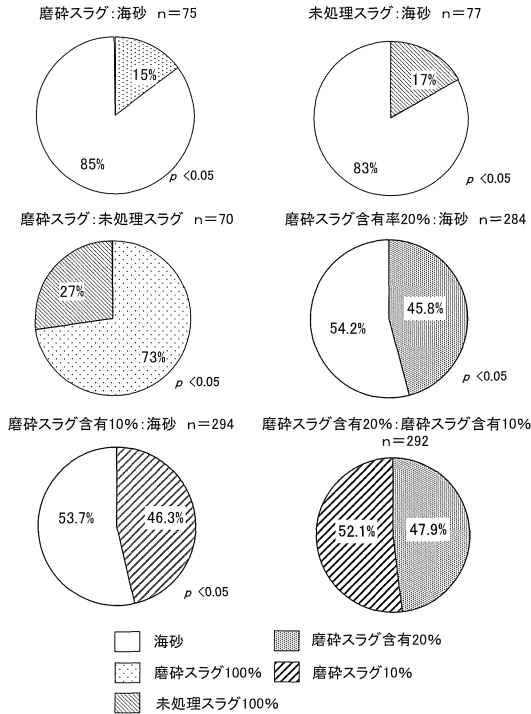


図7 クルマエビのスラグ等への蝟集性結果

推移したが、その後10を上回る値が見られた。一方、磨砕スラグ含有10%及び0%（海砂100%）では固結は確認されなかった。期間中のpHも9未満で推移し、8.9～7.8の範囲であった。

(5) 蝟集性比較試験

試験結果を図7に示した。未処理スラグ及び海砂を比較した試験区で海砂側に83%が蝟集し、磨砕スラグ及び海砂を比較した試験区で海砂側に85%が蝟集した ($p < 0.05$)。また、未処理スラグ及び磨砕スラグを比較した試験区では、磨砕スラグ側に73%が蝟集した ($p < 0.05$)。磨砕スラグ含有20%及び海砂を比較した試験区ではスラグ側に45.8%が ($p < 0.05$)、磨砕スラグ含有10%及び海砂を比較した試験区ではスラグ側に46.3%が ($p < 0.05$)、磨砕スラグ含有20%及び10%を比較した試験区ではスラグ含有20%側に47.9%が蝟集した。

2. 小規模実証試験

小規模実証試験における土壌強度、pH、硫化物及び試験区に確認されたアサリ稚貝出現数結果を図8、9及び表5に示す。また、磨砕スラグ20%、軽磨砕炭酸化スラグ100%、70%、50%及び30%区は台風のため施設が破損し、9月までの結果となっている。土壌強度は磨砕スラグについては、スラグ含有30%以上の試験区では2ヵ月後までに全て固結が確認された。一方、20%以下の試験区では試験区が破損する5ヵ月後まで固結しなかった。磨砕炭酸化スラグについては、スラグ含有50%以上の試験区で3ヵ月後までに全て固結が確認された。

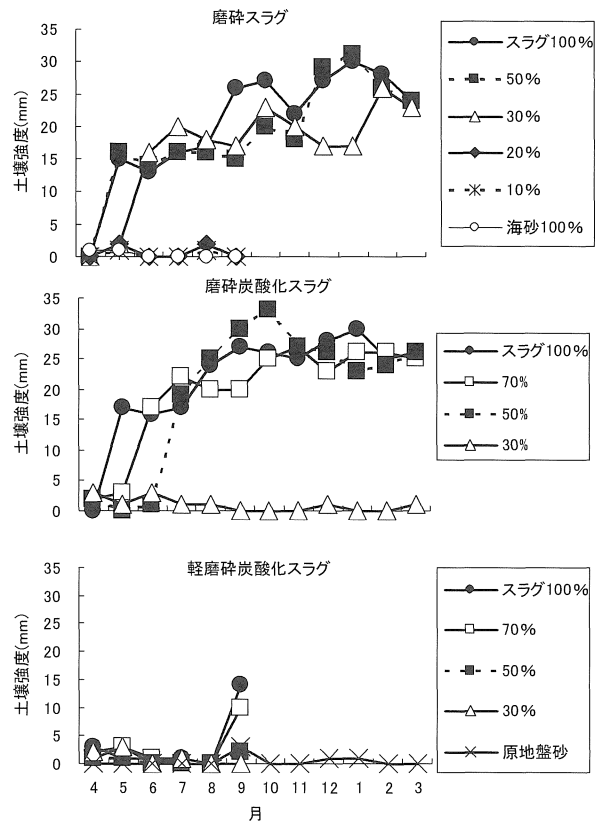


図8 小規模実証試験における土壌強度推移

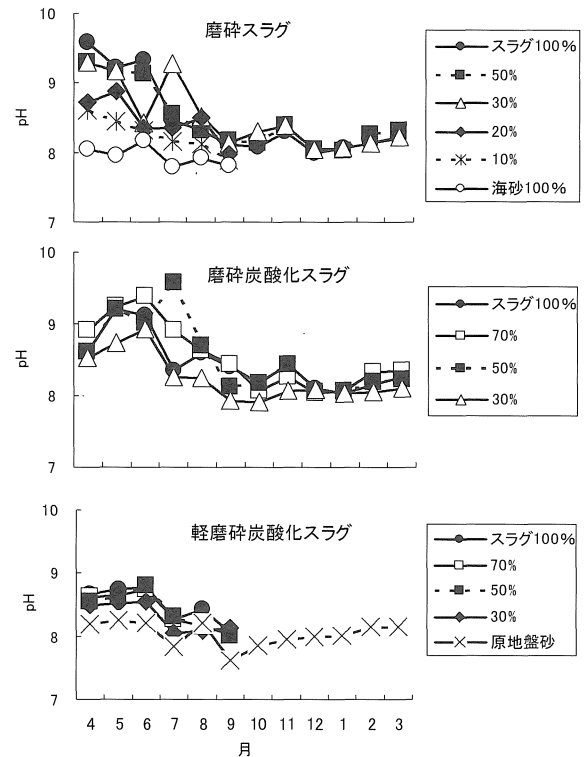


図9 小規模実証試験におけるpH推移

考 察

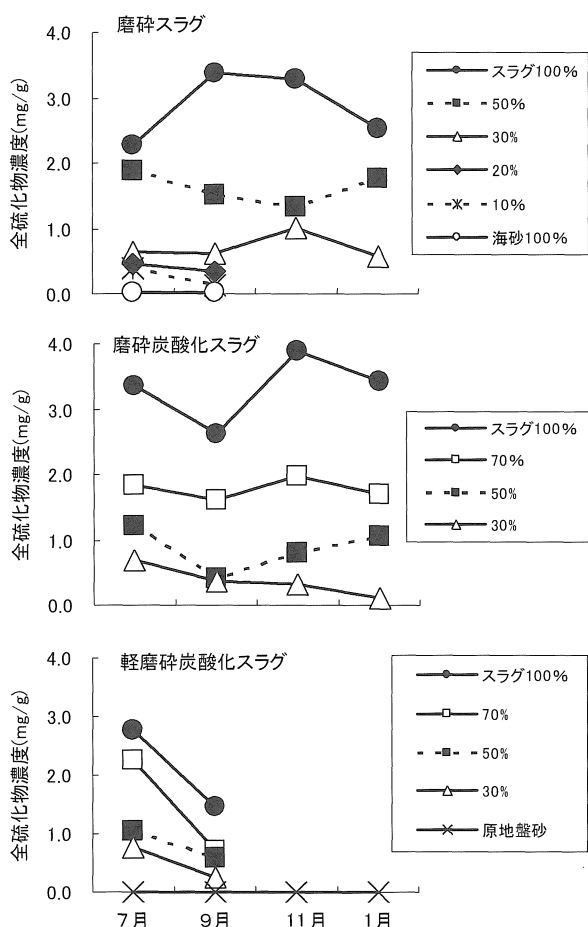


図10 小規模実証試験における全硫化物推移

一方、30%混合砂は試験期間中を通して固結は確認されなかった。軽磨砕炭酸化スラグについては、4試験区とも4ヵ月間は固結がみられなかったが、5ヵ月後にスラグ含有70%以上の試験区で固結が確認された。pHは試験開始当初、高い値を示した試験区があったが、その後低下傾向となった。

CODは全試験区にて水産用水基準内²⁾である20mg/g乾泥以下で推移した。

全硫化物は海砂に比較してスラグ含有率の高い試験区において高い値で推移した。また、スラグ含有率が低い試験区は試験開始当初は高い値を示したものの、試験経過につれて濃度が低下する傾向があった。

各試験区のアサリ出現数は着底期の9月においてはほぼ全試験区において確認された。試験区が破損した区を除いた全ての試験区についてt-検定を実施したところ全試験区間にアサリ稚貝数に差は確認されなかった。

水砕スラグはそれ単体で固結する性質があるが、本研究によってもこの現象が確認された。室内試験における混合砂を用いた固結試験では磨砕スラグ含有20%以上で約140日後までに固結が確認され、10%以下で固結は確認されなかった。つまり水砕スラグと海砂を混合させることによって固結の遅延もしくは抑制が確認された。さらに、小規模実証試験においては磨砕炭酸化及び軽磨砕炭酸化スラグ含有30%で試験終了まで固結は確認されなかった（軽磨砕炭酸化スラグに関しては試験区破損のため5ヵ月間の試験）。小規模実証試験でスラグ含有率が比較的高いのに関わらず固結が抑制された要因としては試験区設置当初で固結が始まる以前に現場海域の海砂と混合したことでスラグ含有率が低くなったことなどが考えられる。

全硫化物は水産用水基準²⁾では0.2 mg/g乾泥以下と標記されているが、小規模実証試験においてはほとんどの試験区において試験期間中これよりも高い値で推移し、最高では磨砕炭酸化スラグ100%（11月）において約20倍の値である3.89 mg/g乾泥を示した。しかしながら、磨砕、磨砕炭酸化及び軽磨砕炭酸化スラグ試験区ともスラグ割合が少なくなるほど、時間経過につれて全硫化物濃度が低くなる傾向が見られた。特に試験区設置9ヵ月後における磨砕スラグ10%及び磨砕炭酸化スラグ30%区ではそれぞれ0.163及び0.116 mg/g乾泥となり水産用水基準の範囲内となった。よってスラグ割合を低くさせて海砂と混合させると全硫化物の課題が解決することが示唆された。

また、生物増集に関しても海砂と同等の効果は得られなかったものの、スラグ100%と比較して海砂に増集性が近づいたことから上記の固結及び全硫化物等の課題と合わせて混合砂による覆砂材としての可能性が示唆された。その混合率としては小規模実証試験において固結が抑制されたスラグ含有率20%（対海砂80%）であることが考えられる。しかしながら、佐藤ら^{a)}はスラグ含有20%で海域に50,000m²、砂厚30cmの覆砂工法を検討した結果、海砂100%覆砂と比較して1.6~1.9倍の工事費を試算していることから、覆砂方法に関しても改良が必要である。

水砕スラグの主成分はCaOやSiO₂等である。クルマエビをスラグ上で飼育した試験では、体内に重金属類はほとんど検出されなかったが、エラや体組織に針状のスラ

表5 小規模実証試験におけるアサリ稚貝確認数推移

試験区	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 5	St. 6	St. 7	St. 8	St. 9	St. 10	St. 11	St. 12	St. 13	St. 14	St. 15
	磨砕スラグ 100%	磨砕スラグ 50%	磨砕スラグ 30%	磨砕スラグ 20%	磨砕スラグ 10%	海砂100%	磨砕炭酸 化スラグ 100%	磨砕炭酸 化スラグ 70%	磨砕炭酸 化スラグ 50%	磨砕炭酸 化スラグ 30%	原鉱炭酸 化スラグ 100%	原鉱炭酸 化スラグ 70%	原鉱炭酸 化スラグ 50%	原鉱炭酸 化スラグ 30%	原地盤砂
7月			1					1		2		1			
9月	2	6	3	2	3	1	4		10	4	9	1	1		3
11月	1		1				2	1							
1月							2								

(網掛け部分は台風のため破損し、試験続行不可であった試験区)

グが残る個体があった。直接的な損傷は確認されなかったが、残留したスラグが生物にどのような影響を与えるかが定かでないため、安全性としての課題が残った。生残率が水砕スラグと海砂と比較して差がほとんどなかったことから、水砕スラグの安全性は確認されたもののpHの値に関しては課題が残った。室内試験における固結推移経過ではpHはさほど高い値は示さなかったが、アサリ生残試験における磨砕スラグ試験区では試験期間を通して、また小規模実証試験においては試験開始当初で間隙水中に水産用水基準の上値(8.4)を超える値(最高; 磨砕炭酸化スラグ70%試験区, 9.38)を示し、覆砂する場合、設置初期は生物への影響が考えられた。しかし、宮田ら³⁾は海底に水砕スラグを設置した後、pHを測定した結果、間隙水中は高い値を示したものの、近傍海水では周辺海域とほとんど変わらない値を示したことからスラグが近傍海水に与える影響はpHに関しては少ないとしている。また、小規模実証試験においては設置後の時間経過に伴ってpHが低下し、水産用水基準内で推移する傾向が見られたことからpHに関しては近傍海水は設置直後から、また間隙水中については時間経過によって生物への影響が軽減されるものと推察された。

また、本田ら⁴⁾は水砕スラグを用いてアサリ着底率を試験している。その結果、水砕スラグは海砂と同等の着底率を示し、スラグの有用性を示唆している。小規模実証試験においては周辺干潟域と試験区の間アサリ稚貝出現数の差が確認されなかったことからアサリに関しては影響が少ないものと考えられた。

今回、未処理スラグ及び磨砕スラグを室内試験に、磨砕スラグ、磨砕炭酸化スラグ及び軽磨砕炭酸化スラグを小規模実証試験に用いた。室内試験と実証試験とで条件

が異なることから安易な比較は出来ないが、固結性や硫化物等の課題を考慮すると、有用性の可能性としては未処理<磨砕<磨砕炭酸化<軽磨砕炭酸化スラグの順であることが推察された。これはメーカー側の今後の開発によっては覆砂材としての利用への可能性があることを示している。

これまで水砕スラグはそれ単体で固結することなどが実用するにあたってさらなる改良が必要であるということ述べてきたが固結することを利用し、人工岩礁や底質改善材など覆砂以外の素材としての活用も検討する必要があると思われる。

以上を総合すると、水砕スラグ自体は有害物質や水産生物の生残などには特に問題が見られていないが、固結や全硫化物等の課題が残っており実海域への影響が明らかになっていないことから、現状での使用に際してはさらなる改良が必要である。しかしながら課題を解決すれば有用な代替材となる可能性があることから、今後も活用に向けた取り組みが必要であると考えられた。

文 献

- 1) 鉄鋼スラグ協会：土木用水砕スラグ，(1998)。
- 2) (社)日本水産資源保護協会：水産用水基準，(2005)。
- 3) 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，第16巻，345-350 (2000)。
- 4) 本田是人・石田基雄・家田喜一・武田和也・山口安幸・鈴木輝明：底生生物の構造およびアサリ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。海洋理工学会誌，Vol. 10, No. 2, 19-33 (2004)。