

環境との調和に資する技術開発（水産資源の有効活用）

実施機関名：独立行政法人 北海道開発土木研究所
環境水工部 水産土木研究室
担当者名：足立 久美子 佐藤 朱美
調査実施年度：平成14年～平成16年度

1. まえがき

水産業が盛んな北海道においては、漁業活動に伴って各種水産廃棄物が排出され、中でもホタテ貝殻は20万tで全体の約半分を占める。貝殻の一部は、堆肥化などにより再資源化されるが、その量は充分とは言い難く、排出される貝殻の約半分は埋立処理される。

近年では、廃棄物の処理、保管に関する法的整備の進行、処理費用の漁業経営の圧迫、環境問題に対する国民意識の高まり、資源循環型社会構築の必要性などから、貝殻を有効利用するための方策を検討することが緊急課題となっている。

そこで本研究は、貝殻の有効活用を図るため、道内におけるホタテ貝の生産量と貝殻の廃棄物処理状況の実態調査、建設資材、環境改良材としての活用のための試験を行った。

2. 調査方法

2. 1 道内における水産廃棄物の種類や算出量、処分および利用に関する実態調査

ホタテの主要な生産地の状況を具体的に把握・整理するため、道南、道東オホーツク、道北オホーツク、青森県の4地域において現地調査（ヒアリング調査）を実施した。

2. 2 ケーソン中詰材料としての適用に関する検討

重力式構造物の砂と置換して貝殻を中詰材として使用するには、砂と同程度の単位容積質量が必要と考えた。置換する砂に比べて単位容積質量が軽いと堤体の幅を大きくしなければならなくなり、コストが高くなるからである。貝殻を原貝のまま用いると間隙が大きすぎるので、破碎してから砂と混合して用いることとした。

2. 2. 1 試験材料

豊浦町の水産加工場内に堆積されたホタテ貝殻（密度 2.51g/cm^3 ）と石狩湾新港に陸揚げされた天塩産の砂（密度 2.66g/cm^3 ）を使用した。

破碎方法は現場で実際に貝殻を砕く場合、ブルドーザーなどで転圧すると想定し、貝殻を敷鉄板上に厚さ10cm程度敷き、その上をハンドガイド式振動ローラーで10往復及び20往復した。破碎した貝殻の粒度試験を行った。試験に使用する試料として、20往復したもの（Aタイプ）、10往復したもの（Cタイプ）、20往復したものと10往復したものを重量比1：1で混合したもの（Bタイプ）の3タイプ作成した。

2. 2. 2 試験方法

試験は、30ℓ容器を用いた小型容器試験と、容器の大きさの差異による単位体積質量の違いを比較するため 1m^3 の容器を用いた大型容器試験を行った。また、丸い砂粒子と平たいホタテ貝殻の形状の違いから、沈降速度に差が生じることが予想され材料の分離が懸念される。現地におけるケーソンの深さを考慮した円筒形容器試験を行った。容器は水中コンクリート打設時に用いるケーシングパイプを利用し、全体の質量を測定するとともに目視により分離状況について観察した。

砂と貝殻の混合率は、容積に占める貝殻の割合を基準にして決定した。混合率については表1に示す。実際に混合量を求めるには、砂と貝殻の質量比で割合を測定するので質量

比も併記する。

2. 2. 3 ケーソン構造物における現地実証試験

砂原漁港において、波除堤ケーソンで実証試験を行った。前述の小型容器試験および円筒容器（φ450×1m）試験を行った。小型容器試験は、実際にケーソン中詰として砂、貝殻を土運船で運搬し、船上で混合し計測した。サンプルは中詰材の混合1回につき3サンプル、運搬回数10回分、全30サンプル行った。円筒容器試験はケーソン天端から2mのところに設置し、投入後引き上げて計測した。

2. 3 ホタテ貝殻礁を用いた環境改善方策の検討

2. 3. 1 環境改善の考え方について

水質・底質の悪化防止の考え方の要点を以下に示す。

- (1) 海底に設置したホタテ貝殻礁が、有機物食性の生物（例えば甲殻類や細菌など）の生息場となる。
- (2) 生物量、生物種が増加する。
- (3) これらの生物が堆積した有機物を分解して、無機化を促進する。
- (4) 底質のヘドロ化を抑制し底質悪化防止となる。
- (5) 堆積物の無機化が促進されることにより、水質・底質悪化の防止が図られる。

試験礁を設置することによって、上記の(1)～(5)の効果をねらう。

2. 3. 2 試験研究内容

水質・底質環境改善効果を検証するため、①貝殻による環境影響の把握、②試験礁を用いた現地調査、③浄化能力算定のための室内試験を行った。

2. 3. 3 貝殻による環境影響の把握

貝殻の再生利用は、廃棄物処理法に基づき「生活環境の保全上支障が生じないこと」が求められる。貝殻から溶出する物質が環境に与える影響を室内試験により把握した。

(1) 残存有機物の溶出物質量の把握

貝殻の再利用について現状では試験判定方法、基準がない。評価は環境基準および水産用水基準を利用して判断した。溶出試験は、廃棄物の埋立処分基準や海洋投入処分基準（「産業廃棄物に含まれる金属等の検出方法」昭和48年2月17日環境庁告示第13号）に準拠して行った。

貝殻の再利用上の支障は「貝殻に残存した有機物による悪臭や水質汚濁の発生」である。有機物量は排出時の加工方法、堆積年数により差がある。これを考慮して溶出試験を実施した。試験ケースと分析項目を表2に示す。ただし、Bタイプは、保管するときに年度別に分類していないので1ケースのみ分析した。Bタイプの堆積直後の代替として、Cタイプの堆積直後の貝殻を100℃で1分間煮沸したものを使用した。

(2) 長期的な水質変化の把握

水域での貝殻利用は、環境基準となる水質項目において影響の有無を把握する必要がある

表1 混合率

	容積比 (%)	質量比 (%)	試験数		
			基本試験	大型容器試験	円筒容器試験
砂	—	—	3	3	—
ホタテ Aタイプ	10	13.7	3	3	1
	20	27.1	3	1	—
	30	38.1	3	1	—
	40	48.9	3	1	—
ホタテ Bタイプ	10	13.7	3	3	1
	20	27.1	3	1	—
	30	38.1	3	1	—
ホタテ Cタイプ	10	13.7	3	3	1
	20	27.1	3	1	—
	30	38.1	3	1	—

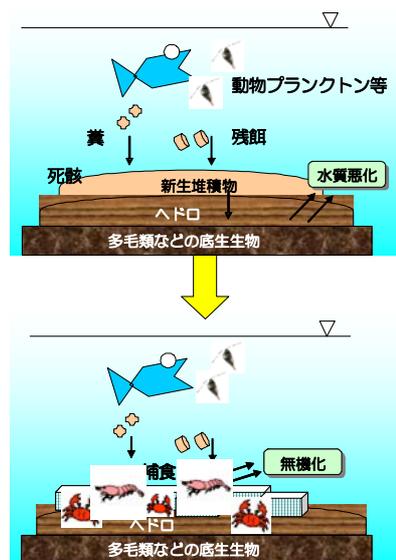


図1 底質悪化防止概念図

表2 溶出試験一覧

分離方法	スチーム	堆積年数	分析項目
機械剥き (乾燥貝柱 製品用)	スチーム	A 直後	pH、生物化学的酸素要求量(BOD)、化学的酸素要求量(COD)、塩化物イオン(Cl)、有機炭素(TOC)
		A 1年	
		A 2年	
手剥き	ボイル有	C H15	
		B *	
		C H15	
		C H14	
		C H13	
手剥き	ボイル無	C H15	
		C H14	
		C H13	

Aの1年は堆積後1年以内、2年は堆積後2年以内を示す。Bは堆積するときに年次で分けていないので1ケースとして分析した。Cは年次ごとに保管されたものである。

表3 海中での溶出試験一覧

分離方法	スチーム	堆積年数	分析項目
機械剥き	スチーム	A 直後	pH、COD、TOC、全窒素(T-N)、全リン(T-P)
手剥き	ボイル有	C H15	
		C H15	

る。人工海水で満たした水槽（約 160L 程度）に、一定量（重量体積比 10%）の貝殻を入れ、設置時と設置後 7、14、21、28、42、56 日後に水質を測定した。試験は恒温室内で約 20℃の状態に保って行った。試験ケースと分析項目については表 3 に示す。

2. 3. 4 試験礁による現地調査

水質・底質悪化防止手法の開発及び効果の検証を進めるため、現地に試験礁を設置した（図 2）。

(1) 平成 15 年度調査内容

調査は、適地選定のため追直漁港クロソイ養殖箇所近傍、室蘭港絵鞆地区ホタテ蓄養箇所近傍、養殖・蓄養箇所との対照区として苫小牧西港貯木場付近とした。

現況を把握するため、各調査域において水質・底質・底生生物・浮遊生物調査と、養殖などの影響による海水中の沈降物質の量や性状を把握するため堆積物の採集を行った。各調査の分析項目については表 4 に示す。

また、追直漁港においては、貝殻を利用した小規模な試験礁を 2003.9.3 から 2004.1.7 まで設置した。試験礁はステンレス製のカゴに貝殻を詰めただけのもので、大きさは一辺約 30 cm の立方体のテストピースを 9 基で 1 ユニットとした。1 基に貝殻約 15 kg が入り、間隙率約 71%、表面積約 10 m² である。設置 2 ヶ月後（11 月調査）、4 ヶ月後（1 月調査）に試験礁の直上水を採水した。試験礁内の生物と堆積物の採取にあたっては、1 基を潜水士により回収し、回収箇所には予備のテストピースを設置した。水質および試験礁に蟻集した生物について、表 4 に示す分析項目の測定を行った。

(2) 平成 16 年度調査内容

平成 16 年度は、室蘭港絵鞆地区ホタテ蓄養箇所近傍、入江地区（湾奥）とした。

① 試験礁調査

試験礁は、プラスチック製のネットの中にホタテ貝殻を充填したもの（φ 150×300 mm、約 2 kg、以下「基質」とする）16 本をプラスチック製のマス状の架台に載せたものを 1 基の試験礁とし、室蘭港入江地区におよび絵鞆地区の海底面に設置した（図 3）。貝殻の間隙による生物の蟻集効果を比較するため、原貝、破砕貝、貝殻無しの基質を用意した。試験礁区分は表 5 のとおりとし、合計 8 基の試験礁（入江 3 基、絵鞆 5 基）を設置した。調査の実施時期は、試験礁設置後 1、3、7、10 ヶ月後（6、8、11、2 月）とした。

試料は試験礁中（基質中）の海水を採取するとともに、試験礁を回収して基質中の堆積物と生物をダイバーにより採取した。

回収時には、塩ビ製の筒を用いて、堆積物および生物が散乱してしまうことがないように、十分注意して行い、



図 2 調査位置図

表 4 分析項目一覧

分析項目	
水質	pH、溶存酸素(DO)、COD、アンモニア態窒素(NH ₄ -N)、亜硝酸態窒素(NO ₂ -N)、硝酸態窒素(NO ₃ -N)、リン酸態リン(PO ₄ -P)、全窒素(T-N)、全リン(T-P)
底質	粒度組成、密度、COD、全硫化物(T-S)、強熱減量(LL)、TOC、有機態窒素(TON)
底生生物	種の同定、計数
浮遊生物	種の同定、計数
堆積物	乾燥重量(DW)、TOC、TON

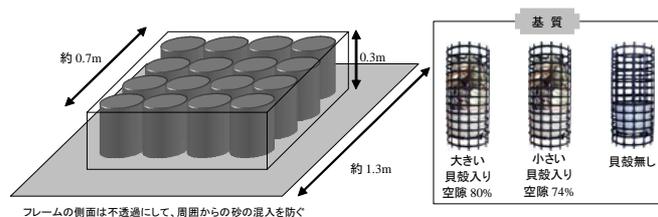


図 3 試験礁および基質イメージ

表 5 試験礁調査試験区分

試験区	原貝 空隙80%	破砕貝 空隙74%	貝なし
試験区A(入江地区)	○	○	○
試験区B(絵鞆地区)	○	○	○
試験区C(絵鞆地区)	○	○	—

表 6 分析項目

		分析項目
試験礁内	間隙水	DO
	堆積物	TOC、TON、粒度分布、土粒子の密度、COD、T-S、LL
	生物	種の同定、計数
試験礁直下	底質	粒度分布、土粒子の密度、COD、T-S、LL

回収した基質の箇所には予備の基質を装填し、元の形状を保つようにした。2月の撤去時には、いずれか一つの試験礁の直下から底泥を採取した。分析項目は表6に示す。また、試験礁の設置および回収には、調査地点の水温塩分の鉛直分布および透明度を記録するとともに、周辺状況の写真撮影およびビデオ撮影を行った。

② 周辺環境調査

試験礁の設置による周辺環境への影響の確認を目的として、水質・底質・底生生物の調査を実施した。また、試験区内の沈降物の状況を把握するためセジメントトラップ（日油技研社製 SMC7S-500）を用いて堆積物を採取した。分析項目は表7とする。

表7 周辺環境調査分析項目

	分析項目
水質	pH、DO、NH4-N、NO2-N、NO3-N、PO4-P、T-N、T-P、大腸菌群数
底質	粒度分布、土粒子の密度、COD、T-S、IL
生物	種の同定、計数
堆積物	粒度分布、土粒子の密度、TOC、TON

調査箇所は、試験礁の設置地点の近傍とし、調査は、試験礁設置時（5月）および試験礁調査のサンプル採取時（8月および2月）の合計3回とした。サンプルは、ダイバーにより、海底の直上水および底泥を採取した。底生生物は、採取した底泥を1mm目合いで篩い残った生物をサンプルとした。

また、水域の環境を把握するため、水温計（オンセット社製ストアウエイティドビッド）を設置し、5月～2月の連続観測を行った。

2. 3. 5 浄化能力の算定

(1) 試料の作成

原貝基質、破砕貝基質、試験礁周辺の浮泥を必要量採集し、試験用試料とした。採集した基質（原貝、破砕貝）を篩にかけ、貝殻、供雑物を取り除いた後、1mm目合の篩にかけ、生物試料と堆積物の二つの分画に分けた。試験礁周辺部の底質も1mm目合の篩にかけ、供雑物を取り除いた後、堆積物とし試験に用いた。

(2) 分析用試料の測定

(1)で得られた各分画の一部を分析用試料とし、他方を試験用試料とした。分析用試料を試験前のコントロールとした。分析用試料の生物試料については、ホルマリン固定し、全体の湿重量を測定するとともに、生物分析を行った。その後、全体の乾重量を測定した。分析用試料の堆積物については、湿重量、乾重量、有機炭素・窒素量を測定した（表8）。

(3) 試料の馴致

採集したヨコエビ群を、排泄物が確認されなくなるまで数日間馴致した。このとき、死亡個体や弱っている個体を取り除いた。

(4) 試験方法

1Lのビーカーに堆積物と(3)で馴致したヨコエビ群を入れた試験区、堆積物のみを添加した試験区を設定し、15℃に保ったインキュベーター内に5、10、15、20、25日間設置した。1条件につき、5ビーカーを用意した。表9に試験区を示す。

表8 分析用試料の測定項目

	分析項目
生物試料	生物分析、湿重量、乾重量
堆積物	湿重量、乾重量、TOC、TON

表9 試験区

試験期間 (日)	堆積物	堆積物+ ヨコエビ類
5	5	5
10	5	5
15	5	5
20	5	5
25	5	5

堆積物量は乾重量で約10gとし、ヨコエビ群は1ビーカーにつき、10個体程度とした。ろ過海水は5日ごとに約半量の交換を行い、曝気については、堆積物の分解を促進する恐れがあるので行わなかった。

試験後、ヨコエビ群の生存率、堆積物の湿重量および乾重量、有機炭素・窒素量の測定を行った（表10）。

表10 分析項目

	分析項目
生物試料	湿重量、乾重量
堆積物	湿重量、乾重量、TOC、TON

2. 4 覆砂材料として用いる場合の貝殻粒の移動機構に関する室内実験

粉砕した貝殻を覆砂材として用いる場合、波浪による洗掘を受け覆砂効果の持続に問題が生じる。覆砂効果を維持するために波浪による貝殻の移動特性を把握する必要がある。振動流水槽を用いて貝殻の移動特性に関する室内実験を行った。

実験に使用する試料は常呂産の貝殻を使用した。試験に使用する貝殻の粒径は、0～2 mm、2～20 mm、0～20 mm、53 mmの4タイプとした。

実験を行う前に予備的な試験を行った。振動流発生装置の観測部に厚さ5cm、幅60cm、奥行き30cmの範囲にホタテ貝殻を敷き詰めて周期5s、10sについて10～80cm/secの振動流を与えた。

その結果から流速は、40、50、60、70 cm/secの4種類とした。

3. 調査結果

3. 1 道内における水産廃棄物の種類や算出量、処分および利用に関する実態

北海道内で発生する水産廃棄物については、北海道水産林務部が市町村を通じて発生量を調査しており、以下にその内容を述べる。

平成9～13年度の種別別の発生状況を見ると（図4）、全体ではやや増加傾向であり、種別別構成比の年変動は小さい。多く発生している廃棄物は、貝殻と魚類残さで、この2種類で全体の8割を占めている。次いで付着物、ヒトデ、イカゴロの順となっている。廃棄物の発生状況を地域別にみると（図5）、網走支庁で最も多く、次いで渡島支庁、宗谷支庁の順となっている。

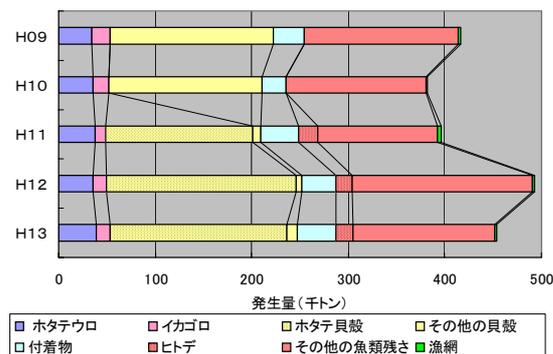


図4 種別別発生量の推移

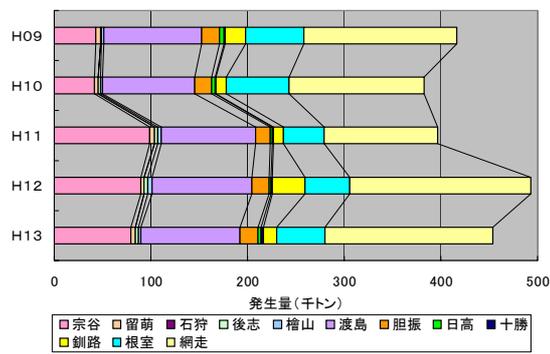


図5 支庁別発生量の推移

資料：北海道水産林務部資料より作成

注) 平成9～10年度は、ホタテ貝殻を他の貝殻と区別せず、ヒトデも他の残さと区別せずに集計している。

北海道の水産廃棄物の排出量は、全国の約半数を占めている。この要因として水産物の生産量が多いことが第一に挙げられる。また、本州等に比べ生産地から消費地への距離が離れていることから、鮮魚ではなく加工品としての出荷の割合が高く、水産加工場からの残さの排出が多くなりやすいことも要因として挙げられる。さらに、本州等に比べ漁業形態が一種多獲的であるため、同じ水産物の廃棄物が大量にかつ同時期に排出されるという特徴を持っており、これが処理の推進を困難にし、多くの種類の廃棄物に共通してみられる課題となっている。

貝殻を大量に有効利用する決定的な方法・分野がないため、保管するしか手立てがなく年々堆積しつつある現状となっている。有効利用の取組みが進んでいるとされる青森県でも、個別に有効利用の取組みを進めているが、道内各地域と同様に量がはげず、抜本的な解決には結びついていないのが現状であった。

北海道で排出される貝殻廃棄物の特徴と課題については、以下のようにまとめられる。

- ① 道内で最も多く発生している水産廃棄物であり全体の 42.7%（ホタテ貝殻とその他の貝殻）を占め、年間約 20 万トン発生。
- ② 処分場が逼迫しているなか、現状では年間約 20 万トンという大量の貝殻を処理、有効利用する決定的な方法は無く、関係者、行政ともに対策に苦慮している。
- ③ リサイクル率が統計では 56.1%（H13 年度）となっているが、再生利用及び再利用のために保管している実態が多く、実情としてはこの数字よりもリサイクル率は低いと思われる。
- ④ 保管のままにしておいても環境上特に問題が起こり難く、低い処理意識が対策を遅らせ、保管の量が増加しやすい傾向にある。
- ⑤ 有効利用としては、専ら畑作地域での農業暗渠排水路の材料とカキ種苗生産用の資材であり、一部道路資材（凍上抑制、石灰石代替品）とする有効利用の取組みもみられるが、排出量が膨大なため有効利用は一部にとどまっている。
- ⑥ 特に、道南地域では埋立の割合が高く今後の処理対策が急務であり、道北オホーツク地域では有効利用が進まず排出量の約 70%が保管の状態となっている。

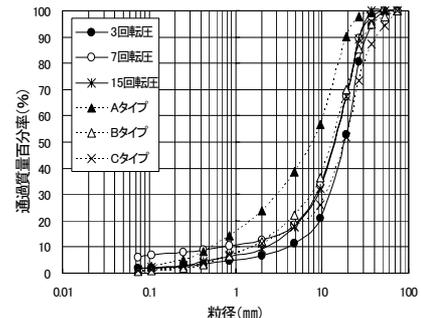


図 6 粒度分布

3. 3 ケーソン中詰材料としての適用に関する検討

3. 3. 1 粒度分布

平成 12 年に函館¹⁾で実施したサンドドレーン材としてホタテ貝殻を破碎して利用したときの貝殻の粒度試験結果と今回の試験結果を図 6 に示す。

函館の破碎試験は 15t 級のブルドーザーで繰り返し走行（敷設厚 20 cm、往復 3～15 回転圧）により貝殻を破碎したものである。函館の試験結果より、転圧回数を増やしても、粒度はそれほど変化していないといえる。貝殻はある程度粉碎された後は、転圧を繰り返しても破碎が進行しないためである。B、C タイプはブルドーザーで転圧した試料と粒度分布が同程度であるが、A タイプについては粒度が細かい。これは、ブルドーザーが貝殻を転圧するときの敷設圧が 20 cm のため力が分散したためと考えられる。ハンドローラーはブルドーザーに比べて重量が軽いので敷設厚を 10 cm と薄くしたため力が伝わりやすく、転圧回数を増やすことにより、貝殻が破碎されやすくなったと考えられる。

3. 3. 2 単位容積質量試験結果

単位容積質量、間隙率の試験結果を表 11 に示す。貝殻は破碎程度に関わらず、砂に比べて単位容積質量が小さかった。容積に占める間隙率も砂に比べて高い結果となった。これは、貝殻は皿状で湾曲しており、形状が偏平しているため間隙が大きく、単位容積質量が小さくなったものと考えられる。

表 11 単位容積質量と間隙率

	単位体積質量 g/cm ³	間隙率 %
砂	2.08	36.8
ホタテAタイプ	1.53	64.6
ホタテBタイプ	1.43	71.8
ホタテCタイプ	1.34	77.7

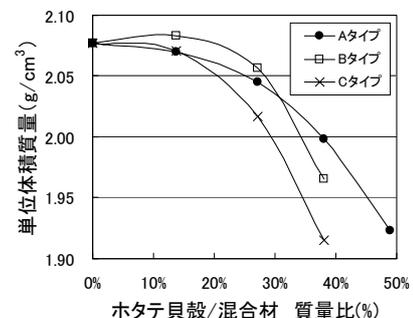


図 7 小型容器試験結果

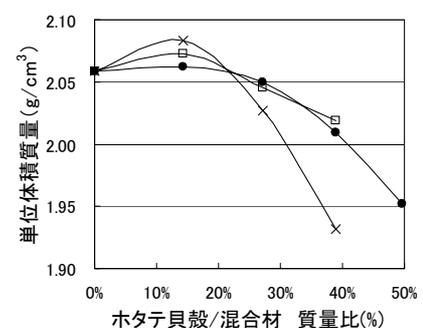


図 8 大型容器試験結果

小型容器試験結果を図7、大型容器試験結果を図8に示す。図7、8の縦軸には単位体積質量を、横軸にはホタテ貝殻が混合材に占める質量比(%)を示す。図7、8より、貝殻の質量比が14%程度であれば、単位体積質量は砂のみの場合と同程度であり、粉碎の程度による差はみられなかった。中詰材に占める貝殻の質量比が大きくなるほど単位体積質量が小さくなる傾向にあった。また、粉碎の程度に着目してみると、Cタイプ(粗い)の単位体積質量が小さかった。これは、貝殻だけで骨格を形成しその間隙に砂が十分に回り込むことがなかったため単位体積質量が小さくなったと考えられる。そのため、貝殻の質量比が増えるほど単位体積質量の減少が顕著に現れたと考えられる。

図9にAタイプにおける容器の違いによる単位体積質量を示す。小型容器と大型容器では貝殻の質量比が小さい14%、27%まではほとんど差がなかった。40%以上になると1m³容器のほうが若干大きくなる傾向がみられた。これは、容器が大きくなると端部による影響が小さくなるためと推察される。B、Cタイプにおいても同様であった。ケーシングを用いた現地再現試験は、他の容器に比べて単位体積質量が小さかった。これは、沈降距離が長いこと水中での分級が促進されたと考えられる。

そこで、ホタテ貝殻と砂粒子(中央粒径D50=0.5mm)の沈降速度を計算した結果を表12に示す。沈降速度は、貝殻に働く重力と水による抵抗が釣り合うときの速度を計算した²⁾。計算時のホタテ貝殻の厚さは、実測値により決めた。貝殻は実測値1~5mm程度で、蝶番部分が厚く先端に行くほど薄くなっていた。最頻値は厚さt=2.0mm程度であったので、この値をもとにして計算を行った。計算を簡略化するため、ホタテ貝殻を円板として、砂粒子は単粒子として計算した。速度のちがいをみると、ホタテ貝殻の速度は砂にくらべて5.5倍程速く距離が長くなるほど分離しやすい。

写真1は現地再現試験における容器内の混合材の断面を撮影したものである。写真からもわかるように上層については沈降距離も短く材料はそれほど分離していない。しかし、中層・下層については、沈降距離も長くなるので材料は分離し貝殻の割合が多い層と貝殻の割合が少ない層とに分かれていることが確認された。

3. 3. 4 ケーソン構造物による現地試験

表13に実証試験結果を示す。砂原漁港で採取される砂の密度は2.72g/cm³で、貝殻の密度は2.23g/cm³であった。室内試験で用いた試料より、砂は重く貝殻は軽かった。室内試験で使用した砂と違い礫が10%程度で混じった礫混じり砂であった。貝殻の破碎程度も室内試験(中央粒径7.4mm~18.1mm)と同程度(中央粒径9.6~15mm)であった。今回の実証試験では、断面が決まってお中詰

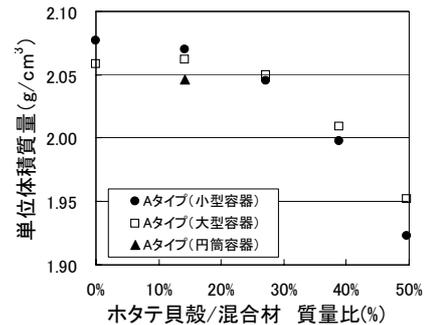


図9 容器別試験結果

表12 沈降速度計算結果

		沈降速度(cm/s)
砂	D10	3.0
	D50	7.1
	D90	37.7
ホタテ貝殻	t=1mm	27.2
	t=2mm	39.0
	t=5mm	60.9



(a) 上層(0~0.5m)



(b) 中層(1.8~2.2m)



(c) 下層(3.6~4.0m)

写真1 Bタイプ(質量比14%)断面図

材の単位容積重量を変更できないので、ケーソンマスの容積に対して10%（中詰材重量の14%程度）のケースを実施した。よって室内試験と単純な比較は出来ないが、容積に対して10%の混合であれば、砂のみを中詰材としたときと同程度の単位容積重量が得られた。

3. 4 ホタテ貝殻礁を用いた環境改善方策の検討

3. 4. 1 貝殻による環境影響の把握

(1) 残存有機物の溶出物質量の把握

試験結果を表14に示す。CODの値で、ボイル有ではボイル無の値の5割以下である。堆積年数の違いでは、CのCODは堆積時間が長い程減少傾向であったが、AのCODは、堆積時間が長いA2年が高かった。原因は、保管状況に起因すると推察される。堆積された貝殻群の内部では降雨によって付着有機物が流れ落ち下部に集積され、COD等が高くなったと考えられる。

(2) 長期的な水質変化の把握

海水中での溶出試験結果のうちCOD、T-Nの経時変化を図10に示す。CODは、28日目(ボイル有は42日目)をピークに減少した。有機物が分解されたものと推察される。T-Nについては、ボイル有が28日目をピークに減少したが、A直後・ボイル無は時間の経過とともに増加した。また、形態別溶出試験と同様、ボイル無に比べてボイル有の試料は、溶出量の変化がゆるやかであった。

以上から、海水中に溶出する有機物は周辺へ拡散するため、低濃度になると予測されるが、海域への有機物負荷を軽減するためには、加熱などの処理が施された貝殻を利用するべきである。

3. 4. 2 試験礁による現地調査

(1) 平成15年度調査結果

水質調査結果(表15)から、追直漁港、室蘭港、苫小牧西港の水質に大きな違いはなく、水質汚濁も認められなかった。底質調査結果(表16)から、追直、室蘭では泥分含有率が高く、細砂分の多い苫小牧に比べて密度は低かった。苫小牧ではCOD、T-S、I.L.が追直、室蘭に比べて低かった。水産用水基準で評価すると、CODは追直と室蘭において基準値(20mg/g乾泥)以上であり、全硫化物については、各港とも基準値(0.2mg/g乾泥)を超えていることから、底質の汚濁が進行していると考えられる。底生生物は、追直漁港で20種、室蘭港で31種、苫小牧港で30種出現した。個体数は、追直で節足動物が多く(88%)、密度は2,961(個体/m²)であった。苫小牧では環形動物が多く(88%)、密度は1,186(個体/m²)。優占種は、追直でコノハエビ、室蘭でシズクガイ、

表13 実証試験結果

	単位容積重量(kg/L)
砂(小型容器)	1.98
混合材(小型容器)	1.98
円筒形容器	1.95

表14 形態別溶出試験結果

	pH	BOD mg/l	COD mg/l	T-N mg/l	T-P mg/l	Cl mg/l	TOC mg/l
機械	A 直後	9.7	29.0	12.0	2.0	21.0	10.0
	A 1年	9.8	2.0	12.0	4.9	1.1	8.6
	A 2年	9.5	7.9	38.0	13.0	2.9	1.3
ボイル有	B H15	9.4	6.8	16.0	9.1	1.1	<0.1
	B *	9.6	6.8	32.0	10.0	2.9	0.2
ボイル無	C H15	8.3	31.0	42.0	26.0	2.5	18.0
	C H14	9.7	1.0	17.0	5.4	2.4	6.4
	C H13	9.7	0.8	9.8	2.6	1.2	1.0

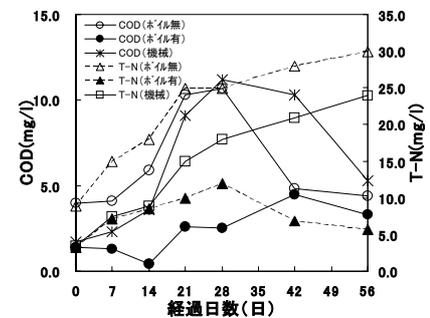


図10 COD・T-Nの経時変化

表15 水質調査結果

分析項目	追直漁港	室蘭	苫小牧
pH	8.2	8.1	8.1
DO mg/l	8.0	6.9	6.8
COD mg/l	1.7	2.8	2.6
NH ₄ -N mg/l	0.018	0.023	0.022
NO ₂ -N mg/l	<0.003	<0.003	<0.003
NO ₃ -N mg/l	0.009	0.024	0.016
T-N mg/l	0.13	0.19	0.16
T-P mg/l	0.023	0.029	0.048
PO ₄ -P mg/l	0.014	0.020	0.035

表16 底質調査結果

分析項目	追直漁港	室蘭港	苫小牧港
COD mg/g(乾泥)	22.0	20.0	16.0
T-S mg/g(乾泥)	1.1	0.8	0.6
I.L. %	6.8	9.9	3.8
密度 g/cm ³	2.53	2.51	2.67
泥分含有率 %	77.4	69.1	28.1
TOC mg/g(乾泥)	13.0	25.0	8.1
TON mg/g(乾泥)	0.06	3.10	1.00

表17 堆積物の分析結果

	乾重量 g-dw/m ²	有機態炭素 mg-C/g-dw	有機態窒素 mg-N/g-dw
追直漁港	ホルマリン無	3,892	61
	ホルマリン有	3,219	70
室蘭港	ホルマリン無	1,567	39
	ホルマリン有	1,169	50
苫小牧港	ホルマリン無	2,880	53
	ホルマリン有	3,714	50

苦小牧でミズヒキゴカイの1種であった。追直、室蘭港の優占種は汚濁指標種で、出現生物からも底質が汚濁傾向にあるといえる。

堆積物調査結果(表 17)から、各港とも有機物量の差、ホルマリン混入の有無による堆積物量の差はみられなかった。ホルマリンを混入したセジメントトラップ試料の外観は茶褐色であったのに対し、未混入の試料の外観は黒色で腐敗臭を呈した。

直上水の水質は、全項目とも追直漁港の試験礁設置時の水質と同程度であった。11月に回収した試験礁内には48種、1月に回収した試験礁内には62種の生物が出現した。11月、1月とも個体数は節足動物が多く(約90%)、出現密度は11月10,389(個体/m²)1月21,467(個体/m²)であった。追直の底生生物で優先種であったコノハエビ(汚濁指標種)の出現密度は小さかった。また、試験礁設置前の現況調査での底生生物の出現密度に比べて1桁多かった(図 11)。試験礁設置期間は短期間であることから、出現種は再生産されたものではなく蟻集したものと考えられる。堆積物調査結果(表 18)から、試験礁内の堆積物量はトラップ内の堆積物量の約2倍であったが、TOCおよびTONはセジメントトラップより少量であった。堆積物が多いのは砂など無機物質を多量に含んでいるためである。2回の試験では、試験礁内で有機物分解が促進されたのか判断し難いが、試験礁内の堆積物は有機物含有量が少なく、腐敗臭もなく、外観も茶緑色を呈していたことから汚濁が認められないといえる。

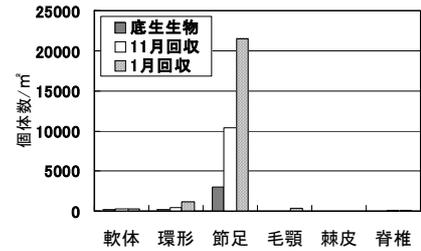


図 11 底生生物と試験礁生物

表 18 堆積物調査結果

	乾重量 g-dw/m ²	有機態炭素 mg-C/g-dw	有機態窒素 mg-N/g-dw
11月	8,215	23	2.6
1月	8,977	24	4.0

(2) 平成16年度調査結果

水質・底質の分析結果を表 19 にそれぞれ示す。両地区とも水質に顕著な汚濁はみられないが、底質は汚濁傾向がうかがえる。特に絵鞆地区でその傾向が強い。これは、当該地区でホタテ貝の蓄養などの漁業活動が行われていることに関係していると考えられる。

捕集された沈降粒子は、入江地区では30~45 g-dry/month、絵鞆地区は19~40 g-dry/monthであった。8月(7/23~8/22)の有機炭素および窒素

表 19 水質・底質結果

	入江地区			絵鞆地区		
	04.5.24	04.8.25	05.2.1	04.5.24	04.8.25	05.2.1
水素イオン濃度(pH)	8.2	8.0	8.0	8.1	8.1	8.0
溶存酸素(DO) mg/L	10.5	6.7	10.4	9.5	7.4	10.3
化学的酸素要求量(COD) mg/L	2.5	2.2	3.7	3.7	2.5	1.6
全窒素 mg/L	0.26	0.26	0.54	0.36	0.30	0.38
アンモニア態窒素 mg/L	0.031	0.090	0.15	0.078	0.044	0.055
亜硝酸態窒素 mg/L	0.003	0.007	0.013	0.006	<0.003	0.008
硝酸態窒素 mg/L	0.034	0.041	0.15	0.032	0.016	0.15
全リン mg/L	0.023	0.048	0.079	0.078	0.037	0.049
リン酸態リン mg/L	0.004	0.035	0.035	0.078	0.014	0.031
大腸菌群数 MPN/100ml	0	7.8	4.5	0	0	0
化学的酸素要求量(COD) mg/g乾泥	4.7	6.9	8.2	5.3	18.0	21.0
全硫化物(T-S) mg/g乾泥	0.24	0.41	0.44	0.83	2.1	2.4
強熱減量(I.L.) %	6.8	7.4	7.3	4.6	13.3	15.3
密度 g/cm ³	2.42	2.37	2.33	2.64	2.44	2.55
中央粒径 mm	0.034	0.057	0.047	0.27	0.058	0.062

の flux を比較すると、入江地区は 3,005mg-C/m²/day、485mg-N/m²/day、絵鞆地区は 6,402mg-C/m²/day、914mg-N/m²/day であった。沈降粒子中の有機物は、絵鞆地区が入江地区の約2倍であり、これが底質悪化の一つの要因といえよう。

ベントスおよび試験礁に蟻集した生物の分析結果(湿重量、個体数)を図 12 に示す。貝殻を導入した試験区は、貝なしやベントスに比べ生物量(湿重量)の増加が確認された。出現種のほとんどがデトリタス食性の生物であった。特に8月の絵鞆地区では原貝区の生物の湿重量が貝なし区の18倍となった。これは、ほぼ平面的に泥が堆積していた海底に、貝殻が設置されたことで、立体的かつ大小様々な空間が提供され、多くの生物にとって良好な生息場が創出された結果といえる。また、生物種の構成から、試験礁(貝殻区)では

ベントスと比較して節足動物の個体数の割合が大きかった。なお、原貝で湿重量が増えた要因は、破砕貝よりも創出された空隙が大きいため、アズマニシキガイ (*Chlamys farreii*) などの生物が蟄集したためである。11月に個体数が増加した要因は、試験礁内に泥が溜まりはじめ、底生性の環形動物（スピオ科の一種 (*Capitella* sp.)、イトゴカイ科の一種 (*Capiterra* sp.)) や節足動物（ニホントロソコエビ (*Grandidierella japonica*)) が増加したためである。

3. 4. 3 浄化能力の算定

試験期間中 (25 日) には、供試した生物は一個体も斃死しなかった。ヨコエビ群添加試験区、対照試験区 (ヨコエビ群添加無) とともに、日数の経過に伴い、有機炭素および窒素量が減少する傾向がみられ、特にヨコエビ群添加試験区ではその傾向が顕著であった。

今回の試験結果より、ヨコエビ等の節足動物群集による堆積物中の炭素および窒素の分解能力を求める。分解能力の単位は、生物量 (乾重量) 当り、1 日あたりに分解する炭素および窒素の量である。今回の試験で得られたデータを表 20 に示す。

本来なら、実験前にビーカーに添加した堆積物の乾重量と炭素 (窒素) 含有量を乗じて得られた総炭素 (総窒素) 量を求めておき、そこから実験終了後の総炭素 (総窒素) を算定し、実験前後の総炭素 (総窒素) の差分から浄化能力を求める必要がある (式 1)。
 分解された炭素の量 = 実験開始前の総炭素 - 実験終了後の総炭素 (1)

実験開始前の総炭素 = 開始前の乾重量 (g-乾泥) × 開始前の炭素含有量 (mg-C/g 乾泥) (2)

実験終了後の総炭素 = 終了後の乾重量 (g-乾泥) × 終了後の炭素含有量 (mg-C/g 乾泥) (3)

しかしながら、ビーカーに添加する堆積物の乾重量を求めるためには、添加する前に絶乾しなくてはならない。サンプルを絶乾することは、サンプルの性状に変異を来し、現地の状態とは著しくかけ離れたものにしてしまう可能性があり、実験目的 (海底に降り積もった堆積物の生物による分解) を勘案すると、この操作は行うべきではない。

したがって、乾重量を正確に測定する代わりに、炭素含有量 (または窒素含有量) をできるだけ正確に測定することで測定誤差の縮小に努めた。

浄化能力は、実験開始前および実験終了後の炭素 (窒素) の量の差、実験期間および生物の乾重量から以下のように算定した (式 4~6)。なお、式 4~6 について、窒素の浄化能力を求める場合には、炭素を窒素に、C を N にそれぞれ読み替える。

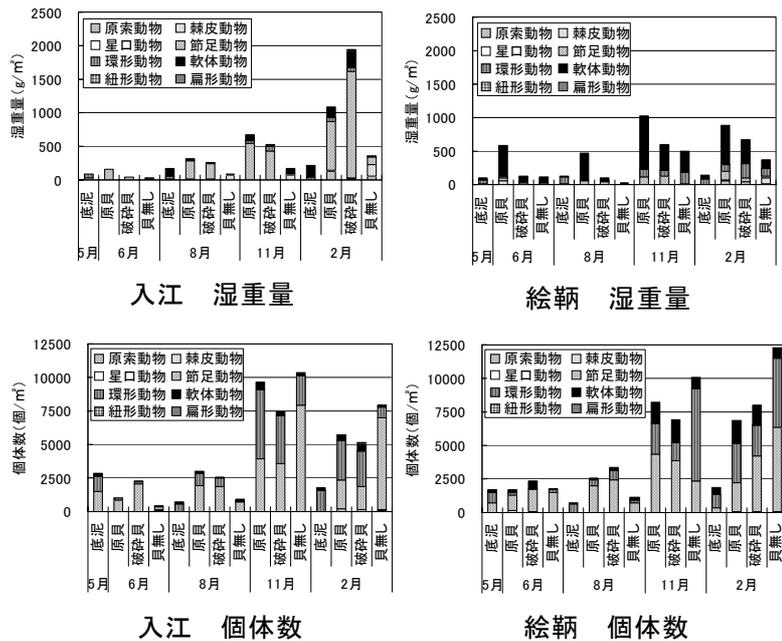


図 12 堆積物調査結果

表 20 試験で得られたデータ

区分	項目	単位	記号
試験前の堆積物 (餌)	炭素含有量	mg-C/g 乾泥	bc
	窒素含有量	mg-N/g 乾泥	bn
	乾重量	g	d
試験後の堆積物 (餌)	炭素含有量	mg-C/g 乾泥	ac
	窒素含有量	mg-N/g 乾泥	an
生物	乾重量	g	M
実験期間 25 日		day	P

生物による炭素浄化能力 (mg-C/g-生物(dry)/day)

= 生物による炭素浄化量 ÷ 生物量 ÷ 実験期間 (4)

生物による炭素浄化量

= 実験前後の炭素量の差 (生物あり) - 実験前後の炭素量の差 (生物なし) (5)

実験前後の炭素量の差

= {開始前の炭素含有量 - 終了後炭素含有量} × 堆積物の乾重量 (6)

- ・ 実験前後の炭素 (窒素) 量の差の算定

実験開始前および実験終了後の炭素 (窒素) の量は、実験前後の炭素 (窒素) 含有量の差に、実験終了後の堆積物の乾重量の平均値を乗じて求めた。(ここで、堆積物の乾重量の平均値を用いたのは、ビーカー毎の堆積物の添加量の微妙な差によるデータのバラツキを抑制するためである。)

すなわち式、6より $(bc - ac) \times d$ および $(bn - an) \times d$ で表すことができる。

- ・ 生物による炭素 (窒素) 浄化量の算定

生物による炭素 (窒素) 浄化量は、生物を入れた試験区の炭素(窒素)量の差から対象区のそれを減ずることによって求めた。

すなわち、式 5より $(bc_1 - ac_1) \times d - (bc_0 - ac_0) \times d$ で表すことができる。

- ・ 生物による炭素 (窒素) 浄化能力の算定

生物による炭素 (窒素) 浄化能力は、(2) で求めた浄化量を、生物量および実験期間 (日数) で除すことにより求めた。

すなわち、式 4より $\{(bc_1 - ac_1) \times d - (bc_0 - ac_0) \times d\} \div M \div P$ で表すことができる。ここで、ac および bc の添字は、生物あり (=1) と対象区 (=0) を示している。

以上により、分析結果から浄化能力を算定した。結果は下表のとおりである。なお、算定過程および算定結果の詳細は表 21 のとおりである。

表 21 生物群 1g あたりの浄化能力

	有機態炭素 mg/g(生物)/day	有機態窒素 mg/g(生物)/day
5日目	24.041	7.457
10日目	-9.77	-4.68
15日目	-8.82	-4.79
20日目	17.576	0.178
25日目	21.142	0.385

3. 5 覆砂材料として用いる場合の貝殻粒の移動機構に関する室内実験

実験結果のまとめとして以下のことが確認できた。

- ・ 貝殻粒径については、粒径が大きいものほど耐波効果がある。
- ・ 粒径、0~2 mmのホタテ貝殻は流速 40 cm/sec 前後で動き出す。
- ・ 粒径、2~20 mmのホタテ貝殻は流速 50 cm/sec 前後で動き出す。
- ・ 波数に比例して移動量 (変化量) は大きくなる。
- ・ 流速が早くなるほど移動が促進される。
- ・ 短周期の方が長周期より移動されるところ、中央観測部の移動を注視したためこの関係は証明出来なかった。

4. 考察

4. 1 ケーソン中詰材として利用する場合

試験結果より、質量比が14%程度（容積に対する比率10%に当たる）までであれば単位体積質量が砂と同程度であったので、その分貝殻をケーソン中詰として使用されたときに試算した。

平成11年度の北海道開発局工事記録より、ケーソン中詰砂の全量（港湾および第3、4種漁港）は約30万 m^3 であったことから、そのうち10%をホタテ貝殻に置き換えられれば、3万 m^3 の処理が可能となる。ホタテの密度を $2.5 t/m^3$ とすると質量は7.5万 t となり、処理しきれずに埋立せざるを得ない貝殻を有効利用できる。実際に利用する場合、加工業者と費用負担等の協議が必要になるものと考えられる。

また、ホタテ貝殻の混合率を多くしていくと、中詰材の単位体積質量が小さくなることを確認できた。この特徴を利用して、地盤が比較的軟弱な条件での重力式防波堤を例に検討を行った。表22および図13に示す条件で行った。中詰材については、試験は行っていないが普通砂 $\rho = 2.0t/m^3$ 、ホタテ混合砂 $\rho = 1.9t/m^3$ （質量比40~50%程度）、ホタテ混合砂 $\rho = 1.8t/m^3$ で行った。検討結果を表23に示す。今回設定したケースの場合、中詰が砂だと滑動で決定する堤体幅17.5mであったが、円弧すべりが所定の安全率に達するには堤体幅が20.5m必要であった。ホタテ混合砂の堤体幅は滑動により $\rho = 1.9t/m^3$ のとき18.8m、 $\rho = 1.8t/m^3$ のとき20.3mとなり、その堤体幅で円弧すべりが所定の安全率を確保できた。このように特殊な条件ではあるが、ホタテ貝殻を混合したほうが、堤体幅を小さくするのに有効であることの方策の一つとして考えられる。

4. 2 環境改良材として利用する場合

浄化能力実験において得られた浄化能力（原単位）を用いて、実際の海域における生物による沈降体積粒子の浄化効果について検討した。検討にあたっては、浄化能力実験において最長の実験期間（25日）で得られた浄化能力を原単位として用いた。

試算は、浄化能力で得られた原単位に、試験礁調査で得られた生物の蝸集量に乗じた単位面積あたりの浄化量とセジメントトラップ調査によって得られた沈降粒子のフラックス量とを比較することで行った（式1~2）。なお、浄化能力実験では、ヨコエビ類を中心とした節足動物を用いたことから、試験礁に蝸集した生物量は節足動物のみを対象とした。

浄化率 = 生物群による浄化量 ÷ 沈降粒子のフラックス量 (1)

生物群による浄化量 = 試験礁に蝸集した生物量 × 浄化能力原単位 (2)

試算の結果表24のとおりである。この結果、11月分までについてみると、炭素フラックスに対して最大で56.8%、窒素フラックスに対して最大で18.2%を生物（節足動物）が分解できるものと見込まれる（いずれも入江地区の11月原貝）。

表 22 設計条件

	Hmax(m)	H1/3(m)	T(s)	L(m)	$\beta(^{\circ})$
H.W.L	11.7	7.2	13.0	131.7	19.5
L.W.L	11.1	7.3	13.0	123.6	19.5

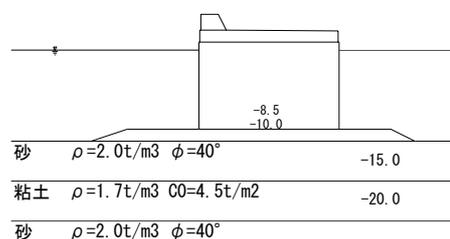


図 13 検討断面

表 23 検討結果

	普通砂 $\rho = 2.0t/m^3$		ホタテ混合 $\rho = 1.9t/m^3$	ホタテ混合 $\rho = 1.8t/m^3$
	B=17.5m	B=20.5m	B=18.8m	B=20.3m
$F_s \geq 1.2$	1.205	1.396	1.208	1.210
$F_o \geq 1.2$	2.405	3.242	2.570	2.757
円弧すべり $F \geq 1.2$	1.130	1.213	1.212	1.298
偏心傾斜荷重 $F \geq 1.0$	1.612	2.034	2.054	2.126

表 24 浄化率試算結果

		入江		絵鞆	
		炭素(%)	窒素(%)	炭素(%)	窒素(%)
6月	原貝	13.5	4.3	2.1	0.5
	破碎貝	3.2	1.0	1.6	0.4
	貝なし	0.1	0.0	0.3	0.1
8月	原貝	29.6	9.9	3.8	0.9
	破碎貝	24.5	8.2	2.8	0.6
	貝なし	2.5	0.2	0.4	0.1
11月	原貝	56.8	18.2	16.4	3.0
	破碎貝	45.6	14.6	19.0	3.5
	貝なし	2.5	0.8	2.5	0.5

以上より、海域で適用する場合、貝殻による間隙を多くし、できるだけ多くの種が棲み場として利用できる空間を設けることが必要である。

5. 摘要

5. 1 ケーソン中詰材としての貝殻の活用

今回の調査結果を以下にまとめる。

- (1) 室内試験において、ホタテ貝殻の質量比 14%程度までであれば、貝殻の粉碎程度に関わらず、砂のみの単位体積質量とほぼ同程度の値であった。
- (2) 室内試験において、質量比を高くすると、粉碎程度が粗いものほど単位体積質量は小さくなった。
- (3) 実証試験と室内試験について単純な比較は出来ないが、容積に対して 10%の混合で、砂のみを中詰材としたときと同程度の単位容積重量が得られた。

今回の実証試験では、防波堤の断面が決まっており単位体積重量を設計の値と同等のものでなければならないことから、砂と貝殻を混合する方向でのみ試験した。砂と貝殻を混合する場合、施工する場合手間がかかり、材料を管理する場合、品質にバラツキを小さくするのが今後の課題である。

しかし、単位体積重量が小さくなくても構わない条件であれば、砂と貝殻を混合する必要はなく、ケーソンマス単位で貝殻を投入すれば施工する上でも、材料管理する上でも簡単となる。今後は、貝殻の有効活用を視野に入れて、計画することが必要である。特に断面の検討時に貝殻廃棄量から中詰材の単位容積重量を決定することも必要である。

5. 2 環境改良材としての貝殻の活用

今回の調査結果を以下にまとめる。

- (1) 試験礁の調査結果から貝殻の間隙に生物が蟻集することが確認できた。また、原貝（破砕なし）の試験礁は破砕貝の試験礁に比べて個体数・生物量・種が多い傾向にあった。これは間隙が多いほど、大小様々な空間が提供されるからである。
- (2) 試験礁において優占種であった、ヨコエビ群を用いて 1 g 当たりの浄化能力を算定したところ、有機炭素 21.142mg/g-生物/day、有機窒素 0.385 mg/g-生物/day であった。
- (3) 海域の沈降粒子フラックスの実測値を用いて浄化率を試算したところ、炭素フラックスに対して最大で 56.8%、窒素フラックスに対して最大で 18.2%を生物（節足動物）が分解できるものと見込まれる。

今回の試験でおおよそではあるが貝殻に集まる生物の浄化能力を算定し、海域での浄化率を試算した。貝殻礁の厚さを 30 cmにして試験してきたが、生物の棲み場としてどの程度の厚さが適しているのか調査する必要がある。また、実際の海域で活用する場合、施工方法、経済的な断面などを含めた検討が必要である。

6. 引用文献

- 1) 函館港湾建設事務所, ホタテ貝殻走行試験報告書, 平成 12 年 10 月
- 2) 水理公式集, 平成 11 年版, p386-387