

かき殻を活用した
漁場環境改善ガイドライン

令和8年2月

広島県

目 次

1. ガイドラインの役割.....	1
1-1 目的	1
1-2 ガイドラインの構成と内容.....	1
1-3 計画フロー	2
(1) 増殖場造成計画.....	2
(2) 底質改善計画.....	3
2. かき殻の発生・活用状況と法令上の位置づけ.....	4
2-1 全国のかき殻の発生量とその利用状況.....	4
(1) かき殻の発生量.....	4
(2) かき殻の海域における利用事例.....	5
2-2 法令上の位置づけ.....	9
(1) 廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和 45 年法律第 137 号）	9
(2) 行政処分の指針について（通知）（令和 3 年 4 月 14 日環循規発第 2104141 号）	9
(3) 海洋汚染防止法等及び海上災害の防止に関する法律(昭和 45 年法律第 136 号)	10
(4) 広島海の管理に関する条例（平成 3 年 3 月 14 日、広島県条例第 7 号） .	10
(5) 干潟等の造成の許可に関する取扱い（平成 28 年 3 月 16 日制定、広島県土木建 築局長、環境県民局長、農林水産局長）	10
(6) かき殻及びかき洗浄残渣等の処理要領（昭和 55 年 10 月 1 日制定、広島県農林 水産局長・土木建築局長・環境県民局長）	11
(7) 干潟造成に当たっての留意点（昭和 59 年 6 月制定、広島県農政部水産漁港課）	12
3. かき殻の性状について.....	13
3-1 形状	13
3-2 構造	13
3-3 化学的特性	14
3-4 物理的特性	16
(1) かき殻の土粒子密度.....	17
(2) かき殻の粒度分布.....	17
(3) かき殻の重量.....	18
(4) かき殻のせん断抵抗角.....	18
(5) その他の物理的特性.....	19
(6) 土質試験結果一覧.....	20
4. かき殻利用によって想定される漁場整備について.....	22

4-1 総論（海域分類の定義及びかき殻の品質管理基準）	22
4-2 海域分類ごとに考えられる増殖場造成	24
(1) 潮間帯(干潟)から極浅海域での整備	24
(2) 沖合浅場海域での整備	26
(3) 沖合深場海域での整備	28
4-3 海域分類ごとに考えられる底質改善	30
(1) 海域分類の考え方	30
(2) 底質改善手法の考え方	34
(3) 課題と問題点	34
(4) 対象とする海域条件	34
4-4 安定性について	36
(1) 評価の方針	36
(2) 安定性の評価	38
5. 費用対効果	42
5-1 漁港・漁場関係事業	42
(1) 周辺水域の高度利用と水産物の安定供給への貢献	42
(2) 快適で活力ある漁港漁村の形成への貢献	43
(3) ふれあい漁港空間の形成への貢献	43
(4) 美しい海辺空間の保全と創造への貢献	43
5-2 漁村関係事業	44
(1) 快適で活力ある漁港漁村の形成への貢献	44
(2) 美しい海辺空間の保全と創造への貢献	44
(3) 周辺水域の高度利用と水産物の安定供給への貢献	44
5-3 水産物の生産性向上	45
(1) 水産物生産コストの削減効果	45
(2) 漁獲可能資源の維持・培養効果	45
5-4 漁業就業環境の向上	45
漁業就業者の労働環境改善効果	45
5-5 地域産業の活性	46
漁業外産業への効果	46
5-6 自然保全・文化の継承	46
自然環境保全・修復効果	46
6. 海域に応じた計画・設計、施工方法、維持管理	47
6-1 増殖場造成	47
(1) 事前準備	48
(2) 設計条件の調査・整理	48
(3) 使用するかき殻	48

(4) 投入量	48
(5) 施工方法	48
(6) 増殖場造成効果の確認方法.....	50
(7) 留意点	50
6-2 底質改善	54
(1) 事前準備	55
(2) 既存資料調査・整理.....	55
(3) 使用するかき殻.....	55
(4) 投入量	55
(5) 施工方法	55
(6) 底質改善効果の確認方法（実施効果を確認する場合）	59
7. 課題の抽出及び対応策の検討.....	68
7-1 増殖場造成について.....	68
7-2 底質改善について.....	68
参考資料 1.....	69
参考資料 2.....	71
参考資料 3.....	73

1. ガイドラインの役割

1-1 目的

かき養殖業が盛んな広島県では、かきのむき身加工においてかき殻が大量に発生している。これまでかき殻は、農業用の肥料や養鶏用の飼料として有効利用されていたが、近年、農業用資材の価格高騰や鳥インフルエンザの発生により、かき殻の利用量が減少傾向にある。

本県のかき養殖業にとって、かき殻対策は喫緊の課題となっており、かき殻の積極的な再利用や新たな用途の拡大を推進していく必要がある。

そこで、かき殻の新たな用途拡大として、かき殻を活用した増殖場造成や底質改善等の漁場環境改善の素材としての利活用を目指すものである。

本ガイドラインは、漁業協同組合、漁業協同組合連合会、地方公共団体または国がかき殻を増殖場造成や底質改善等の漁場環境改善の素材として活用するにあたり、必要な事項などを定めたものである。

なお、本ガイドラインにおける増殖場とは、海域及びこれに接続する陸地において有用水産生物の発生及び成育に適した環境を整備するために行う着定基質（保護育成礁）を指し、底質改善とは、海底に堆積した有機物や硫化物によって悪化した底質環境を生物が生息しやすい状態に戻すことを指す。

1-2 ガイドラインの構成と内容

本ガイドラインは、かき殻の法令上の位置づけやかき殻の性状について整理し、かき殻を活用した増殖場造成手法及び底質改善手法について、令和 6 年度に実施した実証試験などを基に、かき殻の効果や有効性の整理、課題の抽出や対応策の検討、計画や設計の基準となる情報について整理した上で、具体的な施工方法、実施後の効果把握方法等についてとりまとめたものである。

1-3 計画フロー

(1) 増殖場造成計画

増殖場造成計画を進めるにあたってのフローを図 1-3-1 に示した。

かき殻を用いた増殖場造成では、かき殻の安定性の評価が重要になるが、安定性の評価については、過去に実施された評価方法や、今回整理した評価方法を用いる。

安定性については、4-4 項で述べるが、適地候補となる海域は、内湾や島嶼部に囲まれた静穏な海域が挙げられる。

この適地候補となる海域で、増殖場造成に必要な計画・設計を行い、施工・維持管理を進めていく。

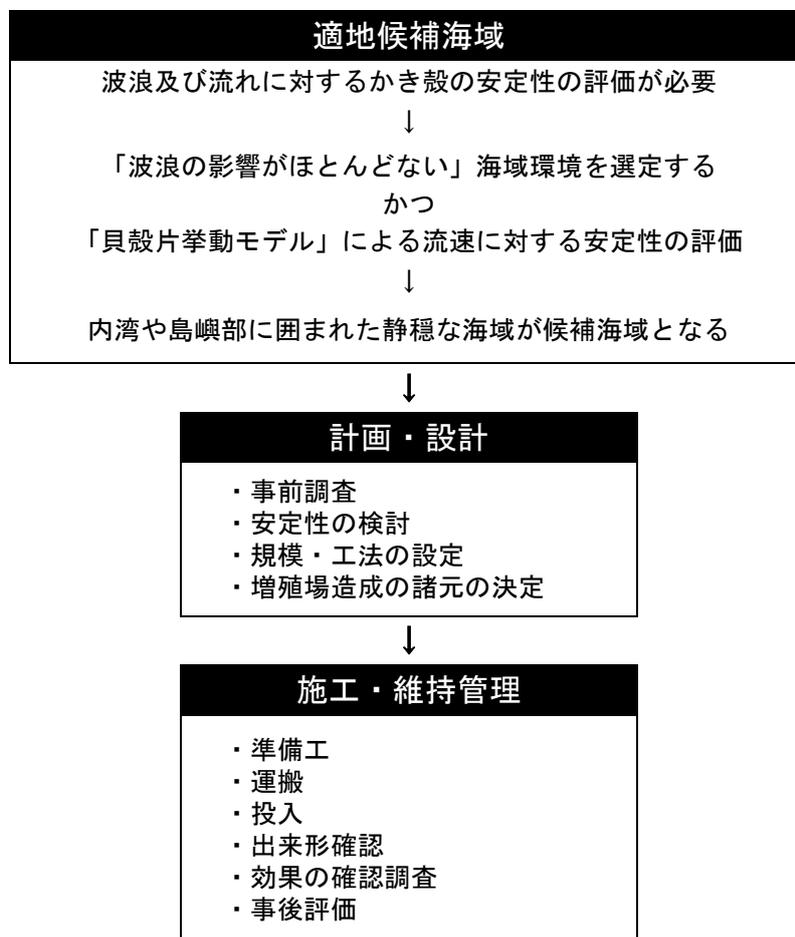


図 1-3-1 増殖場造成計画のフロー図

(2) 底質改善計画

底質改善計画を進めるにあたってのフローを図 1-3-2 に示した。

底質改善を実施する海域は、静穏な海域であり、海水の交換性が悪く、底質環境の悪化が懸念されている海域とし、かき養殖業が盛んな本県では、かき筏垂下式漁場やかき杭打垂下式漁場等が挙げられる。

この実施候補となる海域で、底質改善に必要な計画の策定を行い、施工・維持管理を進めていく。また、必要に応じて改善効果検証のための事前調査等を実施しておくことが望ましい。

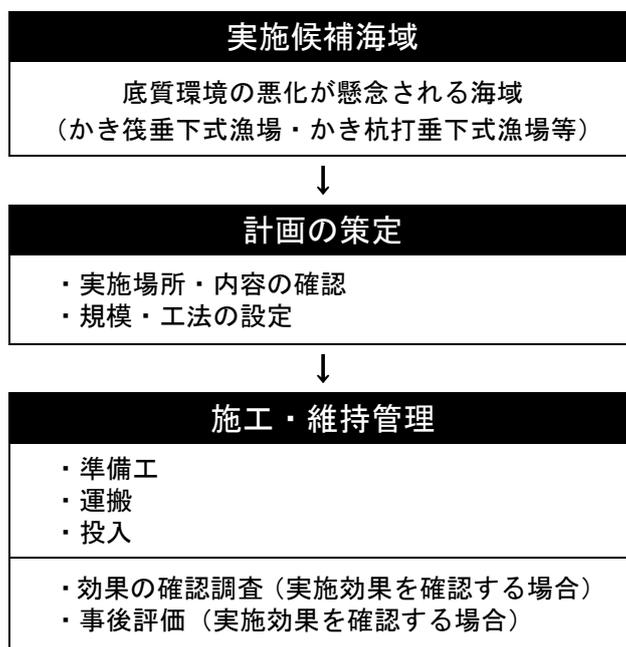


図 1-3-2 底質改善計画のフロー図

2. かき殻の発生・活用状況と法令上の位置づけ

2-1 全国のかき殻の発生量とその利用状況

(1) かき殻の発生量

かき殻の重量は、可食部を含むかきの全体重量の8割程度を占めている。海面漁業生産統計調査（農林水産省）の漁業・養殖業生産統計によるかきの収穫量をもとに、かき殻の発生量を推算した結果を、表 2-1-1 に示す。2022 年における全国のかき殻発生量は約 41 万 m³/年であり、このうち広島県では約 24 万 m³/年のかき殻が発生しており、全国の6割程度を占めている。

なお、養殖年の場合、広島県調べでは、広島県のかき殻発生量は約 20 万 m³/年となっている。

表 2-1-1 かき殻の発生量（推算値）

かき殻容量（m³/年）

都道府県	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
全国	441,745	404,115	397,548	396,973	413,975
広島	260,035	247,860	239,980	232,068	242,040
宮城	65,215	53,515	46,080	55,838	64,270
岡山	38,775	30,415	38,223	36,995	36,810
兵庫	21,630	18,403	22,788	25,370	23,710
岩手	16,615	15,853	15,398	15,520	14,995
北海道	10,208	10,188	10,273	10,438	10,578
三重	8,648	8,330	6,013	4,860	5,000
福岡	4,523	4,425	4,130	4,273	3,988
長崎	3,370	3,203	3,265	2,593	2,340
石川	4,005	3,935	3,218	895	2,033
香川	2,250	1,743	2,250	2,450	2,020
新潟	1,453	1,435	1,635	1,608	1,508
愛媛	1,640	1,570	1,383	1,438	1,480
静岡	733	680	463	305	718
佐賀	705	625	603	480	458
京都	535	560	700	503	443
島根	498	493	288	425	563
大分	358	358	263	205	218
熊本	148	173	198	188	223
徳島	0	110	120	228	155
宮崎	120	103	85	75	158
福井	65	38	85	70	43
山口	48	53	55	60	0
和歌山	0	23	15	13	13
愛知	0	0	0	0	35
鹿児島	0	0	0	10	10

備考) かき殻容量（m³/年）は、かき収穫量(殻付き重量)に0.8を乗じて求めたかき殻重量（t/年）を比重0.32 t/m³で除して求めた。
かき殻発生量は、海面漁業生産統計調査（農林水産省）の漁業・養殖業生産統計データを使用した。

(2) かき殻の海域における利用事例

海域におけるかき殻の利用事例を表 2-1-2 に、かき殻の実験・調査事例を表 2-1-3 に示す。

表 2-1-2 かき殻の利用事例

項目	事例の概要	出典
漁場造成	<p>【目的】 餌場機能、隠れ場機能、産卵場機能等の増殖機能の強化</p> <p>【方法】 かき殻を利用した人工魚礁を製作した。</p> <p>【対象水深】 潮下帯～280m 程度</p> <p>【結果】</p> <p>直径 15cm、長さ 100cm のポリエチレンメッシュパイプにかき殻を満充填した「かき殻基質」は、魚介類の餌料となるエビ類、カニ類、多毛類を中心とする付着生物について、沈設後 23 カ月で同形のコンクリート基質と比較して最大 294 倍増殖させ、これを配置した人工魚礁の餌場機能を著しく強化した。</p> <p>また、かき殻基質内に形成される空隙には小型のハタ類、カサゴ類、ハゼ類、スズメダイ類、マダコ、サザエ等が潜入する様子が観察されており、このような空間が隠れ場を提供することで食害による初期減耗の抑制効果が示唆された。さらに、かき殻基質を付加した人工魚礁は産卵床の造成、繁殖行動の促進等の産卵場機能も備えており、これまでにアイナメ、マダコ、ヤリイカ、アオリイカ等の卵塊・卵のうの着生が観察されたほか、マアジ、イサキ、キジハタ、カサゴ等の抱卵魚が確認された。</p>	1、2
	<p>【目的】 イセエビやマナマコの資源増大</p> <p>【方法】 人工魚礁にかき殻を利用した。</p> <p>【調査海域】 長崎県野母町(イセエビ)、青森県東津軽郡平内町(マナマコ)</p> <p>【調査年】 2002. 3～2006. 8(イセエビ)、2007. 4～2008. 6(マナマコ)</p> <p>【対象水深】 潮下帯～20m 程度</p> <p>【結果】</p> <p>イセエビ資源の増大を目指し事業化された人工魚礁は、餌場機能の強化と様々な成長段階のイセエビの生息に適するように、かき殻基質(直径 15cm×長さ 1m のメッシュパイプ内にかき殻を充填した餌料培養基質)を一行に 10 本程度並べ、くさび形の棚状に配置した。</p> <p>また、マナマコ種苗を採取するために、かき殻を海面に吊るす取組が実施されるなど、かき殻はマナマコとの関わりが強いことで知られているが、かき殻基質(直径 30 cm、長さ 1m の貝殻パイプ)を付加した試験礁でも体長 5 cm 未満を中心とするマナマコ個体が蟄集している様子が確認されており、その結果を踏まえて事業化された人工魚礁には、12 月～4 月の活動期を中心に様々なサイズのマナマコの蟄集が確認された。</p>	3、4
	<p>【目的】 藻場造成</p> <p>【方法】 人工魚礁にかき殻を利用した。</p> <p>【調査海域】 愛媛県今治市平市島、三重県度会郡紀勢町錦</p> <p>【調査年】 2002. 4～2003. 7(愛媛県)、2001. 9(三重県)</p> <p>【対象水深】 潮下帯～10m 程度</p> <p>【結果】</p> <p>海藻類の着生基盤として事業化されているかき殻基質(直径 15cm、長さ 98cm の高密度ポリエチレン樹脂のメッシュパイプにかき殻を充填したもの)を付加した人工魚礁では、付着生物の活動などによる浮泥堆積の抑制、ウニ類による食害の抑制、コンブ類の固着力強化等の効果が確認された。</p>	5、6
アマモ場造成	<p>【目的】 藻場造成</p> <p>【方法】 軟泥域において、アマモのアンカー材としてかき殻を利用した。</p> <p>【調査海域】 岡山県日生町鹿久居島の米子湾</p> <p>【調査年】 2003. 10～2004. 12</p> <p>【対象水深】 水深 3m 以浅</p> <p>【結果】</p> <p>アマモは底土中にかき殻が存在すると、地下茎のひげ根を絡ませて草体を維持するため、波や流れなどの外力に対する抵抗力が強くなるとともに、濁りの抑制に役立つことが明らかとなっている。これを利用して、軟泥域においてかき殻をアンカー材として散布することが事業化されており、アマモの流失が抑制され安定した繁茂が確認された。</p>	7

表 2-1-3 (1) かき殻の実験・調査事例

項目	事例の概要	出典
干潟造成	<p>【目的】干潟の資源量（アサリ幼貝）の増大 【方法】干潟にかき殻を敷設し、アサリ幼貝を移植した。 【対象水深】潮間帯 【結果】 かき殻を敷設した干潟にアサリ幼貝を移植してモニタリングを行った結果、かき殻区では12～65個体(平均46個体、調査面積0.0625m²)と対照区の5個体よりも多くなり、かき殻敷設と幼貝移植を組み合わせることで資源量を増大させることができた。</p>	8
底質改善	<p>【目的】底質の硫化物量の減少 【方法】底土にかき殻を敷設した。 【対象水深】3m程度 【結果】 かき殻を敷設した海域の底土では、硫化物量が87日間で1.12 mg/g（乾泥）から0.76mg/g（乾泥）へと減少したのに対し、対照区では同期中に1.10 mg/g（乾泥）から2.16mg/g（乾泥）へと増加した。一方、水槽実験下では、粉碎かき殻の吸着特性はラングミュアの吸着等温式に従い、最大で12mg-S/g（乾泥）を記録した。よって、かき殻が富栄養化した堆積物中の間隙水から硫化水素を効果的に吸着することが実証されるとともに、上層水の貧酸素化を抑える効果があることを示した。 さらに、粉碎かき殻を付加した底土は対照区よりも酸化還元電位が高くなることから、かき殻は富栄養化した堆積物の中和、緩衝に有効な材料となり得ることが確認できた。</p>	9、10
	<p>【目的】汚濁指標種の減少 【方法】底土にかき殻を敷設した。 【対象水深】13m程度 【結果】 かき殻を敷設した底土では底生生物の種、個体数、湿重量ともに増加したが、その一方で汚濁指標種であるシズクガイやヨツバナネスピオは減少した。</p>	11
養殖漁場の環境改善	<p>【目的】かき養殖筏下の海底への有機物負荷の低減 【方法】かき殻を利用した人工中層海底（サイズ40cm×40cmの籠にかき殻を入れたもの）を設置することにより、養殖筏から沈降する擬糞や剥落物等による有機物を捕捉し、海底への負荷を軽減する。 【調査海域】広島県呉市音戸町広島県水産試験場沖 【調査年】2000.8～2000.11(開始日から69日) 【対象水深】10m程度 【結果】 かき筏直下の貧酸素水塊よりも上層の水深帯に、かき殻基質を10本程度水平に並べたパネルを人工中層海底として設置することで、かき筏から海底へ沈降する擬糞や剥落物等を捕捉し、増殖する付着生物によりこれらの分解を促した。その軽減効率は沈設69日後で6.6%（かき筏からの沈降有機物フラックス5.16gC/m²-底質への沈降有機物フラックス4.82gC/m²/日）/（かき筏からの沈降有機物フラックス5.16gC/m²×100）と見積もられ、対照とした竹炭製の人工中層海底の3.3%と比べて高かった。</p>	12
	<p>【目的】貧酸素水塊が発生する海域において、小型生物の生息環境を創出 【方法】かき殻を利用した人工中層海底（サイズ40cm×40cmの籠にかき殻を入れたもの）を設置した。 【調査海域】広島県呉市音戸町広島県水産試験場沖 【調査年】2000.8～2000.11(開始日から69日) 【対象水深】水深5m程度 【結果】 貧酸素水塊が発生する海域において、それが届かない中層の水深帯にかき殻を利用した人工中層海底を配置することにより、5カ月後の人工中層海底に生息した付着生物の種、個体数、湿重量は周辺海底よりもそれぞれ2倍以上となった。また、人工中層海底には、魚類の蛸集や海藻類の着生も確認されたことから、小型生物の好適な生息環境の創出及び生態系の多様化に寄与していることが実証された。</p>	12

表 2-1-3 (2) かき殻の実験・調査事例

項目	事例の概要	出典
漁港・港湾施設における生物多様性の促進	<p>【目的】小型動物や魚介類などの生物生息機能の増強</p> <p>【方法】かき殻を利用した施設（兵庫県：直径 150mm、長さ 980mm、メッシュ目合 20mm×25mm の高密度ポリエチレンメッシュパイプ内にかき殻を満充填した生物生息基質を製作し、鋼材を用いてパネル状にしたものを幅 2.4m、高さ 2.0m の形状に組み合わせた構造）（岡山県：直径 150mm 及び 300mm、長さ 300mm の 2 種類のメッシュパイプ内にマガキ貝殻を充填したもの）を漁港・港湾施設に併設した。</p> <p>【調査海域】兵庫県姫路市家島東防波堤マウンド上、岡山県倉敷市玉島港防波堤マウンド部天端</p> <p>【調査年】2006.5～2007.11(兵庫県)、2007.8～2009.3(岡山県)</p> <p>【対象水深】水深 D.L. -15.5m(兵庫県)、水深 D.L. -2.7m(岡山県)</p> <p>【結果】生物生息施設として漁港・港湾施設にかき殻基質を併設したところ、防波堤の側面部の付着生物や周囲海底に生息する底生生物とは異なる生物相を形成し、また、その付着生物は対照とした同形のコンクリート基質と比較して、兵庫県での調査では、種類数が 1.1～1.2 倍、湿重量が 2.9～10.8 倍、岡山県での調査では、種類数が 1.2～2.4 倍、湿重量が 13.0～182.1 倍多くなった。このことから、形状が比較的単純であるコンクリート構造物にかき殻基質を併設することで、生態系の多様化に寄与することが明らかとなった。</p>	13、14
水質浄化	<p>【目的】濁度の減少や有機物の取り込み</p> <p>【方法】港湾施設にかき殻基質（直径 15cm×長さ 30cm のメッシュパイプ内にマガキの貝殻を充填した試験片）10 個を設置した。</p> <p>【調査海域】福井県敦賀市敦賀港</p> <p>【調査年】2010.11</p> <p>【対象水深】水深 3m 程度</p> <p>【結果】港湾施設に設置したかき殻基質には植物プランクトンを捕捉する濾過食者が増殖し、これらは 9 カ月後には湿重量で全体の約 74% を占めた。このかき殻基質を水槽内に静置して珪藻を添加しモニタリングした結果、珪藻を捕捉、消化していることが実証され、その減少速度は二枚貝類の生息する干潟と比較してクロロフィル a 量で 10.1 倍、SS で 1.7 倍、有機態窒素量で 17.2 倍となった。このことより、港湾施設にかき殻を使用した構造物を付加、併設することで、バイオディポジション(生物源堆積現象)の機能を高め、周囲の水質環境を改善する効果が認められた。その機能は内部に潜入する小型動物によるバイオターベーション(生物による攪乱作用)により、さらに高められるものと期待される。</p>	15
水質浄化	<p>【目的】全窒素の除去効果</p> <p>【方法】硝化反応槽として、内側に内径 8cm、高さ 30cm、容積 1.2L の硝化反応用処理槽（アクリル樹脂製）にかき殻を充填した。その外側に連続系で処理を行うための処理槽（アクリル樹脂製で内径 14cm、高さ 25cm）を設けた。</p> <p>【調査海域】陸上試験</p> <p>【調査期間】約 1 年</p> <p>【結果】かき殻を充填した施設に人工排水を供給、循環させた結果、24 時間で 10mg/L の濃度のアンモニア性窒素が硝化作用により、ほぼ除去された。</p>	16
	<p>【目的】植物プランクトン除去効果</p> <p>【方法】内径 104mm、高さ 680mm の透明塩ビ性カラムに現地で採取した生物が付着しているかき殻を充填し、カラム下部から現地で採取した湖水を流し、上部から流出させ、通水前後のクロロフィル a 濃度の変化より濾水速度を算出した。</p> <p>【調査海域】静岡県湖西市松見ヶ浦（浜名湖）</p> <p>【調査年】2003.7～2004.8</p> <p>【結果】底生生物が生息するかき殻を充填した施設に水域で採取した水を供給して植物プランクトンの濾水速度を測定した結果、かき殻 1m³ 当たり 31.6m³/日となった。</p>	17

出典：

- 1) 柿元皓：人工魚礁. 財団法人漁港漁場漁村技術研究所, 2004.
- 2) 監修 坂口守彦・平田孝, 水産資源の先進的有効利用法-ゼロエミッションを目指して-, pp301-314, 2005.
- 3) 藤澤真也・片山貴之・片山真基・清田健・藤井淳夫・伊藤靖：廃棄貝殻を利用したイセエビの増殖施設の開発. 海洋開発論文集, Vol. 23, 585-590, 2007.
- 4) 藤澤真也・片山真基・村上由香里・山舘忠則・伊藤靖：水産系副産物（貝殻）を利用したマナマコの増殖施設の開発. 海洋開発論文集, 25, 455-460, 2009.
- 5) 片山貴之・藤澤真也・塩見昌弘・伊藤靖：貝殻餌料培養礁の藻場造成機能-愛媛県今治市の事例-. 平成 16 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 1-4, 2004.
- 6) 片山貴之・吉田創・田原実・柿元皓：基質によるカジメの固着力の変化. 平成 14 年度日本水産工学会学術講演会講演論文集, pp. 65-68, 2002.
- 7) 岡山県農林水産部水産課：かき殻の有効利用に係るガイドライン 平成 18 年 6 月 岡山県. pp1-16, 2006.
- 8) 宮城県水産林業部：かき殻を用いたアサリ増殖場造成事業に関するガイドライン, 1998
- 9) 藤沢邦康・三宅与志雄：かき殻散布による底質改良試験-I. 岡山水試事報, 30-31, 1980
- 10) Satoshi Asaoka・Tamiji Yamamoto・Shunsuke Kondo and Shinjiro Hayakawa Removal of hydrogen sulfide using crushed oyster shell from pore water to remediate organically enriched coastal marine sediments. Bioresource Technology, 100, 4127-4132, 2009.
- 11) 広島県水産試験：7-2 増殖制限因子による赤潮発生防止技術開発試験 B. かき殻による赤潮生物抑制効果試験, 昭和 57 年度赤潮対策技術開発試験報告書 昭和 58 年 3 月. 18, 1983.
- 12) 川口修・山本民次・松田治・橋本俊也・高山晴義：人工中層海底を用いたかき養殖場底質への有機物負荷軽減策の検討. 日本水産学会, 70(5) 722-727, 2004.
- 13) 片山貴之・藤澤真也・廣田敏人・前田智彦・柿元皓 港湾施設に設置した貝殻を利用した生物生息施設の効果. 海洋開発論文集, 25, 473-478, 2009.
- 14) 加村聡・藤澤真也・原茂恭・鳥井正也：港湾施設への生物生息機能付加試験. 海洋開発論文集, 26, 741-746, 2010.
- 15) 加村聡・藤澤真也・片山貴之・齋藤達昭・田原実・岸本英昭：港湾内に設置した生物生息基質の水質浄化機能の定量化. 海洋開発論文集, 27, 2011.
- 16) 小西秀則・牧野雅英・深山敏明：廃棄物を有効利用した小規模排水高度処理システムに関する研究について(第 3 報)-硝化反応、脱窒反応及び脱リン反応を用いた高度排水処理システム-. 石川県保健環境センター研究報告書, 46, 9-14, 2009.
- 17) 袋昭太・島多義彦：かき殻を利用した水環境改善技術の開発-かき殻覆砂工法及びかき殻フィルター工法-. フジタ技術研究報告, 41, 63-68, 2005.

2-2 法令上の位置づけ

(1) 廃棄物の処理及び清掃に関する法律(昭和45年法律第137号)

廃棄物の処理及び清掃に関する法律（以下「廃棄物処理法」という。）に基づく、廃棄物の定義は次のとおりである。

なお、本ガイドラインに従って、資材として適正に使用する場合は、かき殻は廃棄物に該当しない。

(参考)

- 1) 「廃棄物」とは、ごみ、粗大ごみ、燃え殻、汚泥、ふん尿、廃油、廃酸、廃アルカリ、動物の死体その他の汚物または不要物であって、固形状または液状のもの（放射性物質及びこれによって汚染された物を除く。）をいう。(廃棄物処理法第2条第1項)
- 2) 貝類養殖の生産工程において、海域から陸揚げされ、むき身加工に伴い発生するかき殻等の貝殻が不要物として処理される場合は廃棄物処理法が適用される。
- 3) 廃棄物は一般廃棄物と産業廃棄物に区分され、漁業活動に伴い排出されるかき殻は一般廃棄物に、食料品製造業等によって排出されるかき殻は産業廃棄物に区分される。

(2) 行政処分の指針について(通知)(令和3年4月14日環循規発第2104141号)

廃棄物処理法の違法行為が継続し、生活環境の保全上の支障を生ずる事態を招くことを未然に防止し、廃棄物の適正処理を確保するとともに、廃棄物処理に対する国民の不信感を払拭するため、行政処分を実施する際の指針を各都道府県・各政令市に通知したものである。この中で、廃棄物該当性の各種判断要素の基準を示している。

- 1) 物の性状
 - ・利用用途に要求される品質を満足していること
 - ・飛散、流出、悪臭の発生等の生活環境の保全上の支障が発生するおそれのないものであること
- 2) 排出の状況
 - ・排出が需要に沿った計画的なものであること
 - ・排出前や排出時に適切な保管や品質管理がなされていること
- 3) 通常取り扱い形態
 - ・製品としての市場が形成されていること
 - ・廃棄物として処理されている事例が通常は認められないこと
- 4) 取引価値の有無
 - ・占有者と取引の相手方間で有償譲渡がなされていること
 - ・客観的に見て当該取引に経済的合理性があること
- 5) 占有者の意思
 - ・占有者の意思として、適切に利用し若しくは他人に有償譲渡する意思が認められること、または放置若しくは処分の意思が認められないこと

(3) 海洋汚染防止法等及び海上災害の防止に関する法律(昭和 45 年法律第 136 号)

海洋汚染防止法等及び海上災害の防止に関する法律（以下、「海防法」という。）は、船舶、海洋施設等から海洋に油、有害液体物質等及び廃棄物を廃棄することを禁じているが、同法第 3 条により、廃棄物は「人が不要とした物(油及び有害液体物質を除く)をいう。」とされていることから、かき殻を資材として有効利用する場合には廃棄物には該当しないと解される。

(4) 広島の水の管理に関する条例(平成 3 年 3 月 14 日、広島県条例第 7 号)

「広島の水の管理に関する条例」は、海域の占用または海域における土砂の採取について、事業者が事前に知事の許可を受けることを定めている。

(5) 干潟等の造成の許可に関する取扱い(平成 28 年 3 月 16 日制定、広島県土木建築局長、環境県民局長、農林水産局長)

「干潟等の造成の許可に関する取扱い」は、公共事業等（国または地方公共団体が実施する公共事業及び民間事業者が実施する工事）により発生した土砂を有効利用し、干潟等の造成に伴う土砂の海洋投入を行うための海域（水域）の占用または使用の許可等（協議に応じることを含む。以下同じ。）について、事務処理の適正化を図るため、必要な事項を定めている。

なお、かき殻等残渣の海洋投入については、後述の「かき殻及びかき洗浄残渣等の処理要領」に規定されているため、本規定には含まれていない。

(6) かき殻及びかき洗浄残渣等の処理要領(昭和55年10月1日制定、広島県農林水産局長・土木建築局長・環境県民局長)

「かき殻及びかき洗浄残渣等の処理要領」(以下「かき殻要領」という。)は、かきのむき身処理の過程から生ずるかき殻、破碎かき殻及びかき洗浄残渣等の処理に関する要領を規定しているほか、破碎かき殻及びかき洗浄残渣(以下「かき洗浄残渣等」という。)による干潟等の造成、かき殻、破碎かき殻及びかき洗浄残渣(以下「かき殻等」という。)による増殖場の造成、かき殻等による底質改善についても要領を規定している。

かき殻要領から一部抜粋

3 かき洗浄残渣等による干潟等の造成

- (1) かき洗浄残渣等による干潟及び藻場(海藻又は海草類が生育可能な水深帯に地盤高の調整を行い創出されるものに限る。)(以下「干潟等」という。)造成の事業主体は、漁業協同組合、漁業協同組合連合会、地方公共団体又は国とする。
- (2) 干潟等の造成場所の選定に当たっては、次のことを考慮すること。
 - ア 護岸等公共施設の管理上及び海上交通安全上支障がなく、漁業調整上問題のないところであること。
 - イ 景観を損なわない、かつ、海水浴等海浜の利用を妨げないところであること。
 - ウ 潮流、風波の影響が少なく造成後の干潟等が有効に利用できることであること。
- (3) 干潟等造成工事の施工に当たっては、事業主体は、農林水産事務所長等の協力を得て工事の施工前後に干潟等の付近の海域における水深、水質(水温、Cl、透明度、pH、COD、PO₄-P、DO)及び底質(pH、COD、硫化物、PO₄-P)の調査を行うものとする。
- (4) 事業主体は、水質又は底質の悪化が認められた場合、直ちに農林水産事務所長等に通報するものとする。

農林水産事務所長等は、その原因を解明し、工事を中止する等適切な処置を講じさせること。
- (5) かき洗浄残渣等を干潟等造成に使用する場合は、おおむね20日間海中に堆積したものをを用いること。
- (6) かき洗浄残渣等以外のものを干潟等造成に使用する場合は、有害物質(カドミウム、シアン、有機燐、鉛、六価クロム、砒素、総水銀、PCB)の調査をすること。
- (7) 干潟等造成に係る潜堤の基礎の軟弱地盤対策として、かき洗浄残渣等を地盤改良材として用いる場合は、基礎の支持力に係る設計要求水準(「漁港・漁場の施設の設計参考図書」〔水産庁〕参照)を満たすことを確認すること。
- (8) 事業主体は、干潟等造成工事ごとに工事責任者を定め、管理責任体制を明確にし、関係機関からの指導があった場合はこれを遵守すること。
- (9) 工事中は標示板等により工事内容を明示するとともに十分な監視を行うこと。

4 かき殻等による増殖場の造成

- (1) かき殻等による増殖場(保護育成礁)造成の事業主体は、漁業協同組合、漁業協同組

合連合会、地方公共団体又は国とする。

(2) 増殖場造成に用いるかき殻等は、「かき殻を活用した漁場環境改善ガイドライン（広島県）」（以下「かき殻ガイドライン」という。）に定める品質管理基準に適合したものと及び3か月以上海中に堆積し付着物が除去されたものを使用すること。

(3) 増殖場造成に当たっては、前条の規定（第1項、第5項、第6項及び第7項を除く。）を準用するほか、かき殻ガイドラインに定める計画、設計、施工方法及び効果の確認方法に従うこと。

5 かき殻等による底質改善

(1) かき殻等による漁場の底質改善の事業主体は、漁業協同組合、漁業協同組合連合会、地方公共団体又は国とする。

(2) 底質改善に用いるかき殻等は、かき殻ガイドラインに定める品質管理基準に適合したものと及び3か月以上海中に堆積し付着物が除去されたものを使用すること。

なお、全形のかき殻は破碎して使用すること。

(3) 底質改善の実施に当たっては、第3条の規定（第1項、第5項、第6項及び第7項を除く。）を準用するほか、かき殻ガイドラインに定める計画、設計、施工方法及び効果の確認方法に従うこと。

(7) 干潟造成に当たっての留意点(昭和59年6月制定、広島県農政部水産漁港課)

「干潟造成に当たっての留意点」は、干潟の造成計画、計画・設計、工事施行、造成後の管理、行政手続きに関する事項について、水産利用上の観点から留意点をとりまとめている。

3. かき殻の性状について

3-1 形状

かきは二枚貝であり、一般に殻形は卵形であるが、形態は付着した場所によって著しく異なり、一定しない。かき殻は左右非対称で、左殻は膨らみが強く、基質物に固着する。右殻は平たく、蓋のようになっている。殻表には粗い成長脈のひだが波打って走る。高く発達したひだは、半管状の突起になる。殻表外面は淡い黄白色で、紫褐色の放射状の帯がある。かき殻内面は白色である。



図 3-1 かき殻の形状（それぞれの写真の左が左殻、右が右殻）

3-2 構造

かき殻は、外側から殻皮、殻質層（稜柱層、葉状層またはチョーク層）が重なった構造になっている。

外側の殻皮は有機物のみでできており、主成分はタンパク質である。殻皮は内側の炭酸カルシウムが主成分である殻質層（稜柱層、葉状層またはチョーク層）を包んで保護する役割がある。殻皮の内側にある殻質層は薄い酸でも少しずつ溶解するが、殻皮に保護されていることで容易には溶解されない。殻質層のうち、稜柱層は、炭酸カルシウムとその結晶間のコンキオリンと総称されるタンパク質でできており、有機物が比較的多く弾力性があるため簡単に折れることはない。さらにその内側の葉状層やチョーク層は緻密で硬い構造となっており、このような多層構造の殻によって軟体部は、浸食や破壊から守られている。

3-3 化学的特性

かき殻の成分の 82%は炭酸カルシウム(CaCO₃)によって構成されている。さらに、水、塩類水溶液、有機溶媒、希酸やアルカリ等に不溶性の硬タンパク質であるコンキオリンと微量の炭酸マグネシウム、リン酸カルシウム、硫酸カルシウム、酸化鉄等を含んでいる。

また、かき殻堆積場から採取したかき殻(3 カ月以上、海中保管されたかき殻であり、破碎かき殻及び洗浄残渣を含む)の分析結果は表 3-3-2 に示すとおりであり、かき殻は有害物質を含有しておらず、安全性の高い材料と言える。

表 3-3-1 かき殻の成分

成分	単位	かき殻
H ₂ O	%	0.36 - 0.52
CO ₂	%	42.74 - 42.92
Ca	%	38.71 - 38.82
Mg	ppm	820 - 1,420
Sr	ppm	750 - 825
Li	ppm	1.3 - 1.8
Na	ppm	5,560 - 6,580
K	ppm	47 - 76
Mn	ppm	5 - 20
Fe	ppm	2.0 - 6.0
Cu	ppm	0.2 - 1.4
Zn	ppm	0.8 - 5.2
SO ₄	ppm	2,140 - 2,630
Cl	ppm	164 - 412
P	ppm	279 - 858

出典：和田浩爾・藤貫正 軟体動物の生理調整における貝殻の形状と溶解の整理 I 環境水 外套液 貝殻間の化学成分の分配関係から見た水棲軟体動物による微量成分の貝殻への濃縮について，国立真珠研報，18，2085-2110，1974

表 3-3-2 かき殻堆積場から採取したかき殻の分析結果（含有量試験、溶出試験）

番号	項目	単位	分析値 (安浦)	分析値 (海田)	定量 下限値	水産用水 基準（底質）	水底土砂 判定基準	その他 基準
1	COD（アルカリ性法）	mg/g	6.3	2.3	—	20	—	—
2	硫化物	mg/g	0.04	ND	0.01	0.2	—	—
3	ノルマルヘキサン抽出物	%	0.006	0.012	—	0.1	—	—
4	アルキル水銀化合物	mg/L	ND	ND	0.0005	0.01	ND	—
5	水銀又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.0005	0.001	0.005	—
6	カドミウム又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.001	ND	0.1	—
7	鉛又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.005	0.03	0.1	—
8	有機りん化合物	mg/L	ND	ND	0.1	—	1	—
9	六価クロム化合物	mg/L	ND	ND	0.02	0.1	0.5	—
10	ひ素又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.005	0.1	0.1	—
11	シアン化合物	mg/L	ND	ND	0.1	0.01	1	—
12	ポリ塩化ビフェニル	mg/L	ND	ND	0.0005	ND	0.003	—
13	銅又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.005	ND	3	—
14	亜鉛又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.01	ND	2	—
15	ふつ化合物	mg/L	0.2	0.2	—	14	15	—
16	トリクロロエチレン	mg/L	ND	ND	0.002	0.3	0.3	—
17	テトラクロロエチレン	mg/L	ND	ND	0.0005	0.02	0.1	—
18	ベリリウム又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.01	—	2.5	—
19	クロム又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.04	—	2	—
20	ニッケル又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.001	0.07	1.2	—
21	バナジウム又はその化合物	mg/L	0.04	0.01	—	—	1.5	—
22	有機塩素化合物	mg/kg	ND	ND	4	—	40	—
23	ジクロロメタン	mg/L	ND	ND	0.002	0.2	0.2	—
24	四塩化炭素	mg/L	ND	ND	0.0002	0.02	0.02	—
25	一・二ジクロロエタン	mg/L	ND	ND	0.0004	0.04	0.04	—
26	一・二ジクロロエチレン	mg/L	ND	ND	0.002	0.02	1	—
27	シス一・二ジクロロエチレン	mg/L	ND	ND	0.004	0.4	0.4	—
28	一・一・一トリクロロエタン	mg/L	ND	ND	0.0005	5	3	—
29	一・一・二トリクロロエタン	mg/L	ND	ND	0.0006	0.06	0.06	—
30	一・三ジクロロプロペン	mg/L	ND	ND	0.0002	0.02	0.02	—
31	チウラム	mg/L	ND	ND	0.0006	—	0.06	—
32	シマジン	mg/L	ND	ND	0.0003	—	0.03	—
33	チオベンカルブ	mg/L	ND	ND	0.002	0.2	0.2	—
34	ベンゼン	mg/L	ND	ND	0.001	0.1	0.1	—
35	セレン又はその化合物	mg/L	ND	ND	0.002	0.1	0.1	—
36	一・四ジオキサン	mg/L	ND	ND	0.05	—	0.5	—
37	ダイオキシン類（溶出）	pg-TEQ/L	2.3	0.0074	—	10	10	—
38	ダイオキシン類（含有）	pg-TEQ/g	1.1	0.27	—	150	—	—
39	油分	mg/L	ND	ND	1	—	—	15
40	強熱減量	%	5.3	2.8	—	—	—	15

備考：基準の根拠

- ・水産用水基準（底質）
「水産用水基準 第7版（2018年版）」（平成30年、社団法人日本水産資源保護協会）
 - ・水底土砂判定基準
「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令第五条第一項に規定する埋立場所等に排出しようとする金属等を含む廃棄物に係る判定基準を定める省令」（昭和48年2月17日、総理府令第6号）
 - ・その他基準（油分）
「廃棄物の処理及び清掃に関する法律施行令第六条第一項第四号に規定する油分を含む産業廃棄物に係る判定基準を定める省令」（昭和51年2月26日、総理府令第5号）
 - ・その他基準（強熱減量）
「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令」（昭和46年6月22日、政令第201号）
- 注）分析に供した試料は、安浦地区及び海田地区のかき殻堆積場において、3カ月以上、海中保管されたかき殻であり、破碎かき殻及び洗浄残渣を含む。
出典）「かき殻等残渣有効活用検討業務報告書」（平成27年3月、広島県漁業協同組合連合会ほか）

3-4 物理的特性

かき殻の物理的特性（土粒子密度、粒度分布等）は、増殖場造成や底質改善等の漁場環境改善材として活用する場合の設計基準を定める上で必要となるため、既存文献及び漁場整備におけるかき殻有効活用調査検討業務の土質試験結果に基づく整理を行った。

出典B、C、F、G、Hについては、3カ月以上、海中保管されたかき殻であり、破碎かき殻及び洗浄残渣を含む。

表 3-4-1 文献一覧

出典	報告書名	年、調査機関
A	漁場造成における水産系副産物（貝殻）リサイクルガイドライン	平成19年3月、水産庁漁港漁場整備部
B	牡蠣ガラ残渣室内土質試験報告書	平成25年1月、広島かき生産対策協議会ほか
C	かき殻等残渣有効活用検討業務報告書	平成27年3月、広島県漁業協同組合連合会ほか
D	改訂版かき殻を利用した総合的な底質改良技術ガイドライン	令和4年11月、岡山県
E	港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン	令和5年10月、国土交通省 港湾局、航空局
F	令和5年度かき殻を活用した増殖場整備に関する調査検討業務	令和6年3月、水圏リサーチ株式会社
G	牡蠣ガラ残渣室内土質試験（採取地：江田島市大柿町、坂地区）	令和6年3月、6月、7月 広島かき生産対策協議会、復建調査設計株式会社
H	漁場整備におけるかき殻有効活用調査検討業務（室内試験：20mm以下破碎かき殻）（※）	令和7年3月、復建調査設計株式会社

※：破碎かき殻等を 20 mm以下に選別したもの

(1) かき殻の土粒子密度

土粒子密度は、物質の基本的物性を表す指標であり、土粒子（固相）の単位体積あたりの質量である。

かき殻の土粒子密度は突出値 1.737 を除いて、2.174～2.671g/cm³であり、出典 A の砂密度（2.666～2.672g/cm³）とほぼ同等か、やや小さい値であった。

また、表 3-4-2 のとおり、試料の粒径が大きい方が、密度が小さくなる（容器内に空気が残りやすくなるため）という一般的な傾向を得られた。

※例えば、出典 H では 20 mm以下に破碎したかき殻のうち、口径φ1cm のピクノメータ（標準的な試験器具）に入るものを選別して試験をしている（粒径が小さい）。

表 3-4-2 かき殻の土粒子密度

土粒子密度(g/cm ³)	試料の状態	出典
2.174	最大粒径30mm	A
2.609	最大粒径5mm	
2.671	礫分61%、砂分36%、細粒子/シルト/粘土分4%	B
2.572	粒径4.75mm以下(安浦堆積場)	C
2.622	粒径4.75mm以下(海田堆積場)	
1.737	かき殻のまま	E
2.174	Dmax30mmに破碎	
2.609	Dmax5mmに破碎	
2.629	粉粒、可能な限り細かく（不純物を含む）	
2.662	粉粒、可能な限り細かく（不純物を含まない）	
2.665	礫分73%、砂分23%、細粒子/シルト/粘土分4%（大原地区）	G
2.667	礫分71%、砂分23%、細粒子/シルト/粘土分6%（坂地区①）	
2.644	礫分77%、砂分20%、細粒子/シルト/粘土分3%（坂地区②）	
2.599	20mm以下に破碎	H
2.666(参考)	砂（宮城県産）	A
2.672(参考)	砂（北海道産）	

注) AとEの土粒子密度2.174g/cm³、2.609g/cm³は同じ試験を参照していると考えられる。

注) 土質試験法が「土粒子の比重試験」から「土粒子の密度試験」に改正（平成2年4月）されており、上表の値は比重として扱ってよい。

(2) かき殻の粒度分布

粒度分布は、かき殻原料の粒径ごとの含有割合を表したものである。

表 3-4-3 かき殻の粒度分析結果

項目	単位	分析値			
		(出典：C)		(出典：H)	
		安浦堆積場	海田堆積場	広島県内	
密度試験	土粒子の密度（※）	g/cm ³	2.572	2.622	2.599
粒度試験	53.0mm以上	%	2.5	0.2	—
	37.5—53.0mm	%	4.4	1.4	—
	26.5—37.5mm	%	16.3	5.9	—
	19.0—26.5mm	%	11.3	9.2	—
	9.5—19.0mm	%	23.2	23.1	22.7
	4.75—9.5mm	%	9.6	11.7	34.8
	2.0—4.75mm	%	11.0	14.4	20.4
	0.075—2.0mm	%	18.6	32.8	18.6

	0.075mm以下	%	3.1	1.3	3.5
	最大粒径	mm	100	75	19
	中央粒径	mm	—	—	5.6

※：安浦堆積場及び海田堆積場のかき殻は粒径 4.75 mm以下のもの

(3) かき殻の重量

かき殻の重量は全形の場合で16.388 g、破碎した場合で0.042～5.972 gであった。

表 3-4-4 かき殻の重量

かき殻の重量 (g)	試料の状態	出典
16.388	6.66cm (全形)	F
5.972	4.05cm	
3.824	3.00-3.49cm	
2.114	2.50-2.99cm	
1.228	2.00-2.49cm	
0.666	1.50-1.99cm	
0.206	1.00-1.49cm	
0.099	0.75-0.99cm	
0.055	0.50-0.74cm	
0.042	0.35-0.49cm	
0.46	中央粒径0.56cm (20mm以下に破碎)	H

(4) かき殻のせん断抵抗角

せん断抵抗角は、土粒子同士の摩擦によって生じるせん断抵抗を角度で表したものであり、砂質では大きく、粘土質では小さい角度となる。

安息角は、土などを積み上げたときに自発的に崩れることなく安定を保つ斜面の最大角度であり、構成粒子の粒度が大きく、また、角ばっているほど角度は大きくなる。

表 3-4-5 かき殻のせん断抵抗角の試算値等

N 値 (標準貫入試験値)	せん断抵抗角の試算値 (°)	安息角の計測値 (°)	出典
1～2	23.5～24.9	33.7～34.5	D

注) せん断抵抗角の試算値はN値からの推定と考えられるため、参考値扱いが望ましい。

表 3-4-6 かき殻のせん断抵抗角 (土質試験より)

せん断抵抗角 (°)	出典
41.0	B
36.8	G
38.0	
36.4	
41.2	H

(5) その他の物理的特性

表 3-4-7 実験水槽による限界掃流速調査 (出典 : D)

底層流速 (底から 2cm で測定)	結果	備考
57cm/s (実験水槽での最大流速)	粒径 2mm 以上のかき殻片は流失しなかった	本実験は、水平方向の一様流によるものであり、波浪等の影響が大きい水域においては不規則な振動流が発生することを視野に入れる必要がある

※限界掃流速とは、海底にある粒子が動き始める限界摩擦速度のことを指す。

表 3-4-8 かき殻、ホタテガイ貝殻及び砂の物理特性等の比較 (出典 : A)

種類	試料の状態	土粒子の密度 g/cm ³	最大乾燥密度 g/cm ³	最小乾燥密度 g/cm ³	透水係数 cm/s	出典
かき殻	最大粒径 30mm	2.174	0.617	0.447	3.18×10^0	(1)
かき殻	最大粒径 5mm	2.609	0.73	0.546	8.07×10^{-1}	
砂	(宮城県産)	2.666	1.606	1.278	-	
ホタテ貝殻	最大粒径 30mm	2.709	1.291	0.987	2.86×10^{-1}	(2)
砂	(北海道産)	2.672	1.457	1.164	2.18×10^{-1}	

注) 出典(2)に関する試料の透水係数(水の通りやすさ)はホタテが相対密度 26%、砂が 40%の場合の値
 出典(1)橋立ら; かき殻混り砂の工学的特性について, 第 28 回土質工学研究発表会, 1993
 出典(2)河合浩; 函館港港町ふ頭の地盤改良におけるホタテ貝殻の利用について, 基礎工 VOL. 30, 2002

表 3-4-9 盛砂(山砂)の代替材としての適性(出典 : B)

試験項目	盛砂(山砂)の一般値	牡蠣ガラ試験値	適性の評価
粒度	産地によるので一般値は示せない。	礫分 61%、砂分 35% 細粒分含有率 4%	細粒分含有率が小さく、施工中の濁りの影響も抑えられる。
飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	2.0 (g/cm ³)	1.5 (g/cm ³)	密度が小さく、基礎地盤が軟弱粘土の場合、沈下を低減することが可能な材料と言える。
透水係数 k(m/s)	砂の概略値が 10^{-4} (m/s)	4×10^{-3} (m/s)	砂と同等もしくは大きな透水性を示し、排水材ともなる。透水性を期待するサンドマットとしても利用可能。
せん断強度 Cd(kN/m ²)、 $\Phi d(^{\circ})$	Cd=0、 $\Phi d=30^{\circ}$ で設定されることが多い。	Cd=11、 $\Phi d=41^{\circ}$	砂よりも大きなせん断強度を有する。

(6) 土質試験結果一覧

表 3-4-10 土質試験結果① (出典：B)

試験項目		試験結果		考察
層名 (目視判定)		ほとんど牡蠣ガラ		牡蠣ガラは、やや風化しており手で握ることが出来る。
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.671		土の値と変わらない一般値を示している。
含水比 W _n (%)		27.9		陸揚げされたものであるが、やや高い含水状態を示している。
粒度	礫分 (%)	61		粗粒分主体の材料で礫分が61%である。 最大粒径37.5mm 平均粒径D ₅₀ =3mm 0.075mm以下の細粒分は4%と少ない。
	砂分 (%)	36		
	細粒子 シルト・粘土分 (%)	4		
水中落下 密度	飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	1.5		参考として実施した、空中落下による乾燥密度は $\rho_d=0.65$ (g/cm ³) である。
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.74		
	飽和含水比 W (%)	102.4		
分類	地盤材料の分類名	粒径幅の広い砂質礫		
	分類記号	(GWS)		
透水試験	試験方法	定水位	定水位	透水係数は大きく、排水性良好である。
	上載荷重 kN/m ²	0	7.9	
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.74	0.79	
	透水係数 k (m/s)	3.9×10^{-3}	3.7×10^{-3}	
一面せん 断	Cd (kN/m ²)	11.6		比較的大きいせん断強度を示している。
	Φd (°)	41		

表 3-4-11 土質試験結果② (採取地：江田島市大柿町) (出典：G)

試験項目		試験結果		考察
層名 (目視判定)		ほとんど牡蠣ガラ		牡蠣ガラは、やや風化しており手で握ることが出来る。
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.665		土の値と変わらない一般値を示している。
含水比 W _n (%)		22.0		陸揚げされたものであるが、やや高い含水状態を示している。
粒度	礫分 (%)	73		粗粒分主体の材料で礫分が73%である。 最大粒径37.5mm 平均粒径D ₅₀ =8.4mm 0.075mm以下の細粒分は4%と少ない。
	砂分 (%)	23		
	細粒子 シルト・粘土分 (%)	4		
水中落下 密度	飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	1.46		参考として実施した、空中落下による乾燥密度は $\rho_d=0.63$ (g/cm ³) である。
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.73		
	飽和含水比 W (%)	99.9		
分類	地盤材料の分類名	粒径幅の広い砂質礫		
	分類記号	(GWS)		
透水試験	試験方法	定水位	定水位	透水係数は大きく、排水性は良好である。
	上載荷重 kN/m ²	0	7.8	
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.78	0.83	
	透水係数 k (m/s)	2.0×10^{-2}	1.2×10^{-2}	
一面せん 断	Cd (kN/m ²)	49.0		比較的大きいせん断強度を示している。
	Φd (°)	36.8		

表 3-4-12 土質試験結果③（採取地：坂地区）（出典：G）

試験項目		試験結果		考察
層名（目視判定）		ほとんど牡蠣ガラ		牡蠣ガラは、やや風化しており手で握ることが出来る。
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.667		土の値と変わらない一般値を示している。
含水比 W _n (%)		14.5		陸揚げされたものであるが、やや高い含水状態を示している。
粒度	礫分 (%)	71		粗粒分主体の材料で礫分が71%である。 最大粒径37.5mm 平均粒径D50=7.4mm 0.075mm以下の細粒分は6%と少ない。
	砂分 (%)	23		
	細粒子 シルト・粘土分 (%)	6		
水中落下密度	飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	1.47		参考として実施した、空中落下による乾燥密度は $\rho_d=0.6$ (g/cm ³) である。
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.75		
	飽和含水比 W (%)	95.7		
分類	地盤材料の分類名	粘性土まじり砂質礫		
	分類記号	(GS-Cs)		
透水試験	試験方法	定水位	定水位	透水係数は大きく、排水性は良好である。
	上載荷重 kN/m ²	0.0	7.8	
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.75	0.76	
	透水係数 k (m/s)	1.1×10^{-2}	9.8×10^{-3}	
一面せん断	Cd (kN/m ²)	62.0		比較的大きいせん断強度を示している。
	Φ_d (°)	38.0		

表 3-4-13 土質試験結果④（採取地：坂地区）（出典：G）

試験項目		試験結果		考察
層名（目視判定）		ほとんど牡蠣ガラ		牡蠣ガラは、やや風化しており手で握ることが出来る。
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.644		土の値と変わらない一般値を示している。
含水比 W _n (%)		28.7		陸揚げされたものであるが、やや高い含水状態を示している。
粒度	礫分 (%)	77		粗粒分主体の材料で礫分が77%である。 最大粒径37.5mm 平均粒径D50=7.4mm 0.075mm以下の細粒分は3%と少ない。
	砂分 (%)	20		
	細粒子 シルト・粘土分 (%)	3		
水中落下密度	飽和密度 ρ_{sat} (g/cm ³)	1.40		参考として実施した、空中落下による乾燥密度は $\rho_d=0.6$ (g/cm ³) である。
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.64		
	飽和含水比 W (%)	118.4		
分類	地盤材料の分類名	粒径幅の広い砂質礫		
	分類記号	(GWS)		
透水試験	試験方法	定水位	定水位	透水係数は大きく、排水性は良好である。
	上載荷重 kN/m ²	0.0	7.8	
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.68	0.77	
	透水係数 k (m/s)	3.0×10^{-2}	2.5×10^{-2}	
一面せん断	Cd (kN/m ²)	42.0		比較的大きいせん断強度を示している。
	Φ_d (°)	36.4		

4. かき殻利用によって想定される漁場整備について

4-1 総論(海域分類の定義及びかき殻の品質管理基準)

これまでの調査で得られた成果については、利用する海域の条件に応じた技術として、適宜使い分けることが重要である。本節では、図 4-1 に示す海域条件によって利用する海域を分類、定義した上で、品質管理基準を満たしたかき殻を利用した増殖場造成及び底質改善について説明する。

【ガイドラインにおける海域分類の定義】

(1) 潮間帯(干潟)及びそれに続く極浅海域

年平均高潮位(H.W.L.)から年平均低潮位(L.W.L.)まで及びそれに続く極浅海域(L.W.L.-1mまで)

(2) 沖合浅場

年平均低潮位(L.W.L.)-1~-10m程度の沿岸海域

※瀬戸内海での補償深度と小型機船底曳網漁業の操業実態などを加味して、概ね水深10mまでとした。

(3) 沖合深場

沖合浅場よりも深い年平均低潮位(L.W.L.)-10m以深の沿岸海域

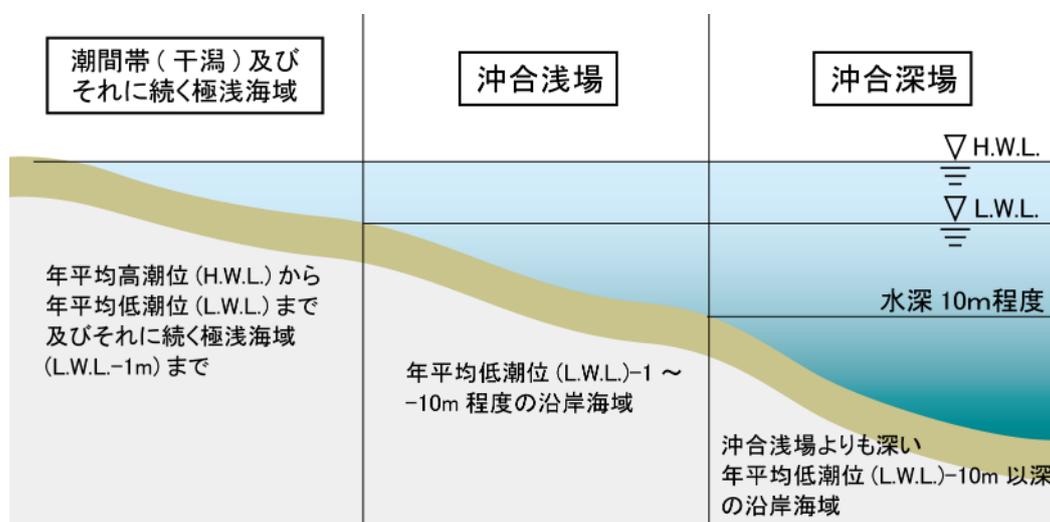


図 4-1 ガイドラインにおける海域分類の定義

使用するかき殻は、表 4-1-1 に示す品質管理基準に適合したものとする。また、使用するかき殻の形状は、表 4-1-2 に示すとおり、用途や期待される効果等に合わせて選定する。

表 4-1-1 かき殻の品質管理基準

項目	基準値等	根拠
COD (アルカリ性法)	20mg/g 乾泥以下	「水産用水基準 第8版(2018年版)」(平成30年8月、社団法人日本水産資源保護協会)
硫化物	0.2mg/g 乾泥以下	
ノルマルヘキサン抽出物	0.1%以下	
付着物	一定期間海中に堆積し、表面に付着した身肉の残滓や付着生物が除去されていること	-
夾雑物	金属類、プラスチック類、ゴム類等の夾雑物が混入していないこと	-

表 4-1-2 本ガイドラインと広島県のかき殻及びかき殻洗浄残渣等の処理要領におけるかき殻の形状について

形状	用途・期待される効果				実証試験で使用したかき殻の形状		
	増殖場		底質改善		増殖場の 実証試験	底質改善の 実証試験	底質改善の 実証試験 (かき殻は 20 mm 選別)
	稚魚・稚ナマコの隠れ場	餌料生物の培養効果	底生生物の培養効果 (かき養殖漁場) (餌料培養、生物攪拌)	硫化物イオンの吸着効果			
かき殻 (全形) (※1)	○	○	△ (漁業調整)	△	●	● (※2)	
破砕かき殻 (※1)	△ (大き目)	○	△ (漁業調整)	○	●	●	●
洗浄残渣 (※1)		○	○	○	●	●	●

※1：かき殻及びかき殻洗浄残渣等の処理要領（広島県 昭和 55 年 10 月 1 日制定）

※2：かき殻を破砕して使用

※3：いずれの場合においても、細粒分含有率は 5%未満に調整したものを使用する

4-2 海域分類ごとに考えられる増殖場造成

(1) 潮間帯(干潟)から極浅海域での整備

1) 対象とする海域条件

本県では、水産生物の餌料生物量の増大や生息適地の拡大及び環境改善を通じて、海域全体の生産力の底上げを目指して増殖場造成事業等を実施している。

潮間帯から極浅海域は、多くの水産生物の産卵場、餌場、育成場等として利用されているが、高度経済成長期の沿岸開発により環境は急激に悪化した。

さらに、近年の環境変化、特に夏季の高水温と異常気象による極端な降水と陸水からの懸濁物の影響も強く受けている。

これらのことから、極浅海域は水産資源の涵養の場としての機能が著しく低下しており、良好な環境の保全や保護、餌料環境や底質等の生息環境の改善等が課題となっている。

2) 漁場整備効果

潮間帯(干潟)から極浅海域は、潮間帯から藻場上端付近を含む範囲で、底質は砂質・砂泥質及び岩礁である。

この範囲は生物生産の場として重要であり、干潟のアサリなどの二枚貝の幼生着底と生産の場であるとともに、水産上重要な種であるマナマコの着底の場である。

海底にかき殻を敷設することで、かき殻の空隙が生物の隠れ家を提供し、新たな生物生息環境が創出され、底生生物量と生物種が増加し、対象海域における水産生物の餌料生物量の増大や生息適地の拡大が期待される。また、底質環境の改善によるアサリ等の二枚貝類の生息環境の創出となる。

マナマコの幼生は、主に水深 5m までの浅海域に着底することが知られている。さらに、着定基質としてのかき殻の効果は知られており、敷設することによってマナマコの浮遊幼生着底と成長後の漁獲が期待される。

その他、かき殻の表面はフジツボ類や、その他生物の付着基質として機能するとともに、隙間は小型甲殻類や多毛類の生息の場として機能する。

3) 現状との比較

県下の潮間帯(干潟)から極浅海域は、護岸整備、埋め立て等によって消失、あるいは大きく規模を縮小している。

現状は、海底のほとんどは陸から続く小規模な岩盤と周辺の砂地、砂泥で構成されている。

このことから、この範囲の生産性はほぼない状態からの改善となる。

4) 課題と対応策

潮間帯(干潟)から極浅海域は波浪条件が厳しく、移動しやすいかき殻の利用は海域によって制限され、内湾の静穏な海域にのみ適用が可能である。

実施に際しては、かき殻の安定性の評価と敷設するかき殻の性状について、詳細に検討することが必要である。

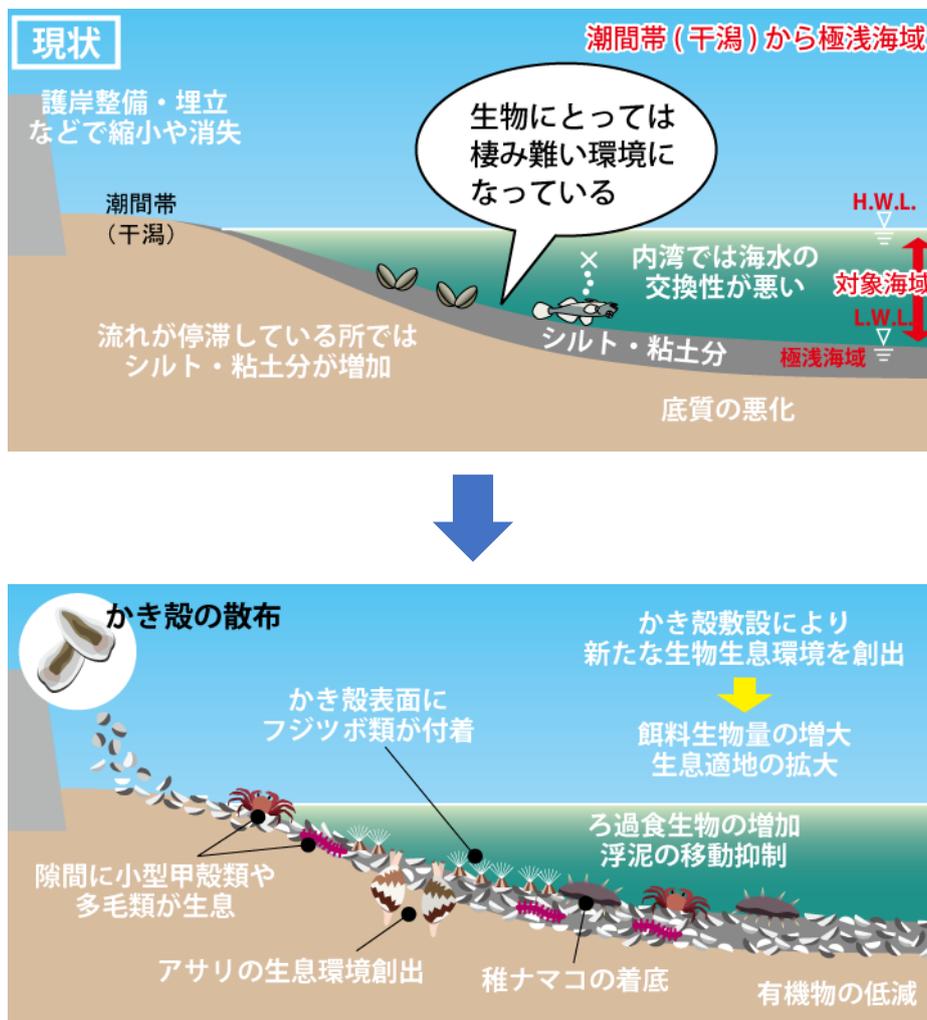


図 4-2-1 増殖場造成による漁場整備効果 (潮間帯(干潟)から極浅海域)

表 4-2-1 増殖場造成効果 (潮間帯(干潟)から極浅海域)

期待される効果	
底質改良	有機物の低減
水質浄化	底質改良による直上水の浄化
	ろ過食生物の増加
	浮泥の移動抑制
増殖効果	底生生物量と生物種の増加
	水産有用種の餌料培養
	着底稚ナマコの増加

(2) 沖合浅場海域での整備

1) 対象とする海域条件

本県では、この水深帯を藻場造成と魚類育成を目的とした主要な増殖場造成実施水深帯として位置づけ、多くの施設が設置されている。

近年の環境変化、特に夏季の高水温と異常気象による極端な降水と陸水からの懸濁物の増加による影響で、沖合浅場海域の生物相は極浅海域同様ダメージを受け、水産資源の涵養の場としての機能が著しく低下している。

このことから沖合浅場の海域環境の改善と有効利用は、危急の課題となっている。

2) 漁場整備効果

沖合浅場は、極浅海域から続く水深 10m程度までの範囲である。

沖合浅場は、増殖場の主要な水深帯であり、対象は海藻類と藻場を生息場とする魚類等の水産生物である。

海底にかき殻を敷設することで、かき殻の空隙が生物の隠れ家を提供し、新たな生物生息環境が創出され、底生生物量と生物種が増加し、対象海域における餌料生物量の増大や生息適地の拡大など、新たな餌料培養基質としての活用が期待される。また、底泥の巻き上げや海底付近の濁りが、かき殻の空隙に生息するろ過食生物によって抑制されることで、透明度の向上が期待され、この効果によって海藻類に必要な光環境の改善が期待される。

さらに、敷設したかき殻に石材等を設置することで、極浅海域に着底したマナマコの生息の場、夏眠の場となることや、魚類等の蝟集効果が期待される。

3) 現状との比較

沖合浅場は、底質が砂泥～軟泥であり、かき殻の敷設によって生物の生産性は劇的に向上すると思われる。

特に、極浅海域において着底したマナマコの幼生は、成長に従い浅場から深場へと移動する。沖合浅場はこれらのマナマコの成長の場として期待される。

4) 課題と対応策

極浅海域同様、沖合浅場は海域によって波浪条件が厳しく、移動しやすいかき殻の利用は海域によって制限される。

実施に際しては、かき殻の安定性の評価と敷設するかき殻の性状について、詳細に検討することが必要で、流動環境や生息環境を改善する対象種によって、使用するかき殻の性状を選択する。

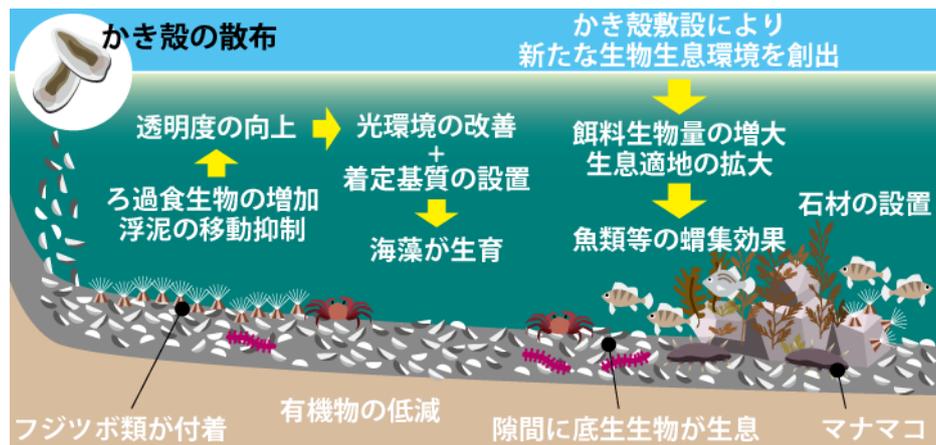
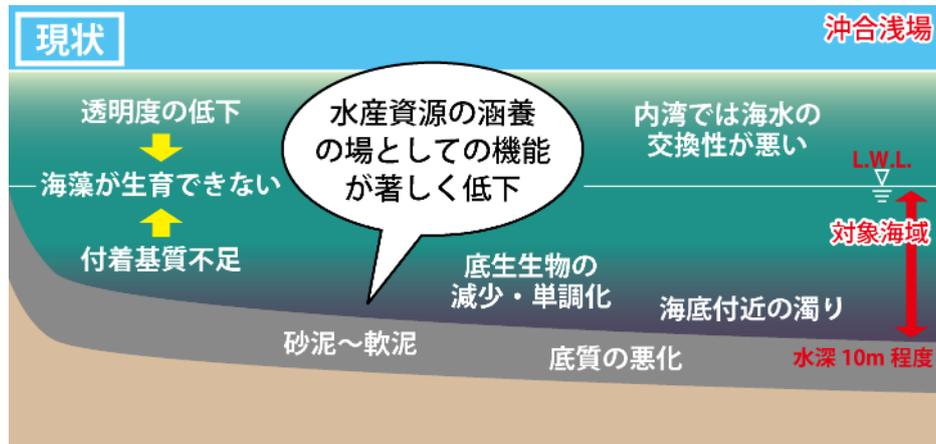


図 4-2-2 増殖場造成による漁場整備効果（沖合浅場海域）

表 4-2-2 増殖場造成効果（沖合浅場海域）

期待される効果	
底質改良	有機物の低減
水質浄化	底質改良による直上水の浄化
	ろ過生物の増加 浮泥の移動抑制
増殖効果	底生生物量と生物種の増加
	水産有用種の餌料培養
	海藻類の着定促進 マナマコの増加

(3) 沖合深場海域での整備

1) 対象とする海域条件

本県では、この水深帯を藻場造成によって増産された魚介類の成長と漁獲の場として位置づけ、多くの施設が設置されている。

近年の環境変化、特に夏季の高水温と異常気象による極端な降水と陸水からの懸濁物の増加による影響で、沖合浅場海域の生物相は極浅海域同様ダメージを受け、水産資源の涵養の場としての機能が著しく低下している。

このことから、沖合深場へのかき殻敷設は、減少傾向にある極浅海域と沖合浅場の資源を効率よく成長・漁獲する場として重要である。

2) 漁場整備効果

沖合深場は、沖合浅場から続く水深 10m 以深の範囲である。

沖合深場は、極浅海域から沖合浅場において着底・成長した、魚介類の成長と漁獲の場である。

海底にかき殻を敷設することで、かき殻の空隙が生物の隠れ家を提供し、新たな生物生息環境が創出され、底生生物量と生物種が増加し、対象海域における餌料生物量の増大や生息適地の拡大など、新たな餌料培養基質としての活用が期待される。また、底泥汚染の改善によって大水深帯の貧酸素軽減等の効果が期待される。さらに、敷設したかき殻に石材、増殖施設を設置することで、極浅海域に着底後、成長に伴い深所に移動したマナモコの生息の場、夏眠の場となることや、魚類等の蛸集効果が期待される。

3) 現状との比較

沖合深場は、潮汐流の激しい場を除き、流動環境は静穏であり底質は泥が多い砂泥から軟泥で単調な底質帯であることが多い。そこに、かき殻を敷設することによって生物の生産性は劇的に向上することが期待される。

4) 課題と対応策

沖合深場は、潮汐流が強い場所を除き、流動環境は静穏である。

実施に際しては、潮流に伴う流動環境に配慮するとともに、小型機船底びき網漁業等で利用されている海域と重なるため、かき殻の敷設にあたっては漁業操業との調整が必要となる。

かき殻のみの場合は、かき殻の流失に対する安定性の確保が条件となり、かき殻上部への増殖施設の設置を伴う場合は滑動、転倒、埋没、石材設置の場合は安定質量の確保と沈下の可能性について検討することが条件となる。

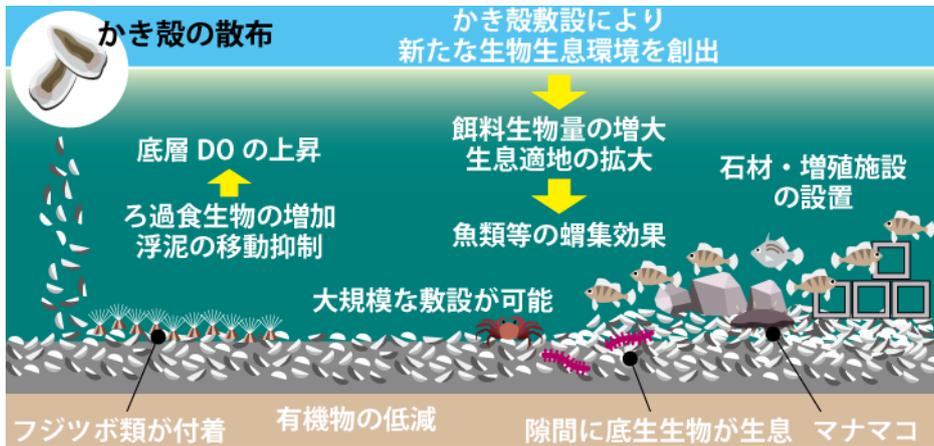
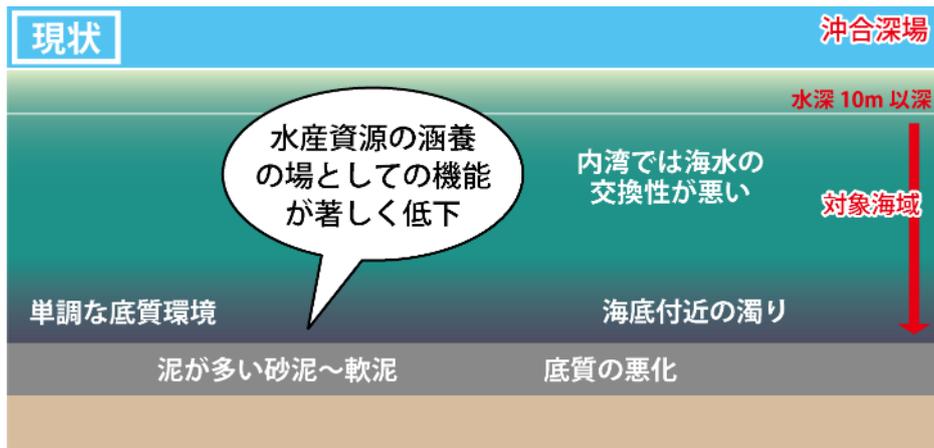


図 4-2-3 増殖場造成による漁場整備効果（沖合深場海域）

表 4-2-3 増殖場造成効果（沖合深場海域）

期待される効果	
底質改良	有機物の低減
水質浄化	底質改良による直上水の浄化
	ろ過生物の増加 浮泥の移動抑制
増殖効果	底生生物量と生物種の増加
	水産有用種の餌料培養
	マナマコの増加

4-3 海域分類ごとに考えられる底質改善

(1) 海域分類の考え方

1) 潮間帯(干潟)から極浅海域における底質改善

潮間帯(干潟)から極浅海域は、潮間帯から藻場上端付近を含む範囲で、底質は砂質・砂泥質及び岩礁である。

本県の干潟部の静穏な海域は、かき杭打垂下式漁場として利用されていることが多い。

これらの干潟部は、近年、有機物の堆積が進んでおり、硫化水素の発生により生物への影響が懸念されている。

かき殻の敷設は、硫化水素を筆頭にした有害物質の除去などの底質改善効果があり、底質環境の改善とともに多種多様な底生生物の生物量が増加し、増加した底生生物による攪拌作用(バイオターベーション)の活性化により堆積物の除去が促進され、更なる底質改善効果の持続が期待される。

施工方法については、流動環境にあわせたものが基本となるが、砂質の干潟ではかき殻を漉き込むことで流失を抑えることが可能である。

2) 沖合浅場における底質改善

沖合浅場は、極浅海域から続く水深 10m程度までの範囲であり、考え方は極浅海域と同様である。

対象となる重点的な海域としては、近年、底質悪化によって発生する貧酸素の被害を受けているかき筏漁場を想定する。

かき筏漁場は、波浪の影響を回避するため、比較的静穏な海域に位置しているが、その地理的要因から、養殖されているかきの排泄物が筏下に溜りやすく、分解されにくい有機物の堆積や多量の有機物を分解する過程で底層に貧酸素水塊が発生している。

かき殻の敷設は、硫化水素を筆頭にした有害物質の除去などの底質改善効果があり、底質環境の改善とともに多種多様な底生生物の生物量が増加し、増加した底生生物による攪拌作用(バイオターベーション)の活性化により堆積物の除去が促進され、更なる底質改善効果の持続が期待される。

3) 沖合深場における底質改善

沖合深場は、沖合浅場から続く水深 10m以深の範囲で、かき筏漁場の主要な海域であり、考え方は極浅海域及び沖合浅場と同様である。

かき殻の敷設は、硫化水素を筆頭にした有害物質の除去などの底質改善効果があり、底質環境の改善とともに多種多様な底生生物の生物量が増加し、増加した底生生物による攪拌作用(バイオターベーション)の活性化により堆積物の除去が促進され、更なる底質改善効果の持続が期待される。

4) 干潟造成における底質改善

干潟造成へのかき殻の活用への考え方は、潮間帯から極浅海域での底質改善と同様で、粒度の粗粒化による透水性の向上や、硫化水素の発生抑制及び有機物の低減などによる底質改善が期待される。また、かき殻による新たな生物生息環境の創出により、餌料生物量の増大や生息適地の拡大も期待される。

5) かき殻による底質改善効果

かき堆積場に海中保管されているかき殻を還元的な底泥に対して混ぜ込むことによる硫化水素の除去効果を明らかにするため、広島県立総合技術研究所水産海洋技術センター及び広島県農林水産局水産課において、室内実験を実施したところ、間隙水中に含まれる硫化物イオンの大半はかき殻の吸着作用によって除去され、吸着能の多寡はかき殻のサイズによって異なることが推察された。

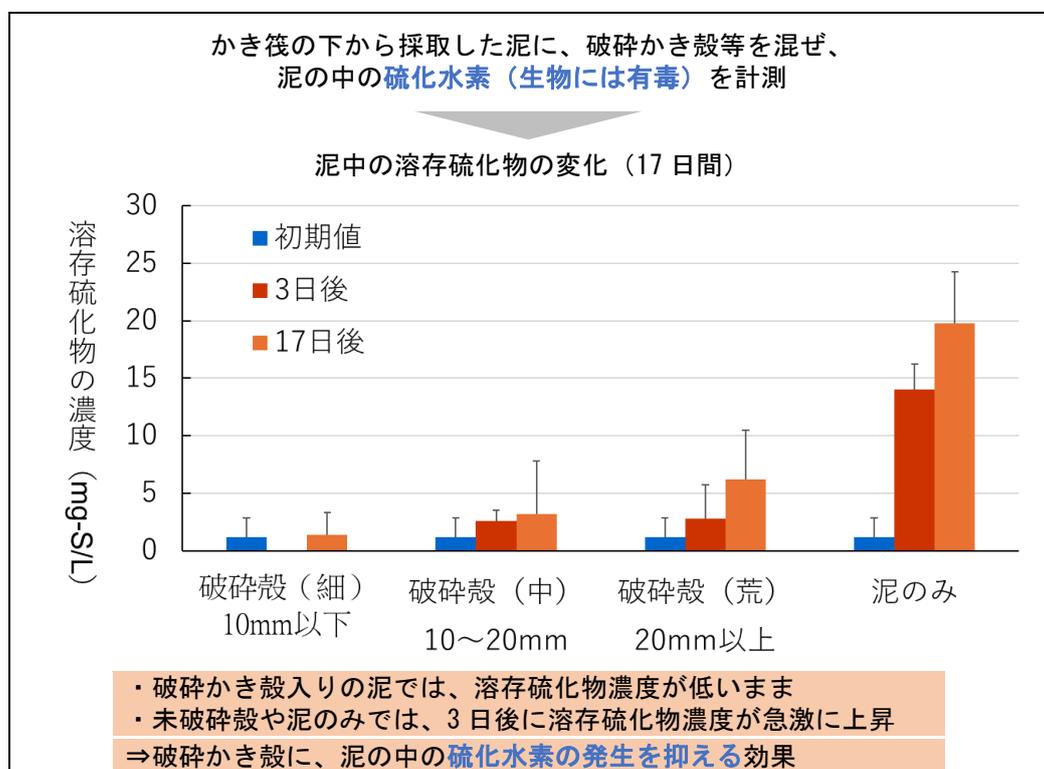


図 4-3-1 破碎かき殻による溶存硫化物濃度の測定

出典) 岩本有司・水野健一郎・川口修・高辻英之・原本真二・塩山恭平:海中保管した牡蠣殻を活用した沿岸漁場底泥からの硫化水素の除去. 日本水産学会誌, 91 (3), 232-234, 2025.

《活用事例》令和5年度尾道系崎港環境調査
 (令和6年3月、国土交通省中国地方整備局 広島港湾・空港整備事務所)

●調査の目的

浅場（藻場・干潟）の整備にあたり、表層の覆砂材は土木工事等にも用いられる細粒分の多い砂を用いているが、干潟造成後においては経年的な変化により砂が締め固まり、アサリ等の二枚貝の生育・生息環境として課題が残る。そこで、底質改善を目的として牡蠣殻材を用いた現地実証実験を行うこととなった。

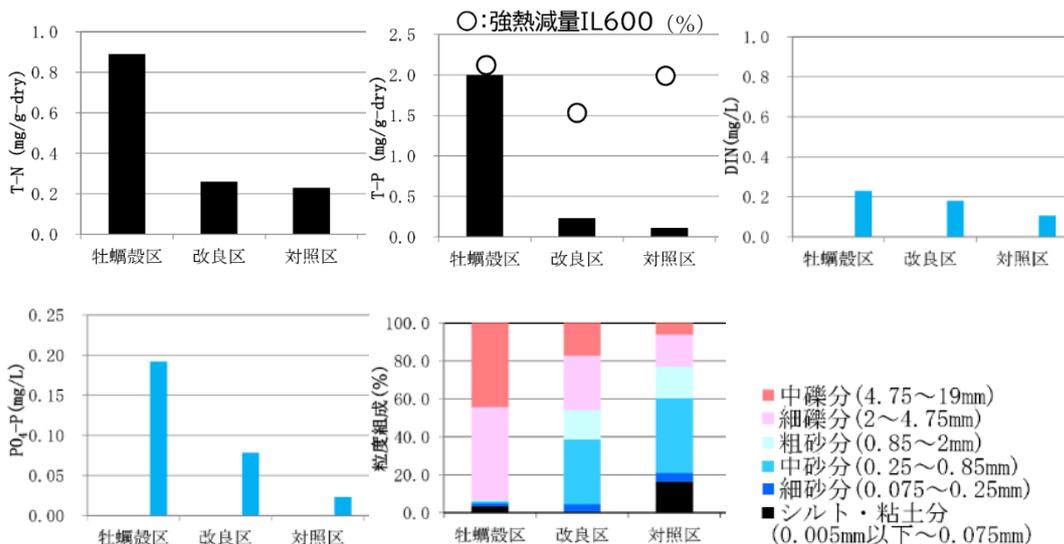


調査場所（百島地区造成干潟：対象干潟の覆砂材が現存している箇所）

調査の概要

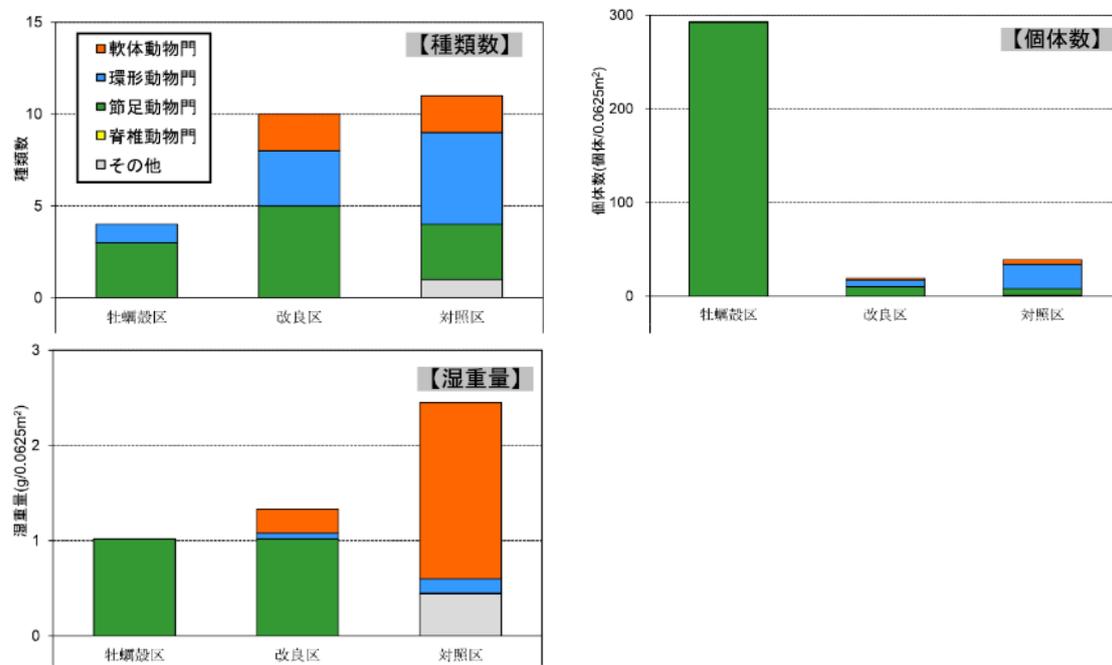
牡蠣殻材の投入・施工日	令和5年10月25-26日
モニタリング調査日	令和5年12月2日(約1カ月後)
牡蠣殻は、熱風処理後、4~8mm程度に破碎した材料を使用	
牡蠣殻区	覆砂材を牡蠣殻に置換した実験区
改良区	両材料を同程度の容量で攪拌して混ぜ込んだ実験区
対照区	牡蠣殻を散布しない実験区

●底質結果



・牡蠣殻区は、他地区と比較してT-N、T-P、DIN、PO4-Pが高くなる傾向
 →有機物量の指標である強熱減量は地区間の違いがほとんどないことから、熱風処理した牡蠣殻に吸着・残存した無機態窒素やリンの影響と考えられた。

●干潟底生生物結果



- ・種類数は、牡蠣殻区4種、改良区10種、対照区11種で、牡蠣殻区がやや少ない傾向
- ・個体数は、牡蠣殻区が顕著に多い
→粗粒材料の空隙などに生息する節足動物のイソコツブムシ属が多く確認されたため
- ・湿重量は、対照区の方がやや多い
→個体重量の大きい軟体動物のホソウミニナが確認された
- ・牡蠣殻材の散布・混在地区で節足動物門が大きく増加し、空隙を好むカニ等の甲殻類の増加も確認された。
- ・粗粒材である牡蠣殻を散布・混在したことで、在来の砂質干潟とは異なる多様な干潟生物環境が形成される可能性が示唆された。

(2) 底質改善手法の考え方

瀬戸内海の水質は、瀬戸内海環境保全特別措置法等の汚濁物質削減の取り組みにより、透明度等の水質は改善された。一方海底では、多くの有機物が堆積し、有機物が分解する過程で生物に有害な硫化水素が発生するなど、魚類等の餌となる底生生物が生育しにくい環境となっている事例が確認されている。

このような底質環境に、かき殻を散布することで、粒度を粗粒化し透水性を向上させ、硫化水素の発生抑制及び有機物の低減等による底質改善や、底生生物の生息環境の改善による生物量の増加などによる生息種の多様化等の効果が得られることが期待される。さらには底生生物による攪拌作用による底質改善や、アサリ等の二枚貝類などのろ過食生物による水質浄化も期待される。

(3) 課題と問題点

底質改善効果を持続させるためには、定期的な浮泥除去が必要である。

海域の流れや周辺の底質状況により浮泥の堆積状況は異なるが、岡山県で実施した沖合深場へのかき殻散布では、3年後から浮泥の堆積により効果が低減している。

定期的な浮泥除去には海底耕うんが有効で、海底耕うんを実施することで海底の攪拌による底質改善効果も期待される。

(4) 対象とする海域条件

県下の潮間帯及び極浅海域は、小規模な岩礁と砂地、砂泥で構成されている。

底質改善は、周辺の環境や海水の交換性等により違いはみられるが、対象とする海域によって、使用するかき殻の形状が異なってくる。

潮間帯から極浅海域は、波浪による影響が大きいため、流動環境を勘案したうえで、破碎かき殻や洗浄残渣の利用が想定される。また、粒径が細かいかき殻を使用することで、アサリ等の二枚貝の生息環境の底質改良材としての活用も見込まれる。

沖合浅場及び沖合深場で使用するかき殻の形状は、潮流速による制限及び漁業操業実態を勘案する必要がある。

鋤き込み（海底耕うん）

かき殻散布のみでも、一定の効果は得られるが、鋤き込みを実施することで、更なる効果が期待される。

干潮時に干上がる海域では、ミキシングフォークを付けたバックホウや人力による鋤き込み、沖合浅場や沖合深場等では海底耕うん等による鋤き込みを行う。

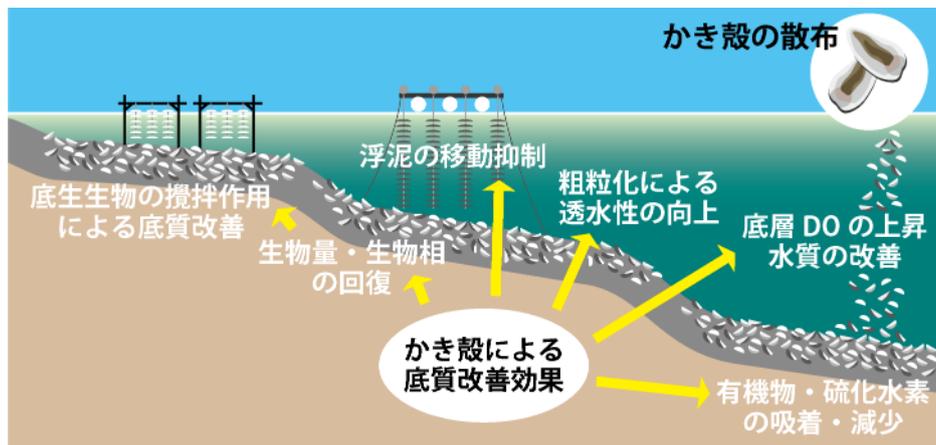
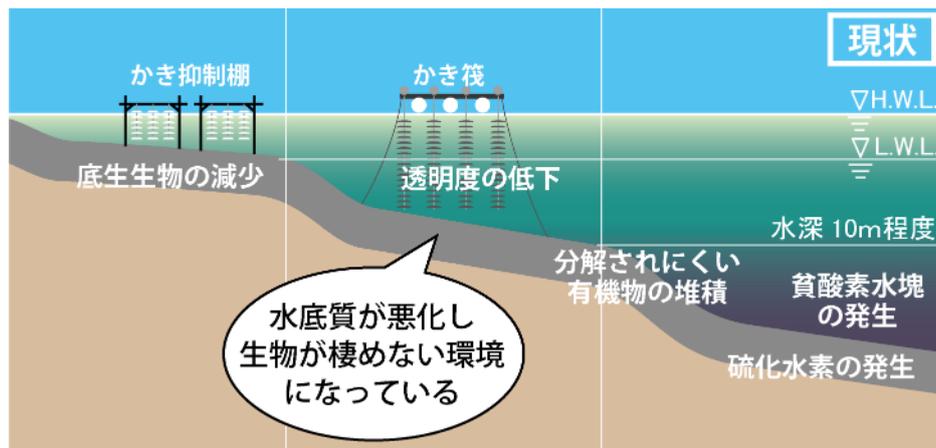


図 4-3-2 底質改善効果

表 4-3 底質改善効果

期待される効果	
底質改善	底質の硫化水素濃度の低減 有機物の低減
水質浄化	底層の DO の上昇 水質改善
生物量・生物相の回復	生物の種類・生息量の増加

4-4 安定性について

(1) 評価の方針

1) かき殻の安定性評価

かき殻を用いた増殖場を計画する場合、波浪及び流れに対するかき殻の安定性を評価した上で、計画地の選定及び増殖場の諸元を決定することが望ましい。

流速に対する安定性の評価は「貝殻片挙動モデル」(水産庁、H19)を用いてよい。また、波浪に対するかき殻の安定性の評価については有効な手法が見い出せていないため、「波浪(波圧等)の影響がほとんどない」海域環境を選定する必要がある。

これまで、かき殻を対象とした貝殻の安定性の評価手法は整理されていなかったため、広島県では、かき殻を用いた水理模型実験により検証を行った。

その結果、流速に対しては、先に報告されている「貝殻片挙動モデル」を用いて評価することが可能であると判断された。

ここで、「波浪(波圧等)の影響がほとんどない」海域環境とは、「漁港・漁場の施設的设计参考図書:2023年版、(公社)全国漁港漁場協会 P101」を参照して-3.0H以深とする(Hは有義波高 $H_{1/3}$)。

マウンド天端の水深	適用式
-1.5H以浅	ハドソン公式を使用
-1.5H~-2.5H [$T > 10s$ にあつては-1.5H~-3.0H]	ハドソン公式での所要質量 $\times(1/10\sim 1/20)$ とプレブナー・ドネリー式での所要質量のうち大きい方を適用
-2.5H以深 [$T > 10s$ にあつては-3.0H以深]	基礎部に作用する波の影響が小さくなることから、一般には被覆材を接地していないが、波や流れ等の状況が特殊な個所においてはプレブナー・ドネリー式により算定

ただし、表中のHはブロック等の法先水深における進行波としての有義波高($H_{1/3}$)である。

出典：「漁港・漁場の施設的设计参考図書:2023年版、(公社)全国漁港漁場協会 P101」

2) その他の評価方法

貝殻片挙動モデルのほかに、漁港・漁場の設計で用いられている波浪及び流れに対する安定性評価手法がいくつか存在する。それぞれの評価方法について、水理模型実験を行い、検証した結果を表 4-4-1 及び表 4-4-2 に示す。

なお、詳細な検討結果は「参考資料 3」に示す。

表 4-4-1 波に対しての評価方法

算定式	計算に必要な項目	評価結果	適用性
ハドソン式	<ul style="list-style-type: none"> かき殻の質量 有義波高 かき殻の密度 海水の密度 法面の勾配 	<ul style="list-style-type: none"> ●安定数$K_D=800$を得たが、水深40cm、波高($H_{1/3}$)17cm未満、勾配1:1という限られた条件である。 ●波(波圧等)の影響を受ける-3.0H以浅で施工するためには、大型の実験水槽を用いて更に波高および水深を大きくした水理模型実験を行い、適用性を検証する必要がある。 	×
プレブナー・ドネリー式			
表層移動限界水深	<ul style="list-style-type: none"> 沖波波長 換算沖波波高 有義波長 有義波高 かき殻の粒径 	<ul style="list-style-type: none"> ●水深40cm、波高($H_{1/3}$)17cm未満の条件では、補正係数を用いて評価が可能である。 ●波(波圧等)の影響を受ける-3.0H以浅で施工するためには、大型の実験水槽を用いて更に波高および水深を大きくした水理模型実験を行い、適用性を検証する必要がある。 	△
完全移動限界水深	<ul style="list-style-type: none"> かき殻と設置基盤との摩擦係数 かき殻の密度 海水の密度 重力加速度 有義波周期 水深 現地波長 構造物の図心の高さ 		
着底基質の安定質量 (波が卓越する領域)			

表 4-4-1 流れに対しての評価方法

算定式	計算に必要な項目	評価結果	適用性
イスパッシュ式	<ul style="list-style-type: none"> かき殻の質量 かき殻の密度 流速 重力加速度 イスパッシュの定数 かき殻の海水に対する比重 法面の勾配 	<ul style="list-style-type: none"> ●イスパッシュ式は、被覆石・被覆ブロックにおいて法面勾配を緩くした場合(傾斜角$<45^\circ$)に適用できる式であり、かき殻への適用は難しい。 参考:法面傾斜角が、20mm以下[※]では$\theta=2.25^\circ$、未選別[※]では$\theta=21.80^\circ$で安定する結果となった。 	×
着底基質の安定質量 (流れが卓越する領域)	<ul style="list-style-type: none"> 流速 かき殻の沈降速度 海中のかき殻の比重 重力加速度 かき殻の粒径 	<ul style="list-style-type: none"> ●実験の条件では、補正係数を用いて評価が可能である。しかし、実験の水深条件は現地に比べて小さすぎる。 ●今後、大型の実験水槽を用いて、更に水深を大きくした水理模型実験を行うことにより、適用性の検証を評価することが可能である。 	△
貝殻片挙動モデル	<ul style="list-style-type: none"> 流速 かき殻の沈降速度 海中のかき殻の比重 重力加速度 かき殻の粒径 	<ul style="list-style-type: none"> ●かき殻特有の物性値をもとに「貝殻片挙動モデル」の評価式で安定性を評価する場合、かなり安全側の評価になることが分かった。 ●かき殻特有の物性値をもとに実験を行った結果、uを直接計測して用いる場合、$(1 \leq u/w \leq 5)$であれば判定条件を見直して評価することが可能と考える。 	○

※参考資料 3 にて下記のように定義している。

・20 mm以下…洗浄残渣を含む、20 mm以下の破碎かき殻 ・未選別…洗浄残渣を含む、未選別の破碎かき殻

(2) 安定性の評価

3) 貝殻片挙動モデル

貝殻片挙動モデルは「漁場造成における水産系副産物（貝殻）リサイクルガイドライン」（平成19年3月、水産庁漁港漁場整備部）に示されている、貝殻の安定性に関する評価手法である。なお、貝殻片挙動モデルは、ホタテを対象とした実験により導かれている。

① 評価式

以下に貝殻片挙動モデルの評価式を示す。本ガイドラインでは、かき殻を対象とした水理模型実験の結果を基に、かき殻特有の物性等を用いてよいものとした。

u は直接計測して用いるのが望ましいが、流速値がない場合は波の条件から求めてもよい。

貝殻片挙動モデル

・ 波浪流速振幅 u

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh(kh)}$$

・ 起動振幅 a_m

$$a_m = \frac{H}{2} \cdot \frac{1}{\sinh(kh)}$$

$$\left(\begin{array}{l} H : \text{有義波高 (m)} \\ T : \text{周期 (s)} \\ k : \text{波数} \\ h : \text{水深 (m)} \end{array} \right)$$

貝殻片挙動モデル

・ 貝殻片の沈降速度 w

$$w = \sqrt{(s-1)gd} \times \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{(s-1)gd^3}} - \sqrt{\frac{36v^2}{(s-1)gd^3}} \right)$$

・ シールズ数 Ψ

$$\Psi = \frac{fu^2}{2(s-1)gd}$$

$$\left(\begin{array}{l} s : \text{貝殻比重 (t/m}^3\text{)} \\ g : \text{重力加速度 (m/s}^2\text{)} \\ d : \text{貝殻粒径 (m)} \\ v : \text{動粘性係数 (0.01cm}^2\text{/s)} \end{array} \right)$$

⇒ここで、貝殻比重 s は「3-4 物理的特性」表3-4-2が参考となるが、その都度室内土質試験を行い、確認することが望ましい。沈降速度 w はかき殻を対象とした実験で得られた $w = 0.233$ (m/s)（未選別※）を用いてよい。

※参考資料3にて下記のように定義している。

- ・ 20mm以下…洗浄残渣を含む、20mm以下の破碎かき殻
- ・ 未選別…洗浄残渣を含む、未選別の破碎かき殻

・ ジョンソンの摩耗係数 f

$$\frac{a_m}{d} \geq 1.57 \quad f = \exp\left(-5.977 + 5.213 \left(\frac{a_m}{d}\right)^{-0.194}\right)$$

$$\frac{a_m}{d} < 1.57 \quad f = 0.30$$

⇒ここで、現地で計測した流速を用いる場合は、ジョンソンの摩擦係数 f は安全側を考慮して $f = 0.30$ を用いてよい。

上記で算出した流速/沈降速度比 u/w と、表4-4-3、図4-4-1を用いて安定性の評価を行う。

表 0-2 境界を表す判定条件 (貝殻片挙動モデル)

u/w が	$e^{18.06} \Psi^{3.16}$ 以上	ならば	不動 (0型)
	$e^{6.96} \Psi^{1.51} \sim e^{18.06} \Psi^{3.16}$		微動 (I型)
	$e^{6.71} \Psi^{1.67} \sim e^{6.96} \Psi^{1.51}$		転動 (II型)
	$e^{4.77} \Psi^{1.33} \sim e^{6.71} \Psi^{1.67}$		集積・埋没 (III型)
	$e^{4.77} \Psi^{1.33}$ 以下		流失 (IV型)

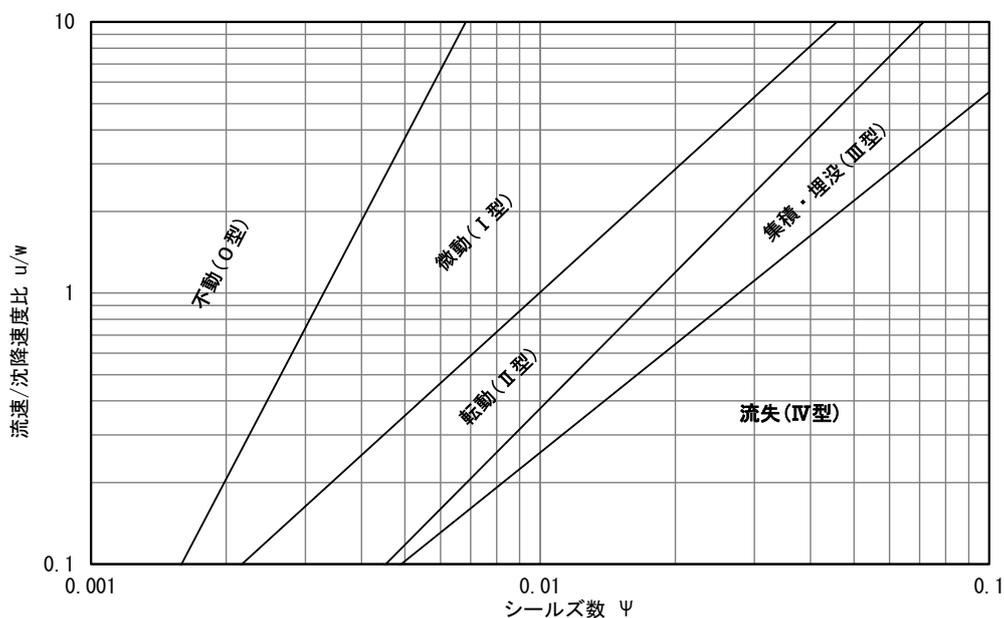


図 4-4-1 水槽実験からの判定条件 (貝殻片挙動モデル)

表 4-4-3 貝殻片挙動モデルにおける状態のタイプ区分（貝殻片挙動モデル）

タイプ	状態
不動(Ⅰ型)	貝殻片は動揺せず、安定している。
微動(Ⅱ型)	一部の貝殻片は動揺するが、移動は認められない。 この状態は、砂粒子の挙動区分における初期移動に該当すると考えられる。
転動(Ⅲ型)	ほとんどの貝殻片が動揺するとともに、一部の貝殻片（半数以下）が底面上を転動する。 この状態は、砂粒子の挙動区分における掃流移動に該当すると考えられる。
集積・埋没 (Ⅳ型)	一部の貝殻片が転動を伴いながら底面を浮遊する。また、ほとんどの貝殻片が直立状態で集積し、パッチを形成する。 この状態は、砂粒子の挙動区分における浮遊移動及び砂漣形成に相当すると考えられる。
流失(Ⅴ型)	全ての貝殻片が底面から浮遊した状態で移動し、パッチが消滅する。 この状態は、砂粒子の挙動区分におけるシートフローに相当すると考えられる。

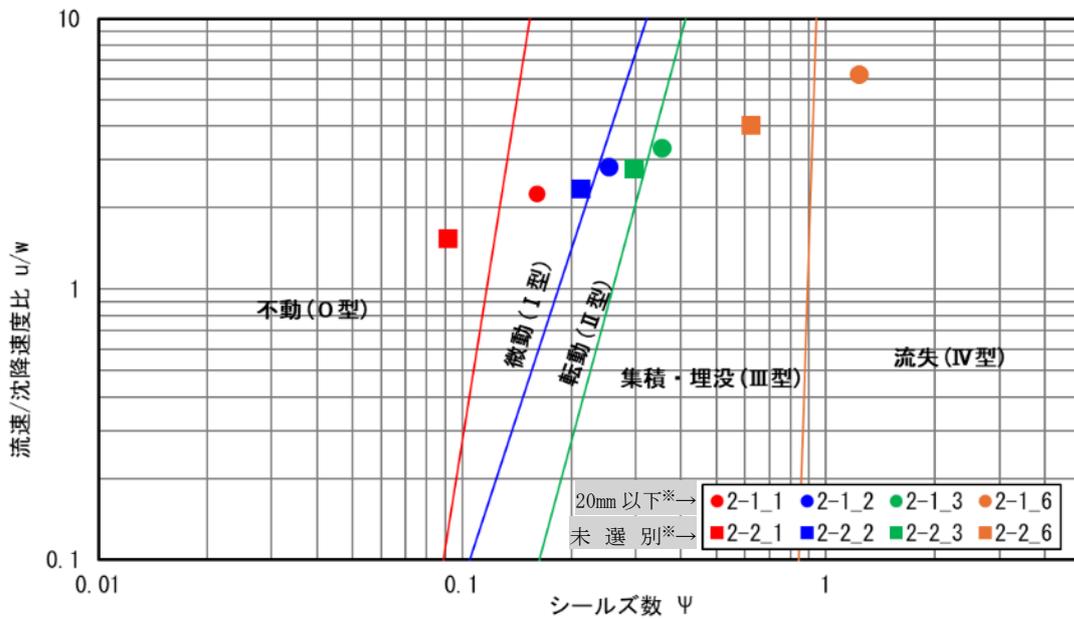
② $1 \leq u/w \leq 5$ の場合の判定条件

貝殻片挙動モデルでは図 4-4-1 の判定条件図による安定性の評価を行なっているが、今回行なったかき殻を対象とした水理模型実験による評価と、貝殻片挙動モデルの判定条件図による評価にかなり差が生じた。

そこで、実験で確認できた $1 \leq u/w \leq 5$ の範囲においては、実験結果を基に判定条件を見直した図 4-4-2 を用いてもよいものとした。

表 4-4-4 境界を表す方程式の前後対比表

境界	方程式 (変更前)	方程式 (変更後)
0 型 - I 型	$u/w = e^{18.06} \psi^{3.16}$	$u/w = e^{18.06} \psi^{8.41}$
I 型 - II 型	$u/w = e^{6.96} \psi^{1.51}$	$u/w = e^{6.96} \psi^{4.11}$
II 型 - III 型	$u/w = e^{6.71} \psi^{1.67}$	$u/w = e^{6.71} \psi^{4.97}$
III 型 - IV 型	$u/w = e^{4.77} \psi^{1.33}$	$u/w = e^{4.77} \psi^{41.33}$



※参考資料 3 にて下記のように定義している。

- ・ 20 mm以下…洗浄残渣を含む、20 mm以下の破砕かき殻
- ・ 未選別…洗浄残渣を含む、未選別の破砕かき殻

図 4-4-2 安定性の判定条件 (変更後)

5. 費用対効果

水産庁の水産基盤整備事業では、ストック効果（施設の供用に伴って発現する効果）が費用対効果分析の対象である。

岡山県のガイドラインでは、かき殻散布効果は25年以上とされている。

一般的に行われている投石や、増殖施設を伴う増殖場の耐用年数は30年であり、上記事例より、かき殻散布は増殖場造成事業の一部として費用対効果の分析に供する。

以下は、水産庁漁港漁場整備部より刊行された「水産基盤整備事業費用対効果分析のガイドライン 令和6年6月」に示された項目である。

貨幣価値換算が可能な大項目のうち、増殖場造成及び底質改善に関連すると思われる主な項目と具体的な内容を下線に示した。

5-1 漁港・漁場関係事業

(1) 周辺水域の高度利用と水産物の安定供給への貢献

●生産コストの削減（漁業者）

- ・ 出漁準備作業、海上操業の効率化
- ・ 航行時間の短縮、漁場探索時間の短縮
- ・ 操業の計画性の向上
- ・ 漁場の利用率の向上
- ・ 未利用漁場の利用化
- ・ 流通の円滑化、流通拠点の機能向上
- ・ 荒天時の安全停泊、安全航行の確保（海難事故・危険の減少等）
- ・ 水産業振興の阻害要因となっている厳しい自然条件の緩和、克服
- ・ 漁場維持管理時間の短縮（密漁監視時間、漁場保全作業時間、養殖施設の避難時間等短縮）
- ・ その他

●水質・底質の改善などによる生産コストの削減（漁業者）

●漁獲可能資源の維持培養（漁業者）

●漁場環境の改善、漁場面積の拡大等による生産量の増加（漁業者）

●水質・底質の改善などによる資源量・漁獲量の増大（漁業者）

●漁獲物の付加価値化（漁業者）

- ・ 水産物の加工の振興
- ・ 活魚流通等高品質化
- ・ その他

●：その全部または一部が貨幣換算可能な効果

●労働環境の改善・作業効率の向上（漁業者）

- つくり育てる漁業の推進
- 資源管理型漁業の推進
- 衛生管理の強化
- 生産体制の強化、安定化
- 労働意欲の向上

(2) 快適で活力ある漁港漁村の形成への貢献

●生活環境の改善（地域住民）

- ・生活物資、ライフラインの確保と利便性の向上
- ・海上交通の確保と利便性の向上
- ・生活の利便性、快適性の向上
- ・景観の向上
- ・憩い・余暇活動などの場の創出と交流の促進、コミュニティの醸成
- ・他施設利用の場合の移動時間の短縮
- ・災害及び災害不安の減少
- ・土地利用の拡大
- ・その他

●漁業外産業の創出（事業者）

- 生命・財産の保全防御（海岸保全等）（地域住民）
- 避難・救助・災害対策（自然災害、海難の未然防除、軽減、事後処理）
（当該地域及び背後地域の住民、遭難者）
- 漁業への新規参入（高齢者、女性を含む）の容易化
- 地域雇用創出
- 漁業協同組合の基盤強化、活性化

(3) ふれあい漁港空間の形成への貢献

- 地域文化の保全、継承（地域住民、訪問者）
- 市民にレクリエーションの場の提供（地域住民、訪問者）
- 地域の魚食文化の普及
- 漁業とレクリエーションの共存の促進
- 海の自然や漁業に関する市民の理解の増進

(4) 美しい海辺空間の保全と創造への貢献

- 藻場・干潟の造成、浚渫などによる自然環境の保全修復（地域住民・国民）
- その他自然環境の保全修復（地域住民、訪問者）
- 景観改善（地域住民、訪問者）

●：その全部または一部が貨幣換算可能な効果

5-2 漁村関係事業

(1) 快適で活力ある漁港漁村の形成への貢献

●生活環境の改善（地域住民）

- ・移動時間の短縮による利便性の向上
- ・既存施設維持管理の解消
- ・集落住民の共同作業の軽減
- ・衛生環境の向上
- ・未利用地の使用価値の増大等空間価値の向上

○宿泊施設など漁業外産業の集客能力の向上

●財産の保全防御（地域住民）

○環境美化意識の醸成と環境美化活動の促進

○生活上の安心感の増大（地域住民）

●地域文化の保全、継承（地域住民、国民）

●市民にレクリエーション(祭り・イベント等)の場の提供（地域住民、国民）

●景観・居住環境の向上

(2) 美しい海辺空間の保全と創造への貢献

●自然環境の保全修復（地域住民、国民）

(3) 周辺水域の高度利用と水産物の安定供給への貢献

●生産コストの削減（漁業者）

- ・運搬時間、移動時間の短縮
- ・漁獲物の荷傷みの減少
- ・海水取得経費などの漁業経費の削減

●漁獲可能資源の維持培養（漁業者）

- ・水質向上による資源量、漁獲量の維持増大

●漁獲物の付加価値化（漁業者）

- ・水産物の加工の振興
- ・水質向上による蓄養、種苗中間育成、養殖能力の向上

○生産上の安心感の増大（漁業者）

●：その全部または一部が貨幣換算可能な効果

なお、主な項目の内容と効果の考え方は「水産基盤整備事業費用対効果分析のガイドライン」に基づき、以下に示す。

5-3 水産物の生産性向上

(1) 水産物生産コストの削減効果

底質改善により、現在問題となっている漁場の貧酸素化が改善され、かき筏のかき生残率が向上することにより、筏1基あたりの収量が増加する。

効果のパラメーター

増加かき収量×加重平均単価

また、死殻率の減少によって、選別時間をかき剥きに転嫁することが可能となるため、生産効率の向上が期待できる。

効果のパラメーター

選別時間減少分に置き換わる単位時間当たりむき身生産量×加重平均単価

また、単位むき身あたりのかき殻が減少することにより、処理の手間が減少し、コスト削減に繋がる。

効果のパラメーター

単位むき身あたりに発生するかき殻の減少分処理費用

(2) 漁獲可能資源の維持・培養効果

増殖場周辺の海底の餌料生物増加によって環境収容力が増加し、漁獲対象魚介類の増加、漁獲増に繋がる。

効果のパラメーター

餌料生物増加分で収容できる魚介類重量×加重平均単価

5-4 漁業就業環境の向上

漁業就業者の労働環境改善効果

かき打ち作業の効率化（死殻の除去等作業の減少）によって、就業者の負担が軽減される。

効果のパラメーター

死殻選別時間の短縮による生産性向上に伴う待遇改善

5-5 地域産業の活性

漁業外産業への効果

高単価漁獲物の増加により、流通～販売における付加価値効果が期待される。

効果のパラメーター

高単価漁獲物増加分単価×手数料(率)

5-6 自然保全・文化の継承

自然環境保全・修復効果

増殖場造成に関しては、透明度の増加による海藻類の繁茂水深がより深くなり（面積の増加）、水質浄化機能の増加が期待される。

底質改善に関しては、前述のとおり、改善により漁獲物の増加が期待される。

効果のパラメーター

藻場の増加分による水質浄化効果

6. 海域に応じた計画・設計、施工方法、維持管理

6-1 増殖場造成

増殖場造成の計画・設計及び施工・維持管理のフローを図 6-1-1 に示した。

適地候補地となる海域は「波浪の影響がほとんどない」海域であるが、海域に応じたかき殻の安定性や規模・工法の設定等の計画・設計を行い、施工・維持管理を進めていく。

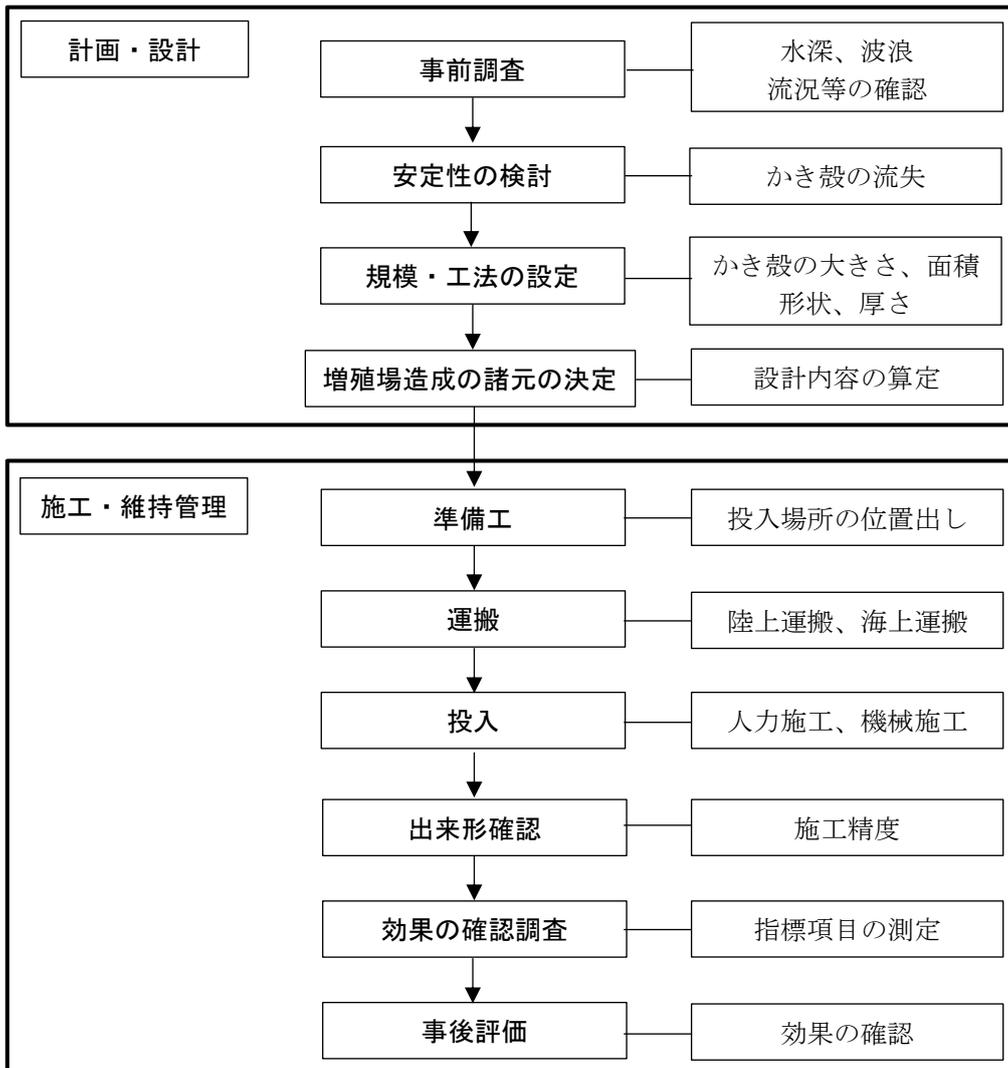


図 6-1-1 増殖場造成の計画・設計及び施工・維持管理のフロー図

(1) 事前準備

現地調査及び施工にあたっては、法律等に基づく許認可等の手続きが必要であり、事前に関係する官公庁、漁業協同組合等と時間的余裕を持って協議、手続きを行う。

- ・作業許可申請、作業届等 → 海上保安部、県、港湾管理者、漁港管理者
- ・特別採捕許可申請、特定水産動植物採捕許可申請 → 県水産課
- ・海域使用（占用）許可申請 → 県、港湾管理者、漁港管理者
- ・漁業操業区域における同意書 → 漁業権を有する漁業協同組合等

(2) 設計条件の調査・整理

増殖場造成の設計上必要となる項目について、既存資料調査及び現地調査を行い、それぞれの項目について整理し、必要な項目についてはシミュレーション等を行い、増殖場造成設計を行う。

表 6-1-1 設計条件の調査・整理項目

調査	項目
既存資料調査及び現地調査	水質、底質、海底地形、波浪、流速 等
かき殻の安定性の検討	波浪推算、潮流計算、かき殻の安定計算 等

(3) 使用するかき殻

後述の事例紹介（増殖場造成としての活用）で使用したかき殻と同等のもの

(4) 投入量

増殖場造成でのかき殻厚は、かき殻の安定性の評価と敷設するかき殻の性状について詳細に検討することが必要である。

参考撒布面積：10,000m³ → 100m×200m×厚さ 0.5m

(5) 施工方法

増殖場造成は、造成規模や現地条件、造成コストを考慮し、適切な施工方法を選定する必要がある。例としてガットバージ船による施工例を示した。

ガットバージ船による標準的な施工方法の概要は、以下のとおりである。

石材を設置する場合も、使用する石材規格により、クレーン船を使用するか、人力により投入設置するかを選定する。

かき殻積み込み 運搬 かき殻投入

汚濁防止膜

海底付近で投入

ガットバージ船

①準備工

かき殻を投入するにあたり、事前に海底地形を把握するため深浅測量を行う。また、以前に調べられた資料がある場合は、それを利用することもできる。

投入場所の位置出しは GPS を使用して行い、区域表示は旗竿等を基点及び区域境界に設置する。

②陸上運搬

陸上のかき殻集積場のかき殻を使用する場合には、トラック等により岸壁等の積み込み場所まで運搬する。

③海上運搬

岸壁等の積み込み場所に運搬されたかき殻を、ガットバージ船等で岸壁に接岸させた作業船に積み込む。なお、作業船は投入場所の水深、運搬数量、経済性等により、適切な規格のものを選定する。

海中のかき殻集積場のかき殻を使用する場合は、作業船のガット等により積み込んで運搬する。

④投入

かき殻の投入は、音響測深機やレッド等を用いて施工場所の水深確認や GPS 等により施工場所を測位しながら、偏りが生じないように投入場所をこまめに変えながら行う。

出来形管理の許容範囲は、計画区域に対して-5m以内とし、その他の事項については下記について配慮する。

- ・追加で船上検収を行うこととし、個別の高さ基準は設けない
- ・ただし、設置水深帯によっては、航行安全上、必要な水深を確保すること

図 6-1-2 ガットバージ船による施工方法の例

(6) 増殖場造成効果の確認方法

かき殻敷設後は、底生生物をはじめとした生物相の変遷をモニタリングにより検証する。また、効果を把握するためにも、敷設前の事前調査も実施しておく。

かき殻敷設による増殖場造成効果の確認のための調査内容は表 6-1-2 に示すとおりである。

表 6-1-2 増殖場造成効果の確認方法（事前・事後）

期待される効果		評価指標等	調査項目	調査方法
底質改良	生物量・生物相の変化	生物量・生物相の変化	底生生物（種類、個体数、湿重量、多様度数）	潜水土が表層かき殻または表層泥を採取し、分析
水質浄化	底質改良による水質の改善	DO 等の水質改善	水温、塩分、pH、酸化還元電位 (ORP)、化学的酸素要求量 (COD)、溶存酸素 (DO)	直上水を採水し、分析
	る過食生物の増加			
	浮泥の移動抑制	濁度の改善 沈降粒子量の減少	濁度、光量子量	多項目水質計で鉛直測定
増殖効果	底生生物量と生物種の増加	底生生物の種数 個体数の増加	底生生物（種類、個体数、湿重量、多様度数）	潜水土が表層かき殻または表層泥を採取し、分析
	水産有用種の餌料培養	魚類の餌料（小型甲殻類、多毛類等）の増加		
			有用魚種の出現数の増加	魚介類（種類、個体数、湿重量）
	海藻類の着定促進	着定基質への浮泥堆積の減少	浮泥厚さ、海藻の生育状況	潜水測定・観察
着底稚ナマコの増加	稚ナマコの増加	ナマコ調査	潜水観察・コブレット調査（冬季）	

(7) 留意点

かき殻の流速に対する安定計算を確認したうえで、漁船漁業の操業状況や増殖対象魚種によっては、投石等で囲い礁を設置することが望ましい。なお、石で囲う場合に期待される効果としては、以下のとおりである。

- ・小型底びき網漁業等の操業によるかき殻の流失を防ぐための区域の明確化
- ・敷設したかき殻礁を利用する増殖対象魚種の稚魚などの隠れ場の提供

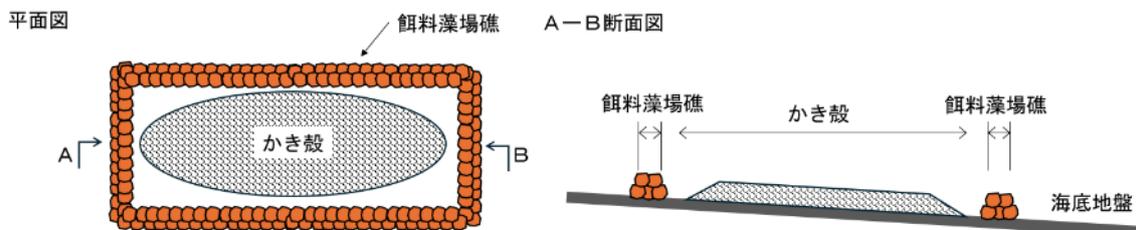


図 6-1-3 かき殻を囲むイメージ図

増殖場造成としての活用《事例紹介》

●対象海域



対象海域（江田島市能美町地先）

かき殻増殖場造成及び現地調査日

項目	調査日	
事前調査	令和5年	12月19日
かき殻投入	令和6年	3月11日
投石試験用石材投入		7月17日
母藻・食害防止ケージ作業		7月18日
夏季調査		9月9日
秋季調査		11月16日
冬季調査	令和7年	1月13日

●使用した材料

使用したかき殻は、かき殻堆積場で3カ月以上海中に保管されたもので、かつ前述の表 4-1-1 に示す品質管理基準に適合したものを使用した。

●施工方法

江田島市津久茂地区のかき殻堆積場のかき殻を用いて、令和6年3月に江田島市能美町地先に100×200mのかき殻増殖場を整備した。施工はガットバージ船により、かき殻を海底付近で投入した。また、令和6年7月にかき殻試験区内での投石試験のために石材設置（200～400kg/個を2×2個設置）を行い、その後に食害防止ケージ（約2m×2m×高さ1m）を施すとともに、母藻を設置し、石材と海藻の付着状況について調査を実施した。



江田島市能美町地先の増殖場造成

増殖場造成としての活用《事例紹介》



江田島市能美町地先の投石試験区

増殖場造成効果の確認方法（試験区・対照区それぞれ1地点×3季）

期待される効果		評価指標等	調査項目	調査方法
底質改良	有機汚染、富栄養化の改善	臭気等の改善	泥温、泥色、臭気	潜水士が表層泥を採取し、分析
		汚染度の低い環境指標種の増加	底生生物（種類、個体数、湿重量、多様度数）	
水質浄化	底質改良による上層水の浄化	DO等の水質改善	水温、塩分、pH、ORP、COD、DO	直上水を採水し、分析
	ろ過食者の増加			
	浮泥の移動抑制	濁度の改善 沈降粒子量の減少	濁度、光量子量	多項目水質計で鉛直測定
増殖効果	水産有用種の餌料培養	魚類の餌料（小型甲殻類、多毛類等）、ナマコの餌料（付着珪藻等）の増加	底生生物の結果を使用	
		有用魚種の出現数の増加	魚介類（種類、個体数、湿重量）	刺網等で採取し、分析
	ベントスの隠れ家の提供	底生生物の種数、個体数の増加	底生生物の結果を使用	
	海藻類の着定促進	着定基質への浮泥堆積の減少	浮泥厚さ、海藻の生育状況	潜水測定・観察
出来高管理		施設縁辺の崩れ有無	縁辺部の高さ確認	潜水測定

●増殖場造成効果の調査結果

水底質は、対照区と比べ、あまり違いはみられなかった。

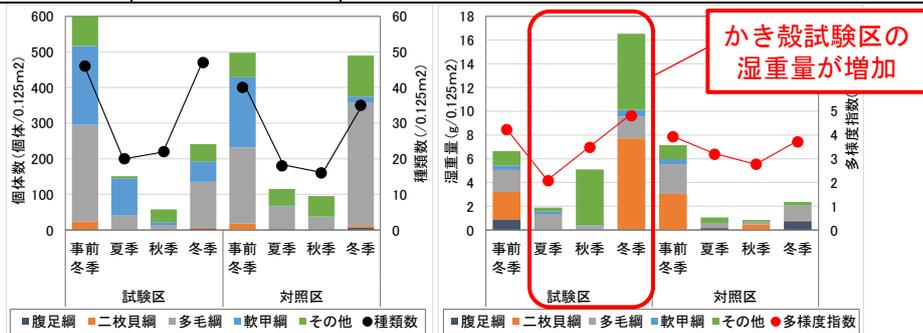
底生生物は、冬季に増加し、対照区は砂泥質の底質であるため多毛綱が多かったが、試験区は底質がかき殻層に変化したことで、かき殻に付着するサンカクフジツボ（その他：顎脚綱）や表層に生息する軟甲綱（ヨコエビ類、エビ類）が増え始めていた。また、冬季の稚ナマコ調査では、試験区ケージ内で稚ナマコ2個体（体長約8cm）とかき殻増殖場で2個体（水深約10m、体長約8cm）を確認した。この結果をかき殻増殖場面積に換算すると、稚ナマコは0.2個体/m²程度の密度で生息していると推定された。

かき殻の表面は、フジツボ類やその他生物の付着基質として機能するとともに、隙間等は稚ナマコや小型甲殻類、多毛類の生息の場として機能したと考えられる。また、底生生物の湿重量は増加しており、増殖場造成による生物生産性の向上と、バイオターベーションの活性化による底質改善効果や餌料培養効果が期待できる。

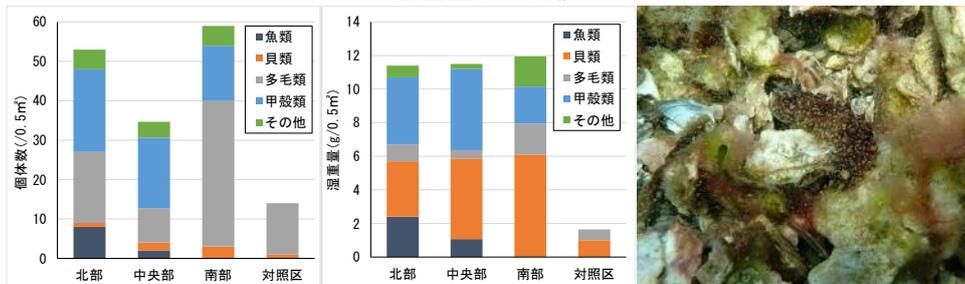
増殖場造成としての活用《事例紹介》

調査結果の概要（試験区・対照区それぞれ1地点×3季）

期待される効果		評価指標等	試験区と対照区の比較
底質改良	有機汚染 富栄養化の改良	臭気等の改善	・ともに良好
		汚染度の低い 環境指標種の増加	・夏季の対照区で、有機汚濁指標種のカタマガリギボシソメ(多毛綱)を確認
水質浄化	底質改良による 上層水の浄化	DO等の水質改善	・ほとんど違いはない
	ろ過食者の増加	濁度の改善 沈降粒子量の減少	・夏季の対照区の底層濁度は高くなったが、試験区は底層まであまり変化がない
増殖効果	水産有用種の 餌料培養	魚類の餌料の増加	・試験区の湿重量が増加
		有用魚種の 出現数の増加	・夏季の試験区で大型のヒラメを、秋季の対照区で大型のアオリイカを採捕 ・餌料生物量増加（冬季結果）は、表層から5cm層で106.024g/m ² であった（試験区-対照区）。30cm層まで有効であるとする岡山県の先行調査の結果を踏まえると、234.6g/m ² と推定された。
	ベントスの 隠れ家の提供	底生生物の種数 個体数の増加	・種数は冬季に増加し、試験区の方が多い ・個体数は対照区が多いが、試験区では軟甲綱が増加した ・湿重量は試験区が多く、特にその他（サンカクフジツボ）が増加した ・試験区では、かき殻に付着するサンカクフジツボ（その他：顎脚綱）や軟甲綱（ヨコエビ類、エビ類）が増え始めていた ・冬季の石材ケージ内及びかき殻増殖場でマナマコを確認（冬季稚ナマコ調査） ・かき殻増殖場は底生生物（個体数・湿重量）が多く、特に個体数では軟甲綱（エビ類）が多く、湿重量では貝類が多い（冬季稚ナマコ調査）
海藻類の 着定促進	着定基質への 浮泥堆積の減少	・ともに浮泥1mm以下、海藻の着生なし	
出来高管理	施設縁辺の 崩れ有無	・流失等は確認されなかった	



底生生物の推移



稚ナマコ調査での底生生物

かき殻増殖場で確認した稚ナマコ

6-2 底質改善

底質改善計画のフローを図 6-2-1 に示した。

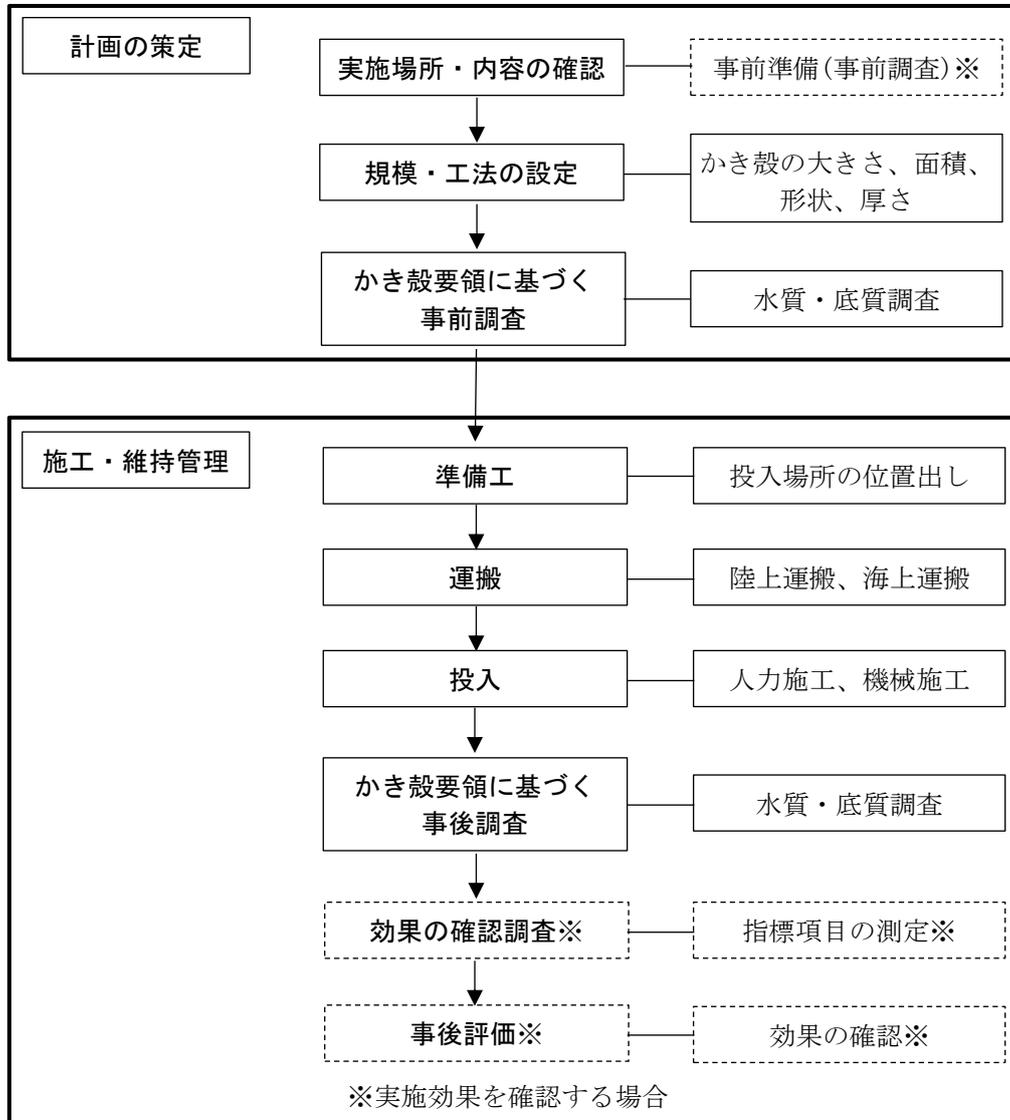


図 6-2-1 底質改善計画のフロー図

(1) 事前準備

現地調査及び施工にあたっては、法律等に基づく許認可等の手続きが必要であり、事前に関係する官公庁、漁業協同組合等と時間的余裕を持って協議、手続きを行う。

- ・作業許可申請、作業届等 → 海上保安部、県、港湾管理者、漁港管理者
- ・特別採捕許可申請、特定水産動植物採捕許可申請 → 県水産課
- ・海域使用（占有）許可申請 → 県、港湾管理者、漁港管理者
- ・漁業操業区域における同意書 → 漁業権を有する漁業協同組合等

(2) 既存資料調査・整理

必要に応じ既存資料調査を行い、底質改善内容の設定や、改善効果検証のための事前調査を行う。

表 6-2-1 既存資料調査・整理項目

調査	項目
既存資料調査及び事前調査	水質、底質、海底地形、波浪、流速 等

(3) 使用するかき殻

後述の事例紹介（底質改善材としての活用）で使用したかき殻と同等のもの

(4) 投入量

かき殻投入量は、約 10cm 厚になるような量を準備する。

参考散布面積：1 トンフレコン×10 袋 → 10m×10m×厚さ 0.1m 20kg 袋×20 個 → 3m×3m×厚さ 0.1m

(5) 施工方法

底質改善の手法は、規模や現地条件、造成コストを考慮し、適切な施工方法を選定する必要がある。施工方法は、増殖場造成と同様な部分もあるが、例として潮間帯から極浅海域では干潟でのバックホウを使用した施工例と小型船舶からの人力による施工例、沖合浅場及び沖合深場でのクレーン付き船による施工例を示した。

1) 潮間帯から極浅海域

干潮時のバックホウ等を用いた散布方法の例は、以下のとおりである。

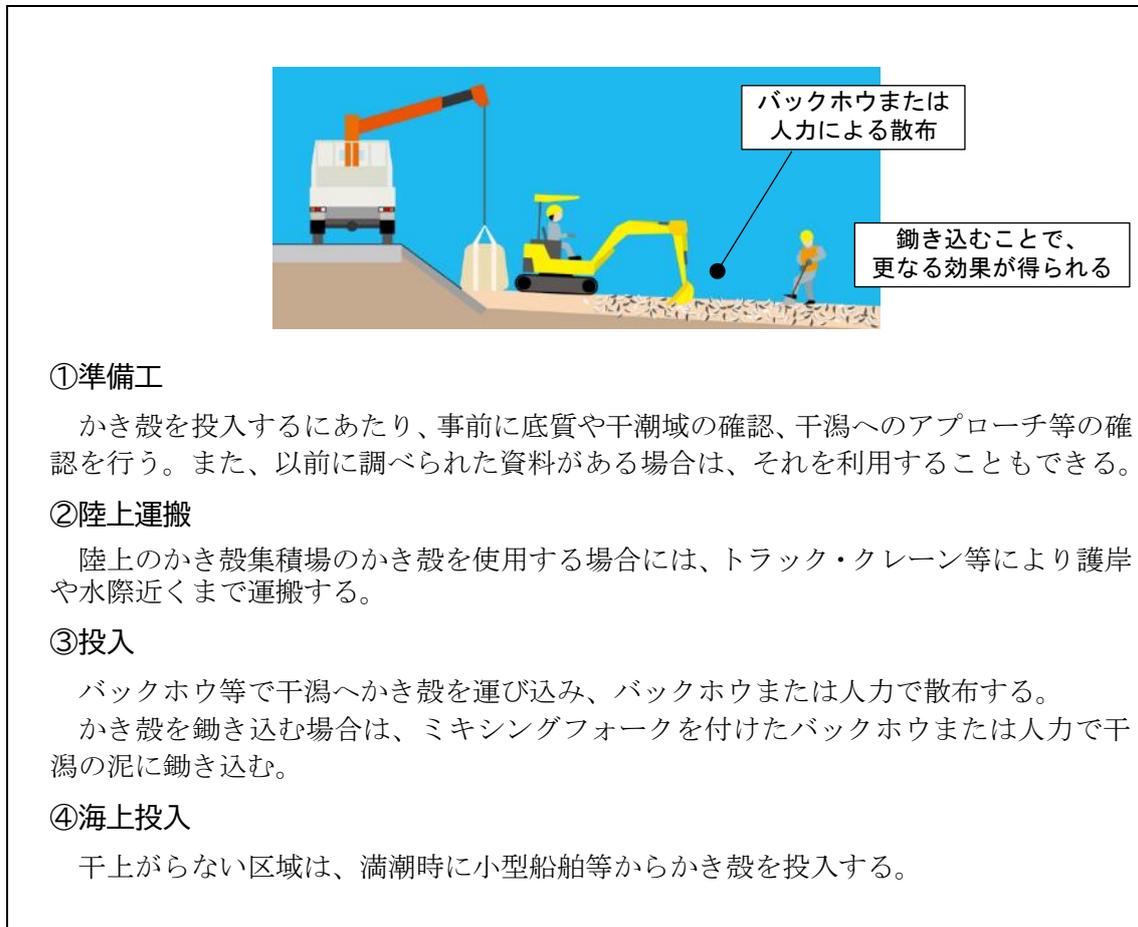


図 6-2-2 干潟での施工方法の例

小型船舶からの人力による散布方法の例は、以下のとおりである。

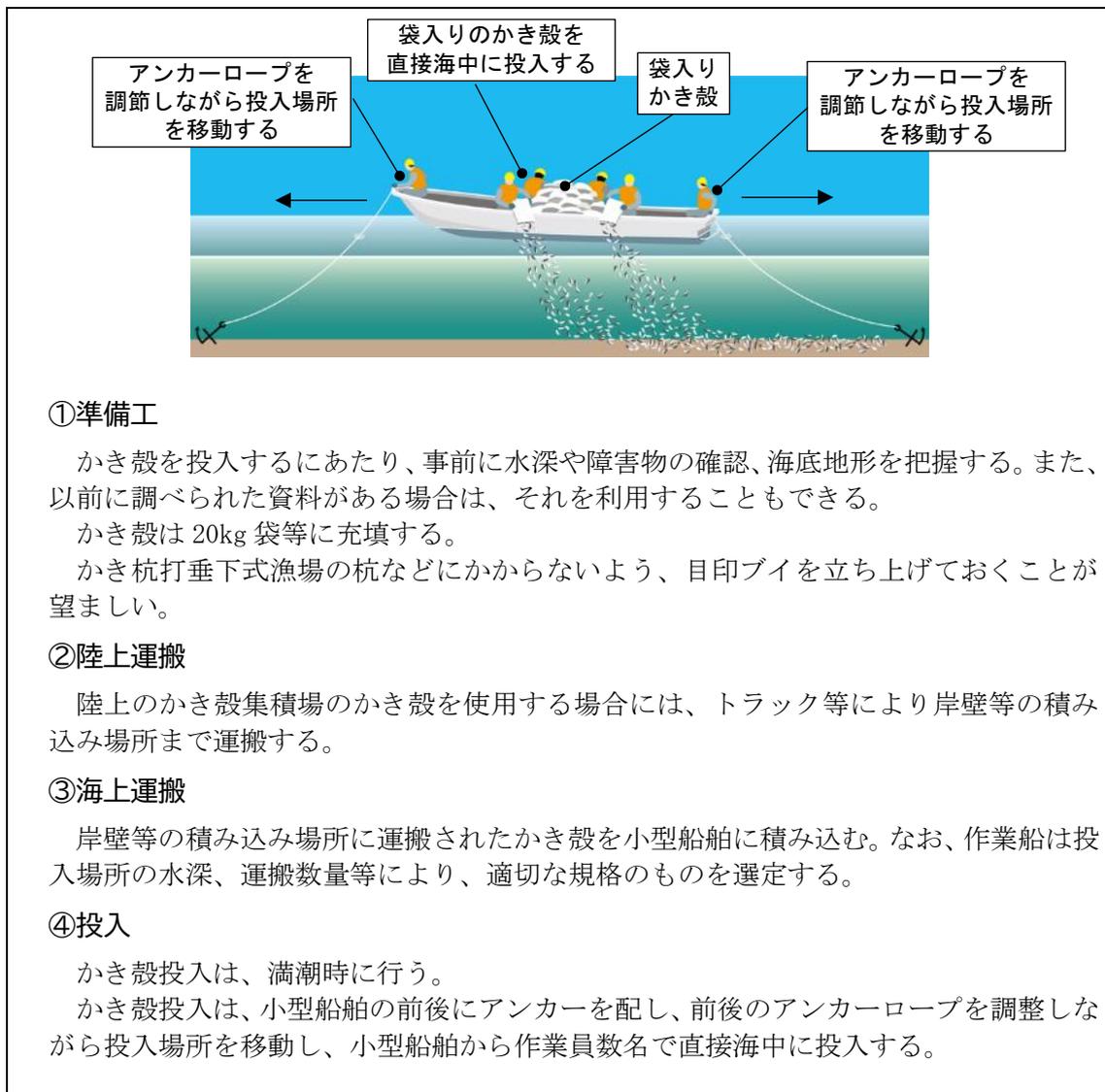


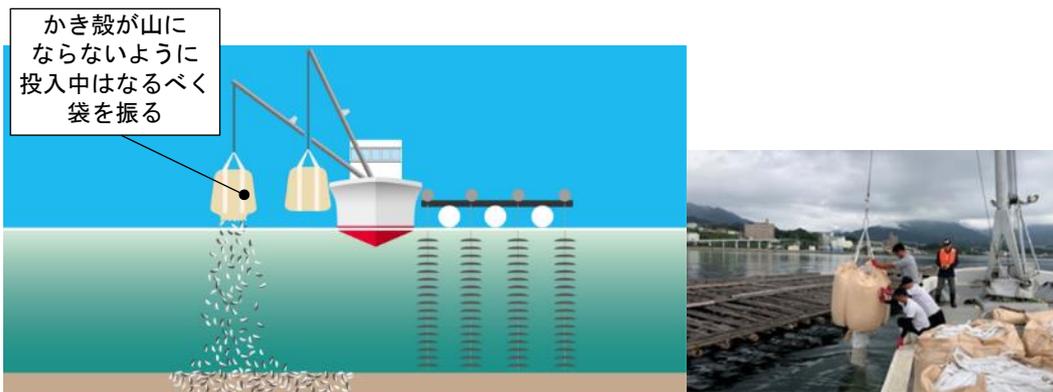
図 6-2-3 小型船舶による施工方法の例

2) 沖合浅場及び沖合深場

かき筏垂下式漁場等の障害物が多い海域では、大型のグラブ船等による施工が困難な海域が多いため、小型船舶からの散布が望ましい。

小型船舶による施工方法は、前述の方法のほか、クレーン付き船によるかき殻散布を行う。

クレーン付き船による散布方法の例は、以下のとおりである。



①準備工

かき殻を投入するにあたり、事前に障害物の確認や海底地形を把握する。また、以前に調べられた資料がある場合は、それを利用することもできる。

かき筏は、風で移動するため、モニタリング位置を考慮した位置を計画する。

かき殻は1トフレコンに充填する。

投入場所が偏らないように、目印ブイを立ち上げておくことが望ましい。

②陸上運搬

陸上のかき殻集積場のかき殻を使用する場合には、トラック等により岸壁等の積み込み場所まで運搬する。

③海上運搬

岸壁等の積み込み場所に運搬されたかき殻を、岸壁に接岸させたクレーン付き作業船で積み込む。なお、作業船は投入場所の水深、運搬数量等により、適切な規格のものを選定する。

④投入

かき殻の投入は、かき筏に横づけしたクレーン付き船で、1トフレコンに充填したかき殻袋を吊るし、投入位置まで誘導し、船上からかき殻袋下部の紐を解くかナイフ等で裂き、自重で海中に投入する。

※落下中のかき殻は、あまり拡散せず、位置を固定して散布した場合は、海底で山積み状態になるため、投入中はかき殻袋を振るなど、なるべく広く散布するようにすることが望まれる。

図 6-2-4 クレーン付き船による施工方法の例

(6) 底質改善効果の確認方法(実施効果を確認する場合)

実施効果を確認する必要がある場合は、かき殻敷設後、底質環境の変化、底生生物をはじめとした生物相の変遷をモニタリングにより検証する。また、効果を把握するためにも、敷設前の事前調査も実施しておくことが望ましい。

かき殻敷設による底質改善効果の確認のための調査内容として想定される項目例は、表 6-2-2 に示すとおりである。

表 6-2-2 底質改善効果の確認方法 (事前・事後)

期待される効果		評価指標等	調査項目	調査方法
底質改善	底質の硫化水素濃度の低減、有機物の低減	底質の硫化水素・有機物・栄養塩	●底泥 含水率、強熱減量(IL) 全窒素(TN)、全リン(TP) 粒度組成、pH 酸化還元電位(ORP)	●底泥 潜水土が表層泥を採取し、室内分析
			●間隙水 硫化水素、 溶存態全窒素(DTN) 溶存態全リン(DTP) アンモニウム態窒素(NH ₄ -N) 硝酸態窒素(NO ₃ -N) 亜硝酸態窒素(NO ₂ -N) 溶存態無機リン(DIP)	●間隙水 底泥を採取し、遠心分離器を用いて間隙水を分離し、室内分析
水質浄化	底層のDOの上昇、水質改善	底層のDO・有機物・栄養塩	●海水 水温、塩分、溶存酸素(DO)の鉛直分布	●海水 鉛直分布は多項目水質計で測定
			●直上水 pH、酸化還元電位(ORP) 溶存態全窒素(DTN) 溶存態全リン(DTP) アンモニウム態窒素(NH ₄ -N) 硝酸態窒素(NO ₃ -N) 亜硝酸態窒素(NO ₂ -N) 溶存態無機リン(DIP)	●直上水 船上から採水し、室内分析(pH、ORPは現地観測)
生物量 生物相の回復	生物の種類 生息量の増加	生物の種類 生息量の増加	底生生物の種類、個体数、種類別湿重量	潜水土が表層泥を採取し、室内分析

底質改良材としての活用《事例紹介 1：かき筏垂下式漁場》

●対象海域



対象海域（呉市音戸町奥の内の筏漁場）

かき殻投入日及び現地調査日

項目	調査日	
事前調査	令和 6 年	7 月 22 日
かき殻投入		7 月 26 日
1 週間後調査		8 月 2 日
1 か月後調査		8 月 26 日
3 か月後調査		11 月 14 日
6 か月後調査	令和 7 年	1 月 27 日

●使用した材料

使用したかき殻は、かき殻堆積場で3カ月以上海中に保管されたもので、かつ前述の表 4-1-1 に示す品質管理基準に適合したものを使用した。

試験区は、1区画10m四方で、試験区Aはかき殻（破碎したもの）、破碎かき殻及び洗浄残渣、試験区Bは破碎かき殻及び洗浄残渣を20mm以下に選別したものを使用した。

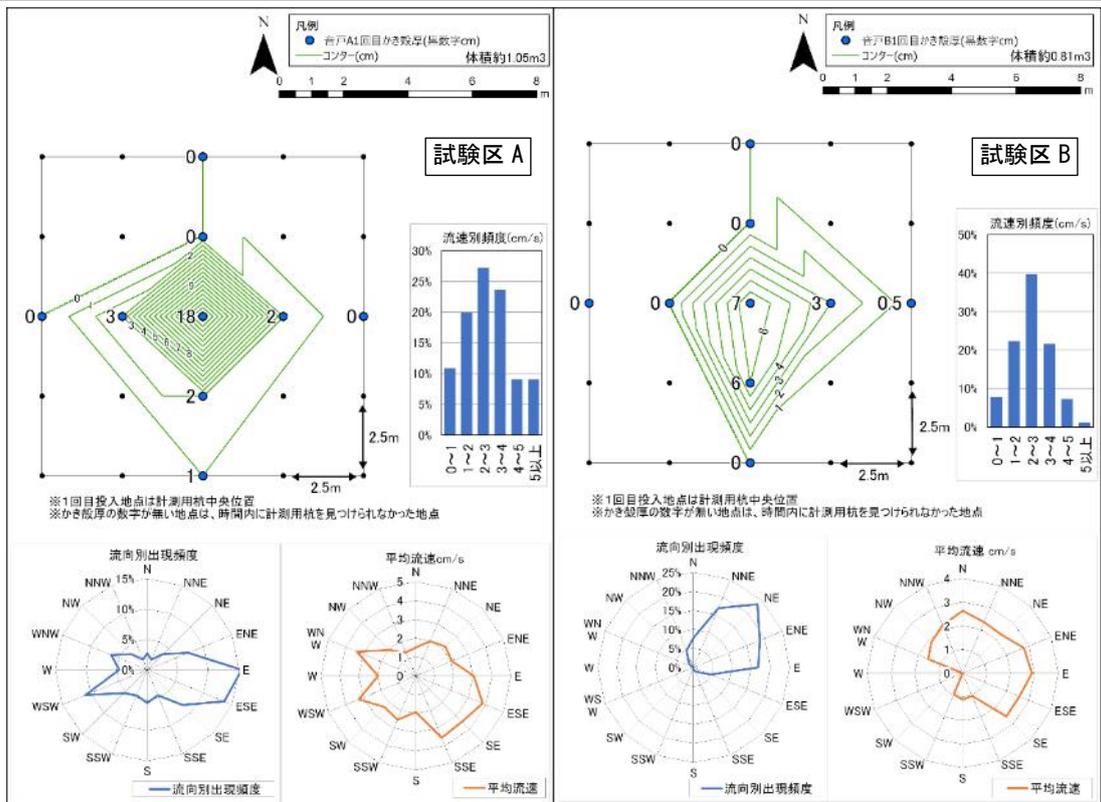
●施工方法

かき殻投入は、かき筏に横づけしたクレーン付き船で、1トフレコン（計10袋投入）に充填したかき殻を吊るし、投入位置まで誘導した後、船上からフレコン下部をナイフ等で裂き、自重で海中に投入した（途中からは、水面でダイバーがフレコン下部を裂いた）。

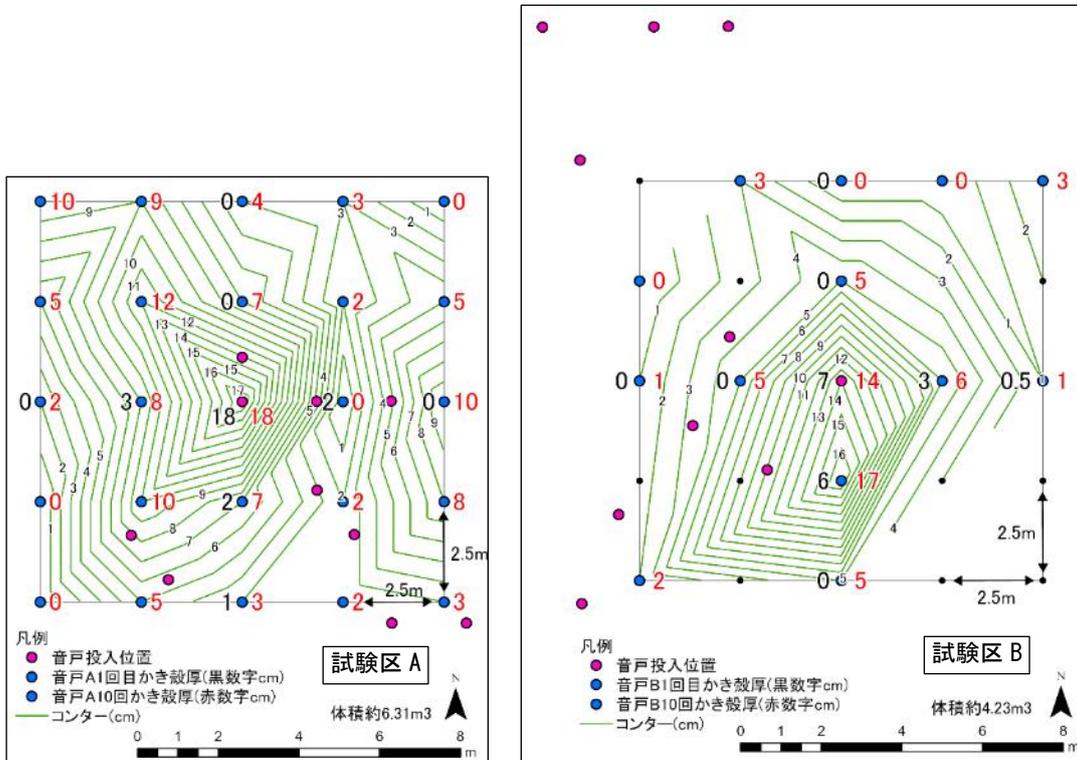
また、かき殻投入時の拡散状況を確認するため、区画中央で1回目と10回投入後にかき殻厚の確認、1回目投入時間中の水面下約5mの流向流速を調査した。

かき殻1回目投入時の平均流速は5cm/s以下で、試験区Aでは、ほとんど拡散することなく半径約3m内に落下し、試験区Bは、僅かに拡散していることが確認された。

底質改良材としての活用《事例紹介 1：かき筏垂下式漁場》



中央地点でのかき殻 1 回目投入直後のかき殻厚及び流向流速（水面下 5m）結果

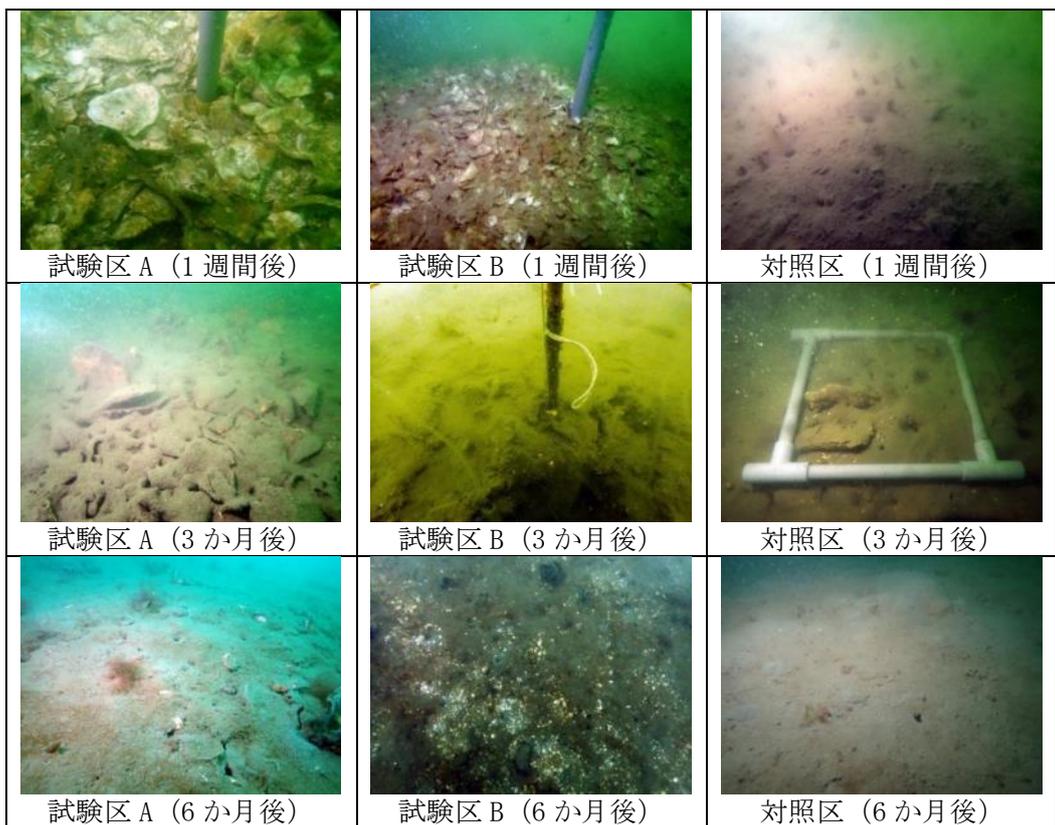


かき殻 10 回投入の位置及び 10 回投入後のかき殻厚（水深約 10m）

底質改良材としての活用《事例紹介1：かき筏垂下式漁場》

底質改善効果の確認方法(試験区A・試験区B・対照区それぞれ1地点×事前1回、事後4回)

期待される効果		評価指標等	調査項目	調査方法
底質改善	底質の硫化水素濃度の低減、有機物の低減	底質の硫化水素・有機物・栄養塩	(底泥) 含水率、IL、TN、TP、 粒度組成、pH、ORP (間隙水) 硫化水素、DTN、DTP、NH4-N、NO3-N、NO2-N、DIP	(底泥) 潜水土が表層泥を採取し、分析(間隙水) 底泥を採取し、遠心分離器を用いて間隙水を分離し、分析
水質浄化	底層の硫化水素濃度の低減、DOの上昇	底層のDO	(海水) 水温、塩分及びDOの鉛直分布 (直上水) pH、ORP、DTN、DTP、NH4-N、NO3-N、NO2-N、DIP	(海水) 鉛直分布は多項目水質計で測定 (直上水) 船上から採水し、分析(pH、ORPは現地観測)
生物量・生物相の回復	生物の種類・生息量の増加	生物の種類・生息量の増加	底生生物の種類、個体数、種類別湿重量	潜水土が表層泥を採取し、分析



試験区及び対照区の海底状況

底質改良材としての活用《事例紹介1：かき筏垂下式漁場》

●底質改善効果の調査結果

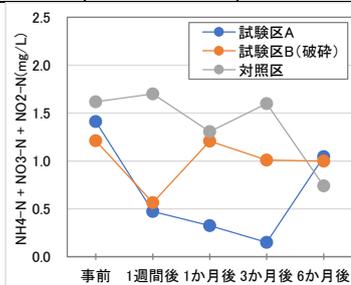
試験区 A は、一定期間の間隙水中の有機物の低減、生物量の増加が確認された。

試験区 B は、散布直後に間隙水中の有機物の低減は確認されたが、次第に対照区に近い値となった。生物量の増加は確認されなかった。

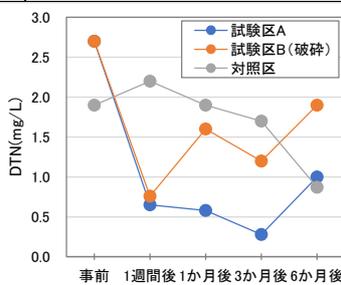
海水・直上水は、明らかな数値の変化や傾向はほとんどみられなかった。

調査結果の概要(試験区 A・試験区 B・対照区それぞれ 1 地点×事前 1 回、事後 4 回)

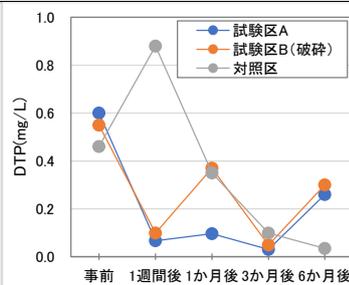
期待される効果		評価指標等	試験区と対照区の比較	
底質改善	底質の硫化水素濃度の低減、有機物の低減	底質の硫化水素・有機物・栄養塩	底泥	・1週間後は試験区が高い項目が多く、1か月後は対照区が高い項目が多かった
			間隙水	・硝化反応により、1週間後の試験区ではNH ₄ -Nが大きく減少し、試験区 A は3か月後までは低い値で推移した。試験区 B は増減した ・DTP 及び DIP も、ほぼ同様の変動であった
水質浄化	底層の硫化水素濃度の低減、DOの上昇	底層の DO	海水	・ほとんど違いはみられないが、試験区 A の1か月後の底層 DO は低かった
			直上水	・明らかな数値の変化や傾向はみられなかった
生物量 生物相の回復	生物の種類・生息量の増加	生物の種類・生息量の増加	<ul style="list-style-type: none"> ・種類数は試験区 A がやや多く、1か月後に最大となった ・個体数及び湿重量は試験区 A がやや多く、1か月後に最大(軟甲綱:コノハエビの増加による)となった ・餌料生物量増加は、試験区 A は 16.624g/m²(1か月後:試験区-対照区)、試験区 B は 2.12g/m²であった(3か月後:試験区-対照区) 	



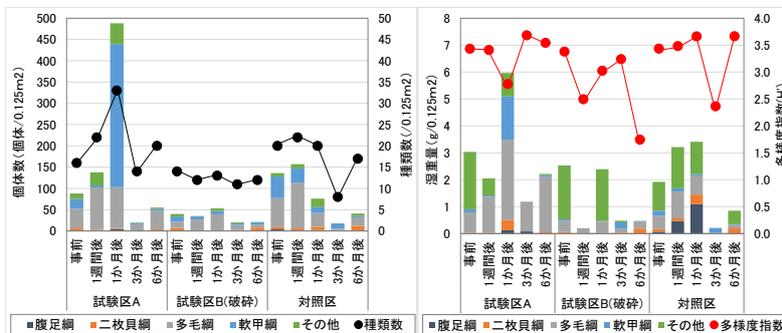
間隙水 (DIN)



間隙水 (DTN)



間隙水 (DTP)



底生生物

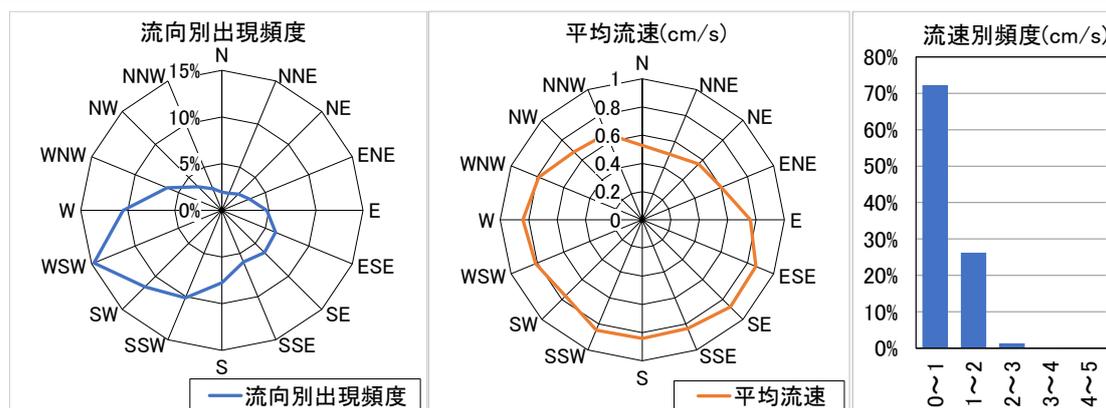
底質改良材としての活用《事例紹介1：かき筏垂下式漁場》

●かき筏海底付近の流向流速結果

試験区Bの海底上10cmでの流向流速は、ほとんどが0~1cm/sで、ほぼ流れはなかった。

流向流速調査概要

設置地点	開始日時	終了日時	最大流速 (cm/s)	観測設定
試験区B	8月2日11時 (1週間後調査時)	8月26日10時50分 (1か月後調査時)	4.63	毎時10分毎のインターバル1秒で10個観測



●留意点

(施工時)

試験区Bの施工時は、海底の区画設置後にクレーン付き船を横付けしたかき筏が、風で北西方向に移動したため、クレーンが区画南東側まで届かず、やや北西方向に偏った投入となった。

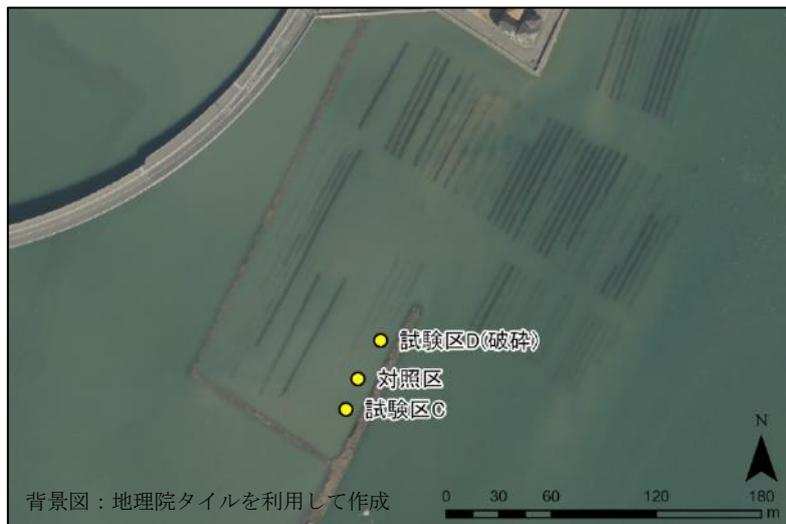
作業船をかき筏に横付けし、敷設区域を細かく設定して散布する場合は、風や流れがないタイミングで作業を行うことが望ましい。

(効果調査)

間隙水の6か月後の値が、対照区より高い項目が多く、これが一時的なものかの判断が困難であることから、調査の継続が望まれる。

底質改良材としての活用《事例紹介 2：かき杭打垂下式漁場》

●対象海域



対象海域（呉市阿賀地区）

かき殻投入日及び現地調査日

項目	調査日	
事前調査	令和 6 年	7 月 23 日
かき殻投入		7 月 29 日
1 週間後調査		8 月 5 日
1 か月後調査		9 月 4 日
3 か月後調査		11 月 15 日
6 か月後調査	令和 7 年	1 月 31 日

●使用した材料

使用したかき殻は、かき殻堆積場で 3 カ月以上海中に保管されたもので、かつ前述の表 4-1-1 に示す品質管理基準に適合したものを使用した。

試験区は、1 区画 3m 四方で、試験区 C はかき殻（破碎したもの）、破碎かき殻及び洗浄残渣）、試験区 D は破碎かき殻及び洗浄残渣を 20mm 以下に選別したものを使用した。

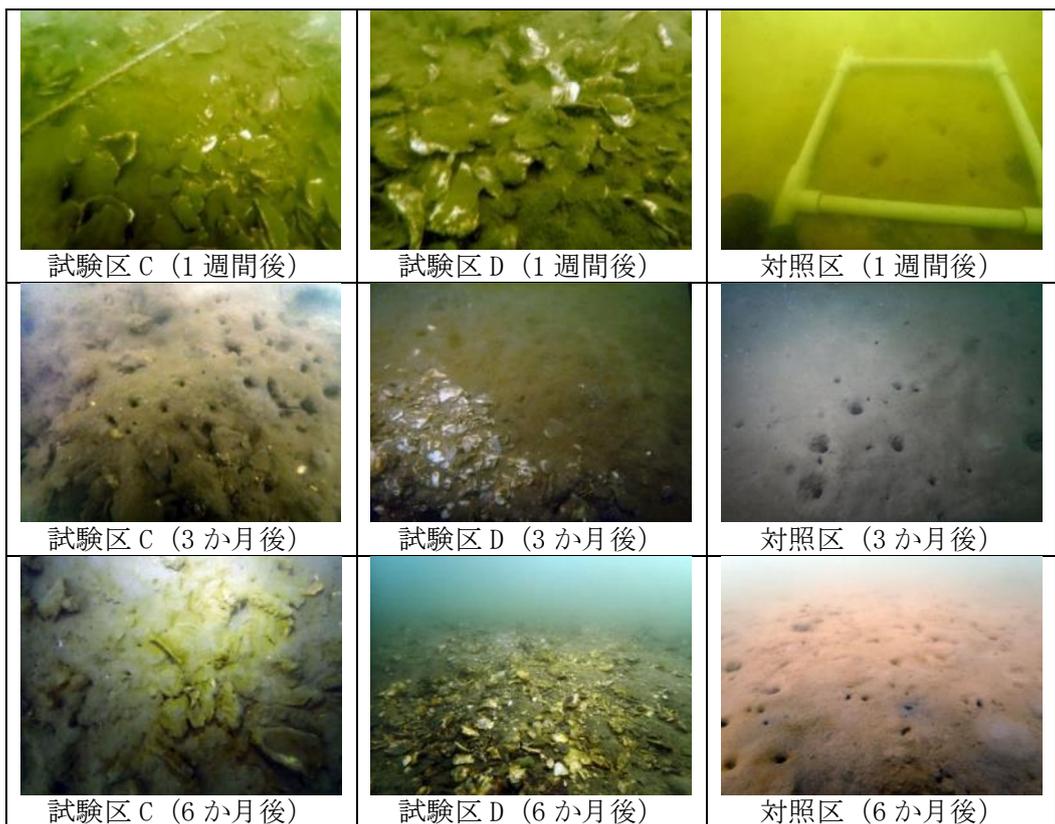
●施工方法

かき殻投入は、種船の前後にアンカーを配し、前後のアンカーロープを調整しながら投入位置まで誘導し、種船から作業員が直接海中に投入した。

底質改良材としての活用《事例紹介 2 : かき杭打垂下式漁場》

底質改善効果の確認方法(試験区 C・試験区 D・対照区それぞれ 1 地点×事前 1 回、事後 4 回)

期待される効果		評価指標等	調査項目	調査方法
底質改善	底質の硫化水素濃度の低減、有機物の低減	底質の硫化水素・有機物・栄養塩	(底泥) 含水率、IL、TN、TP、 粒度組成、pH、ORP (間隙水) 硫化水素、DTN、DTP、NH ₄ -N、NO ₃ -N、NO ₂ -N、DIP	(底泥) 潜水土が表層泥を採取し、分析(間隙水) エアストーンを設置、静置後にシリンジ等で採水、または底泥を採取し、遠心分離器を用いて間隙水を分離し、分析
水質浄化	底層の硫化水素濃度の低減、DO の上昇	底層の DO	(海水) 水温、塩分及び DO の鉛直分布 (直上水) pH、ORP、DTN、DTP、NH ₄ -N、NO ₃ -N、NO ₂ -N、DIP	(海水) 鉛直分布は多項目水質計で測定 (直上水) 船上から採水し、分析(pH、ORP は現地観測)
生物量・生物相の回復	生物の種類・生息量の増加	生物の種類・生息量の増加	底生生物の種類、個体数、種類別湿重量	潜水土が表層泥を採取し、分析



試験区及び対照区の海底状況

底質改良材としての活用《事例紹介2：かき杭打垂下式漁場》

●底質改善効果の調査結果

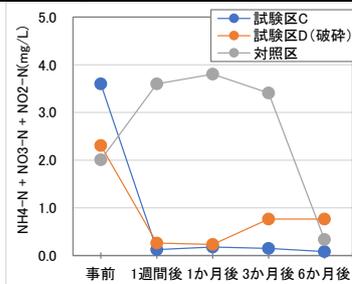
試験区C及び試験区Dともに、間隙水中の有機物の低減、生物量の増加が確認された。

かき殻の表面は、フジツボ類やその他生物の付着基質として機能するとともに、隙間は小型甲殻類や多毛類の生息の場として機能したと考えられる。

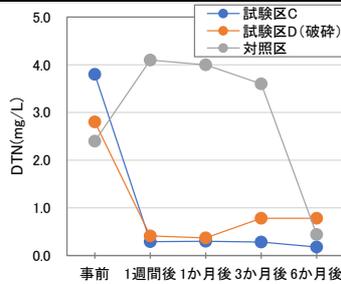
海水・直上水は、明らかな数値の変化や傾向はみられなかった。

調査結果の概要(試験区C・試験区D・対照区それぞれ1地点×事前1回、事後4回)

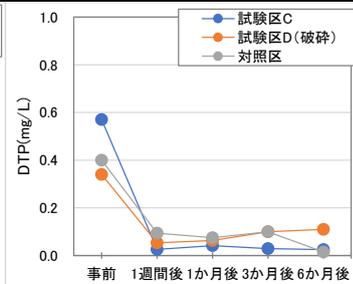
期待される効果		評価指標等	試験区と対照区の比較	
底質改善	底質の硫化水素濃度の低減、有機物の低減	底質の硫化水素・有機物・栄養塩	底泥	・明らかな数値の変化や傾向はみられなかった
			間隙水	・1週間後以降の試験区では、硝化反応によりNH ₄ -Nは減少し、対照区は増加後、6か月後は減少 ・DTP及びDIPは対照区とともに減少
水質浄化	底層の硫化水素濃度の低減、DOの上昇	底層のDO	直海上水	・ほとんど違いはみられなかった
生物量 生物相の回復	生物の種類 生息量の増加	生物の種類 生息量の増加		<ul style="list-style-type: none"> ・種類数は、試験区Cでは増加傾向で、試験区Dでは1か月後に最大となった ・個体数は、試験区が多く、増加傾向で、6か月後に最大となった ・湿重量も試験区が多く、6か月後に最大となった ・試験区では、1か月後以降フジツボ科(サラサフジツボ)が多く確認されたほか、試験区Dでは多毛綱も多く確認された ・餌料生物量増加は、試験区Cは109.568g/m²(6か月後:試験区-対照区)、試験区Dは167.64g/m²であった(3か月後:試験区-対照区)



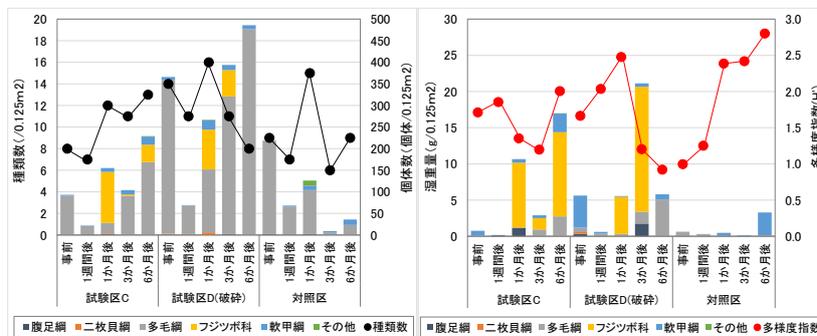
間隙水 (DIN)



間隙水 (DTN)



間隙水 (DTP)



底生生物

7. 課題の抽出及び対応策の検討

7-1 増殖場造成について

かき殻の安定性については、検証数が少ないため、今後、水理模型実験のケースを増やしてデータを蓄積し、かき殻を対象としたかき殻片挙動モデルの判定図を作成していく必要がある。

増殖場造成後の水底質及び底生生物等の生物のモニタリングについては、施工後約半年で一定の効果は確認されたが、調査期間を数年後まで延長し、変化の推移を調査することで、効果の検証や定期的なメンテナンス頻度の確認等が得られると思われる。

7-2 底質改善について

水底質及び底生生物等の生物のモニタリングについては、施工後約半年で一定の効果は確認されたが、調査期間を数年後まで延長し、変化の推移を調査することで、効果の検証や定期的なメンテナンス頻度の確認等が得られると思われる。また、鋤き込みの有無による効果の検証の実施が望まれる。

参考資料 1

岡山県が令和 4 年に作成した「かき殻を利用した総合的な底質改良技術ガイドライン」(改訂版)の概要をまとめた。

表 「かき殻を利用した総合的な底質改良技術ガイドライン」(改訂版)の概要

対象海域	潮間帯(干潟)及びそれに続く極浅海域	
施工方法	粉碎かき殻を海上から投入し、専用機器により鋤き込み	
効果	底質改善	IL: 試験区の値が 1 カ月後までは高いが、以降は対照区と同値もしくはやや低く推移 COD: 試験区の値が対照区より低く推移 ORP: 鋤き込み 8 カ月後までは大きな差はないが、以降は対照区より良好な値で推移 TS: 試験区が概ね低い値 これらの結果は、かき殻を底土中に鋤き込むことで、粒度組成を改善(粗粒化)させて透水性が向上したことによるものと考えられた。
	底生生物	<ul style="list-style-type: none"> ・出現種はほとんどの調査日で試験区が多く、鋤き込み 1 年 6 カ月後に最大となった ・個体数は鋤き込み 6 カ月後までは対照区と同等であったが、以降は試験区が増加し、鋤き込み 1 年 10 か月後に最大となった ・試験区ではアサリやマテガイ等の二枚貝類が多く確認された ・湿重量は 11 か月後から 1 年 10 か月後間はアサリ、マテガイ、ホトトギスガイが増えた ・鋤き込みした場合は、上層から下層になるに従い、底質、底生生物相ともに大きな差はなくなるものの、深さ 30cm 層までは COD が低く、汚濁指標種が少ないなど底質改善効果が認められた ・鋤き込んだかき殻が周辺海底に生息する底生生物に与える効果の範囲は、試験区の縁辺から 5m 程度の範囲内である ・底生生物に与える効果の範囲は、試験区の縁辺から 5m 程度の範囲内である
対象海域	沖合浅場	
施工方法	全形かき殻を海上から投入	
効果	底質改善	ORP: 対照区より良好な値で推移 TS: 試験区の表層は対照区に比べ大幅に改善されていた 試験区の濁度は低い値で推移した。かき殻敷設により波浪等に伴う再懸濁が抑制されていたと考えられる。それにより、海藻類の着生とかき殻が付着基盤として大きな役割を果たしていた
	底生生物	<ul style="list-style-type: none"> ・種類数は試験区が多い ・個体数は、敷設 1 カ月後までは大きく減少したが、以降は増加し、1 年 6 カ月後は最大となった ・湿重量は、敷設 1 カ月後までは大きな差はないが、以降は対照区より多かった ・試験区ではマナマコや魚介類が出現した。対照区では水産有用種はほとんど見られなかった ・かき殻深さは 30cm までは明らかな効果がみられた ・底生生物に与える効果の範囲は、試験区の縁辺から 5m 程度の範囲内である

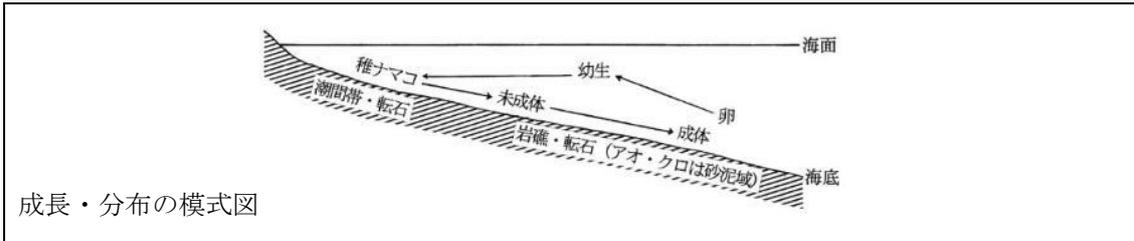
対象海域	沖合深場	
施工方法	全形かき殻を海上から投入	
効果	底質改善	<p>AVS：夏季は高い値を示したが、試験区が低い値であった。3年後からは浮泥の堆積により AVS 値は上昇し、浮泥除去等のメンテナンスの必要性が示唆された。</p> <ul style="list-style-type: none"> かき殻敷設によって、波浪や潮流による海底付近の底泥の巻き上がりが抑制されていることが示された
	底生生物	<ul style="list-style-type: none"> 種類数は試験区が多く、敷設1年1カ月後に最多となった 個体数は試験区が多く、敷設半年後から増加し、10か月後に最大となった。 かき殻敷設から約3年後には敷設したかき殻に堆積した浮泥等により底生生物の増加効果が低減するものと推察された。 かき殻の敷設により底質環境が改善され、比較的良好な環境下で生息する底生生物が増殖し、その多くが有用水産物の餌料となることで、水産資源の増加に寄与することが期待された。 魚介類は、種類数及び個体数ともに試験区が多かったが、敷設からの時間の経過に伴って種類数及び個体数ともに減少する傾向がみられた。 試験区ではマナマコやカサゴ、マダコ等の泥質海底に通常生息しない種が確認された 底びき網で採捕された魚介類の種類数は、対照区に比べて最大で4倍多く、個体数は1.5～10倍多く、湿重量は6～80倍多かった <p>これらの結果からも、底びき網漁業の主要な対象魚種となっているマナマコ等が増加する効果が確認され、産業上の観点からもかき殻の敷設は有効な手法であることが明らかとなった。</p>

参考資料 2

マナマコの生態等についてまとめた。

表 マナマコの生態等

	浮遊期	稚ナマコ期	未成体期・成体期
成長		発生後約 50 日:4~7mm 発生後 5 ヶ月:1.2 cm 水温 6℃以下、20℃以上 で成長停止	1 歳:全長 5.9cm、体重 15.5g、殻重 9g 2 歳:全長 13.3cm、体重 122.5g、殻重 80g 3 歳:全長 17.6cm、体重 307.0g、殻重 175g 4 歳:全長 20.8cm、体重 472.5g、殻重 260g
出現時期		青森-周年 愛知-8月中旬より出現	
餌料生物	植物プランクトン	殻重 2.0~2.5g 迄:泥中の付着珪藻類、有機沈積物 腸管の中の砂泥は少量	砂・泥貝殻片等と共に珪藻類、海藻、小型の貝類、コペポダ、アマモの葉片、木片、砂泥中の有機物、小動物、甲殻類
移動回遊		潮間帯の石の下、海藻アジモの茎に付着 昼間-1.11±0.75cm/min 夜間-0.55±0.48cm/min 12m/day	青森県野辺地では 3~20m(5~10m に多い) 夜間:平均 12.7m/day(25℃) 平均 52.3m/day(16℃)
水深	ペンタクチュラは水深 1m を中心とした転石域に付着する	潮間帯~水深 5m	3m 以浅に多く、潮間帯から 20~30m の所に生息
水温		適水温 20~25℃。 生息水温 30℃まで	適水温 8~19℃ 20℃以上で成長が止まり、24℃以上で活動が停止して夏眠する。 北方系のマナマコは岩礁の下に潜り込み夏眠する。
底質		付着基盤:礫・貝殻・アマモ・アオサ等	アカナマコ:岩礁・転石 アオナマコ・クロナマコ:小型個体は 5m 以浅の転石、大型個体は砂泥域
海底(地形) 礫との関わり		かき殻、古いのり網などの採苗器を用いて稚ナマコを天然採苗する。 適水深と好適石材サイズ例(山口): 稚ナマコ 水深 0~3m 石材の径 30cm 幼ナマコ 水深 3~5m 石材の径 40cm 未成体 水深 5m 以深 石材の径 70cm	
産卵場		マナマコは大きな移動を行わないので、生息場を産卵場として利用する	
産卵期		水温が 12℃~22℃の時期で、地方によって多少異なるが、3~9 月である。南の温暖域では早く、北の寒冷域で遅い。山口 4~5 月、九州 3~6 月。 産卵期は種(俗称)でも異なり、アカナマコは約 1 ヶ月早く、期間が短く、アオナマコは遅く、期間が長い(福井)。	



資料：「主要対象生物の発育段階の生態的知見の収集・整理」（平成 18 年、(社)全国豊かな海づくり推進協会）

着定基質としてのかき殻についてまとめた。

- ・ マナマコの幼生を着生させる採苗器の基質を、かき殻、ホタテ貝殻、ノリ網、塩化ビニール管、ポリモンの 5 種で実験したところ、平均着生数は、かき殻 87.5 個/籠、ホタテ貝殻 84 個/籠、ノリ網 34.3 個/籠、塩化ビニール管 4.5 個/個、ポリモン 0.7 個/籠とかき殻、ホタテ貝殻が良かった。

基質はかき殻、ホタテ貝殻のように付着面の起伏が多いものが良い。

資料：「大村湾におけるマナマコの野外人工採苗」（1989 年、長崎県水産試験場研究報告第 15 号）

- ・ 付着基質に対するマナマコの選択実験を、砂、玉砂利（白色）、玉砂利（黒）、かき殻、藻類を付着させたかき殻、遮光、黒塗りの 8 種に、マナマコ（小型 5-10cm、中型 10-15cm をそれぞれ 5 個体）を入れ、低水温期（16℃）、高水温期（26℃）でのマナマコの行動パターンについて実験したところ、低水温期は昼夜ともに活発に移動した一方、高水温期には夜間にだけ活発に移動し、日中は不活発な状態で一所に留まった。かき殻の場合には、藻類の付着の有無に関わらず、かき殻への付着の偏りが高水温期と低水温期の両方で認められた。高水温期の夜間でさえ、基質に密着し付着し続けるという日周性の例外が認められ、かき殻への非常に強い選択性が示唆された。

資料：「マナマコの付着基質選択の季節性」（2009 年 2 月、水産大学校研究報告 57 巻 3 号 p. 227-235）

参考資料 3 - 安定性について -

ここでは、下記 2 種類のかき殻について水理模型実験を行い、安定性の評価手法について検討する。

- ・ 20 mm以下…洗浄残渣を含む、20 mm以下の破碎かき殻
- ・ 未選別…洗浄残渣を含む、未選別の破碎かき殻

(1) 水理模型実験結果

1) 実験条件

① 相似則

水理模型実験における波浪条件及び流速条件は、フルードの相似則に従って設定するが、本実験では実際の大きさのかき殻を対象とするため縮尺は設定しない。

② かき殻の規格

対象のかき殻は、広島県内で入手できるかき殻の実物を使用する。20mm 以下と、未選別の 2 種類を使用する。土質試験によるかき殻の諸元は表- 1 に示すとおりである。代表質量は中央粒径の立方体として求めた場合である。

しかし、水理模型実験に使用する際は、実験装置の管理上、塩分を除去する必要があり、洗浄を行い細粒子が流失した状態となる。その状態のかき殻について、別途簡易検査を行った結果は表- 2 に示すとおりである。細粒子を取り除いたため密度が下がり、中央粒径が大きくなった。

表- 1 かき殻の諸元

	仕様	代表質量(g)	代表密度(g/cm ³)	中央粒径(cm)
かき殻①	20mm 以下	0.46	2.599	0.56

※堆積場に入る前に作業場のクラッシャで人為的に粗砕きされているものや、堆積場で保管する際などにかき殻の自重によって自然に破碎された比較的小さい粒径のものも含む。

表- 2 かき殻の諸元 (洗浄後)

	仕様	代表質量(g)	代表密度(g/cm ³)	中央粒径(cm)
かき殻①	20mm 以下	0.6	2.112	1.05
かき殻②	未選別	4.5	2.172	1.86

※実験に使用するため水で洗浄し、細粒分が流失した状態のかき殻の諸元。

※代表密度はかき殻の測定箇所によって異なると思われる。



図- 1 使用するかき殻 (左：かき殻①、右：かき殻②、洗浄前)

③実験水路

実験水路の概略図を図-2に示す。水路内に高さ0.2m、長さ6mの固定床を水平に設置し、その先にかき殻を1m幅で設置した。かき殻は台形状に設置し、法面勾配を1:1.0、天端高から固定床までの高さを150mmと固定床からさらに下側に50mm設置し合計200mmの厚さとした。

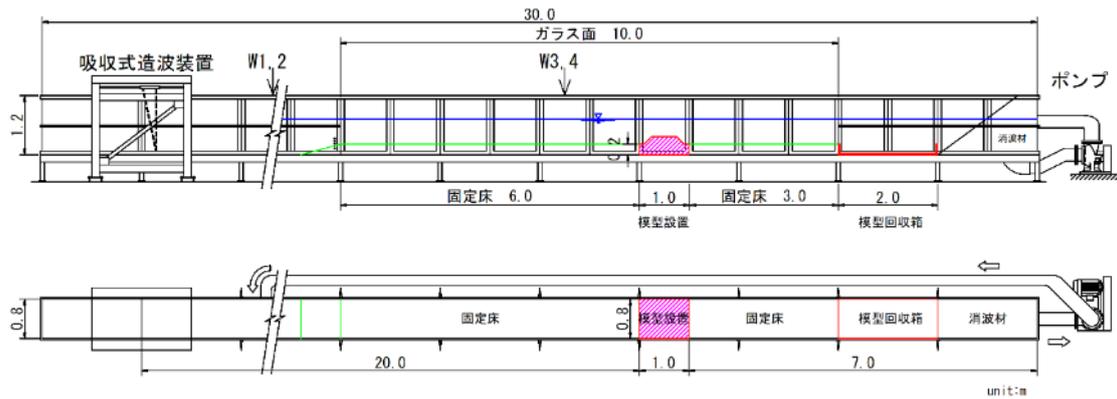


図-2 実験水路の概略図(単位 m)

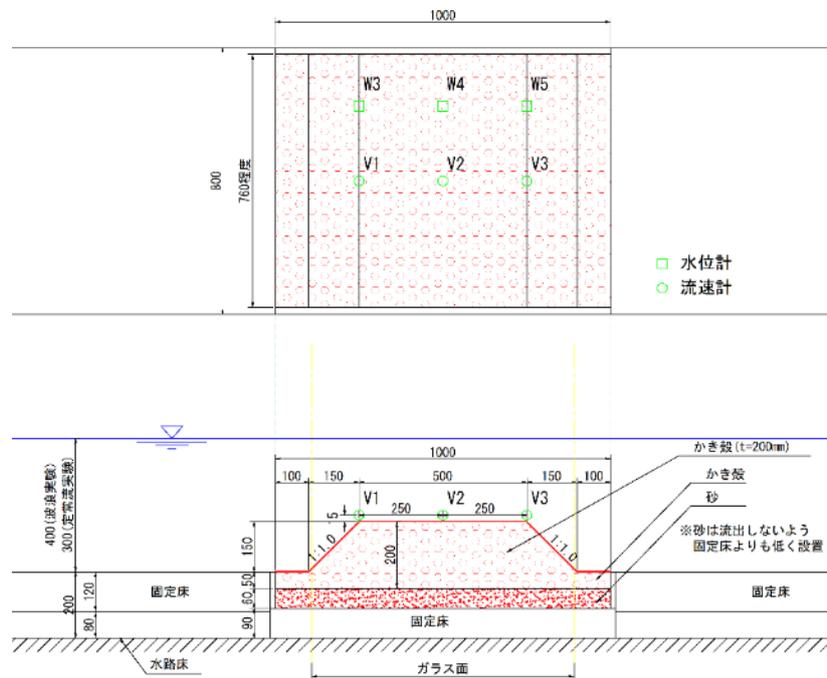


図-3 実験断面と計測器の設置位置 (単位 mm)

④検討項目

実験による検討項目は表-3の3項目である。波浪実験は波浪に対する安定性、定常流実験は流れに対する安定性、沈降実験は沈降速度を検証する。

表-3 検討項目

実験の種類	検討項目	外力条件
波浪実験	安定限界波高 (波浪・流速の測定)	不規則波 周期1ケース、 波高3ケース以上
定常流実験	安定限界流速 (流速の測定)	5段階評価の限界流速 が確認できる範囲
沈降実験	沈降速度	—

⑤波浪条件

波浪実験で使用する波浪条件は、現地実証実験を行っている江田島市能美町（内能美工区）の規模を想定する。対象地点の現地波浪条件（30年確率波）は既往報告書「令和4年度、県営中西部地区増殖場造成（内能美工区）調査・測量・設計業務、水圏リサーチ(株)」より、表-4のとおりである。

しかしながら、30年確率波相当の波高は0.84mであるが、造波装置の仕様から有義波高0.16m程度しか造波できない。このため、水深を浅くしてかき殻の移動が確認できる条件とする必要があり、事前に予備実験を行い、水深を0.4mとした（かき殻が確実に移動する水深とするため）。

安定性の評価が判定できるように波高は前後3ケース以上とする。また、波の周期については現地スケール $T=2.64\text{ s}$ とする。

実験波は不規則波とし、周波数スペクトルは修正ブレットシュナイダー・光易型とする。作用波数は1000波程度とする。

表-4 波浪条件

対象波	潮位 (m)	周期 $T(\text{ s})$	換算沖波波高 $H_0'(\text{ m})$	堤体前面波高 $H_{1/3}(\text{ m})$
30年確率波	H. W. L+3.76	2.64	0.86	0.84

⑥流速条件

5段階の安定評価（不動、微動、転動、集積・埋没、流失）に対する限界流速が把握できるようにするため、流速を数ケース与える。

ポンプで発生させる流速には限界がある一方で、5段階の安定評価が出来る条件とするため、事前に予備実験を行い、水深を0.3mとした（かき殻が確実に移動する水深とするため）。

2) 実験方法

① 波浪実験

実験場の使用可能期間を踏まえ、波浪実験ではかき殻①（20mm 以下）の 1 種類を対象とする。波の検定で作成した不規則波を作用させ、かき殻の安定性を目視観察とビデオ撮影により確認する。波高はかき殻に被害が発生するまで段階的に上げていく。

波浪実験では「波動流速」による整理にも対応するため、流速計を設置して流速の測定も行った。

② 定常流実験

定常流実験では、かき殻は 2 種類（20mm 以下・未選別）を対象とする。ポンプにより水路内の水を回流させて水路内に定常流を発生させる。流速はかき殻の段階評価ができるよう、なるべく小刻みに流速を上げていく。

1 ケースあたりの作用時間は 3 分程度とし、その後はポンプの回転数を上げて流速を上げ、このサイクルを繰り返す。流速が上昇している移行時間は 1～2 分程度であり、約 4～5 分のサイクルで流速をランクアップさせる。流速の代表値は 3 分間のデータを平均した値とする。

実験中は目視確認やビデオ撮影を行い、移動状況を把握する。

③ 沈降実験

沈降実験では、かき殻は 2 種類（20mm 以下・未選別）を対象とする。水路内に 0.5m の水を張った状態でかき殻を投下し、下記の式に示す落下距離と着底までにかかった時間から沈降速度を求める。

着底時間はビデオ撮影した動画を解析して求める。かき殻はそれぞれ 50 個を抽出し、1 個ずつ落下させる。

沈降速度は以下の式より求めた。

$$\text{沈降速度} = \text{落下距離(m)} \div \text{着底時間 (s)}$$

3) 実験結果

① 波浪実験の結果

ア. 波浪及び流速の解析結果

波浪実験による波浪と流速の解析結果を表- 5 に示す。波浪の解析結果は有義波周期 $T_{1/3}$ 、有義波高 $H_{1/3}$ と、参考までに最大波高 H_{max} 、1/10 最大波高 $H_{1/10}$ 、換算沖波波高 Ho' を併せて示す。

流速についても波浪と同じく V_{max} 、 $V_{1/10}$ 、 $V_{1/3}$ で示す。流速は波の進行方向を正として極大値（押し波時）と極小値（引き波時）に分類し、3 か所で測定した $V1 \sim V3$ とこれらの平均値を示す。流速はかき殻天端面から 1.5cm の高さで計測した。

流速は以下のような傾向がある。

- 波高が大きくなるにつれ、流速も大きくなる。
- 流速は3か所測定したうち天端中央（V2）が大きい傾向にある。
- 極大値（押し波時）と極小値（引き波時）の流速の絶対値を比較すると極大値（押し波時）の方が流速は大きい。

波動による流速を基にした整理では、「平均流速」を用いるものとする。

表- 5 波浪実験による波浪と流速の解析結果

No	かき殻の規格	波浪				水平流速(m/s)								
		項目	H(m)	$T_{1/3}$ (s)	Ho' (m)	項目	極大値(押し波時)				極小値(引き波時)			
							V1	V2	V3	平均	V1	V2	V3	平均
1-1_1	①	H_{max}	0.132	2.63	0.066	V_{max}	0.36	0.49	0.47	0.44	-0.30	-0.33	-0.32	-0.32
		$H_{1/10}$	0.084			$V_{1/10}$	0.23	0.32	0.30	0.28	-0.22	-0.23	-0.23	-0.23
		$H_{1/3}$	0.066			$V_{1/3}$	0.18	0.25	0.23	0.22	-0.17	-0.18	-0.19	-0.18
1-1_2		H_{max}	0.196	2.63	0.097	V_{max}	0.46	0.75	0.56	0.59	-0.44	-0.46	-0.39	-0.43
		$H_{1/10}$	0.126			$V_{1/10}$	0.33	0.50	0.40	0.41	-0.31	-0.33	-0.30	-0.31
		$H_{1/3}$	0.098			$V_{1/3}$	0.26	0.39	0.31	0.32	-0.24	-0.26	-0.25	-0.25
1-1_3		H_{max}	0.250	2.58	0.123	V_{max}	0.53	0.91	0.79	0.74	-0.59	-0.57	-0.44	-0.53
		$H_{1/10}$	0.159			$V_{1/10}$	0.41	0.60	0.48	0.50	-0.37	-0.40	-0.35	-0.37
		$H_{1/3}$	0.124			$V_{1/3}$	0.33	0.47	0.39	0.40	-0.28	-0.32	-0.29	-0.30
1-1_4	H_{max}	0.310	2.52	0.167	V_{max}	0.62	1.08	0.90	0.87	-0.63	-0.71	-0.58	-0.64	
	$H_{1/10}$	0.215			$V_{1/10}$	0.51	0.67	0.60	0.59	-0.46	-0.50	-0.44	-0.47	
	$H_{1/3}$	0.169			$V_{1/3}$	0.43	0.55	0.50	0.49	-0.36	-0.40	-0.36	-0.37	

※流速は波の進行方向を正

※流速はかき殻天端面から1.5cmの高さで測定、静水面から測定位置までの高さは23.5cm

イ. 波浪実験による安定性

波浪によるかき殻の移動状況は図-4に示すとおりである。かき殻の移動形態は主に表層移動であり、波の運動に合わせて前後に移動する。押し波時の流速の方が大きいいため岸側への移動量が多い。初期断面は台形状であるが波の作用により法肩から洗堀される。波浪条件が厳しくなると天端部分も洗堀され最終的に丘陵状になる。

安定性を評価する上で、No1-1_1～No1-1_4の4種類の波浪条件のどこまでが安定で、どこからが移動か判定する必要がある。しかし、かき殻の大きさや形状が様々であり、どの大きさまでを検査対象とするか、また、仮に大きさの範囲を決定しても数が多いため対象とする大きさの判定や被害個数を正確に把握することができない。

そこで、今回の安定評価については、天端面の移動について着目し、「安定」と「移動」の2段階で判定を行った。

安定評価の結果としては表-6に示すとおり、No. 1-1_1ではかき殻自体の動揺は見られたものの、構造物における天端面の移動はほぼ無い状態であったことから、No1-1_1は「安定」と判定した。No. 1-1_2、No. 1-1_3、No. 1-1_4については、天端面の移動が確認されることから「移動」と判定した。

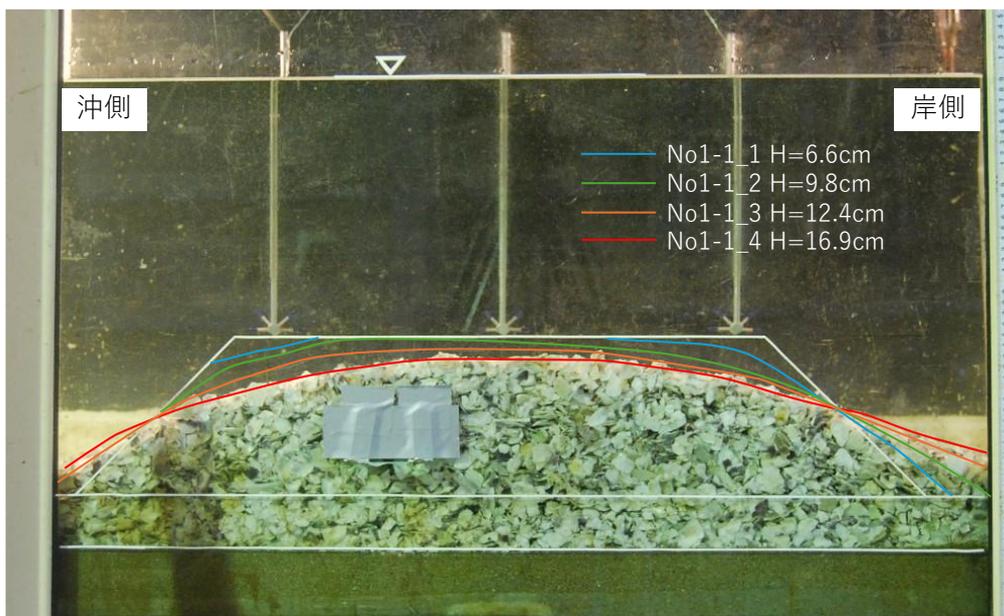


図-4 かき殻の移動状況

表-6 波浪実験による安定性の判定結果

No	かき殻の規格	不動0型	微動I型	転動II型	集積・埋没III型	流失IV型	備考
1-1_1	20mm以下	○	○				安定
1-1_2			○	○	○		移動
1-1_3					○	○	移動
1-1_4					○	○	移動

○：確認された

空欄：確認されない

②定常流実験の結果

定常流実験による水位と流速の解析結果を表-7に示す。表の値は定常状態で3分間測定したデータを平均した値である。水深は定常流で変化した水面からかき殻の天端の高さまでの距離である。流速は流れの進行方向を正とし、3か所で測定したV1~V3とこれらの平均値を示す。流速はかき殻天端面から1.5cmの高さで測定した。流速が速くなると下流側の水位が低下し、V3の流速はV1、V2に比べて大きくなる傾向が確認できる。

定常流実験における安定性の判定結果としては、表-8に示すとおりである。波浪実験と同様に「安定」と「移動」の2段階で判定した場合は、No.2-1_1とNo.2-2_1が「安定」と判定される。

表-7 定常流実験による水位と流速の解析結果

No	かき殻の規格	ポンプ回転数	平均水深(m)				平均水平流速(m/s)			
			沖側(ch3)	中央(ch4)	岸側(ch5)	平均	沖側(V1)	中央(V2)	岸側(V3)	平均
2-1_1	①	26Hz	0.145	0.135	0.134	0.138	0.43	0.28	0.33	0.35
2-1_2		29Hz	0.144	0.129	0.129	0.134	0.48	0.40	0.45	0.44
2-1_3		33Hz	0.144	0.120	0.124	0.129	0.55	0.52	0.50	0.52
2-1_4		36Hz	0.145	0.115	0.112	0.124	0.57	0.61	0.71	0.63
2-1_5		39Hz	0.147	0.113	0.095	0.118	0.60	0.79	1.10	0.83
2-1_6		42Hz	0.144	0.104	0.081	0.110	0.66	1.06	1.20	0.97
2-1_7		45Hz	0.146	0.102	0.071	0.106	0.70	1.12	1.34	1.05
2-2_1	②	26Hz	0.146	0.136	0.134	0.139	0.39	0.25	0.43	0.36
2-2_2		29Hz	0.145	0.131	0.130	0.135	0.42	0.61	0.63	0.55
2-2_3		33Hz	0.144	0.123	0.123	0.130	0.48	0.72	0.75	0.65
2-2_4		36Hz	0.145	0.118	0.114	0.126	0.54	0.81	0.81	0.72
2-2_5		39Hz	0.146	0.113	0.096	0.118	0.58	0.93	0.96	0.82
2-2_6		42Hz	0.146	0.121	0.080	0.116	0.62	1.00	1.20	0.94
2-2_7		45Hz	0.147	0.119	0.074	0.113	0.65	1.06	1.26	0.99

※流速は流れの進行方向を正

※流速はかき殻天端面から1.5cmの高さで測定、静水面から測定位置までの高さは13.5cm

表-8 定常流実験による安定性の判定結果

No	かき殻の規格	不動0型	微動I型	転動II型	集積・埋没III型	流失IV型	備考	
2-1_1	20mm以下	○	○				安定	
2-1_2				○	○			移動
2-1_3					○	○		移動
2-1_4					○	○		移動
2-1_5						○		移動
2-1_6						○	○	移動
2-1_7						○	※	移動
2-2_1	未選別	○	○				安定	
2-2_2				○	○			移動
2-2_3					○	○		移動
2-2_4						○		移動
2-2_5					○	○		移動
2-2_6						○	○	移動
2-2_7						○	○	移動

○：確認された 空欄：確認されない

※No.2-1_7では「流失IV型」と判定できる動きはみられなかったが、No.2-1_6でかき殻が多く飛ばされたためだと考えられる。

③沈降実験の結果

沈降実験による平均落下速度の結果を表- 9 に、実験に使用したかき殻を図- 5 に示す。落下の状況を目視しやすいよう、かき殻の大きさは全体の中でも比較的大きいものとした。

結果として、かき殻の大きさで落下速度は異なった。落下中の挙動は、かき殻①はかき殻②に比べてひらひらと舞いやすい傾向にある。このため、かき殻①の方が平均落下速度は遅く標準偏差は大きい。反対に、かき殻②は平均落下速度が速く標準偏差は小さい。なお、50 個全ての結果は表- 10 に示す。

なお、上記の結果は淡水による沈降速度であり、海水の場合は異なるため補正が必要である。補正方法は、沈降速度の算定式を用いて淡水と海水の場合の沈降速度を求め、両者の比率を補正係数とする。かき殻の密度等の条件によって変化するが、表- 11 に示すとおり、海水の場合は淡水に比べ、約 3%遅くなる結果が得られた。

このため、海水の場合には 3%の補正を与え、沈降速度はかき殻①では $0.16 \times 0.97 = 0.155\text{m/s}$ 、かき殻②では $0.24 \times 0.97 = 0.233\text{m/s}$ と推定される。

表- 9 沈降実験による平均落下速度の結果（淡水の場合）

No	かき殻の規格	水深(m)	平均落下時間(t)	平均速度(m/s)	標準偏差
3-1	①	0.5	3.11	0.16	0.05
3-2	②	0.5	2.08	0.24	0.04



図- 5 沈降実験に使用したかき殻 50 個（上：かき殻①、下：かき殻②）

表- 10 沈降実験結果の詳細

かき殻①

No	平均落下時間 (t)	水深 (m)	平均速度 (m/s)	標準偏差
3-1	3.11	0.5	0.16	0.05

回数	着水時間	着底時間	落下時間 (s)	速度 (m/s)
1	0:04.61	0:06.58	1.97	0.25
2	0:08.68	0:11.46	2.78	0.18
3	0:12.58	0:17.19	4.61	0.11
4	0:18.44	0:21.15	2.71	0.18
5	0:22.34	0:24.34	2.00	0.25
6	0:25.90	0:28.95	3.05	0.16
7	0:29.83	0:31.12	1.29	0.39
8	0:33.12	0:35.86	2.74	0.18
9	0:37.12	0:41.25	4.13	0.12
10	0:41.83	0:44.03	2.20	0.23
11	0:45.39	0:48.91	3.52	0.14
12	0:49.52	0:52.54	3.02	0.17
13	0:53.08	0:56.98	3.90	0.13
14	0:57.76	1:00.98	3.22	0.16
15	1:01.39	1:04.57	3.18	0.16
16	1:05.18	1:08.03	2.85	0.18
17	1:08.88	1:12.44	3.56	0.14
18	1:12.91	1:15.86	2.95	0.17
19	1:16.57	1:19.96	3.39	0.15
20	1:20.54	1:23.08	2.54	0.20
21	1:24.10	1:27.59	3.49	0.14
22	1:28.16	1:30.43	2.27	0.22
23	1:31.48	1:35.76	4.28	0.12
24	1:36.20	1:40.87	4.67	0.11
25	1:41.31	1:45.38	4.07	0.12
26	1:45.82	1:49.75	3.93	0.13
27	1:50.33	1:52.06	1.73	0.29
28	1:53.18	1:55.79	2.61	0.19
29	1:56.40	2:00.67	4.27	0.12
30	2:01.35	2:04.67	3.32	0.15
31	2:05.52	2:09.55	4.03	0.12
32	2:10.26	2:13.01	2.75	0.18
33	2:13.62	2:17.99	4.37	0.11
34	2:18.53	2:20.50	1.97	0.25
35	2:21.18	2:23.62	2.44	0.20
36	2:24.26	2:26.67	2.41	0.21
37	2:27.51	2:30.60	3.09	0.16
38	2:31.04	2:34.73	3.69	0.14
39	2:35.31	2:38.90	3.59	0.14
40	2:39.48	2:43.01	3.53	0.14
41	2:43.55	2:46.19	2.64	0.19
42	2:46.90	2:48.94	2.04	0.25
43	2:50.02	2:52.53	2.51	0.20
44	2:53.11	2:55.58	2.47	0.20
45	2:56.26	2:59.51	3.25	0.15
46	3:00.12	3:03.00	2.88	0.17
47	3:03.58	3:06.77	3.19	0.16
48	3:07.44	3:11.48	4.04	0.12
49	3:11.92	3:14.26	2.34	0.21
50	3:16.66	3:20.49	3.83	0.13

かき殻②

No	平均落下時間 (t)	水深 (m)	平均速度 (m/s)	標準偏差
3-2	2.08	0.5	0.24	0.04

回数	着水時間	着底時間	落下時間 (s)	速度 (m/s)
1	0:03.76	0:05.42	1.66	0.30
2	0:06.54	0:08.37	1.83	0.27
3	0:09.46	0:11.12	1.66	0.30
4	0:12.47	0:14.27	1.80	0.28
5	0:15.32	0:17.25	1.93	0.26
6	0:18.95	0:21.39	2.44	0.20
7	0:22.20	0:24.13	1.93	0.26
8	0:25.25	0:28.03	2.78	0.18
9	0:29.42	0:30.98	1.56	0.32
10	0:32.81	0:35.25	2.44	0.20
11	0:37.15	0:38.81	1.66	0.30
12	0:40.30	0:41.93	1.63	0.31
13	0:44.03	0:45.89	1.86	0.27
14	0:47.62	0:49.32	1.70	0.29
15	0:51.25	0:53.11	1.86	0.27
16	0:54.67	0:57.45	2.78	0.18
17	0:58.17	1:00.10	1.93	0.26
18	1:01.79	1:03.89	2.10	0.24
19	1:05.15	1:07.45	2.30	0.22
20	1:09.01	1:10.67	1.66	0.30
21	1:11.99	1:13.89	1.90	0.26
22	1:15.03	1:17.35	2.32	0.22
23	1:18.50	1:20.77	2.27	0.22
24	1:21.55	1:24.10	2.55	0.20
25	1:25.01	1:27.04	2.03	0.25
26	1:28.84	1:30.74	1.90	0.26
27	1:32.30	1:34.13	1.83	0.27
28	1:35.52	1:37.76	2.24	0.22
29	1:39.15	1:41.04	1.89	0.26
30	1:43.04	1:45.08	2.04	0.25
31	1:46.53	1:49.04	2.51	0.20
32	1:50.20	1:51.89	1.69	0.30
33	1:53.48	1:55.72	2.24	0.22
34	1:56.70	1:59.28	2.58	0.19
35	1:59.96	2:01.82	1.86	0.27
36	2:03.69	2:05.92	2.23	0.22
37	2:06.97	2:09.08	2.11	0.24
38	2:10.30	2:12.33	2.03	0.25
39	2:13.65	2:15.79	2.14	0.23
40	2:17.07	2:19.18	2.11	0.24
41	2:20.74	2:22.80	2.06	0.24
42	2:24.16	2:26.80	2.64	0.19
43	2:28.16	2:29.96	1.80	0.28
44	2:31.82	2:34.56	2.74	0.18
45	2:35.65	2:37.55	1.90	0.26
46	2:39.14	2:40.67	1.53	0.33
47	2:42.46	2:44.26	1.80	0.28
48	2:45.65	2:47.92	2.27	0.22
49	2:49.00	2:51.38	2.38	0.21
50	2:52.43	2:55.21	2.78	0.18

表- 11 海水と淡水の沈降速度の比率の検討結果

流体	水の密度 ρ_w	かき殻の 密度 ρ_k	s	重力加速度 g(m/s ²)	代表粒径 d ₅₀ (m)	動粘性係数 ν (m ² /s)	沈降速度 W(m/s)
淡水 (実験)	1.00	2.60	2.600	9.8	0.005	0.00000114	0.227
淡水 (実験)	1.00	2.10	2.100	9.8	0.005	0.00000114	0.188

流体	水の密度 ρ_w	かき殻の 密度 ρ_k	s	重力加速度 g(m/s ²)	代表粒径 d ₅₀ (m)	動粘性係数 ν (m ² /s)	沈降速度 W(m/s)
海水	1.03	2.60	2.524	9.8	0.005	0.00000109	0.222
海水	1.03	2.10	2.039	9.8	0.005	0.00000109	0.183

※代表粒径は任意値である。
 ※動粘性係数は15℃の場合（表- 12）。

沈降速度比＝海水/淡水＝ 0.976 倍（かき殻の密度 2.6）
 0.972 倍（かき殻の密度 2.1）

淡水に比べ、海水の沈降密度は約 3%遅い。

貝殻片の沈降速度 w

$$w = \sqrt{(s-1)gd} \times \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{(s-1)gd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{(s-1)gd^3}} \right) \dots\dots\dots\text{式-3.3}$$

s : 貝殻比重(=2.726)、g : 重力加速度、d : 貝殻粒径、ν : 動粘性係数(0.01cm²/s)

「出典：漁場造成における水産系副産物(貝殻)リサイクルガイドライン、平成 19 年、水産庁漁港漁場整備部」

表- 12 動粘性係数（参考資料）

項目	水		空気
	真水	海水	
密度	1000(kg/m ³)	1025(kg/m ³)	1226×10 ⁻³ (kg/m ³)
定圧比熱(cal/g. deg)	1.00	0.94	0.24
粘性係数(kg. sec/m ²)	1.16×10 ⁻⁴	1.25×10 ⁻⁴	1.82×10 ⁻⁶
動粘性係数(m ² /sec)	1.14×10 ⁻⁶	1.09×10 ⁻⁶	14.6×10 ⁻⁶
音速(m/sec)	1,460	1,500	330 (乾燥) ~340
熱伝導率(cal/cm. sec. deg)	1.4×10 ⁻³	1.35×10 ⁻³	6×10 ⁻⁵

(2) 増殖場造成における安定性の評価

1) 波浪・流れに対する安定性の評価

① 安定性の評価方法

水理模型実験では実際のかき殻の挙動を観察し、目視での安定性の判定を行う。表-13に示す方法により、波と流れに対する安定性の評価を行う。

また、表-13の安定性の評価を行う上で必要となる項目を表-14に示す。

表-13 安定性の評価方法

項目	算定式	出典元※
波に対しての 安定性の評価方法	ハドソン式	・ 漁港基準（上巻）：PP. 99～100 ・ 港湾基準（上巻）：PP. 238～239 ・ 海岸保全：PP. 2-52～2-53
	ブレブナー・ドネリー式	・ 漁港基準（上巻）：PP. 99～100 ・ 港湾基準（上巻）：PP. 244～246 ・ 海岸保全：PP. 2-56～2-57
	表層移動限界水深 完全移動限界水深	・ 港湾基準（上巻）：PP. 277～278
	着定基質の安定質量 (波が卓越する領域)	・ 漁港基準（下巻）：PP. 829～830
流れに対しての 安定性の評価方法	イスバッシュ式	・ 漁港基準（上巻）：P. 115 ・ 港湾基準（上巻）：P. 248 ・ 海岸保全：P. 2-58
	着定基質の安定質量 (流れが卓越する領域)	・ 漁港基準（下巻）：PP. 829～830
	貝殻片挙動モデル	・ リサイクルガイドライン：PP. 43～46

※漁港基準：漁港・漁場の施設の設計参考図書、2023年版、水産庁

港湾基準：港湾の施設の技術上の基準・同解説、平成30年5月、公益社団法人日本港湾協会

海岸保全：海岸保全施設の技術上の基準・同解説、平成30年8月、全国農地海岸保全協会・公益社団法人

全国漁港漁場協会・一般社団法人全国海岸協会・公益社団法人日本港湾協会

リサイクルガイドライン：漁場造成における水産系副産物（貝殻）リサイクルガイドライン、平成19年3月、水産庁漁港漁場整備部

表- 14 評価に必要な項目一覧

項目	算定式	計算に必要な項目
波に対しての 安定性の評価方法	ハドソン式	<ul style="list-style-type: none"> かき殻の質量 有義波高
	ブレブナー・ドネリー式	<ul style="list-style-type: none"> かき殻の密度 海水の密度 法面の勾配
	表層移動限界水深 完全移動限界水深	<ul style="list-style-type: none"> 沖波波長 換算沖波波高 有義波長 有義波高 かき殻の粒径
	着定基質の安定質量 (波が卓越する領域)	<ul style="list-style-type: none"> かき殻と設置基盤との摩擦係数 かき殻の密度 海水の密度 重力加速度 有義波周期 水深 現地波長 構造物の図心の高さ
流れに対しての 安定性の評価方法	イスバッシュ式	<ul style="list-style-type: none"> かき殻の質量 かき殻の密度 流速 重力加速度 イスバッシュの定数 かき殻の海水に対する比重 法面の勾配
	着定基質の安定質量 (流れが卓越する領域)	<ul style="list-style-type: none"> かき殻と設置基盤との摩擦係数 かき殻の密度 海水の密度 重力加速度 かき殻の粒径 流速 流速を測定する高さ
	貝殻片挙動モデル	<ul style="list-style-type: none"> 流速 かき殻の沈降速度 海水中のかき殻の比重 重力加速度 かき殻の粒径

②波浪条件

現地実証実験を行っている江田島市能美町（内能美工区）の波浪条件を目標として、表- 15 に示すとおり波浪条件を設定した。ただし、実験装置の能力に応じた設定とした。

表- 15 波浪条件

波浪条件				概要
対象波		30年確率波		
沖波波高	(H_0)	0.88	m	
沖波周期	(T_0)	2.64	s	
沖波波長	(L_0)	10.87	m	
潮位	(H. W. L.)	3.76	m	広島港
換算沖波波高	(H_0')	0.86	m	
堤体前面波高	($H_{1/3}$)	0.84	m	

③かき殻の物性条件

実験装置の故障を防ぐ目的で細粒分を洗い流したかき殻（20 mm以下、未選別）より、かき殻の諸元を表- 16 のように設定した。

表- 16 かき殻の諸元（洗浄後）

かき殻の諸元			
代表質量	20mm以下	0.6	g
	未選別	4.5	g
代表密度	20mm以下	2.112	g/cm^3
	未選別	2.172	g/cm^3
中央粒径	20mm以下	10.5	mm
	未選別	18.6	mm

④安定性の評価結果

安定性の評価結果を表- 17、表- 18 に示す。

表- 17 波に対する安定性の評価結果

算定式	計算に必要な項目	評価結果	適用性
ハドソン式	<ul style="list-style-type: none"> かき殻の質量 有義波高 かき殻の密度 海水の密度 法面の勾配 	<ul style="list-style-type: none"> 安定数$K_D \approx 800$を得たが、水深40cm、波高($H_{1/3}$)17cm未満、勾配1:1という限られた条件である。 波(波圧等)の影響を受ける-3.0H以浅で施工するためには、大型の実験水槽を用いて更に波高および水深を大きくした水理模型実験を行い、適用性を検証する必要がある。 	×
プレブナー・ドネリー式			
表層移動限界水深	<ul style="list-style-type: none"> 沖波波長 換算沖波波高 有義波長 有義波高 かき殻の粒径 	<ul style="list-style-type: none"> 水深40cm、波高($H_{1/3}$)17cm未満の条件では、補正係数を用いて評価が可能である。 波(波圧等)の影響を受ける-3.0H以浅で施工するためには、大型の実験水槽を用いて更に波高および水深を大きくした水理模型実験を行い、適用性を検証する必要がある。 	△
完全移動限界水深			
着底基質の安定質量 (波が卓越する領域)	<ul style="list-style-type: none"> かき殻と設置基盤との摩擦係数 かき殻の密度 海水の密度 重力加速度 有義波周期 水深 現地波長 構造物の図心の高さ 		△

表- 18 流れに対する安定性の評価結果

算定式	計算に必要な項目	評価結果	適用性
イスパッシュ式	<ul style="list-style-type: none"> かき殻の質量 かき殻の密度 流速 重力加速度 イスパッシュの定数 かき殻の海水に対する比重 法面の勾配 	<ul style="list-style-type: none"> イスパッシュ式は、被覆石・被覆ブロックにおいて法面勾配を緩くした場合(傾斜角$< 45^\circ$)に適用できる式であり、かき殻への適用は難しい。参考:法面傾斜角が、20mm以下では$\theta = 2.25^\circ$、未選別では$\theta = 21.80^\circ$で安定する結果となった。 	×
着底基質の安定質量 (流れが卓越する領域)	<ul style="list-style-type: none"> 流速 かき殻の沈降速度 海中のかき殻の比重 重力加速度 かき殻の粒径 	<ul style="list-style-type: none"> 実験の条件では、補正係数を用いて評価が可能である。しかし、実験の水深条件は現地に比べて小さすぎる。 今後、大型の実験水槽を用いて、更に水深を大きくした水理模型実験を行うことにより、適用性の検証を評価することが可能である。 	△
貝殻片挙動モデル	<ul style="list-style-type: none"> 流速 かき殻の沈降速度 海中のかき殻の比重 重力加速度 かき殻の粒径 	<ul style="list-style-type: none"> かき殻特有の物性値をもとに「貝殻片挙動モデル」の評価式で安定性を評価する場合、かなり安全側の評価になることが分かった。 かき殻特有の物性値をもとに実験を行った結果、uを直接計測して用いる場合、$(1 \leq u/w \leq 5)$であれば判定条件を見直して評価することが可能と考える。 	○

2) 安定性の評価式

①ハドソン式、ブレブナー・ドネリー式

ハドソン式は、波力を受ける斜面を被覆するための捨石や消波ブロックの所要重量を算定する式である。波の高さ、捨石や消波ブロックの重量、波の周期などを考慮して、捨石や消波ブロックが安定するか判断する。マウンド天端高の水深は-1.5H以浅に使用する。

ブレブナー・ドネリー式は、ハドソン式を基にしており、混成防波堤などに適用されるように改良されている。マウンド天端高の水深は-2.5H以深に使用する。

・ハドソン式

$$W = \frac{\rho_r H^3}{K_D \cot \theta (\rho_r / \rho_0 - 1)^3}$$

・ブレブナー・ドネリー式

$$W = \frac{\rho_r H^3}{N_S^3 (\rho_r / \rho_0 - 1)^3}$$

W : ブロック等の安定質量(t)

H : ブロック等の法先水深における進行波としての有義波高(m)

ρ_r : ブロック等の密度(t/m³)

ρ_0 : 海水の密度(t/m³)

θ : 法面が水平面となす角度

K_D : ブロック等の安定数

N_S : ブロック等の安定数

②表層移動限界水深、完全移動限界水深

移動限界水深とは、波や潮流によって海底の砂や堆積物が移動しなくなる水深である。

表層移動限界は、海底における表層の砂が波向きの方に集団的に掃流される場合、完全移動限界は、水深変化が明瞭に現れるほどに顕著な移動を示す場合である。

- ・表層移動限界水深

$$\frac{H_0}{L_0} = 1.35 \left(\frac{d}{L_0} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h_i H_0}{L H}$$

- ・完全移動限界水深

$$\frac{H_0}{L_0} = 2.40 \left(\frac{d}{L_0} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h_i H_0}{L H}$$

L_0 : 沖波波長 (m)

H_0 : 換算沖波波高 (m)

L : 水深 h_i での波長 (m)

H : 水深 h_i での波高 (m)

d : 底質粒径 (平均粒径または中央粒径) (m)

h_i : 移動限界水深 (m)

③イスバッシュ式

イッシュバッシュ式は、主に津波や強い流れに対する構造物の安定性を評価するために使用する。特に防波堤や堤防の設計において、流速や水位、斜面の傾斜角などの条件を考慮して、被覆ブロックや捨石の安定質量を算定する。

$$M = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3}$$

M : 安定質量 (t)

ρ_r : 捨石等の密度 (t/m³)

U : 捨石等の上面における水の流れの速度 (m/s)

g : 重力加速度 (m/s²)

y : イッシュバッシュの定数

S_r : 捨石等の海水に対する比重

θ : 捨石マウンド等の法面の傾斜角 (°)

④着定基質の安定質量

着定基質は、増殖場として整備される生息場の総称で、藻場礁、保護育成礁及び干潟・浅場に大別される。主に石材や異形ブロックなどが使用され、餌料海藻類の着生基盤として設置される。その安定質量は、波、流れによる安定性を算定し判断する。

- ・ 石材の安定質量

$$M_{50} = \alpha \rho_s D_{n50}^3$$

M_{50} : 石材の安定質量

α : 設置方法の効果を表す係数 (以下の値)

$$\left(\begin{array}{l} 1 \quad : \text{単体で設置} \\ 0.2 \quad : \text{敷き詰め密度 75\%以上の群で設置} \\ 0.04 \quad : \text{囲い礁を設けて敷き詰め密度 75\%以上の群で設置} \end{array} \right)$$

ρ_s : 石材の密度 (t/m³)

D_{n50} : 単体で設置する石材の安定質量の立方体相当径で、波が卓越する領域と流れが卓越する領域で異なる

D_{n50} の算定式

- ・ 波が卓越する領域 ($u_{min} < 0\text{m/s}$ の場合)

$$\left(7.28 - \ln \frac{u_{max} T_{zp}}{D_{n50}} \right) \frac{U_a^2}{\mu (\rho_s / \rho - 1) g D_{n50}} = \phi_{cr}$$

u_{max} : 底面における最大流速波形の最大値 (m/s)

T_{zp} : 最大流速波形のゼロ・クロス点から最大値までの時間 (s)

U_a : 底面 ($z_A=0\text{m}$) における最大流速波形の流速振幅 (m/s)

μ : 石材と設置基盤との摩擦係数

ρ_s : 石材の密度 (t/m³)

ρ : 海水の密度 (t/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

ϕ_{cr} : 被害率 10%における被災限界係数 (=2.8)

$$Ua = rU_{Airy}$$

$$r = \left\{ 1 - 0.471 \tanh \left[1.46 \left(\frac{H_{ref}}{h} \right)^{1.44} \right] \right\} \left(0.947 + 3.77 \frac{H_{1/3}}{L} \right)$$

$$U_{Airy} = \frac{\pi H_{ref} \cosh(2\pi Z_A/L)}{T \sinh(2\pi h/L)}$$

$$u_{max} = \frac{\pi H_{ref}}{T \sinh(2\pi h/L)}$$

$$T_{zp} = \left\{ 1 - 0.967 \tanh \left[0.855 \left(\frac{H_{ref}}{h} \right)^{0.883} \right] \right\} \frac{T}{4}$$

$$L = \frac{gt^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

H_{ref} : 参照波高 (m)

$T=T_{1/3}=T_0$: 設計対象地点における有義波周期 (s)

h : 水深 (m)

L : 設計対象地点における微小振幅波の波長 (m)

$$H_{ref} \begin{cases} h/H_0' \geq 4.0 = 1.8H_{1/3} \\ h/H_0' < 4.0 = \lambda_0 H_{1/3} \end{cases}$$

・ 流れが卓越する領域 ($u_{min} \geq 0$ m/s の場合)

$$D_{n50} = \frac{K_m U_{rms}^2}{\mu(\rho_s/\rho - 1)g}$$

$$K_m = 2.3$$

U_{rms} : 流速の鉛直分布を考慮した底面から石材の天端までの二乗平均平方根流速 (m/s)

μ : 石材と設置基盤との摩擦係数

ρ_s : 石材の密度 (t/m³)

ρ : 海水の密度 (t/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

$$U_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2n+1}} \left(\frac{b}{z_0} \right)^n U_c$$

n : べき乗流速分布のべき数 (=1/7)

b : 石材の比高 (m)

U_c : 流れの速度 (m/s)

z_0 : U_c を与える底面からの高さ (m)

⑤貝殻片挙動モデル

「漁場造成における水産系副産物（貝殻）リサイクルガイドライン」（平成19年3月、水産庁漁港漁場整備部）に示されており、敷設するホタテ殻の安定性について、造成区域の波浪外力を基に評価し、流出せぬよう貝殻粒径と水深を設定するものである。

- ・ 波浪流速振幅 u

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\sinh(kh)}$$

- ・ 起動振幅 a_m

$$a_m = \frac{H}{2} \cdot \frac{1}{\sinh(kh)}$$

H : 有義波高(m)

T : 周期(s)

k : 波数 (= $2\pi/L$: L は波長)

h : 水深(m)

- ・ 貝殻片の沈降速度 w

$$w = \sqrt{(s-1)gd} \times \left(\sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{(s-1)gd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{(s-1)gd^3}} \right)$$

s : 貝殻比重 (t/m^3)

g : 重力加速度 (m/s^2)

d : 貝殻粒径 (m)

ν : 動粘性係数 ($0.01cm^2/s$)

- ・ シールズ数 Ψ

$$\Psi = \frac{fu^2}{2(s-1)gd}$$

- ・ ジョンソンの摩耗係数 f

$$\frac{a_m}{d} \geq 1.57 \quad f = \exp\left(-5.977 + 5.213\left(\frac{a_m}{d}\right)^{-0.194}\right)$$

$$\frac{a_m}{d} < 1.57 \quad f = 0.30$$

u/w が	$e^{18.06} \Psi^{3.16}$ 以上	ならば	不動 (0型)
	$e^{6.96} \Psi^{1.51} \sim e^{18.06} \Psi^{3.16}$		微動 (I型)
	$e^{6.71} \Psi^{1.67} \sim e^{6.96} \Psi^{1.51}$		転動 (II型)
	$e^{4.77} \Psi^{1.33} \sim e^{6.71} \Psi^{1.67}$		集積・埋没 (III型)
	$e^{4.77} \Psi^{1.33}$ 以下		流失 (IV型)

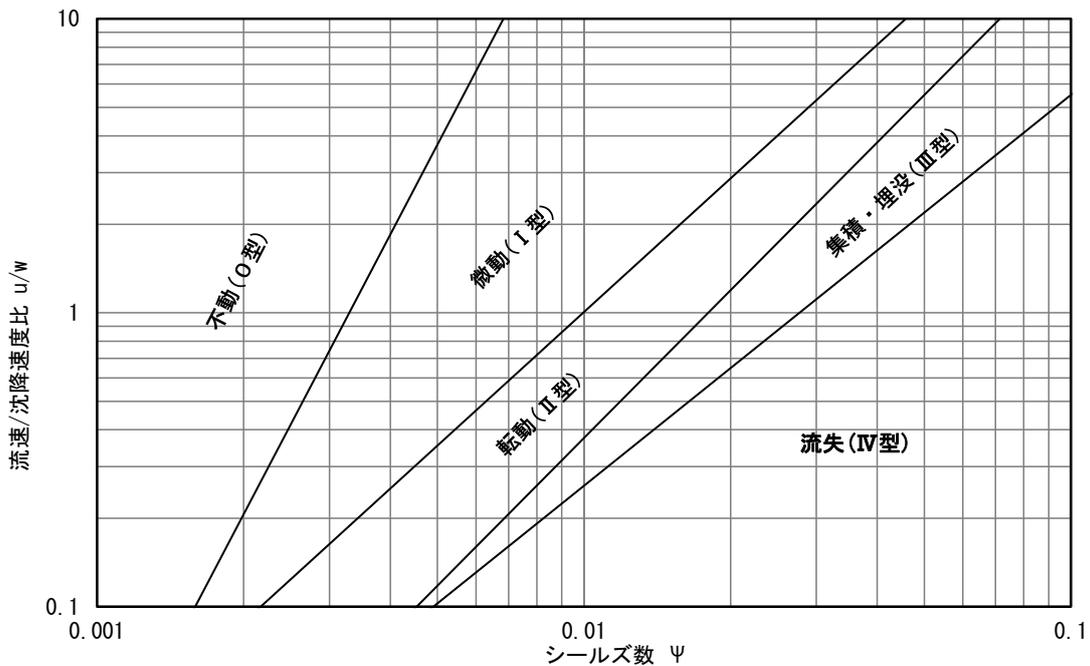


図- 6 水槽実験からの判定条件 (貝殻片挙動モデル)

表- 19 貝殻片挙動モデルにおける状態のタイプ区分

タイプ	状態
不動(0型)	貝殻片は動揺せず、安定している。
微動(I型)	一部の貝殻片は動揺するが、移動は認められない。 この状態は、砂粒子の挙動区分における初期移動に該当すると考えられる。
転動(II型)	ほとんどの貝殻片が動揺するとともに、一部の貝殻片(半数以下)が底面上を転動する。 この状態は、砂粒子の挙動区分における掃流移動に該当すると考えられる。
集積・埋没(III型)	一部の貝殻片が転動を伴いながら底面を浮遊する。また、ほとんどの貝殻片が直立状態で集積し、パッチを形成する。 この状態は、砂粒子の挙動区分における浮遊移動及び砂漣形成に相当すると考えられる。
流失(IV型)	全ての貝殻片が底面から浮遊した状態で移動し、パッチが消滅する。 この状態は、砂粒子の挙動区分におけるシートフローに相当すると考えられる。

3) 安定性の評価検討

水理模型実験では実際のかき殻の挙動を観察し、表- 19 に示す貝殻片挙動モデルを用いた 5 段階の安定性の判定を行っている。

表- 20 及び表- 21 に示すとおり、かき殻の挙動が確認された場合は【○】で示し、確認されない場合は空欄としている。

表- 20 水理模型実験の貝殻片挙動モデルを用いた 5 段階の安定性判定結果（波浪実験）

No	かき殻の規格	不動 0型	微動 I型	転動 II型	集積・埋没 III型	流失 IV型	備考
1-1_1	20mm 以下	○	○				安定 不動0型
1-1_2			○	○	○		移動 微動I型, 転動II型
1-1_3					○	○	移動 集積・埋没III型
1-1_4					○	○	移動 流失IV型

○：確認された ○：若干確認された 空欄：確認されない

表- 21 水理模型実験の貝殻片挙動モデルを用いた 5 段階の安定性判定結果（定常流実験）

No	かき殻も規格	不動 0型	微動 I型	転動 II型	集積・埋没 III型	流失 IV型	備考	
2-1_1	20mm 以下	○	○				安定 不動0型	
2-1_2			○	○			移動 微動I型	
2-1_3					○	○	移動 転動II型	
2-1_4					○	○	移動 集積・埋没III型	
2-1_5						○	移動 集積・埋没III型	
2-1_6						○	○	移動 流失IV型
2-1_7						○	※	移動 流失IV型
2-2_1	未選別	○	○				安定 不動0型	
2-2_2			○	○			移動 微動I型	
2-2_3					○	○	移動 転動II型	
2-2_4						○	移動 集積・埋没III型	
2-2_5					○	○	移動 集積・埋没III型	
2-2_6						○	○	移動 流失IV型
2-2_7						○	○※	移動 流失IV型

○：確認された ○：若干確認された 空欄：確認されない

※No. 2-1_7, No. 2-2_7 では、「流失IV型」と判定できる動きはあまりみられなかったが、No. 2-1_6、No. 2-2_6 でかき殻が多く飛ばされたためだと考えられる。そのため、「流失IV型」とする。

①ハドソン式、ブレブナー・ドネリー式

水理模型実験のかき殻の法面勾配は、1:1.0 である。ハドソン式とブレブナー・ドネリー式は同様の算定方法 ($K_D \cot \theta = N_s^3$) になるため、ハドソン式で算定を行った。

波浪実験の有義波高から安定数 K_D を算定した結果は、表- 22 に示す。

表- 20 に示すとおり、水理模型実験で「安定」と判定出来たものは No. 1-1_1 のみである。

よって、ハドソン式及びブレブナー・ドネリー式を用いて安定性を評価する場合、安定数 $K_D=873$ ($N_s^3=873$) を用いることで評価することが可能である。

しかし、この安定数が適用可能となるのは法面の傾斜角が $\theta=45^\circ$ (法面勾配=1:1.0) のみの場合であり、それ以外の傾斜角へ適用出来るかは確認できていない。

また、今回の水理模型実験結果のみでは、検証数が少ないため精度や信頼性を十分に保証することは出来ない。当式の妥当性を検証するためには今後も実験を行い、精度を上げていく必要がある。

表- 22 ハドソン式による安定数の算定結果

No	かき殻の規格	質量	有義波高	貝殻密度	海水の密度	法面の傾斜角		安定数	判定	
		W (t)	H (m)	ρ_r (t/m ³)	ρ_o (t/m ³)	θ (°)	(法面勾配)			
1-1_1	20mm 以下	6.0E-07	0.066	2.112	1.03	45.00	(1: 1.00)	873	○	安定
1-1_2			0.098			45.00	(1: 1.00)	2,858	×	移動
1-1_3			0.124			45.00	(1: 1.00)	5,789	×	
1-1_4			0.169			45.00	(1: 1.00)	14,657	×	

=0.6g

②表層移動限界水深、完全移動限界水深

表層移動限界水深の算定結果を表- 23 に、完全移動限界水深の算定結果を表- 24 に示す。表- 20 に示すとおり、水理模型実験で「安定」と判定出来たものは No. 1-1_1 のみである。

計算の結果、表層移動限界水深は 0.036m、完全移動限界水深は 0.044m となったが、実験時のかき殻の天端面は水深 0.25m であるため、計算結果と一致しない。そこで、表- 25 に示すとおり、計算結果と実験時の水深が同一になるよう、表層移動限界水深及び完全移動限界水深の補正係数を算定した。

結果として、表層移動限界水深では補正係数 6.864、完全移動限界水深では補正係数 5.661 を考慮することによって、移動限界水深の算定が可能である。

波（波圧等）の影響を受ける-3.0H 以浅で施工するためには、大型の実験水槽を用いて更に波高及び水深を大きくした水理模型実験を行い、適用性を検証する必要がある。

表- 23 表層移動限界水深の算定結果

No	かき殻の規格	沖波波長	沖波波高	波長	周期	波高	貝殻粒径 <i>d</i> (m)	表層移動限界水深	判定	
		<i>L₀</i> (m)	<i>H₀</i> (m)	<i>L</i> (m)	<i>T</i> (s)	<i>H</i> (m)		<i>h_i</i> (m)		
1-1_1	20mm 以下	10.79	0.066	5.01	2.63	0.066	0.0105	0.036	○	安定
1-1_2		10.79	0.097	5.01	2.63	0.098		0.054	×	移動
1-1_3		10.38	0.123	4.90	2.58	0.124		0.069	×	
1-1_4		9.91	0.167	4.78	2.52	0.169		0.094	×	

表- 24 完全移動限界水深の算定結果

No	かき殻の規格	沖波波長	沖波波高	波長	周期	波高	貝殻粒径 <i>d</i> (m)	完全移動限界水深	判定	
		<i>L₀</i> (m)	<i>H₀</i> (m)	<i>L</i> (m)	<i>T</i> (s)	<i>H</i> (m)		<i>h_i</i> (m)		
1-1_1	20mm 以下	10.79	0.066	10.79	2.63	0.066	0.0105	0.044	○	安定
1-1_2		10.79	0.097	10.79	2.63	0.098		0.066	×	移動
1-1_3		10.38	0.123	10.38	2.58	0.124		0.082	×	
1-1_4		9.91	0.167	9.91	2.52	0.169		0.110	×	

表- 25 補正係数の算定結果

No		移動限界水深 <i>h_i</i> (m)	実験時水深 (m)	※ 補正係数
1-1_1	表層移動限界水深	0.036	0.25	6.864
1-1_2	完全移動限界水深	0.044		5.661

※実験時水深 ÷ 移動限界水深

③イスバッシュ式

イスバッシュ式は、法面の角度が急になるほど安定質量が大きくなり、法面の傾斜角が $\theta=45^\circ$ （法面勾配=1:1.0）で無限大となり発散する。水理模型実験のかき殻の法面勾配は 1:1.0 であるため、実験内容を検証することが出来ない。

このため、今回はかき殻の質量により、安定する法面の傾斜角を逆算して整理することとした。

表- 21 に示すとおり、水理模型実験で「安定」と判定出来たものは、20mm 以下では No. 2-1_1、未選別では No. 2-2_1 のみである。

算定を行うにあたり、イスバッシュ定数を設定する必要があるが、今回は、石材と同様に $y=0.86$ で算定を行った。

安定する法面の傾斜角を算定した結果は表- 26 及び表- 27 に示すとおりである。20mm 以下(=0.6g)では法面の傾斜角が $\theta=2.25^\circ$ （法面勾配=1:25.5）、未選別(=4.5g)では法面の傾斜角が $\theta=21.80^\circ$ （法面勾配=1:2.5）で安定することが分かった。

しかしながら、イスバッシュ式は、被覆石・被覆ブロックにおいて法面勾配を緩くした場合(傾斜角 $<45^\circ$)に適用でき式である上に、流速の6乗を基に算定するため、算定値が異常に大きくなる場合があり、扱いに留意が必要となっている。

現段階では、かき殻への適用は難しいと判断する。

表- 26 イスバッシュ式による法面の傾斜角の算定結果（20mm 以下）

No	かき殻の規格	貝殻密度 ρ_r (t/m ³)	流速 U (m/s)	重力加速度 g (m/s ²)	イスバッシュ定数 y	貝殻比重 S_r (t/m ³)	法面の傾斜角 θ		安定質量 M		判定
							(°)	(法面勾配)	(t)	(g)	
2-1_1	20mm 以下	2.112	0.35	9.81	0.86	2.050	2.25	(1:25.5)	6.5E-07	0.6	○ 安定
2-1_2			0.44				2.25	(1:25.5)	2.6E-06	2.6	×
2-1_3			0.52				2.25	(1:25.5)	7.0E-06	7.0	×
2-1_4			0.63				2.25	(1:25.5)	2.2E-05	22.1	×
2-1_5			0.83				2.25	(1:25.5)	1.2E-04	115.4	×
2-1_6			0.97				2.25	(1:25.5)	2.9E-04	293.9	×
2-1_7			1.05				2.25	(1:25.5)	4.7E-04	472.8	×

※法面勾配は（1：0.5）単位で算定。

表- 27 イスバッシュ式による法面の傾斜角の算定結果（未選別）

No	かき殻の規格	貝殻密度 ρ_r (t/m ³)	流速 U (m/s)	重力加速度 g (m/s ²)	イスバッシュ定数 y	貝殻比重 S_r (t/m ³)	法面の傾斜角 θ		安定質量 M		判定
							(°)	(法面勾配)	(t)	(g)	
2-2_1	未選別	2.172	0.36	9.81	0.86	2.109	21.80	(1:2.5)	3.4E-06	3.4	○ 安定
2-2_2			0.55				21.80	(1:2.5)	4.4E-05	43.7	×
2-2_3			0.65				21.80	(1:2.5)	1.2E-04	119.1	×
2-2_4			0.72				21.80	(1:2.5)	2.2E-04	220.0	×
2-2_5			0.82				21.80	(1:2.5)	4.8E-04	480.2	×
2-2_6			0.94				21.80	(1:2.5)	1.1E-03	1,089.6	×
2-2_7			0.99				21.80	(1:2.5)	1.5E-03	1,487.1	×

※法面勾配は（1：0.5）単位で算定。

④着定基質の安定質量

・波が卓越する領域 ($u_{min} < 0\text{m/s}$ の場合)

波が卓越する領域での着定基質の安定質量を算定した結果を表- 28 に示す。表- 20 に示すとおり、水理実験で「安定」と判定出来たものはNo. 1-1_1のみである。

計算の結果、波が卓越する領域での着定基質の安定質量は、 $M_{50}=1.08\text{g}$ となった。

しかし、かき殻の質量(20mm以下)は0.6gなので、計算結果と一致しない。そこで、表- 29 に示すとおり、計算結果と実験時の質量が同一になるよう、補正係数を算定した。

結果として、補正係数0.554を考慮することによって、波が卓越する領域での着定基質の安定質量の算定が可能である。

なお、波(波圧等)の影響を受ける-3.0H以浅で施工するためには、大型の実験水槽を用いて更に波高及び水深を大きくした水理模型実験を行い、適用性を検証する必要がある。

表- 28 波が卓越する領域での着定基質の安定質量の算定結果

No	かき殻の規格	係数 α	貝殻密度 ρ_s (t/m^3)	立方体相当径 Dn_{50} (m)	安定質量 M_{50}		判定
					(t)	(g)	
1-1_1	20mm以下	1.00	2.112	0.008002	0.00000108	1.08	○ 安定
1-1_2				0.018178	0.00001269	12.69	×
1-1_3				0.028537	0.00004908	49.08	×
1-1_4				0.049071	0.00024956	249.56	×

No	最大流速 u_{max} (m/s)	周期 T_{zp} (s)	流速振幅 U_a (m/s)	摩擦係数 μ	貝殻密度 ρ_s (t/m^3)	海水密度 ρ (t/m^3)	重力加速度 g (m/s^2)	被災限界係数 Φ_{cr}
1-1_1	0.200	0.517	0.185	0.70	2.112	1.03	9.81	2.8000
1-1_2	0.298	0.462	0.264					2.8000
1-1_3	0.375	0.413	0.321					2.8000
1-1_4	0.509	0.342	0.406					2.8000

No	参照波高 H_{ref} (m)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	λ_0	周期 T (s)	水深 h (m)	波長 L (m)	構造物の図心高さ Z_A (m)	r	U_{Airy}
1-1_1	0.09	0.066	1.33	2.63	0.40	5.007	0.069	0.920	0.201
1-1_2	0.13	0.098		2.63		5.007		0.885	0.299
1-1_3	0.16	0.124		2.58		4.904		0.853	0.377
1-1_4	0.22	0.169		2.52		4.780		0.794	0.511

表- 29 補正係数の算定

No	安定質量 (g)	かき殻の質量 (g)	※補正係数
1-1_1	1.08	0.6	0.554

※かき殻の質量÷安定質量

・流れが卓越する領域 ($u_{min} \geq 0\text{m/s}$ の場合)

流れが卓越する領域での着定基質の安定質量を算定した結果は表- 30 及び表- 31 に示すとおりである。表- 21 に示すとおり、水理模型実験で「安定」と判定出来たものは、20mm 以下では No. 2-1_1、未選別では No. 2-2_1 のみである。

計算結果として、流れが卓越する領域での着定基質の安定質量は、20mm 以下の No. 2-1_1 では $M_{50} = 54.56\text{g}$ 、未選別時の No. 2-2_1 では $M_{50} = 56.51\text{g}$ となった。

しかし、かき殻の質量は、20mm 以下では 0.6g、未選別では 4.5g なので、計算結果と一致しない。そこで、表- 32 に示すとおり、計算結果と実験時の質量が同一になるよう、補正係数を算定した。

結果として、20mm 以下では補正係数 0.011、未選別では補正係数 0.080 を考慮することによって、流れが卓越する領域での着定基質の安定質量の算定が可能である。

なお、今後、大型の実験水槽を用いて更に水深を大きくした水理模型実験を行うことにより、適用性の検証を評価することが可能である。

表- 30 流れが卓越する領域での着定基質の安定質量の算定結果 (20mm 以下)

No	かき殻の規格	係数 α	貝殻密度 ρ_s (t/m^3)	立方体相当径 Dn_{50} (m)	安定質量 M_{50}		判定
					(t)	(g)	
2-1_1	20mm 以下	1.00	2.112	0.029562	5.5E-05	54.56	○ 安定
2-1_2				0.046720	2.2E-04	215.38	×
2-1_3				0.065254	5.9E-04	586.83	×
2-1_4				0.095781	1.9E-03	1,855.82	×
2-1_5				0.166248	9.7E-03	9,704.25	×
2-1_6				0.227061	2.5E-02	24,724.28	×
2-1_7				0.266059	4.0E-02	39,776.73	×

No	K_m	二乗平均平方根流速 U_{rms}	摩擦係数 μ	貝殻密度 ρ_s (t/m^3)	海水密度 ρ (t/m^3)	重力加速度 g (m/s^2)
		(m/s)				
2-1_1	2.3	0.304	0.70	2.112	1.03	9.81
2-1_2		0.383				
2-1_3		0.452				
2-1_4		0.548				
2-1_5		0.722				
2-1_6		0.844				
2-1_7		0.913				

No	べき乗流速分布のべき数 n	貝殻比高 b	流速 U_c	流速を与える高さ z_0
		(m)	(m/s)	(m)
2-1_1	0.143	0.1500	0.35	0.165
2-1_2			0.44	
2-1_3			0.52	
2-1_4			0.63	
2-1_5			0.83	
2-1_6			0.97	
2-1_7			1.05	

表- 31 流れが卓越する領域での着定基質の安定質量の算定結果（未選別）

No	かき殻の規格	係数 α	貝殻密度 ρ_s (t/m ³)	立方体相当径 Dn_{50} (m)	安定質量 M_{50}		判定	
					(t)	(g)		
2-2_1	未選別	1.00	2.172	0.029632	5.7E-05	56.51	○	安定
2-2_2				0.069165	7.2E-04	718.65	×	移動
2-2_3				0.096602	2.0E-03	1,958.05	×	
2-2_4				0.118529	3.6E-03	3,616.91	×	
2-2_5				0.153741	7.9E-03	7,892.70	×	
2-2_6				0.202030	1.8E-02	17,910.59	×	
2-2_7				0.224095	2.4E-02	24,442.96	×	

No	K_m	二乗平均平方根流速 U_{rms} (m/s)	摩擦係数 μ	貝殻密度 ρ_s (t/m ³)	海水密度 ρ (t/m ³)	重力加速度 g (m/s ²)
2-2_1	2.3	0.313	0.70	2.172	1.03	9.81
2-2_2		0.478				
2-2_3		0.565				
2-2_4		0.626				
2-2_5		0.713				
2-2_6		0.818				
2-2_7		0.861				

No	べき乗流速分布のべき数 n	貝殻比高 b (m)	流速 U_c (m/s)	流速を与える高さ z_0 (m)
2-2_1	0.143	0.1500	0.36	0.165
2-2_2			0.55	
2-2_3			0.65	
2-2_4			0.72	
2-2_5			0.82	
2-2_6			0.94	
2-2_7			0.99	

表- 32 補正係数の算定

No	安定質量 (g)	かき殻の質量 (g)	※補正係数
2-1_1	54.56	0.6	0.011
2-2_1	56.51	4.5	0.080

※かき殻の質量÷安定質量

⑤貝殻片挙動モデル

既往の貝殻片挙動モデルでは、波の条件から流速（波動流速）を算定するが、今回は定常流実験から流速、沈降実験から沈降速度を設定することが可能であるため、それらを用いた安定性の評価を行う。さらに、ジョンソンの摩耗係数は、危険側に判定される $f=0.30$ に固定して計算した。

計算結果は、表- 33 及び表- 34 に示すとおりである。その結果を図- 6 の既往の判定条件（貝殻片挙動モデル）に表示したものを図- 7 に示す。結果としては、全ての項目が【流失(IV型)】の判定になった。

表- 33 実験結果を用いた貝殻片挙動モデル計算結果（20mm 以下）

No	かき殻の規格	流速	貝殻比重 s (t/m^3)	重力加速度 g (m/s^2)	貝殻粒径 d (m)	沈降速度 w (m/s)	摩耗係数 f	u/w	シールズ数	判定
		u (m/s)							ψ	
2-1_1	20mm 以下	0.35	2.112	9.81	0.0105	0.155	0.30	2.2531	0.1604	不動 O 型
2-1_2		0.44						2.8325	0.2535	微動 I 型
2-1_3		0.52						3.3475	0.3541	転動 II 型
2-1_4		0.63						4.0556	0.5198	集積・埋没 III 型
2-1_5		0.83						5.3431	0.9022	
2-1_6		0.97						6.2444	1.2322	
2-1_7		1.05						6.7594	1.4438	流失 IV 型

表- 34 実験結果を用いた貝殻片挙動モデル計算結果（未選別）

No	かき殻の規格	流速	貝殻比重 s (t/m^3)	重力加速度 g (m/s^2)	貝殻粒径 d (m)	沈降速度 w (m/s)	摩耗係数 f	u/w	シールズ数	判定
		u (m/s)							ψ	
2-2_1	未選別	0.36	2.172	9.81	0.0186	0.233	0.30	1.5450	0.0909	不動 O 型
2-2_2		0.55						2.3604	0.2122	微動 I 型
2-2_3		0.65						2.7896	0.2964	転動 II 型
2-2_4		0.72						3.0900	0.3636	集積・埋没 III 型
2-2_5		0.82						3.5192	0.4716	
2-2_6		0.94						4.0342	0.6198	
2-2_7		0.99						4.2488	0.6875	流失 IV 型

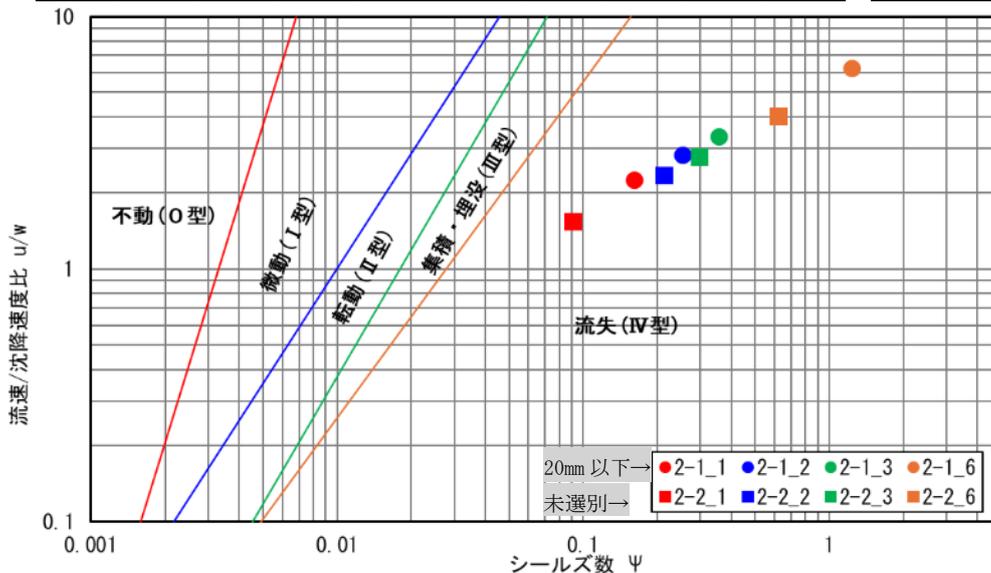


図- 7 安定性の評価結果

水理模型実験では表- 21 に示したとおり、【不動 (0型)】、【微動 (I型)】、【転動 (II型)】、【集積・埋没 (III型)】、【流失 (IV型)】 の判定を行っている。その判定を基に、【0型 - I型】、【I型 - II型】、【II型 - III型】、【III型 - IV型】 のそれぞれの境界を移動することとした。

【0型 - I型】の境界値を「No. 2-1_1」と「No. 2-2_1」、【I型 - II型】の境界値を「No. 2-1_2」と「No. 2-2_2」、【II型 - III型】の境界値を「No. 2-1_3」と「No. 2-2_3」、【III型 - IV型】の境界値を「No. 2-1_6」と「No. 2-2_6」として、それぞれ2つのデータの間地点に境界線を移動した。境界線はシールズ数 Ψ のべき乗を変化させて求めたものである。

それぞれの境界を移動し、新たな判定条件を設定した結果は表- 35 及び図- 8 に示す。かき殻の場合、これを用いた安定性の評価が可能と考える。

表- 35 境界を表す方程式の前後対比表

境界	方程式 (変更前)	方程式 (変更後)
0型 - I型	$u/w = e^{18.06} \Psi^{3.16}$	$u/w = e^{18.06} \Psi^{8.41}$
I型 - II型	$u/w = e^{6.96} \Psi^{1.51}$	$u/w = e^{6.96} \Psi^{4.11}$
II型 - III型	$u/w = e^{6.71} \Psi^{1.67}$	$u/w = e^{6.71} \Psi^{4.97}$
III型 - IV型	$u/w = e^{4.77} \Psi^{1.33}$	$u/w = e^{4.77} \Psi^{41.33}$

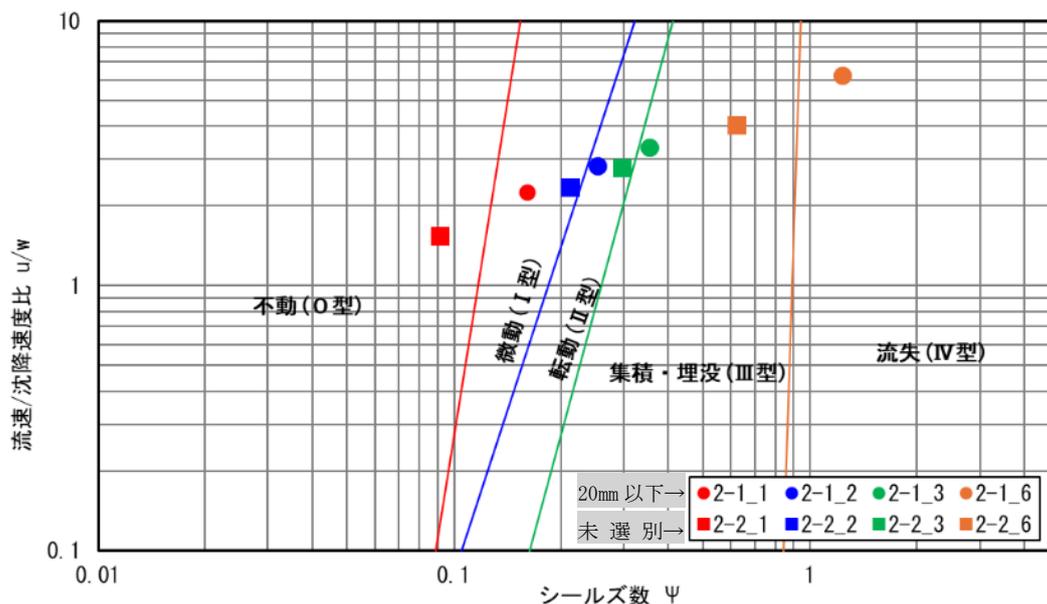


図- 8 安定性の判定条件図 (変更後)

既往成果の「令和5年度 かき殻を活用した増殖場整備に関する調査検討業務、水圏リサーチ(株)」における貝殻片挙動モデルを用いた安定性の評価について、今回の判定条件に変更した場合の安定性の評価を確認した。

既往成果では、図-9のように水深1.53mのかき殻は全て【流失(IV型)】と判定されていたが、今回設定した判定条件では、図-10に示すように全て【不動(0型)】と判定された。

表-36 既往成果の計算結果(1)

資料表 1(1) 内能美工区 (貝殻粒径 1cm)										
算定水深 h	h における波長 L	h における波高 H	海底上での波浪流速振幅 u	海底上での起動振幅 a_m	貝殻片の沈降速度 ω	ジョンソンの摩擦係数 a_m/d f		流速/沈降速度比 u/ω	シーلز数 Ψ	挙動パターン
1.53	8.71	0.79	0.70060	0.29437	0.25369	29.437	0.038	2.7617	0.094963	流失(IV型)
2.03	9.48	0.79	0.52527	0.22070		22.070	0.044	2.0705	0.062356	流失(IV型)
3.03	10.34	0.81	0.31369	0.13180		13.180	0.060	1.2365	0.030045	集積・埋没(III型)
4.03	10.68	0.83	0.18612	0.07820		7.820	0.084	0.7337	0.014813	転動(II型)
5.03	10.80	0.85	0.10873	0.04569		4.569	0.123	0.4286	0.007426	転動(II型)
6.03	10.84	0.86	0.06216	0.02612		2.612	0.192	0.2450	0.003787	微動(I型)
7.03	10.86	0.86	0.03506	0.01473		1.473	0.300	0.1382	0.001881	微動(I型)
8.03	10.86	0.86	0.01965	0.00826		0.826	0.300	0.0775	0.000591	不動(0型)
9.03	10.87	0.86	0.01107	0.00465		0.465	0.300	0.0436	0.000188	不動(0型)
10.03	10.87	0.86	0.00621	0.00261		0.261	0.300	0.0245	0.000059	不動(0型)
11.03	10.87	0.86	0.00348	0.00146		0.146	0.300	0.0137	0.000019	不動(0型)
12.03	10.87	0.86	0.00195	0.00082		0.082	0.300	0.0077	0.000006	不動(0型)
13.03	10.87	0.86	0.00110	0.00046		0.046	0.300	0.0043	0.000002	不動(0型)
14.03	10.87	0.86	0.00062	0.00026		0.026	0.300	0.0024	0.0000006	不動(0型)
14.13	10.87	0.86	0.00058	0.00024	0.024	0.300	0.0023	0.0000005	不動(0型)	
資料表 1(2) 内能美工区 (貝殻粒径 2cm)										
算定水深 h	h における波長 L	h における波高 H	海底上での波浪流速振幅 u	海底上での起動振幅 a_m	貝殻片の沈降速度 ω	ジョンソンの摩擦係数 a_m/d f		流速/沈降速度比 u/ω	シーلز数 Ψ	挙動パターン
1.53	8.71	0.79	0.70060	0.29437	0.36080	14.719	0.056	1.9418	0.070080	流失(IV型)
2.03	9.48	0.79	0.52527	0.22070		11.035	0.067	1.4558	0.047058	流失(IV型)
3.03	10.34	0.81	0.31369	0.13180		6.590	0.094	0.8694	0.023677	集積・埋没(III型)
4.03	10.68	0.83	0.18612	0.07820		3.910	0.139	0.5158	0.012254	集積・埋没(III型)
5.03	10.80	0.85	0.10873	0.04569		2.284	0.215	0.3014	0.006492	転動(II型)
6.03	10.84	0.86	0.06216	0.02612		1.306	0.300	0.1723	0.002957	微動(I型)
7.03	10.86	0.86	0.03506	0.01473		0.737	0.300	0.0972	0.000941	不動(0型)
8.03	10.86	0.86	0.01965	0.00826		0.413	0.300	0.0545	0.000296	不動(0型)
9.03	10.87	0.86	0.01107	0.00465		0.233	0.300	0.0307	0.000094	不動(0型)
10.03	10.87	0.86	0.00621	0.00261		0.130	0.300	0.0172	0.000030	不動(0型)
11.03	10.87	0.86	0.00348	0.00146		0.073	0.300	0.0097	0.000009	不動(0型)
12.03	10.87	0.86	0.00195	0.00082		0.041	0.300	0.0054	0.000003	不動(0型)
13.03	10.87	0.86	0.00110	0.00046		0.023	0.300	0.0030	0.000001	不動(0型)
14.03	10.87	0.86	0.00062	0.00026		0.013	0.300	0.0017	0.0000003	不動(0型)
14.13	10.87	0.86	0.00058	0.00024	0.012	0.300	0.0016	0.0000003	不動(0型)	
資料表 1(3) 内能美工区 (貝殻粒径 3cm)										
算定水深 h	h における波長 L	h における波高 H	海底上での波浪流速振幅 u	海底上での起動振幅 a_m	貝殻片の沈降速度 ω	ジョンソンの摩擦係数 a_m/d f		流速/沈降速度比 u/ω	シーلز数 Ψ	挙動パターン
1.53	8.71	0.79	0.70060	0.29437	0.44235	9.812	0.072	1.5838	0.060182	流失(IV型)
2.03	9.48	0.79	0.52527	0.22070		7.357	0.087	1.1875	0.041004	流失(IV型)
3.03	10.34	0.81	0.31369	0.13180		4.393	0.127	0.7091	0.021220	集積・埋没(III型)
4.03	10.68	0.83	0.18612	0.07820		2.607	0.192	0.4207	0.011334	集積・埋没(III型)
5.03	10.80	0.85	0.10873	0.04569		1.523	0.300	0.2458	0.006032	転動(II型)
6.03	10.84	0.86	0.06216	0.02612		0.871	0.300	0.1405	0.001972	微動(I型)
7.03	10.86	0.86	0.03506	0.01473		0.491	0.300	0.0793	0.000627	不動(0型)
8.03	10.86	0.86	0.01965	0.00826		0.275	0.300	0.0444	0.000197	不動(0型)
9.03	10.87	0.86	0.01107	0.00465		0.155	0.300	0.0250	0.000063	不動(0型)
10.03	10.87	0.86	0.00621	0.00261		0.087	0.300	0.014	0.000020	不動(0型)
11.03	10.87	0.86	0.00348	0.00146		0.049	0.300	0.0079	0.000006	不動(0型)
12.03	10.87	0.86	0.00195	0.00082		0.027	0.300	0.0044	0.000002	不動(0型)
13.03	10.87	0.86	0.00110	0.00046		0.015	0.300	0.0025	0.000001	不動(0型)
14.03	10.87	0.86	0.00062	0.00026		0.009	0.300	0.0014	0.0000002	不動(0型)
14.13	10.87	0.86	0.00058	0.00024	0.008	0.300	0.0013	0.0000002	不動(0型)	

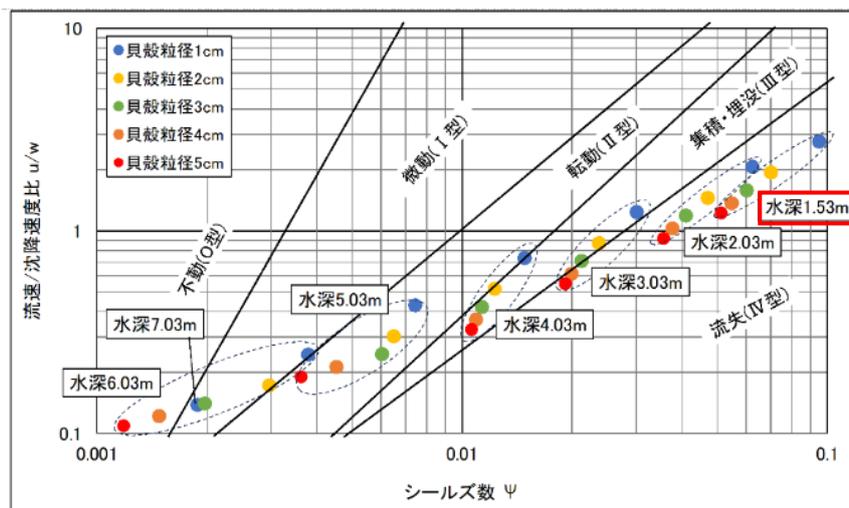
出典：「令和5年度 かき殻を活用した増殖場整備に関する調査検討業務、水圏リサーチ(株)」

表- 37 既往成果の計算結果(2)

資料表 1(4) 内能美工区 (貝殻粒径 4cm)										
算定水深 h	h における波長 L	h における波高 H	海底上での波浪流速振幅 u	海底上での起動振幅 a_m	貝殻片の沈降速度 ω	ジョンソンの摩擦係数 a_m/d	f	流速/沈降速度比 u/w	シーلز数 Ψ	挙動パターン
1.53	8.71	0.79	0.7006	0.29437		7.359	0.087	1.3711	0.054697	流失(IV型)
2.03	9.48	0.79	0.52527	0.2207		5.518	0.107	1.0280	0.037681	流失(IV型)
3.03	10.34	0.81	0.31369	0.1318		3.295	0.159	0.6139	0.019922	流失(IV型)
4.03	10.68	0.83	0.18612	0.0782		1.955	0.247	0.3642	0.010898	集積・埋没(III型)
5.03	10.80	0.85	0.10873	0.04569		1.142	0.300	0.2128	0.004524	転動(II型)
6.03	10.84	0.86	0.06216	0.02612		0.653	0.300	0.1217	0.001479	不動(O型)
7.03	10.86	0.86	0.03506	0.01473	0.51097	0.368	0.300	0.0686	0.000470	不動(O型)
8.03	10.86	0.86	0.01965	0.00826		0.206	0.300	0.0385	0.000148	不動(O型)
9.03	10.87	0.86	0.01107	0.00465		0.116	0.300	0.0217	0.000047	不動(O型)
10.03	10.87	0.86	0.00621	0.00261		0.065	0.300	0.0122	0.000015	不動(O型)
11.03	10.87	0.86	0.00348	0.00146		0.037	0.300	0.0068	0.000005	不動(O型)
12.03	10.87	0.86	0.00195	0.00082		0.021	0.300	0.0038	0.000001	不動(O型)
13.03	10.87	0.86	0.0011	0.00046		0.012	0.300	0.0021	0.0000005	不動(O型)
14.03	10.87	0.86	0.00062	0.00026		0.006	0.300	0.0012	0.0000001	不動(O型)
14.13	10.87	0.86	0.00058	0.00024		0.006	0.300	0.0011	0.0000001	不動(O型)

資料表 1(5) 内能美工区 (貝殻粒径 5cm)										
算定水深 h	h における波長 L	h における波高 H	海底上での波浪流速振幅 u	海底上での起動振幅 a_m	貝殻片の沈降速度 ω	ジョンソンの摩擦係数 a_m/d	f	流速/沈降速度比 u/w	シーلز数 Ψ	挙動パターン
1.53	8.71	0.79	0.70060	0.29437		5.887	0.102	1.2262	0.051175	流失(IV型)
2.03	9.48	0.79	0.52527	0.22070		4.414	0.126	0.9193	0.035573	流失(IV型)
3.03	10.34	0.81	0.31369	0.13180		2.636	0.191	0.5490	0.019138	流失(IV型)
4.03	10.68	0.83	0.18612	0.07820		1.564	0.300	0.3257	0.010604	集積・埋没(III型)
5.03	10.80	0.85	0.10873	0.04569		0.914	0.300	0.1903	0.003619	転動(II型)
6.03	10.84	0.86	0.06216	0.02612		0.522	0.300	0.1088	0.001183	不動(O型)
7.03	10.86	0.86	0.03506	0.01473	0.57138	0.295	0.300	0.0614	0.000376	不動(O型)
8.03	10.86	0.86	0.01965	0.00826		0.165	0.300	0.0344	0.000118	不動(O型)
9.03	10.87	0.86	0.01107	0.00465		0.093	0.300	0.0194	0.000038	不動(O型)
10.03	10.87	0.86	0.00621	0.00261		0.052	0.300	0.0109	0.000012	不動(O型)
11.03	10.87	0.86	0.00348	0.00146		0.029	0.300	0.0061	0.000004	不動(O型)
12.03	10.87	0.86	0.00195	0.00082		0.016	0.300	0.0034	0.000001	不動(O型)
13.03	10.87	0.86	0.00110	0.00046		0.009	0.300	0.0019	0.0000004	不動(O型)
14.03	10.87	0.86	0.00062	0.00026		0.005	0.300	0.0011	0.0000001	不動(O型)
14.13	10.87	0.86	0.00058	0.00024		0.005	0.300	0.0010	0.0000001	不動(O型)

出典：「令和5年度 かき殻を活用した増殖場整備に関する調査検討業務、水圏リサーチ(株)」



出典：「令和5年度 かき殻を活用した増殖場整備に関する調査検討業務、水圏リサーチ(株)」

図- 9 安定性の判定 (内能美地区)

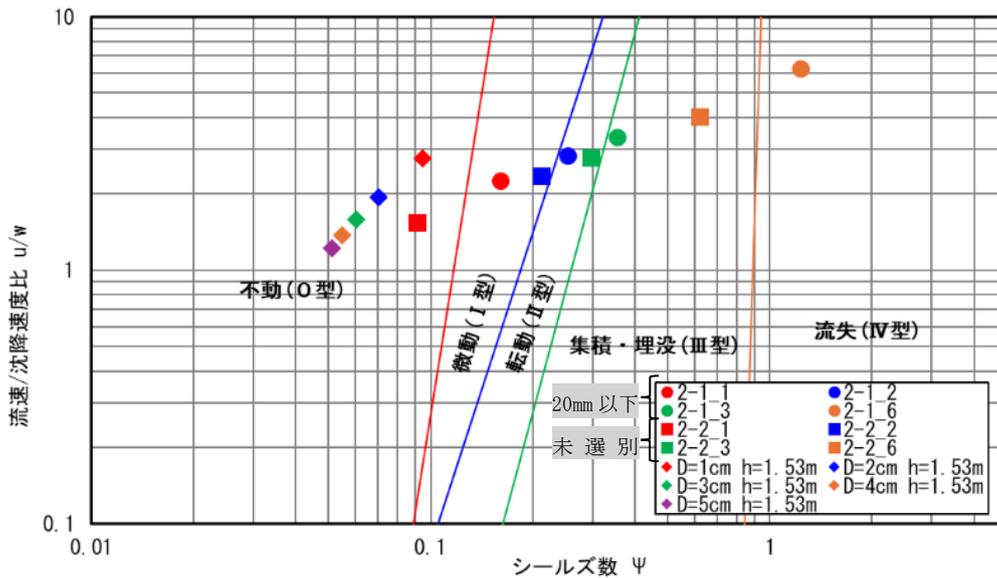


図- 10 安定性の評価結果 (変更後)

なお、今回の実験によって、かき殻の場合は貝殻片挙動モデルの判定条件を適用すれば、安全側の結果になることが確認でき、限られた u/w の範囲のみ、実験結果を踏まえた判定が可能とした。

今後、水理模型実験のケースを増やしてデータを蓄積することで、かき殻を対象とした判定図を作成することが可能と考える。