

平成 25 年度 博士論文

多孔質体を用いた藻場造成構造物および
海域環境改善技術に関する研究

2014 年 2 月

香川大学大学院工学研究科

博士後期課程 安全システム建設工学専攻

亀山 剛史

要旨

我が国の沿岸域は、かつて藻場が広範囲に分布し、豊かな海域環境を形成していた。藻場は、魚類等の産卵場や稚仔魚の成育場としての役割を果たし、沿岸漁業と深い関わりがある。しかし、先の東日本大震災による海底の地盤沈下や各種沿岸開発に伴う藻場の減少は深刻化しており、藻場の修復、造成およびより高度な海域環境改善技術の開発が望まれている。

香川県においても藻場は、沿岸漁業と深い関わりがあり、自治体や漁業関係者らによる藻場の現状把握のための現地調査や藻場の修復・造成研究が進められているものの、安定した海藻着生基盤や環境改善に関する技術に乏しく、未だ有効な技術開発には至っていない。

本研究では前述の問題を解決するために、多孔質体を用いた新規藻場造成構造物を設計し、悪化した海底環境を改善し、生物にとって好適な環境を提供可能な環境改善基質の開発を行い、新たな海域環境改善技術を検討した。

ABSTRACT

There're many semi-enclosed bay in Seto Inland Sea, Japan and the highest fisheries productive area in the world. On the other hand, red tide and oxygen depleted water have occurred frequently and harmful affect against processes of biological production. There are many issues to be clarified about the suitable installation of artificial reefs, such as the relation between flow conditions and the biological effect of artificial reefs. Therefore we developed an artificial reef with the functions of the current control and the high efficiency on adhesion of prey abundance. We tried realizing the former function by the structure and the latter by the porous material. This developed artificial reef includes the porous material. The porous material used the air-cooled blast furnace slag. The air-cooled blast furnace slag is one of the industry by-products which produced in a manufacturing process of iron and steel. The principal of its ingredient is a CaO, SiO₂, and it has the element similar to the rock. Before the installation of the structure, we conducted carbonation of porous materials in order to equalize pH with sea water (8.0-9.0). This carbonation technology can expect the reduction of CO₂ and recycling of the industry by-product. Also, this structure generates distinctive upwelling or downward current above the sediment, which accelerates vertical mixture of bottom layer water. Moreover, we expect probability of fouling function of algae with this current control function. We examined the effect of fouling function of algae around the structure, which was settled at the real sea bottom by measuring the concentration of algae and aggregation of fish juveniles. Verification researches in actual sea area on these functions are being performed at present and we introduce some results of these experiments.

Also, many harmful substances are hidden around us. Waters and soils polluted with harmful metal ions are particularly dangerous to the living organisms. A large amount of harmful metal ions might be diffused in the water environments when the great earthquake occurred in the Eastern Japan in March 2011. The purpose in the present study is to verify the removal of various metal ions from wastewaters in the water environments by the porous concrete containing baking bone dust (mainly natural hydroxyapatite; HAP) and steel slag as a industrial by-product. The porous concrete showed more than 10N/mm² strength and 30% air space rate. We investigated the removal of various metal ions from the artificial wastewater by the porous concrete. As a result, the porous concrete containing 10% baking bone dust efficiently absorbed lead ion, cadmium ion, copper ion, ferric ion and chromium ion. Manganese ion, nickel ion and strontium ion were also moderately absorbed in the porous concrete. Moreover, we examined the absorption of ferric ion and manganese ion eluted from the bottom sediment in Yashima-bay of Kagawa prefecture. The porous concrete significantly absorbed metal ions eluted from the bottom sediment. To confirm the binding ability of the porous concrete toward metal ions in real sea, the amounts of metal ions bound to the porous concrete were measured after placement of the porous concrete in Yashima-bay. As a result, 2-3years later of the placement of the porous concrete, the efficient bindings of lead ion, cadmium ion, copper ion, ferric ion, manganese ion and zinc ion to the porous concrete were observed. These results suggest that the porous concrete containing baking bone dust seem to be available to remove metal ions from the water environments. Furthermore the useful metal ions absorbed in the porous concrete can be recovered easily with acid treatment.

目次

1章 序論	
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	1～2
1.3 藻場造成の方法	3～6
1.4 藻場の役割	6～9
1.5 藻場形成の阻害要因	9～10
2章 多孔質体を用いた藻場造成構造物の課題と構造設計	
2.1 多孔質体を用いた藻場造成構造物の課題と検証方法	11
2.2 構造物の形状検討	11～12
2.3 構造物の概要と形状寸法	12～13
2.4 構造物の設計とその特徴	13～14
2.5 多孔質体の機能	14～16
2.6 水理模型実験による流れの制御機能と安定性の検討	17
3章 滑動抑制及び揚力軽減機能の検証	
3.1 スパイク構造による滑動抑制機能の検証	18～23
3.2 海底勾配を考慮した構造物の安定性の検討	24～33
3.3 揚力軽減機能の検討	33～35
4章 実海域における藻場造成機能の検証	
4.1 設置海域	36
4.2 調査結果及び考察	36～46
5章 多孔質コンクリートの底質改善機能	
5.1 底質改善多孔質コンクリートの概要	47～49
5.2 金属吸着機能の検証	49～57
5.3 吸着された金属の再資源化の検討	57～58
5.4 試験結果のまとめ	58
6章 結論	
6.1 本研究の成果	59～60
6.2 今後の展望	60～64
謝辞	65
参考文献	66～68

1 章

序論

1.1 研究背景

我が国の沿岸域は、かつて藻場が広範囲に分布し、豊かな海域環境を形成していた。藻場は、魚類等の産卵場や稚仔魚の成育場としての役割を果たし、沿岸漁業と深い関わりがある。しかし、各種沿岸開発に伴う藻場の減少は深刻化しており、藻場の修復、造成およびより高度な海域環境改善技術の開発が望まれている。さらに、先の東日本大震災では、大震災による海底の地盤沈下により海域環境にも負の影響をもたらし、多くの水産資源生産力の低下を招いている。特に、海底に存在する有害金属イオンの海域環境からの除去および流出の抑制は最重要課題であり、適切な浄化および処理技術の開発が望まれている。

一方藻場は、沿岸漁業と深い関わりがあり、自治体や漁業関係者らによる藻場の現状把握のための現地調査や藻場の修復・造成研究が進められているものの、安定した海藻着生基盤や環境改善に関する技術に乏しく、未だ有効な技術開発には至っていない。

これらの改善策として、全国的にも様々な藻場造成構造物が開発され、藻場造成が行われているがそのほとんどが磯焼けの発生や浮泥の堆積による着生基盤としての効果が失われ、事業実施の成果が乏しい現状である。特に、藻場の分布する浅海域では、流動環境の多様性が期待できる海底勾配の急な部分から平坦部へ移行する場所への藻場造成構造物の設置が求められるようになってきた。このような場所に構造物設置する場合は、構造物設置後の滑動、転倒さらには揚力に対する安定性に乏しくなるため、安定性向上のための技術開発も急務となっている。

1.2 研究目的

瀬戸内海は広大な干潟や藻場に支えられた高い生産性を誇る、世界でも有数の生物生産性・多様性に優れた海域であった。しかし、近年の干拓や埋め立て事業等の影響により、干潟や藻場が大幅に減少し、赤潮・貧酸素塊の発生、底質環境の悪化といった環境面への問題が深刻化してきている。特に藻場の減少は進行し続けており、1960年に22,635 haあった藻場は、1990年には6,381 haとなり、約30年間の間で7割もの藻場が消滅した¹⁾。それに伴い香川県における漁獲量は、1980年代の45万トンをピークに減少傾向²⁾を示し、2000年以降は、20～25万トンと半数以下の水準まで下がっている状況である²⁾。行政としても、瀬戸内海環境保全特別措置法および瀬戸内海環境保全基本計画に基づく各種の施策を講じてはいるが³⁾、決定的な改善には至っていないのが現状である。

藻場造成の技術の1つとして、コンクリートブロックや巨石等の藻場造成構造物を海底に沈設し、それらに海藻を付着させ繁茂させることで藻場を形成する方法がある。波、流れ等の流動環境の変化により底質が不安定となる海域では、構造物を用いて流動を制御し、底質を安定させる必要があり、構造物を用いるこの方法は、瀬戸内海の海象条件(強い潮流)に適し

た方法であると考えられている⁴⁾。しかしこの方法は、表面部への浮泥の堆積により着生基盤の機能が失われ⁴⁾、数年間しか海藻が繁茂せず、期待ほどの成果が得られていないのが現状である。また既存の藻場造瀬構造物の中には海中における安定性が十分に確保されていないものも存在し、さらに今後の設計照査項目に組み込まれることが予想される、海底面と構造物底部との間隙に発生する波の浮き上がりの力「揚力」に対する確かな安全性も確立されていない。これらの問題解決につながる技術開発は、安定的な藻場造成を行う上で急務となっている。

そこで、本研究の目的は、構造物を海域に沈設した際に考慮すべき滑動・転倒そして揚力を加えた三点の安定性を評価すると共に、多孔質体を用いた藻場造成構造物により悪化した海底環境を改善し、生物にとって好適な環境を提供可能な環境改善基質の開発を行い、有用な海域環境改善技術を開発することにより藻場を造成し、藻場が消失した沿岸部に元々生息していた海底生物および魚介類の生育環境を整え改善させることで、水産資源生産力の増大に繋げることを目的としている。さらに、高機能多孔質体による、有害金属類で汚染された底質の改善技術の開発を研究課題とした。

漁業生産量(海面漁業)

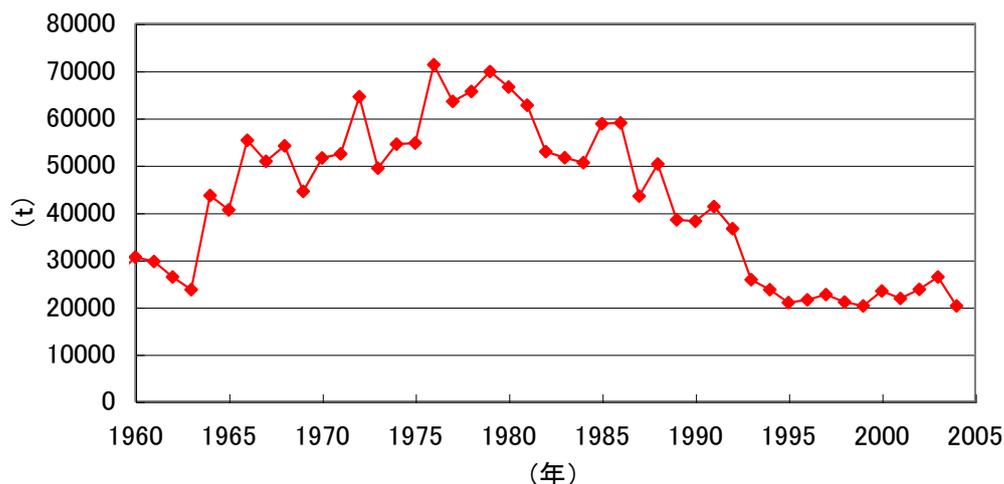


図 1.1 瀬戸内海における漁業生産量の推移 (海面漁業) ²⁾

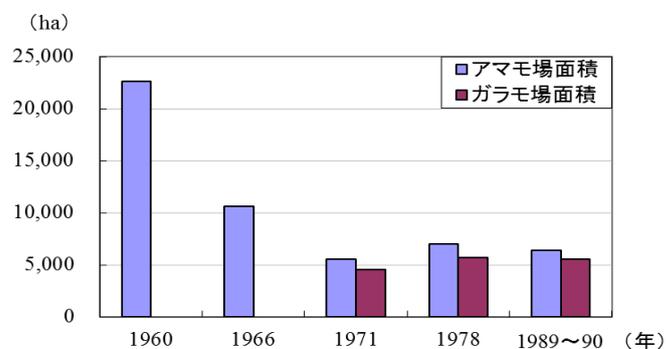


図 1.2 瀬戸内海の藻場面積の推移 ²⁾

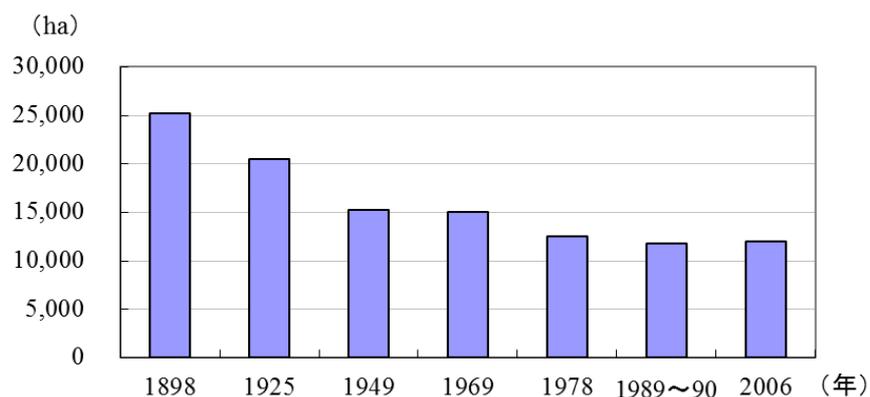


図 1.3 瀬戸内海の干潟面積の推移²⁾

1.3 藻場造成の方法

1960年代に始まる高度成長の時代以降、沿岸の開発・埋め立てにより多くの干潟や藻場が失われた²⁾。この現状を改善する為各地で藻場の再生・保存を目的とした藻場造成が行われている。藻場造成方法には、投石やコンクリート構造物の沈設等、海藻着生基質材を用いた藻場造成が数多くあり、全国の海域で実施されている。下記にその分類をまとめる。

(1) 母藻移植⁴⁾

母藻移植は、海藻のタネをもつ母藻、またはその一部を対象場所へ移植、あるいは投入し、そこから海藻のタネを拡散させる方法である。

a) 移植ブロック法⁴⁾

母藻をコンクリート製ブロックなどの基質に固定後、岩盤や藻礁等に設置する方法である。母藻は数年にわたって生育するため、海藻のタネを長期に亘って拡散させることが期待できる方法である。



瞬間接着剤で固定した方法



水中ボンドで固定する方法

図 1.4 移植ブロック法⁴⁾

b) スポアバッグ法⁴⁾

スポアバッグ（図 1.5 参照）とは、成熟した海藻を天然藻場から採取し、これを袋に詰めて基質の上に浮かすことで、袋から海藻のタネを周辺の岩盤等に拡散させる方法である。袋と錘となる巨石やコンクリートブロックをロープで結んだ単純な構造であるため、多く用いられてきた移植方法である。



図 1.5 スポアバッグ法⁴⁾

(2) 種苗移植⁴⁾

種苗移植は、海藻のない場所に、基質に着生した幼体を移植する方法である。この方法は、母藻を大量に必要としないため、母藻移植に比べて天然藻場への影響が軽微である。しかし、種苗の生産（一部、市販されているものもある）には、生産施設の確保やランニングコストがかかるため、利用できる地域が限定されるのが実情である。

a) 移植ブロック法⁴⁾

移植ブロック法（図1.6 参照）は、小型の基質材に生殖細胞を直接種付けして移設する方法である。種苗は、アラメ・カジメ類であれば、通常は種付けした翌日以降、ホンダワラ類は数日間程度、静置した後に移植が行われるが、浮泥堆積や付着動物などが阻害要因となる海域では、陸上水槽や養殖筏等で数ヶ月、あるいは1年程度育成して、藻体を大きく育ててから移植を行うこともある。取り付け方は、水中ドリルで穴をあけてボルトで取り付ける、あるいは水中ボンドで固定する場合がある。



図 1.6 種苗移植の移植ブロック法⁴⁾

b) 種糸法⁴⁾

種糸法は(図1.7 参照), 撚糸などに種付けし, 育成した後, 岩盤, 礫, コンクリートブロックなどに, 巻付けて固定する方法である. この方法は移植幼体の基盤への根付きが悪いところもあるが, コンクリートブロックに予め埋め込んだ木材に止め具で固定したり, 種糸の一部を水中ボンドで直接基盤に接着したりするなどの改良が行われ, 実用的な方法となっている.



図 1.7 種糸法⁴⁾

(3) 構造物を用いた藻場造成

a) ポーラスコンクリートブロック

ポーラスコンクリートとは, セメントペーストもしくはモルタルで覆われた粗骨材が団結した構造体で, 連続もしくは独立した空隙に富む基質である. 特に連続した空隙は植生基盤や浄化基盤としても優れ, 河川護岸などにおいて護岸ブロックとしても多く使用されている. 素材としての特徴は以下の通りである.

- ・ 海藻の種が, 表面に着生しやすいだけでなく, 仮根・付着器も活着しやすいので, 波浪の強いところでも海藻が剥離しにくい.
- ・ 凹凸によって, 幼芽がウニの摂食から回避できる.
- ・ 形状を比較的自由に成形できる.
- ・ 空隙径や空隙率を任意に設定できる.

ポーラスコンクリートを普通コンクリートブロックに複合さず場合は, コンクリート打設後, コンクリートが硬化する前に連続打設する, あるいは打設時にポーラスコンクリートにアンカーを取り付け, 硬化脱型後にボルトで取り付ける, 脱型後に穿孔してボルトで取り付けるなどの方法がある. また, 鋼製の基質に取り付ける場合は, 鋼製枠にはめ込みボルトで固定して取り付ける. ただしこの場合は, ガタツキによる破損に注意が必要である. ポーラスコンクリートは, 浮泥の多い場所や閉鎖性の強い海域の場合, 表面に浮泥が堆積しやすく, 空隙が目詰まりしやすい(着生基質としての効果が失われる). また, そのような海域は, 基質を巡って競合する種(イガイ類, カンザシゴカイ類など)も多いため, 先に基質を優占されると, その後の海藻の着生が阻害されることがある. したがって, 使用するにあたっては, そのような場所をできるだけ避けた方がよい⁴⁾.

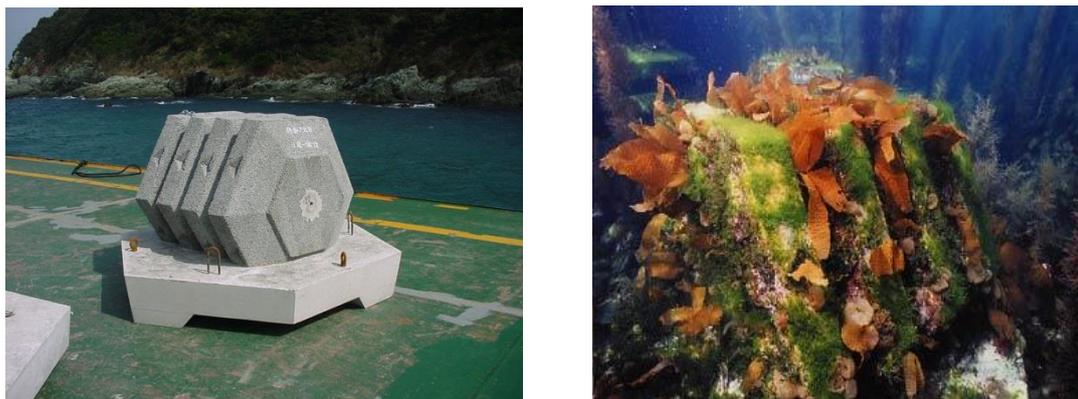


図 1.8 ポーラスコンクリート

b) 特殊コンクリート

産業副産物である製鋼スラグを炭酸ガスにより固化された特殊コンクリートブロック（図 1.9 参照）である。成分は貝殻や珊瑚の主成分と同じ炭酸カルシウムで構成され、気孔率 25% のポーラス状のブロックである。表面が粗面であり海藻の付着が良いとされている。^{5) 6)}



図 1.9 特殊コンクリート

1.4 藻場の役割

藻場とは、沿岸域に形成された様々な海草・海藻の群落のことである。海域や水深、底質により異なる様々なタイプの藻場が立体的に存在しており、種子植物であるアマモなどの海草（*sea grass*）により形成されるアマモ場と、藻類に分類されるホンダワラ、コンブ、ワカメといった海藻（*seaweed*）により形成されるガラモ場とがある。これらのうち日本の藻場を特徴づける代表的な藻場は、アマモ場、アラメ・カジメ場、ガラモ場、コンブ場の 4 タイプである¹²⁾。藻場は、潮の流れを和らげるとともに浅海域の第一次生産を支え、多くの水生生物の生活を支え、産卵場や餌場としての機能を有していることから「海のゆりかご」と呼ばれている。また、光合成による二酸化炭素の吸収、海棲生物への酸素供給に加えて、地下茎による底質の安定化、海水・底泥中のチッソ・リンといった有機物を吸収し富栄養化を防止するなど海水の浄化作用機能を有しており、「海の森」とも呼ばれる⁷⁾。

表 1.1 代表的な藻場とその分布海域⁷⁾

		底質	海域	分布
アマモ場 >>		砂泥域	内湾域	日本全国
ガラモ場 >>		岩礁域	内湾～外洋域	
海中林	アラメ・カジメ場 >>		外洋域	本州以南
	コンブ場 >>		中間～外洋域	北海道・東北
	ワカメ場			
その他	テングサ場	外洋域	北海道～九州	
	アオサ・アオリ場	砂泥域・岩礁域		内湾域

(1) 稚魚の保護・育成場としての藻場

稚魚の初期段階の生き残り（歩留まり）にとって重要な二つの要因がある。一つはふ化した稚魚が浮遊生活に移行した際、自力で餌をとり栄養を補給する初回の摂取餌に成功するかどうか、そして、二つ目は浮遊生活から接岸回遊⁸⁾へとすみやかに移行できるかである。接岸回遊とは、浮遊生活の初期に潮流・海流の影響を受け広い範囲に拡散された際、本来の生息場所である海岸近くに戻る行動のことである⁸⁾。遊泳力が弱い稚魚にとって波の影響を強く受けてしまった場合、本来の海岸から遠く離れてしまい接岸することができずに死亡する可能性が高まる。また沿岸に達した後も、限られた生育場所をめぐる他の稚魚との競合や、生存に適した水温範囲、大型魚による被食といったものが重要な死亡要因として位置づけられている⁹⁾。

一方藻場で生活する稚魚の場合は、体長が数 cm に達すればある程度の遊泳能力が備わる。藻場の主な役割として稚魚に餌場と天敵から身を守る「シェルター」を提供することがあげられる。藻場には、稚魚の初期段階の餌となる動物プランクトンのカイアシ類や、ヨコエビといった底生生物が豊富に付着しており、容易に餌を摂取することができ、初回の摂取餌を容易にする。また藻場を形成する海藻が天敵から逃れる隠れ家、逃げる際の障壁、そして生育場と「シェルター」の役割を果たし、稚魚たちに対する捕食圧を低下させる。このように藻場があることで稚魚の初期段階の死亡要因を解決することができ、生物生産性を高めることができる。

(2) 産卵場としての藻場

藻場は、様々な海洋生物に産卵場を提供している。藻場を産卵場としている生物は普段沖合に生息しているが、ふ化した稚魚の餌であるプランクトンが豊富な春先になると藻場へ産卵のために集まってくる。産卵床となる代表的な海藻の種として褐藻類のホンダワラ類がある。特に対馬暖流の影響を受ける沿岸域や瀬戸内海に生息する多様なホンダワラ属から成る植物群落一帯を「ガラモ場」と呼び、絶好の産卵場となる。またホンダワラ類は、流れ藻に

なりやすく、ちぎれた藻は海流に乗り、稚魚の洋上の格好の隠れ家となる¹⁰⁾。

更に親潮（寒流）の影響を受ける北方域のコンブ類等から構成される「コンブ場」¹⁰⁾、日本中の波の静かな内海・内海湾の砂泥域に繁茂する海草であるアマモから構成されるアマモ場⁸⁾等が産卵場や幼稚魚の保育場となり重要な役割を果たしている。

魚類やイカ類が藻場の海藻や流れ藻に卵を産み付ける理由には、卵がヒトデやカニなどの底生生物に食べられにくくすること、海藻が流れを抑えて稚魚の隠れ場になること、稚魚の餌となる小さな生物が海藻に多く付着していることなどが考えられる¹¹⁾。よって藻場は、海生生物にとって重要な場所であり、藻場の消滅は、産卵機会の減少、生物生産性の低下に直結するものとなる。



図 1.10 ガラモ場

表 1.2 ガラモ場の主な構成種

一年生	アカモク、シダモク、タマハハキモク
多年生	ヤツマタモク、マメタワラ、ノコギリモク、オオバモク、ヨレモクモドキ、ウミトラノオ



図 1.11 コンブ場



図 1.12 アマモ場

(3) 水質浄化作用

藻場の水質浄化作用として、光合成を行うことで二酸化炭素を吸収し、海棲生物に酸素を供給する作用、さらに窒素やリンといった有機物を栄養として吸収することで、富栄養化を抑制する作用を持つことがあげられる。光合成で作られた有機物は、流れ藻といった形で外洋や深海にも運ばれ、細菌や真菌などの微生物も海藻・海草に付着し、海中の有機物を分解して増殖するため水質浄化に寄与するものとなる。特に栄養塩の吸収は、赤潮発生を抑制する効果があり、沿岸域の漁業のみならず海域環境全体においても重要な役割を担っていることが認められている¹²⁾。赤潮とは、プランクトンの異常増殖により海や川、湖沼の水の色が、赤褐色や茶褐色に変わることをいい、多くの漁業被害の要因となるものである。

藻場が栄養塩を吸収することで、海中の栄養塩濃度を低く保つことができれば、植物プランクトンの異常発生を抑制し、海水の透明度も高くすることが可能となる。透明度が高くなることで海藻の成長に必要な日の光も届きやすくなり、藻場の成長促進、良好な海域環境の保持にも繋がっていくこととなる。

1.5 藻場形成の阻害要因

藻場形成の阻害要因としては、表 1.3 及び図 1.13 に示す様に、物理的環境要因（海水温の上昇、台風、浮泥の堆積、砂の移動、海岸地形の変化、底質の変化）と化学的環境要因（栄養塩類の減少、富栄養化、透明度の低下、水質汚染）及び生物的環境要因（植食動物による食害、固着生物との基を巡る競合）に大別される。磯焼け対策ガイドライン（水産庁 2007）によると、磯焼けの発生・継続の仕組みは、①海藻が食われる②海藻が枯れる③海藻が芽生えなくなる、のいずれか、もしくは組み合わせとされているが、磯焼けに対する研究の進展に伴い、これらの複数の要因の中でも、「水温上昇」と構造物などによる「静穏化」が最も重要であると認識されている。

海藻の生長速度は、一般に、水温が高くなるに従い早くなり、ピークに達した後、急激に低下する。ピーク時の水温は最適水温と呼ばれており、海藻の種類や季節によって異なる。この事は、水温が上昇して藻場構成種の最適温度を越すと、藻場の生産力は急激に低下することを意味している。藻場の主な構成種の最適温度は、アラメ、カジメ（幼体）20℃、ワカメ 25℃、マコンブ（幼体）12℃、アカモク 25℃以下、ヤツマタモク 18～30℃であることが知られている。また、防波堤や離岸堤などの構造物の設置によって静穏化した海域では、清浄な外海水との交換が減少するとともに、濁りが滞留するため透明度が低下し、海藻の生長に必要な光量が不足する。さらに海藻は体全体で海水から栄養塩を吸収し、光合成と呼吸に伴う O₂ と CO₂ のガス交換を行っており、構造物等により流動が低下すると、これらの物質交換の効率が低下し、海藻の生長が悪くなる。

表 1.3 藻場形成阻害要因

要因の分類	藻場形成阻害要因	現象
物理的環境要因	・海岸地形の変化 ・砂等の移動 ・浮泥の堆積 ・台風の影響	埋め立てなどによる藻場の減少 浮泥が海藻の上に堆積すると、海藻が利用できる光量が低下する 海藻の生長に必要な光量が不足する 高波浪による母藻の流出、漂砂や礫による海藻の埋設、擦り切れ
	・構造物の影響 ・底質の変化 ・流れの速さ ・海水温の上昇	防波堤や離岸堤などの構造物により静穏化した海域では、清浄な外海水との交換が減少するとともに、濁りが滞留するため透明度が低下し、海藻の生長に必要な光量が不足する 構造物などにより流動が低下すると、光合成と呼吸に伴う物質交換の効率が低下し海藻の生長が悪くなる 水温が上昇して藻場構成種の最適温度を超すと、藻場の生産力は急速に低下する 高水温(30℃前後)が持続すると、枯死する海藻が現れる
化学的環境要因	・透明度の低下 ・水質汚染 ・富栄養化 ・栄養塩類の減少	海藻の生長に必要な光量が不足する 農薬、除草材などの化学物質や工場排水などによる水質汚濁による生育環境の悪化 栄養塩サイクルの衰退による栄養分の供給不足
生物的環境要因	・植食動物による食害 ・固着生物の基質を巡る競争	アイゴ、ブダイなどの植食性魚類ならびにキタムラサキウニなどによる食害 基質を巡って競争する種に先に基質を優先されると海藻の加入が阻害される



植食性魚類による食痕



浮泥の堆積した海藻



カキで覆われた基質



浮泥の堆積した海藻

図 1.13 藻場形成を阻害する要因 (例)

2章

多孔質体を用いた藻場造成構造物の課題と構造設計

2.1 多孔質体を用いた藻場造成構造物の課題と検証方法

藻場の分布する浅海域では、流動環境の多様性が期待できる海底勾配の急な部分から平坦部へ移行する場所への藻場造成構造物の設置が求められるようになってきた。このような場所に設置する場合は、構造物設置後の滑動、転倒さらには揚力に対する安定性に乏しくなるため、安定性向上のための技術開発が必要である。また、海藻胞子の着生および海藻根の活着を促進し、安定した海中林形成を可能とするため、構造物に流動制御機能が必要となる。さらに、既存の藻場造成用構造物や着生基盤等と比べ、海藻胞子および小型餌料生物着生機能が高く、しかも長期間に渡って機能を持続できるようにするため、多孔質部の空隙径を制御するためのポーラスコンクリートの製造技術の確立が必要となる。

そこで本研究では、構造物底部の摩擦抵抗を高めるための滑動防止用スパイク構造、内部に揚力軽減用の空孔部を設けた新たな藻場造成構造物を設計し、実機スケールでの滑動実験による摩擦係数を算定した後、海底勾配の急な場所での安定性向上効果を検証する。また、これまで藻場造成構造物の安定計算の中で検討されていなかった揚力に対する安定性を確保するために、水理実験を行い、構造物内部に設ける空孔部の適正な割合を算定し、さらに、実海域設置後の時間経過に伴う海藻の着生量をモニタリングし、既存の藻場造成技術で用いられている着生基質に対する優位性を検証する。

2.2 構造物の形状検討

藻場構造物の形状検討においては、図 2.1 に示す形状案の中から表 2.1 の評価事項を考慮して行った。①流動制御機能を有すること、②対象とする海域である瀬戸内海での波浪および設置底面に適応できること、③異なった魚類へ適応できること、④多孔質体およびオプションパーツが装着可能なこと、⑤生産性が良く低価格であること、⑥運搬、保管、沈設が容易に行えることなどである。検討の結果、図 2.1 中の番号 1 の二分割 2 層構造を基本構造に選定した。

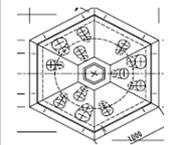
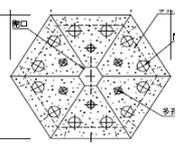
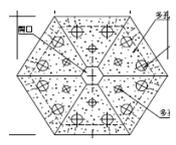
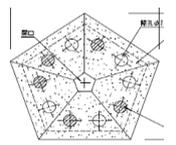
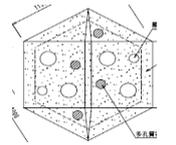
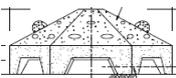
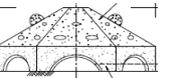
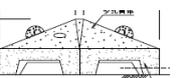
番号	1	2	3	4	5
平面図					
側面図					
特徴	二分割 2層構造	一体 2層構造	一体 1層構造	一体 1層構造	一体 1層構造

図 2.1 形状案

表 2.1 評価結果

番号	1	2	3	4	5
流れ対応	○	○	○	○	△
波浪抵抗	○	○	△	○	◎
魚類対応	○	○	○	○	△
オプション対応	○	○	○	○	○
強度	◎	○	△	△	○
生産性	◎	○	×	△	△
運搬性	○	○	○	○	○
保管性	○	△	△	△	△
1次評価	◎	○	×	×	×

※ 重要項目(太字)が△×であれば、評価は×とする

2.3 構造物の概要と形状寸法

- ・高機能多孔質体とコンクリートブロック基礎を一体化
- ・着脱機能を有する増殖基質を装備
- ・流動制御機能を持たせるためのステージ構造
- ・形状寸法：縦 2,000 mm×横 1,732 mm×高さ 1,000 mm
- ・参考質量：1.876 ton

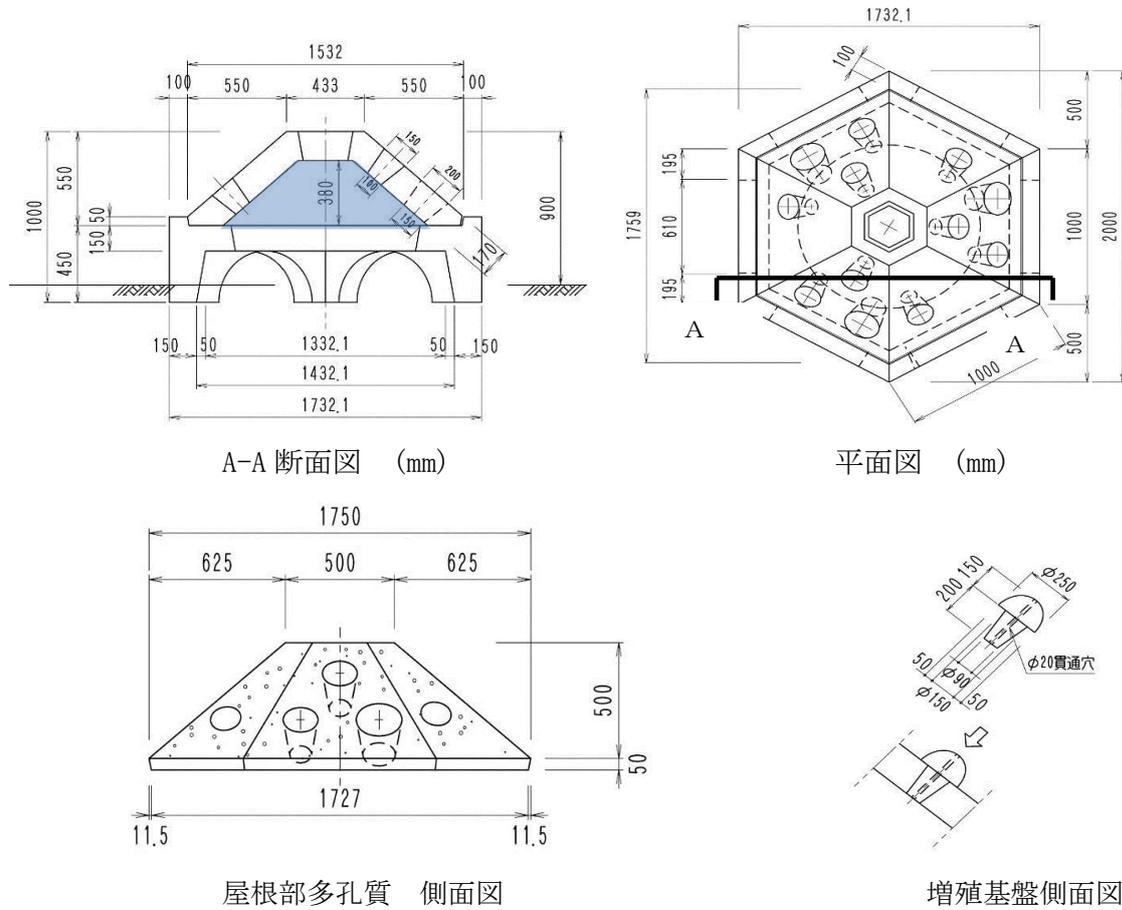


図 2.2 構造物図面

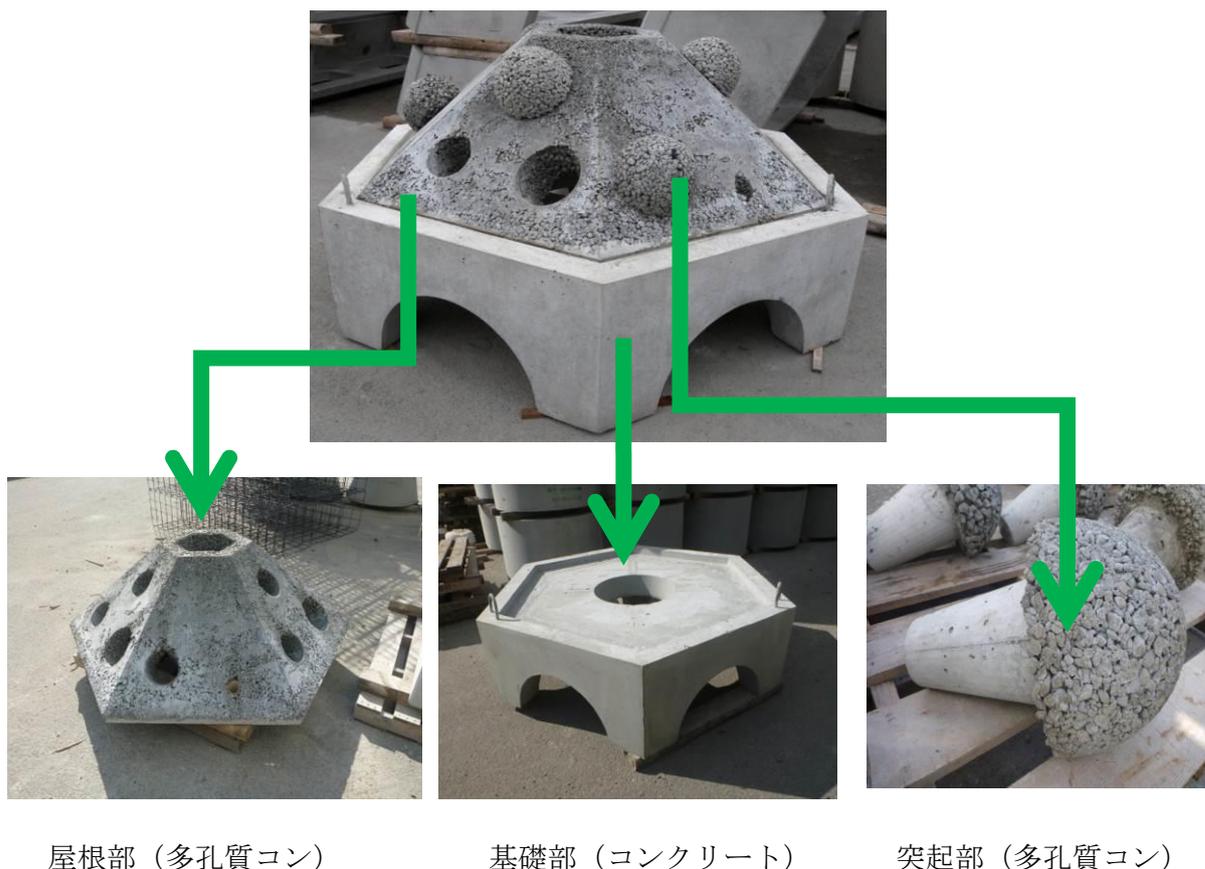


図 2.3 藻場造成構造物及び各部構成基質

2.4 構造物の設計とその特徴

図 2.2 は本研究で設計した藻場造成構造物の図面である。A-A 断面図内の青で示された部分に空間が存在し、この部分が、稚魚が隠れるためのスペースとなる。また、本構造物は基礎部・屋根部・突起部の 3 つの部材を組み合わせることで成り立ち、それぞれの部材が藻場造成・生物生産性向上に寄与する機能を持つ（図 2.3 参照）。これらが持つ機能の詳細は以下に示す通りである。

- ・ 上部構造の多孔質体はポーラスコンクリートとし、多孔質部の空隙径を制御することで表面に多くの間隙を有することにより、海藻胞子の着生および海藻根の活着、餌料生物の着生を促進する。なお、構造性能を保持するため、ポーラスコンクリートの河川護岸の構造仕様に準拠し、設計基準圧縮強度を 10N/mm^2 以上、空隙率 30% に設定した。同時に、産業副産物である鉄鋼スラグ（高炉徐冷スラグ 2010）を主要骨材とした。多孔質部（単位質量 $1,520\sim 1,674\text{kg/m}^3$ ）は、水粉体比 27%、空隙率 30% で配合し、ペーストフロー値を 180mm とした¹³⁾。
- ・ 屋根部の台形構造により人工湧昇流を発生させ、海中の栄養塩の湧昇、餌料となるプラ

ンクトンの増殖・滞留を図り、魚類の蝟集効果を向上させる¹⁴⁾。

- ・ 流動制御と空隙径制御により既往の構造物では、解決困難とされてきた浮泥の堆積（目詰まり）を抑制する。
- ・ 構造物内部に空間を構築し、大型魚の侵入を防ぎ稚魚への捕食圧を低減させることで、大型魚の侵入を阻み、捕食圧を低減させることで、稚魚にとって「餌場」と「保護・育成場」を同時に提供可能なステージ構造とすることで、稚魚の好適な生息場となり、資源生産力を向上させる。
- ・ 下部は、従来安定性に問題のあった急勾配な場所における安定性を向上させるスパイク構造とし、さらに内部ステージの空隙径を制御することによる揚力に対する安定性も向上させる。
- ・ 従来の技術には無い着脱機能を有する増殖基質を装備することで、基質に着生した海藻、餌料生物の回収・分析及び再利用が容易となる。更に他の海域における同型の構造物に増殖基質を移植することで、新たな藻場造成を可能とする。
- ・ 産業副産物の材料特性を活かした高機能化と、大量かつ有効な利用を可能とする。

2.5 多孔質体の機能

本構造物に用いられている多孔質体は、安岡らが開発した¹⁵⁾、産業廃棄物を利用した生物増殖機能、および海藻孢子着生促進機能を有する炭酸カルシウム化多孔質体である。

多孔質体の原料は鉄鋼スラグであり、鉄鋼の製造過程で精製されるスラグを破砕したものである。主成分はCaOとSiO₂であり、天然岩石と同様の成分を持つ¹⁶⁾。

本多孔質体は、産業廃棄物である鉄鋼スラグを再利用することで、環境への負荷の削減を図るだけでなく、従来技術において機能維持の面で問題となっていた浮泥による目詰まりを空隙径の制御機能を持たせることで抑制し、海藻孢子着生機能が長期的に保持できる。また、従来の魚礁はコンクリート製のため、pHが12~14と高く、生物にとって好適な環境を形成することが困難であった。そこで炭酸化処理を施すことで多孔質体表面のpHを対象海域の水と同程度まで下げ、小型餌料生物と海藻の着生を促進し、生物親和性を向上させている¹⁵⁾。本多孔質材を1 ton 製作する場合、約100 kgのCO₂吸収に繋がる。

さらに安岡らにより、本多孔質体における餌量生物着生量が報告されている。図2.4は、多孔質体の空隙率別に生物着生料の変化を調査した結果をグラフに示したものである。その結果、設置後4か月の時点で、空隙率30%の多孔質パネルにおける餌料生物着生量が約5,700 g/m³を示した。この結果は、30%の空隙率を持たせることが、小型生物にとって最も好ましい空間を造り出していることを示唆すると共に、炭酸化を施すことで基質のpHを海水と同等まで下げ、設置初期の生物親和性を向上させていると考えられる。

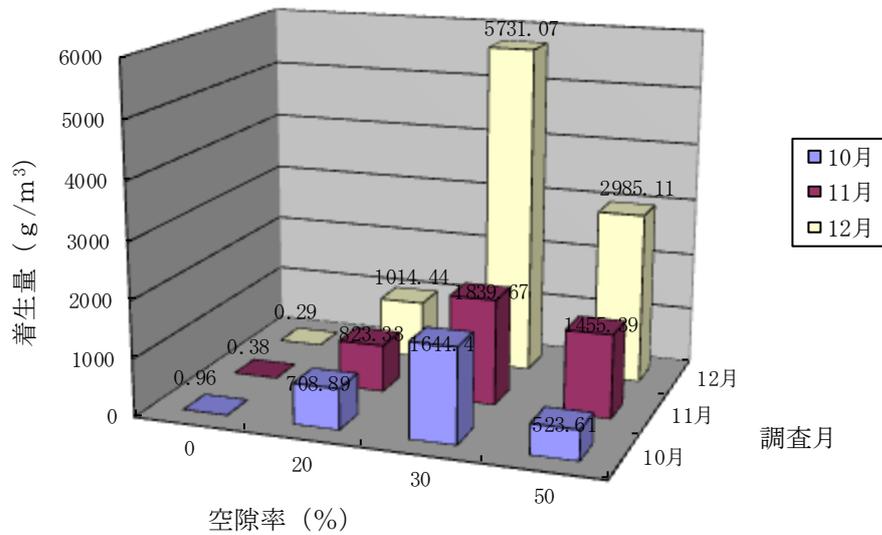


図 2.4 選好性餌料生物着生量 (g/m³)¹⁵⁾

また、海藻着生基質である多孔質体の優位性を検証する為に、多孔質体、コンクリート、石材、鉄板の各基質上に着生した海藻量を比較した (図 2. 5 参照). その結果, 図 2. 6 に示される様に、炭酸化を施された多孔質体基質に約 154 g/m², コンクリート基質に 65 g/m², 石材基質に 80 g/m², 鉄板基質に 0 g/m² の海藻がそれぞれ着生し, 多孔質基質に最も多くの海藻が着生した. これはコンクリート基質上の海藻量の約 2.4 倍, 石材の約 2 倍に相当する. さらに構造物上の多孔質体は 1, 277 g/m² と非常に高い着生量を示した.

以上の結果より、多孔質体の有する空隙により海藻胞子の着生が促進されたことが推察される. この優れた海藻着生機能を有する多孔質体を藻場造成構造物に設置することで、その機能を大幅に向上させることができると推察される.



図 2.5 試験に使用した増殖基質

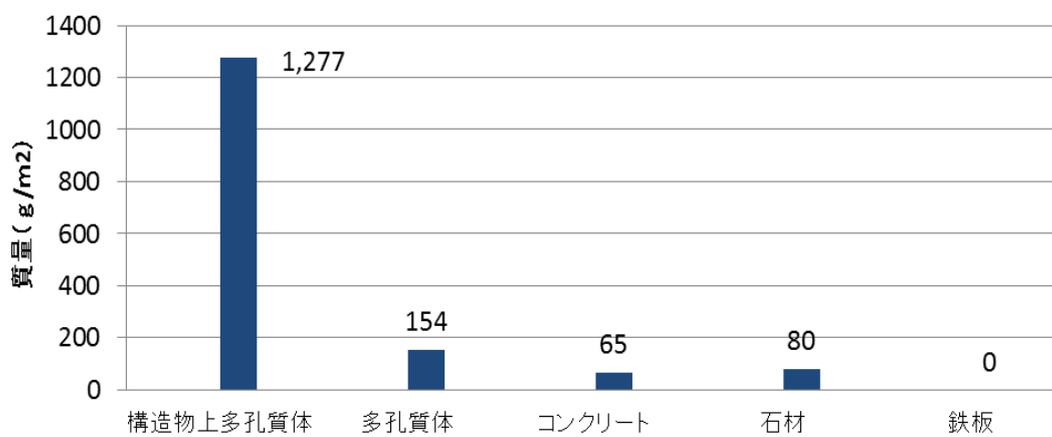


図 2.6 増殖基質別の海藻着生量の比較

2.6 水理模型実験による流動抑制機能と安定性の検討

図-2.7に示す開水路を用いて、1/20のスケールで、瀬戸内海の藻場造成事業で用いられている平均的な海象条件である、水深15~25cm（現地換算3.0~5.0m）、海面平均流速17cm/s（現地換算77cm/s）の条件下で、流れの制御機能および揚力に対する安定性を検討した。

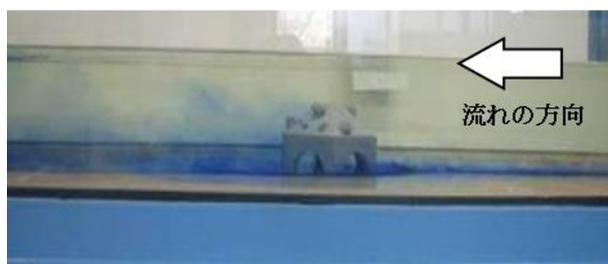


図2.7 水理実験状況

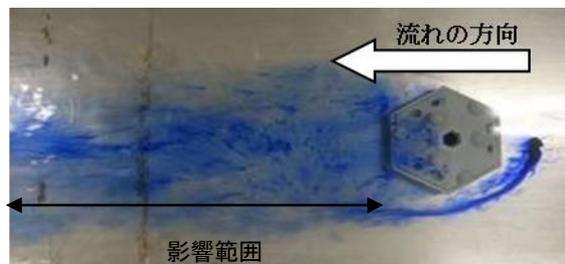


図2.8 構造物周辺の流れの状況

水理実験の結果、構造物の形状特性により上昇する流れと内部から湧き上がった流れが渦となって後方に広がることが確認された。この渦流は、構造物高さの約11倍後方まで伝播し、構造物の影響範囲が定量的に把握された。特に、構造物上部の多孔質部に装着した突起部周辺で図2.9の様に微少な渦が多数発生し、滞留域が形成されていた。（図2.7~図2.9参照）これらの渦の発生は、海藻胞子の着生を促進させることが報告されており¹⁴⁾、本構造物の流動抑制機能が海藻着生に寄与することが示唆された。

また実験中、構造物底部から浸入した流れによって、構造物が浮き上がる現象が確認され、揚力による影響が構造物の安定性に強い影響を及ぼすことが確認された。これにより、安定計算で検討すべき揚力軽減のために、構造物内部のステージ構造に設ける適切な空孔部を決定することが、藻場構造物の安定照査に重要であることが明らかになった。

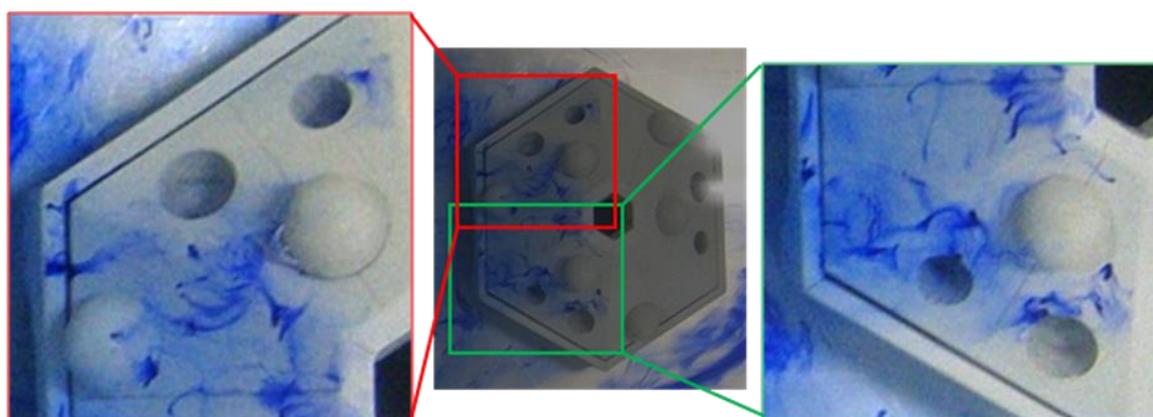


図2.9 構造物上部に発生した渦の様子

3 章

滑動抑制及び揚力軽減機能の検証

3.1 スパイク構造による滑動抑制機能の検証

(1) 滑動実験の概要

一般的に構造物の滑動に対する抵抗力の算定に用いる摩擦係数は、静止摩擦係数とされている^{17), 18), 19)}。この静止摩擦係数は、対象となる構造物と設置場所の地盤の特性を勘案して、適切に設定するものとする。また、安定計算に用いる一般的な静止摩擦係数^{20), 21)}は、砂とコンクリートおよび捨石とコンクリートの場合は0.6、コンクリートと岩盤の場合は0.5が用いられているが、摩擦は適当な荷重のもとにおいて近似的に成立する経験則であって、全く同一条件のもとで繰り返し実測して得られる摩擦係数の値はかなりの幅でばらつくものとなる^{17), 18), 19)}。よって、本研究では、表3.1、図3.1に示した条件下で、藻場造成構造物に設けたスパイク構造による滑動抑制機能を検証するため、実機スケールの滑動試験を実施した。

ここでは、瀬戸内海域のみならず、震災域での海底条件を想定した底質（砂利地盤）における滑動抑制機能も評価した。実験の手順を下記に示す。

【実験手順】

- ・海底砂地盤を想定し、砂を高さ50cm に敷き詰め、極軽く転圧（人力）を行う。
- ・試験体、反力台およびロードセル+ジャッキ等を設置し、滑動試験準備を行う（図3.1）。
- ・油圧ジャッキを操作し、ストローク伸びにより台型ブロックを滑動させる（図3.3）。
- ・付属のロードセルおよびデータロガーにて滑動時の荷重を1～2秒間隔で測定する。
- ・実験構造物の種類は、魚礁用台型ブロック（スパイク付）、藻場造成用構造物A（本研究構造物）および藻場造成用構造物Bの3種類とした（図3.2）。
- ・砂地盤での試験終了後、砂を25cm 程度掘り起こし、その場所に砂利（骨材径 $\phi = 30\text{--}40\text{mm}$ ）を敷き詰め、極軽く転圧（人力）を行った。この時の試験準備および試験方法、試験種類は、砂地盤での試験時と同様に行った（図3.1）。

表 3.1 滑動実験に使用した器具・装置類

項目	詳細	備考
地盤関係	砕砂	海底疑似砕砂作成用
	砕石 40-30	
	仕切用ブロック	
試験体	魚礁用台型ブロック	
	藻場造成用構造物A	
	藻場造成用構造物B	
反力台	魚礁用台型ブロック	試験体の2倍以上の重さを確保
	ボックスカルパート	
滑動用器具	ロードセル, ジャッキ (各2基)	滑動発生のための押し出し用
データ測定器具他	データロガー	滑動発生時の荷重測定用
	スタッフ	
	クレーンスケール	試験体重量の測定用

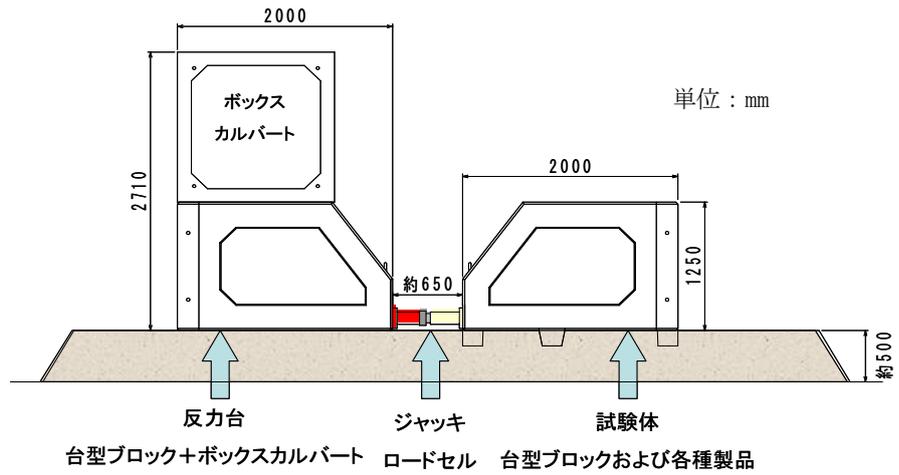


図 3.1 滑動実験の構造物配置図



〈魚礁用台座ブロック〉



〈藻場造成構造物A〉



〈藻場造成構造物B〉

図3.2 滑動実験に使用した構造物



滑動試験用マウンド（砂地盤：左，砂利地盤：右）



滑動試験状況

反力測定状況

図3.3 滑動実験状況

(2) 滑動実験の結果

藻場造成構造物A（本研究構造物）及び魚礁用台型ブロックおよび藻場造成構造物Bについて測定した反力測定結果を図3.4及び図3.5に示す。最大摩擦係（ μ ）は、下式を用いて算定した。表3.2に試験結果一覧表を示す。

$$\text{最大摩擦係数}(\mu) = \frac{\text{最大滑動荷重}}{\text{構造物単位質量(垂直抗力)}}$$

滑動試験の結果、藻場造成構造物Aの最大摩擦係数 $\mu = 0.69$ （砂地盤）、 0.86 （砂利地盤）であり、既存の設計値（ $\mu = 0.6$ ）を上回る結果となった。また、魚礁用台型ブロックおよび藻場造成構造物Bを用いた滑動実験においても、既存の設計値（ $\mu = 0.6$ ）を上回る結果となりスパイク構造の効果が確認された。さらにどの構造物においても砂地盤と砂利地盤では、後者の方が摩擦係数は大きな値を示した。これは、スパイクが埋没する部分で砂利が締固められたことに起因するものと考えられた。

表3.2最大摩擦係数結果一覧表（上：砂地盤 下：砂利地盤）

試験体	魚礁用台型ブロック 2,476kg	藻場造成用構造物A 1,908kg	藻場造成用構造物B 2,050kg
地盤条件	砂	砂	砂
最大荷重(kN)	18.88	12.84	14.35
摩擦係数	0.78	0.69	0.71

試験体	魚礁用台型ブロック 2,476kg	藻場造成用構造物A 1,908kg	藻場造成用構造物B 2,050kg
地盤条件	砂利	砂利	砂利
最大荷重(kN)	19.35	16.17	17.23
摩擦係数	0.80	0.86	0.86

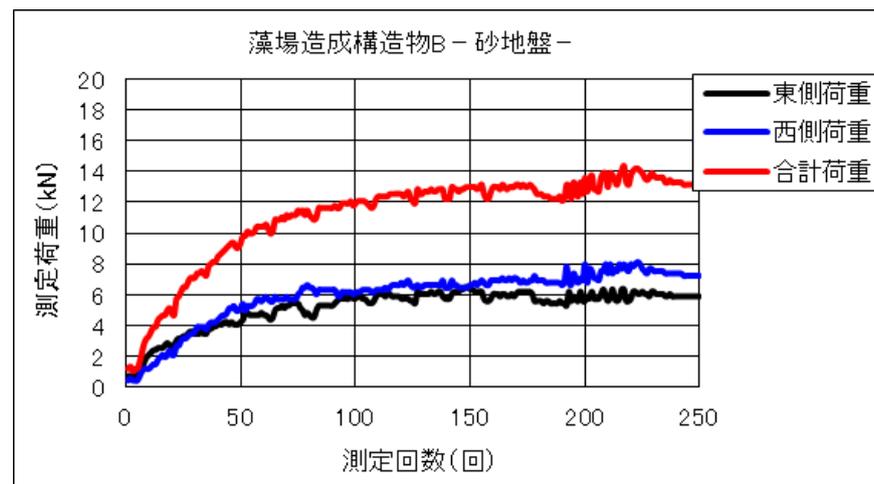
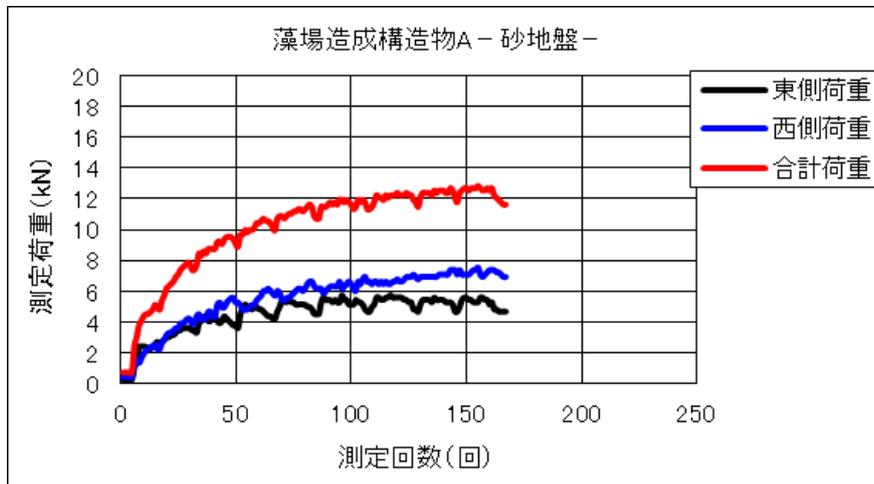
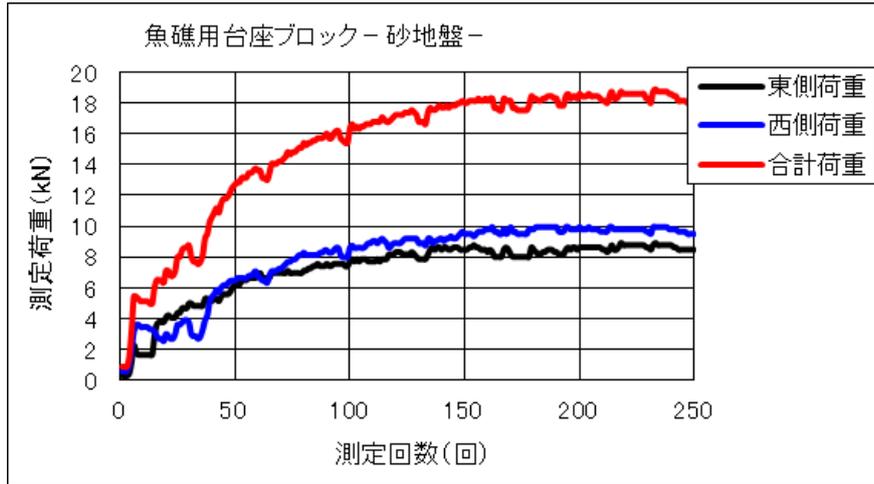


図3.4 反力測定結果 (砂地盤)

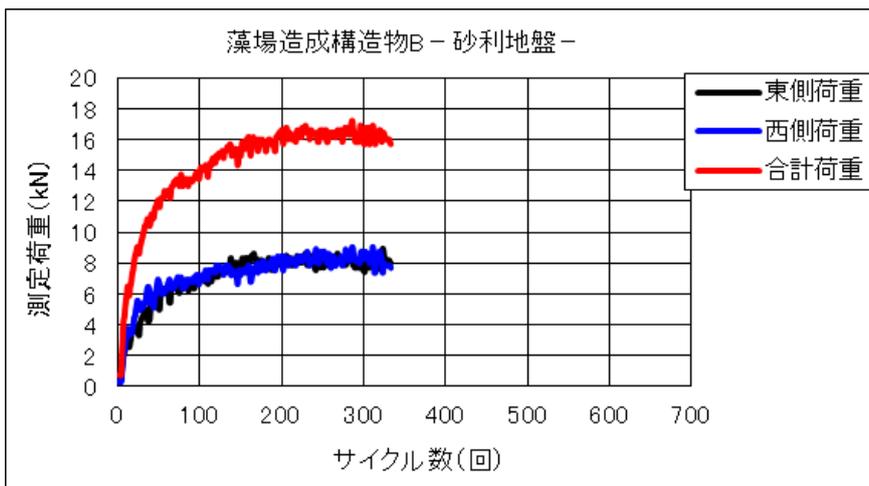
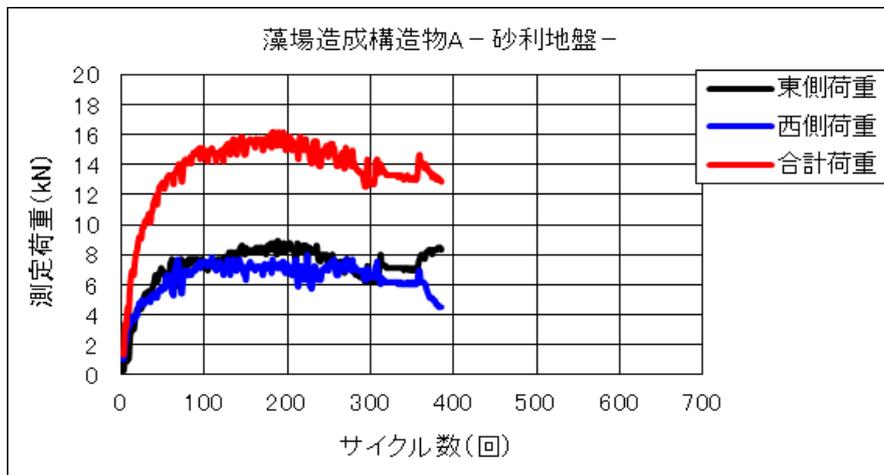
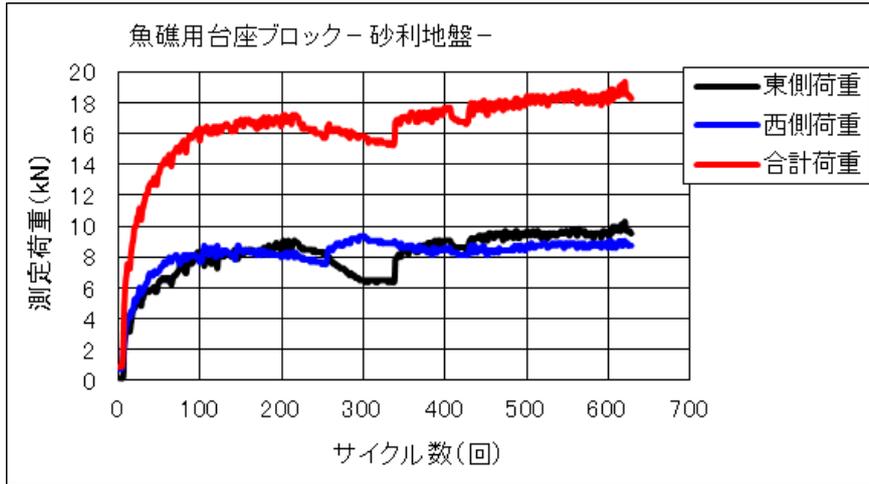


図3.5 反力測定結果 (砂利地盤)

3.2 海底勾配を考慮した構造物の安定性の検討

3.2.1 海底構造物の滑動と転倒

人工魚礁などの海底に沈設する構造物の安定性を判断する基準となるのは、構造物の滑動、転倒に対する安全性である。構造物の滑動に対する安全率は、設置場所の設計流体力と摩擦力をもとに得られる構造物の滑動に対する抵抗力の比で表される。また、転倒の安全率は、設置場所の設計流体力と重心距離によるモーメントと構造物の水中重量と転倒中心距離によるモーメントの比によって表される^{20), 21)}。

3.2.2 海象条件

今回の安定計算においては、水理実験同様に、表 3.3 に示した瀬戸内海における平均的な海象条件を用いることとした。これに海底勾配を考慮して、滑動・転倒・揚力に対する安定性を検討するために、沿岸漁場整備開発事業施設設計指針に則して安定計算を行い²²⁾、安全率を 1.2 以上確保しうるかを検討した。

表 3.3 瀬戸内海における海象条件

Ho	沖波:波高	2.1 m
H	設計:波高	1.95 m
To	沖波:周期	5.1 sec
T	設計:周期	5.1 sec
L	波長	31.08 m
U_H	海面流速	0.77 m/sec
h	水深	5.0 m
W_o	海水の単位体積重量	10.1kN/m ³

3.2.3 構造物の設計条件

(a) 魚礁用台型ブロック

表 3.4 魚礁用台型ブロックにおける設計条件

D	構造物高さ	1.5 m
C_D	抗力係数	2.0
C_M	見掛け質量係数	0.9
V	構造物体積	0.906 m ³
A	投影面積	2.29 m ²
σ_g	構造物の単位体積重量	24.01 kN/m ³
W	構造物重量	21.75 kN
L_A	図心高さ	0.75 m
L_V	転倒中心距離	0.75 m
U_z	構造物天端の流速	1.037 m/sec

(b) 藻場造成用構造物 A

表 3.5 藻場造成用構造物 A における設計条件

D	構造物高さ	1.0m
C_D	抗力係数	1.0
C_M	見掛け質量係数	0.9
V	構造物体積	0.699 m ³
A	投影面積	1.383 m ²
σ_g	構造物の単位体積重量	21.75 kN/m ³
W	構造物重量	15.20 kN
L_A	図心高さ	0.45 m
L_V	転倒中心距離-	1.0 m
U_z	構造物天端の流速	0.979 m/sec

(c) 藻場造成用構造物 B

表 3.6 藻場造成構造物 B における設計条件

D	構造物高さ	0.90 m
C_D	抗力係数	1.0
C_M	見掛け質量係数	2.0
V	構造物体積	0.941 m ³
A	投影面積	1.067 m ²
σ_g	構造物の単位体積重量	22.10 kN/m ³
W	構造物重量	20.80 kN
L_A	図心高さ	0.41 m
L_V	転倒中心距離	1.0 m
U_z	構造物天端の流速	0.964 m/sec

3.2.4 設計流体力の算定

(1) 魚礁用台座ブロックに作用する最大流体力の算定

非砕波領域における波による魚礁構造物上端での水平方向流速の最大値 U_m は以下のよう
に求める。

$$U = U_m \sin\theta \quad (1)$$

$$U_m = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi D}{L}}{\sinh \frac{2\pi D}{L}} = 1.054 \text{ m/sec} \quad (2)$$

求めた U_m を用いて、波力の抗力成分 F_D と質量力成分の最大値 F_M を求める。

$$F_D = C_D A \frac{\omega_0}{2g} U_m^2 = 1.18 \text{ kN} \quad (3)$$

$$F_M = C_M A \frac{\omega_0}{g} \frac{2\pi}{T} U_m = 2.43 \text{ kN} \quad (4)$$

流れと非砕波領域の波の両方がある場合、魚礁に作用する流体力 F は下記式で表される。

$$F = F_D \left(\sin\theta + \frac{U_Z}{U_m} \right)^2 - F_M \cos\theta \quad (5)$$

波の位相 θ は時間とともに変化するので魚礁に作用する流体力 F も時間と共に変化する。
設計流体力を算定するためには、この F を最大にする位相 θ を求めなければならない。

ここで、 $F_M = (2F_D) = \beta$ 、 $U_Z/U_M = \alpha$ とおいて、 F の最大値を求めるには、

$$S^4 + 2\alpha S^3 + (\alpha^2 + \beta^2 - 1)S^2 - 2\alpha S - \alpha^2 = 0 \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{U_Z}{U_M} = 0.983 \quad (7)$$

$$\beta = \frac{F_M}{2F_D} = 1.027 \quad (8)$$

なお、4次方程式であるのでニュートン法による漸近解法を用いて求められる。

一般型で書くと、 n 次近似値 (n は整数) の値から $n+1$ 次の近似値を求める式は次のとおり。

$$S_{n+1} = S_n - \frac{S_n^4 + 2\alpha S_n^3 + (\alpha^2 + \beta^2 - 1)S_n^2 - 2\alpha S_n - \alpha^2}{4S_n^3 + 6\alpha S_n^2 + 2(\alpha^2 + \beta^2 - 1)S_n - 2\alpha} \quad (9)$$

S_{n+1} と S_n の差が十分に小さくなったら計算を終了し、収束値 S とする。

まず、 $S_1 = 1$ とすると、

$$S_2 = S_1 - \frac{S_1^4 + 2\alpha S_1^3 + \gamma S_1^2 - 2\alpha S_1 - \alpha^2}{4S_1^3 + 6\alpha S_1^2 + 2\gamma S_1 - 2\alpha} = 0.894 \quad (10)$$

同様に $S_2, S_3 \dots$ と求めていき、収束計算を行うと、

$$S = 0.875$$

また、 $S_1 = 0$ のときも同様に収束計算を行うと、

$$S = -0.456$$

$$C_i(S_i + \alpha) + \beta S_i = 0 \quad (11)$$

$$1 - 2S_i^2 - \alpha S_i + \beta C_i < 0 \quad (12)$$

極大値を求めるために上の式を満足する組み合わせの S, C を求める、この時の $S = \sin\theta$, $C = \cos\theta$ を用いて最大作用力 F を算出する。

式(11)を満足する S, C を満足するのは以下の値のときである。

$$S = 0.875 \text{ のとき, } C = -0.484$$

$$S = -0.456 \text{ のとき, } C = +0.890$$

また、式(12)を満足するのは、

$$S = 0.875, C = -0.484 \text{ のとき,}$$

$$1 - 2S_i^2 - \alpha S_i + \beta C_i = -1.890 < 0$$

故に、 $\sin\theta = 0.875, \cos\theta = -0.484$ が最大流体力を与える位相である。

この S と C が F を最大にする $\sin\theta$ と $\cos\theta$ の組み合わせであるので、それぞれに代入すると、流れと非砕波領域の波がある場合の流体力の最大値 F が求まる。

$$F = F_D \left(\sin\theta + \frac{U_z}{U_m} \right)^2 - F_M \cos\theta = 5.25 \text{ kN}$$

この F をもって、魚礁用台型ブロックに作用する設計流体力とする。

(2) 藻場造成用構造物 A に作用する設計流体力の算定

魚礁用台型ブロックに作用する設計流体力と同様の計算方法で算定する。
計算結果を以下に示す。

$$F = F_D \left(\sin\theta + \frac{U_Z}{U_m} \right)^2 - F_M \cos\theta = 3.41 \text{ kN}$$

(3) 藻場造成用構造物 B に作用する設計流体力の算定

魚礁用台型ブロックに作用する設計流体力と同様の計算方法で算定する。
計算結果を以下に示す。

$$F = F_D \left(\sin\theta + \frac{U_Z}{U_m} \right)^2 - F_M \cos\theta = 3.33 \text{ kN}$$

3.2.5 滑動に対する安定性の検討

(1) 魚礁用台型ブロックにおける検討

滑動に対する安定性は、設置場所の設計流体力と、摩擦力をもとに得られる構造物の滑動に対する抵抗力の比で表される。沿岸漁場整備開発事業施設設計指針によると、この比を安全率とし、値が 1.20 以上を満たすことが実海域設置の条件となっている。この項目においては海底勾配が 1/15 における安定計算を行う。

(a) 摩擦係数が 0.60 の場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu \left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right) \cos\theta - F\mu \sin\theta}{W \left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right) \sin\theta + F \cos\theta} = 1.21 > 1.20$$

(b) 砂地盤における計測値を用いた場合

- ・摩擦係数 0.78 の場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu \left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right) \cos\theta - F\mu \sin\theta}{W \left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right) \sin\theta + F \cos\theta} = 1.57 > 1.20$$

(c) 砂利地盤における計測値を用いた場合

- ・摩擦係数 0.80 の場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu \left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right) \cos\theta - F\mu \sin\theta}{W \left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right) \sin\theta + F \cos\theta} = 1.61 > 1.20$$

算定の結果は上記のようになり、3種の摩擦係数を用いた場合における魚礁用台型ブロックの滑動に対する安全性が検証された。また、沿岸漁場整備開発事業施設設計指針で示されている摩擦係数 0.6 ではなく、今回の滑動試験から得られた摩擦係数を用いることで、魚礁用台型ブロックを滑動に対してより安定させることが可能であることが確認できた。

さらに、砂地盤における安全率より砂利地盤における安全率がわずかに高い値を示したということから、海底底質が砂利とは異なる場所においても安定性を確保することが可能であることが確認できた。

(2) 藻場造成用構造物 A における検討

藻場造成用構造物 A においても同様に海底勾配を 1/15 に設定して算定する。

(a) 摩擦係数 0.6 の場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\cos\theta - F\mu\sin\theta}{W\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\sin\theta + F\cos\theta} = 1.201 > 1.20$$

(b) 砂地盤上にて計測された摩擦係数 0.69 を用いた場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\cos\theta - F\mu\sin\theta}{W\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\sin\theta + F\cos\theta} = 1.38 > 1.20$$

(c) 砂利地盤上にて計測された摩擦係数 0.86 を用いた場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\cos\theta - F\mu\sin\theta}{W\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\sin\theta + F\cos\theta} = 1.72 > 1.20$$

算定結果は上記のようになり、3種の摩擦係数を用いた場合における藻場造成用構造物 A の滑動に対する安全性が検証された。藻場造成用構造物 A に関しても、魚礁用台型ブロックと同様に、沿岸漁場整備開発事業施設設計指針で示されている摩擦係数 0.6 ではなく、今回の滑動試験から得られた摩擦係数を利用することで、より安定性を増大することが可能であることが分かった。

また、砂地盤における安全率に比べ、砂利地盤における安全率が格段に高い値を示しているため、この構造物は海底底質が砂利である場所への設置がより有効である。

(3) 藻場造成用構造物 B における検討

藻場造成用構造物 B においても同様に海底勾配を 1/15 に設定して算定する。

(a) 摩擦係数 0.6 の場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\cos\theta - F\mu\sin\theta}{W\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\sin\theta + F\cos\theta} = 1.63 > 1.20$$

(b) 砂地盤上にて計測された摩擦係数 0.71 を用いた場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\cos\theta - F\mu\sin\theta}{W\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\sin\theta + F\cos\theta} = 1.93 > 1.20$$

(c) 砂利地盤上にて計測された摩擦係数 0.86 を用いた場合

$$S_{FS} = \frac{W\mu\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\cos\theta - F\mu\sin\theta}{W\left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right)\sin\theta + F\cos\theta} = 2.33 > 1.20$$

算定結果は上記のようになり、台座ブロック及び藻場構造物 B と同様に、3 種の摩擦係数を用いた場合における藻場造成用構造物 B の滑動に対する安全性が検証された。

(4) 算定結果まとめ

表 3.7 及び表 3.8 に示す様に、3 種類の構造物とも、沿岸漁場整備開発事業施設設計指針で示されている摩擦係数 0.6 ではなく、今回の滑動試験から得られた摩擦係数を用いることで、より安定性が增大することが確認でき、スパイク構造の有効性が確認された。特に砂利地盤においては高い滑動抵抗性を示した。

表 3.7 各種構造物の砂地盤の滑動に対する安全率

底質条件：砂地盤						
	魚礁用台座ブロック		藻場造成用構造物A		藻場造成用構造物B	
摩擦係数 μ	0.60	0.78	0.60	0.69	0.60	0.71
安全率 S_{FS}	1.21	1.57	1.20	1.38	1.63	1.93

表 3.8 各種構造物の砂利地盤の滑動に対する安全率

底質条件：砂利地盤			
	魚礁用台座ブ	藻場造成用構造物A	藻場造成用構造物B
摩擦係数 μ	0.80	0.86	0.86
安全率 S_{FS}	1.61	1.72	2.33

3.2.6 転倒に対する安定性の検討

転倒の安全率は、設置場所の設計流体力と重心距離によるモーメントと、構造物の水中重量と転倒中心距離によるモーメントの比によって表される。具体的な式は以下に示す。沿岸漁場整備開発事業施設設計指針によると、この比を安全率とし、数値が 1.20 以上を満たすことが実海域設置の条件となっている。転倒においても海底勾配 1/15 における安定計算を行う。算定の結果は表 3.9 に示す。

$$S_{FS} = \frac{W \left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right) \cos\theta - F \mu \sin\theta L_V}{W \left(1 - \frac{\omega_0}{\sigma_g}\right) \sin\theta + F \mu \cos\theta L_A} \geq 1.2$$

表 3.9 転倒に対する各種構造物の安全率

	魚礁用台座ブロック	藻場造成用構造物A	藻場造成用構造物B
安全率 S_{FS}	2.02	4.47	6.62

算定結果より、転倒に対する安全率は、いずれの構造物においても 1.2 を超えるため、転倒に対して安全であることが証明された。また、いずれの構造物においても滑動に対する安全率と比べ、格段に大きい数値を示しているため、構造物を海底に沈設する際には、滑動抵抗を増加させる対策を練ることが重要であると考えられる。

3.2.7 海底勾配の変化に応じた安全性

前述までの設計条件は、瀬戸内海における平均的な数値であるが、ここでは海底勾配の変化した場合における藻場造成用構造物 A の安全性の検討を行う。

(1) 藻場造成用構造物 A の安全率結果

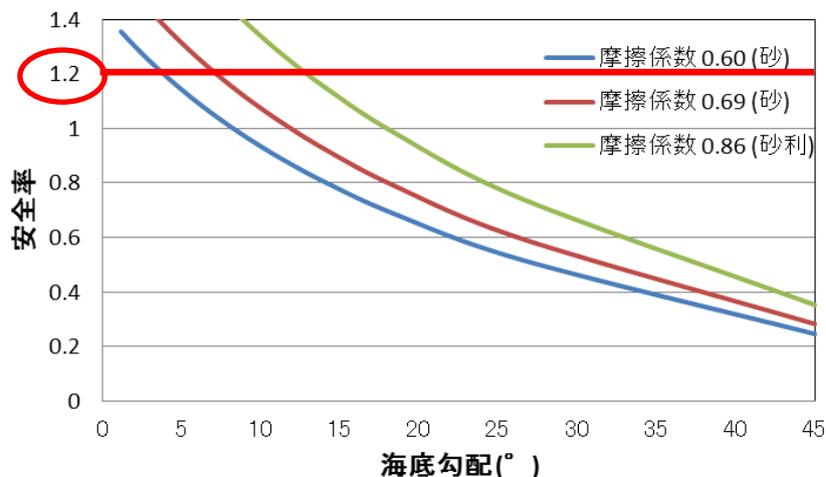


図 3.6 測定した摩擦係数による藻場造成用構造物 A の安全率の変化

図 3.6 から、藻場造成用構造物 A の滑動実験によって得られた摩擦係数値を用いて安定計算を行った結果、既存の構造物のほとんどが海底勾配 1/10 以上では不安定となることに対し、藻場造成用構造物 A は、砂利地盤では海底勾配が約 1/4 の場所においても安全率の基準値 1.20 以上が確保できる結果となった。

(2) 各種構造物の安全率の比較

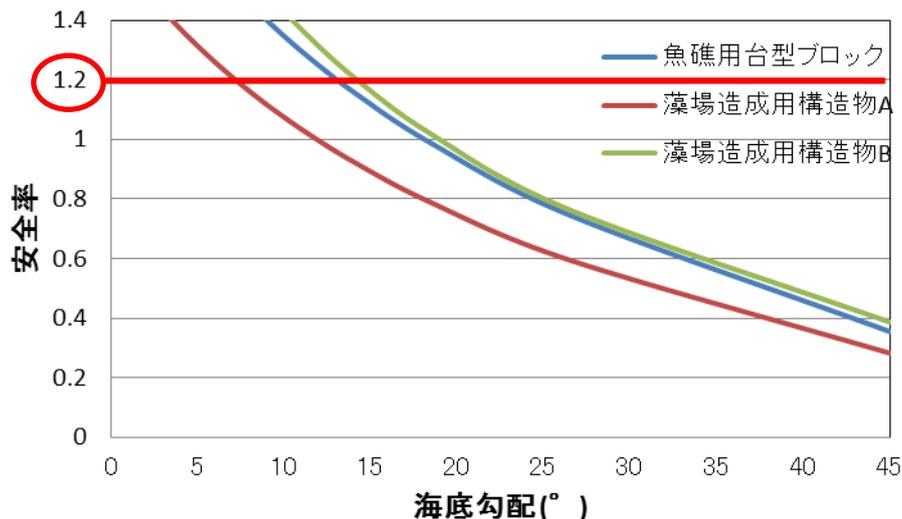


図 3.7 海底底質が砂の場合における各種構造物の安全率の変化

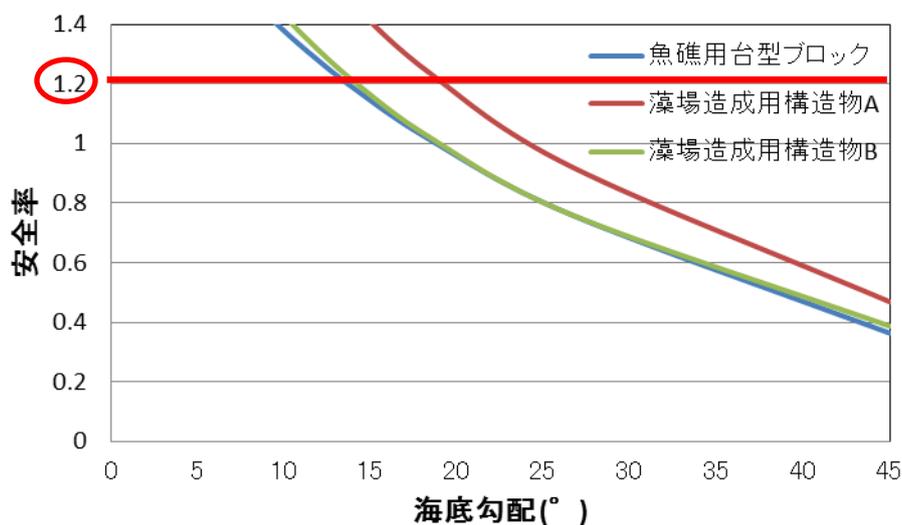


図 3.8 海底底質が砂利の場合における各種構造物の安全率の変化

図 3.7 及び図 3.8 から、魚礁用台型ブロックと藻場造成用構造物 B は海底底質の変化に関わらず、海底勾配の変化に対して安全率の推移は似通った軌道を示し、設置限界勾配も 15° 程度とほぼ同等であることが分かった。また、藻場造成用構造物 A は海底底質が砂の場合は沈設できる海底勾配はやや小さいものの、砂利の場合は、海底勾配が 20° 付近まで大きく増大することがわかった。これは、今回使用した 3 種類の構造物の有するスパイク埋設面積（海底面に着底する面積）を等しくした場合、埋設するスパイクの数（魚礁用ブロック 5 箇所、藻場造成構造物 A は 6 箇所、B は 3 箇所）が多いほど、滑動に対する安定性が向上することが考えられる。

(3) 転倒に対する安全率

図 3.9 に海底勾配の変化による転倒に対する安全率の計算結果を示す。

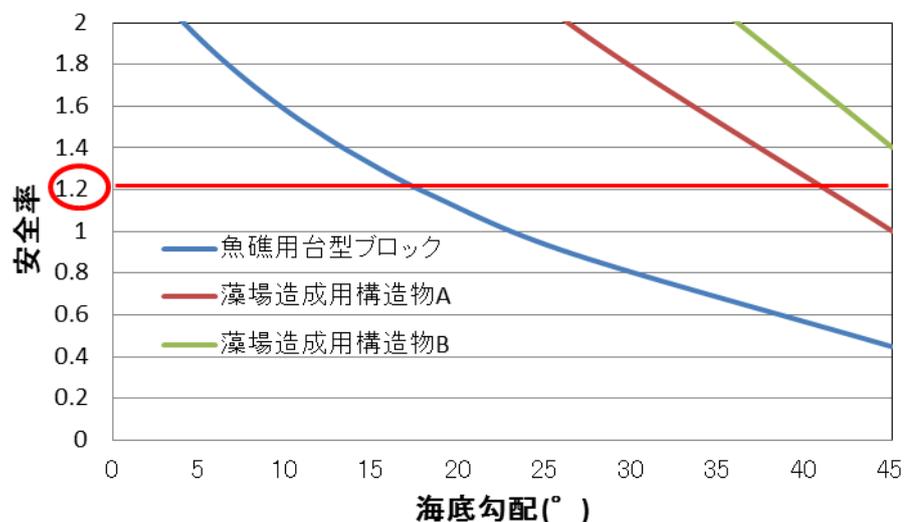


図 3.9 各種構造物における転倒に対する安全率の変化

上記のグラフから、全ての構造物において滑動に比べ、転倒に対して安定していることが分かった。一般に魚礁の不安定については、まず滑動が発生するとされており、それについてもこの計算結果から確認できた。

3.3 揚圧軽減機能の検討

海流が大きく作用する場合の海中の構造物には、図 3.10 に表す様な揚力が作用する^{23) 24) 25)}^{26) 27)}。そこで藻場造成構造物 A の揚力に対する軽減対策として内部ステージに図 3.11 に示す様に下部から上部へ貫通する空孔部を設けた。設計基準に基づき実際に設置する場所の海底勾配 1/50 において、表 3.10 に示す海象条件において揚力を算定し、安定率から最適空孔を検討した。他の構造物でも応用できるよう空孔半径 r の代わりに A_1/A_0 の面積率で比較した。 A_1/A_0 とは、下部構造(空孔なし)の投影面積と内部ステージの空孔部の控除面積との比率を示し、以降これを空孔率と称す(図 3.13 参照)。

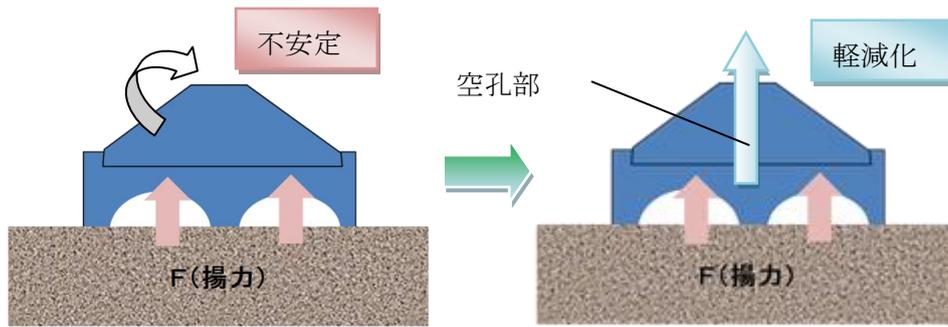


図 3.10 揚力の作用図と軽減化の構造

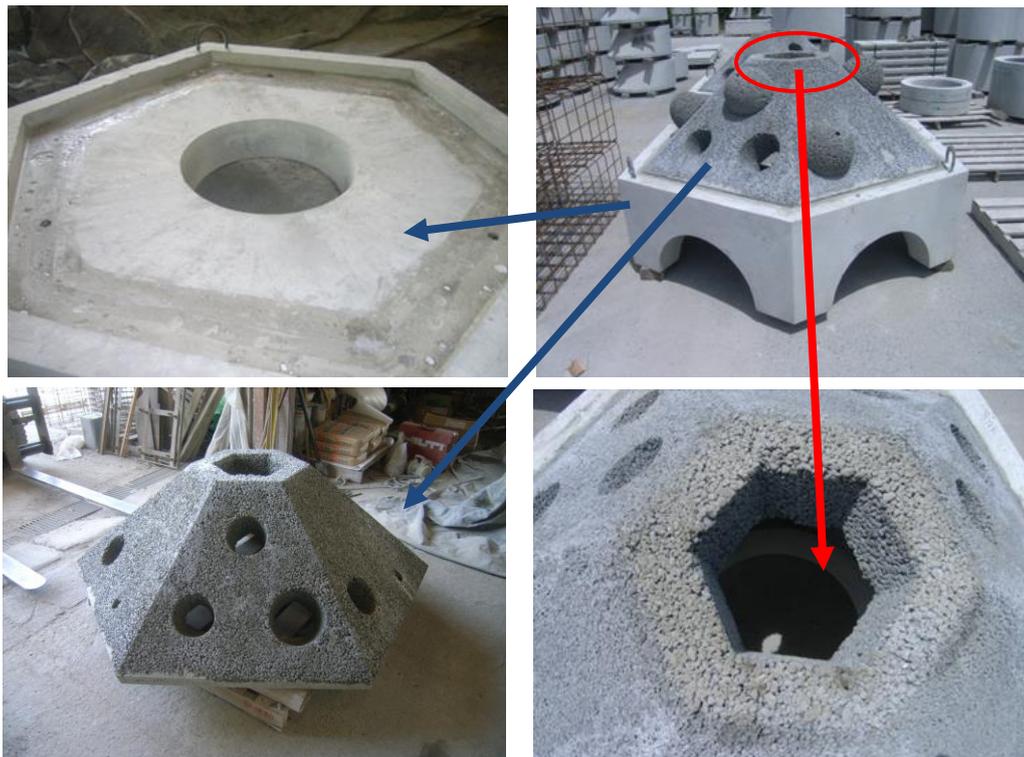


図 3.11 藻場構造物 A に設けた内部ステージの空孔部

表 3.10 海象条件（揚力の安定性）

沖波の波高 H_0 (m)	1.05
設計周期 T (s)	4.0
沖波の波長 L_0 (m)	24.96
海面流速 U_H (m/s)	0.50
設置水深 h (m)	4.0
設置場所の海底条件	砂質
設計波高 H (m)	0.88
設計波長 L (m)	20.85
魚礁先端での流速 U_z (m/s)	0.656
水粒子の速度 U_m (m/s)	0.474
海底勾配	1/50

表 3.11 構造物の空孔半径の変化による各パラメータの推移

空孔の半径:r (m)	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55
下部構造の投影面積:A ₀	2.307						
空孔部の控除面積:A ₁	0.196	0.283	0.385	0.503	0.636	0.785	0.950
空孔率:A ₁ /A ₀ (%)	8.5%	12.3%	16.7%	21.8%	27.6%	34.0%	41.2%
揚圧力:F(ton/m ²)	0.5						
揚力:F(ton)	1.055	1.012	0.961	0.902	0.835	0.761	0.678
空中重量:W ₀ (ton)	2.088	2.057	2.019	1.976	1.927	1.872	1.811
水中重量:W(ton)	1.21	1.19	1.17	1.15	1.12	1.08	1.05
安全率:F(W/F)	1.15	1.18	1.22	1.27	1.34	1.42	1.55

表 3.11 は、空孔半径を変化させた際の安全率の変化を表している。表を見ると安全率 1.20 以上を満たす境界が、空孔半径 0.3 m~0.35m の間にあることが分かる。図 3.12 は、表 3.11 を縦軸に安全率 S、横軸に空孔率 A₁/A₀ としグラフ化したものである。結果として、図 3.11 に示す通り安全と境界の空孔面積の割合 A₁/A₀ は、約 16%ということが確認され、揚力に対しては、下部構造の空孔半径を 0.35 m 以上とすることが望ましいということが分かった。またこの時の滑動安全率 S_{FS}=3.51、転倒安全率 S_{FL}=14.13 であるので、考慮すべき 3 つ全ての項目に対して安全であることが確認された。

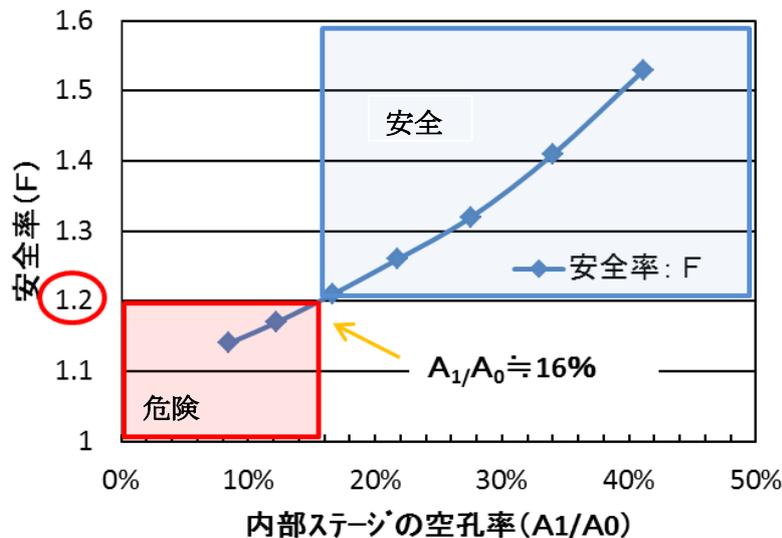


図 3.12 揚力を考慮した安定性の計算結果

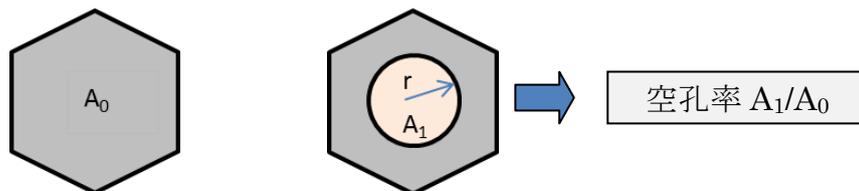


図 3.13 下部構造物の面積 (A₁, A₀) と空孔率

4 章

実海域における藻場造成機能の検証

4.1 設置海域

- ・設置海域：香川県高松市庵治町篠尾地先および鎌野地先
- ・設置年月日：2010年3月13日（2基沈設）2012年11月27日（4基沈設）・・篠尾
2013年6月18日（25基沈設）・・鎌野
- ・設置水深：4～6 m
- ・底質：砂質

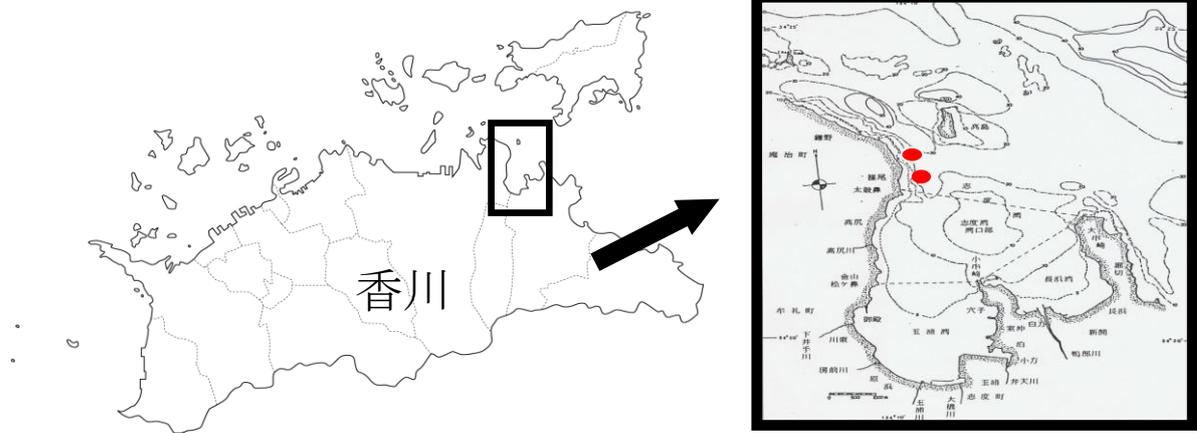


図 4.1 構造物設置場所

研究対象構造物は、香川県高松市篠尾地先および鎌野地先の海域に計 31 基沈設されている。第 3 章にて、滑動・転倒・揚力に対する安定性を安定計算において検討し、海中での安定性を確保している。また対象構造物は、浅海域での藻場造成を行うことを目的として設計された点を考慮し、水深の浅い沿岸部を選択し、研究地とした。上記の安定性が確認されたことから実際に対象構造物を沈設し、着生した海藻や餌料生物を定量的に評価することで、対象構造物の藻場造成機能を検証することとする。

研究対象構造物が設置されている志度湾は、香川県北東部に位置する瀬戸内海に面した内湾である。正確には、備讃瀬戸東部海域の東端近くに位置し、南北に約 6 km、東西に約 5 km に範囲する全体面積約 18.50 km² のほぼ楕円状の湾で、小串崎の突出により奥部に 2 つの支湾を形成している。

4.2 調査結果および考察

香川県高松市庵治沖（図 4.1 参照）において、設置魚礁直上での稚魚放流、および追跡調査

を含め計 9 回行った。また、2012 年の 11 月 27 日に 4 基沈設したものについては、構造物上の多孔質体、コンクリート、石材（既存の投石礁）、鋼材の各基質上に着生した海藻量を比較した。さらに、2013 年の 6 月 18 日に 25 基沈設し、現在追跡調査中である。

なお、これまでの調査時においては、設置している研究対象構造物に特に目立った破損や埋没など、物理的な損害は確認されていない。

(1) 海藻着生量

篠尾地先で実施された 1 回目の調査は、2012 年 4 月 27 日に行われ、ダイバーによる視認確認調査（これ以降「調査」とする）により約 5,000g/m² のガラモやワカメといった海藻の着生が確認された。春先はガラモを形成するホンダワラ類（第 1 章 藻場参照）の成長がピークを迎える時期ということもあり、構造物の外形が視認できないほどの大規模な海藻群落を確認することができた（図 4.2 参照）。

2 回目の調査は、同年 2012 年 8 月 30 日に行われ、魚礁表面に微細藻類の生育がみられたが、ガラモなど海藻類の着生はほとんど確認されなかった（図 4.3 参照）。1 年生の海藻であるホンダワラ類は、夏期に発芽するとすぐに成長し、冬季には全長が 1 m 以上に達する。その後春季に成熟して幼胚を散布し、最終的に付着基ごと流出することで流れ藻になるという成長特性をもっている。このことから、夏期には一般的に着生量が落ち込むことが知られており、今回海藻着生量に乏しい結果になったのは、季節的要因が大きな影響をおよぼしたと考えられる。

3 回目の調査は、同年 9 月 20 日に約 300 尾のキジハタ稚魚放流と並行して行い、構造物表層に数 cm 程度のガラモ類の着生が確認された（図 4.4 参照）。キジハタ稚魚の放流に関しては、魚礁直上での放流を行い、再度追跡調査を行うこととした。

4 回目の調査は、同年 10 月 12 日に、海藻の着生状況・追跡調査をダイバーによる調査により行われた。海藻に関しては、多孔質体部分に 5~10 cm のガラモ類が繁茂しており、約 500g/m² 程度の着生が確認された（図 4.5 参照）。

5 回目の調査は、同年 11 月 27 日に研究対象構造物と同型の構造物を新たに 4 基沈設し、さらに約 3,000 尾のキジハタ稚魚放流と並行して行われ、約 700g/m² の海藻着生量がダイバーによる視認調査により確認されている（図 4.6 参照）。

6 回目の調査は、2013 年 1 月 4 日に行われ、約 50 cm 程度に成長したガラモ場が確認され、着生量としても前回調査の約 3.6 倍、2,500g/m² という大幅な海藻類の成長、大規模な藻場が形成されていることが確認された（図 4.7 図 4.8 参照）。ホンダワラ類の特徴として、水温が低下し始めると伸長し、春先から初夏にかけて極大値を示す成長特性がある。よって本来冬季は、海藻の着生・育成に乏しいはずである。それにもかかわらずこれだけの海藻着生量を確認できたのは、構造物の海藻着生効果が確実に発揮されていることを示唆している。

7 回目の調査は、2013 年の 3 月 29 日に海藻の着生状況・追跡調査をダイバーによる調査により行われた。多孔質体部分にガラモ類が 38,400g/m²、ワカメが 10,500g/m² という大規模な藻場が形成されていることが確認された（図 4.9 参照）。

8 回目の調査は、2013 年の 5 月 17 日に海藻の着生状況・追跡調査をダイバーによる調査により行われた。多孔質体部分にガラモ類が 47,600g/m²、ワカメが 12,400g/m² という大

規模な藻場が形成されていることが確認された。(図 4.10 参照)

9 回目の調査は、2013 年の 5 月 31 日に海藻の着生状況・追跡調査をダイバーによる調査により行われた。多孔質体部分にガラモ類が $41,000\text{g}/\text{m}^2$ 、ワカメが $1,900\text{g}/\text{m}^2$ という大規模な藻場が形成されていることが確認された。(図 4.11 参照)

a) 考察

2012 年度の調査結果と 2010 年度の調査結果を比較した際、季節の移り変わりによる海藻着生量は、多少の差はあるものの夏期に落ち込み、春先に向けて回復していく生育サイクルが形成されており、2 つの調査結果は同様の傾向を示していることが確認された(図 4.12 参照)。

次に同時期における海藻着生量を比較すると、夏期から初冬にかけては、2010 年度の数値の方が多少良い結果を示している。一方海藻量の極大値に注目してみると 2012 年度と 2010 年度の数値には大きな差があり、2012 年度の方が優れた成果をあげていることが分かる。また 2010 年度は、冬季の早い段階から海藻量の減少が見られるが、2012 年度以降は、2013 年 5 月末までに飛躍的に現存海藻量が増加していることから、今後も海藻着生量は安定し、より高い海藻着生量を示すと予測できる。更に高い海藻着生量から春季における流れ藻の量も増大することが予想され、来年度以降の藻場造成に好影響を与えることが期待される^{28) 29) 30) 31) 32) 33) 34) 35)}。

2010 年度は、大型魚種による海藻への食害被害が発生し(図 4.13 参照)、このことが本来春先に向けて成長していく藻場の成長を阻害し、海藻着生量の減少を招く大きな要因となった(図 4.14 参照)。それに対して 2012 年度から 2013 年度にかけては、食害といった被害もなく順調な藻場造成が確認されている。加えて構造物の藻場造成効果が経年変化で発揮されることで、時間の経過とともに海藻着生量も増大し、藻場造成機能が着実に発揮されていることが明らかとなった。なお、東北震災域沿岸での藻場機能としての検証については、2013 年 8 月 6 日に現場海域に沈設し現在調査中の段階である。沈設状況については、6 章の今後の課題で後述する。



図 4.2 海藻着生状況 (2012. 4. 27)



図 4.3 海藻着生状況 (2012. 8. 30)



図 4.4 海藻着生状況 (2012. 9. 20)



図 4.5 海藻着生状況 (2012. 10. 12)



図 4.6 海藻着生状況 (2012. 11. 27)



図 4.7 陸側の海藻着生状況 (2013. 1. 4)



図 4.8 沖側の海藻着生状況 (2013. 1. 4)



图 4.9 海藻着生状况 (2013. 3. 29)

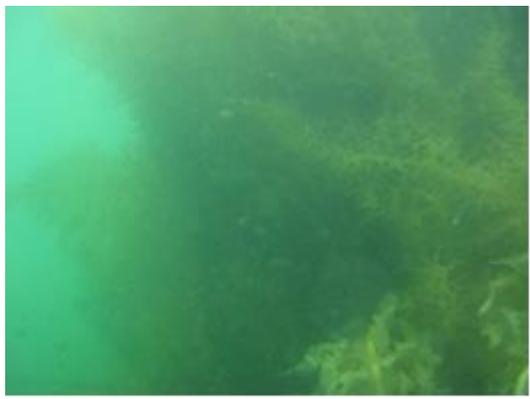


图 4.10 海藻着生状况 (2013. 5. 17)



图 4.11 海藻着生状况 (2013. 5. 31)

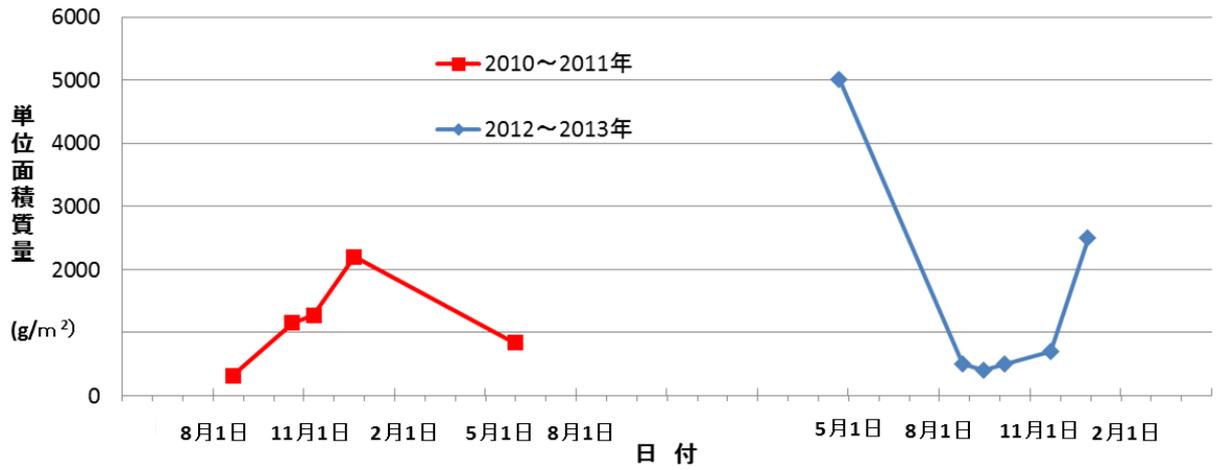


図 4.12 海藻着生量の経年変化



図 4.13 食害を受けた構造物

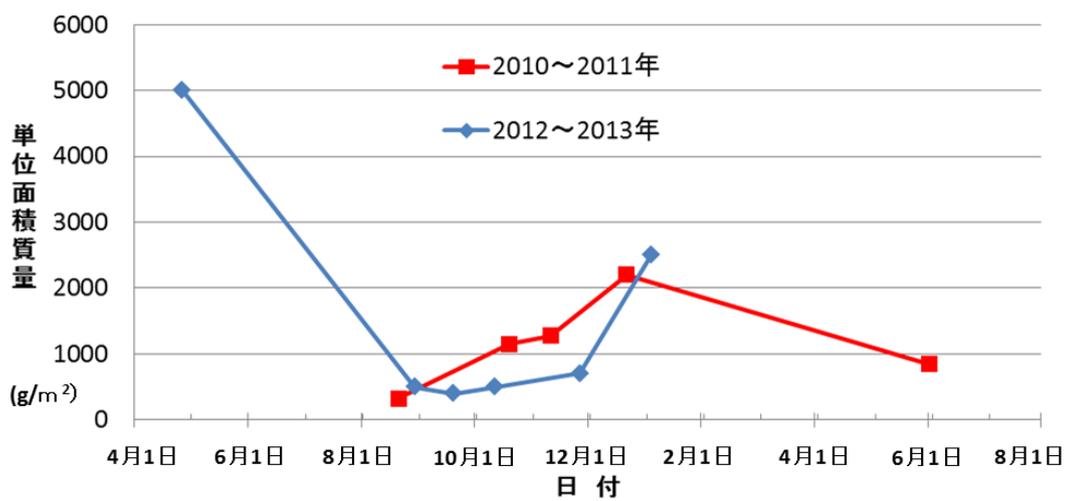


図 4.14 同時期の海藻着生量の比較

(2) 蛸集魚類

蛸集魚類に関する詳細調査は、海藻着生状況の確認と並行して計2回行われた。1回目は、2012年8月30日のダイバーによる視認確認調査によりメバルや、ベラといった魚種の蛸集が確認された(図4.15参照)。また魚礁底部にて20cm程度のキジハタを視認することができ、前年に放流した稚魚が、構造物を住处として利用していることが確認された(図4.16参照)。下記に詳しい蛸集魚類を示す(表4.1参照)。

表4.1 蛸集魚類 (1回目)

魚類	発見場所	全長 (cm)	個体数 (尾)
キジハタ	魚礁底部	20	1
メバル	魚礁底部	5~10	20
スズキ	魚礁上部	60	3
チヌ	魚礁底部	30	3
ベラ	魚礁底部	10~15	20
カワハギ	魚礁上部・底部	10	5
マダイ	魚礁上部	5~10	5
カサゴ	魚礁内部	25	3

2回目の調査は、2012年10月12日に行われ、蛸集魚類の視認調査と並行して放流稚魚の追跡調査も行った(4章2項 海藻着生量参照)。総じて1回目の調査より多数の蛸集が発生しており、メバルやハゼといった魚類の姿が確認された(表4.2参照)。

また、追跡調査により魚礁上部・内部に体長8~10cmのキジハタ稚魚が100~150尾、魚礁底部に体長20cmの個体が1尾確認できた。

表4.2 蛸集魚類 (2回目)

魚類	視認場所	全長 (cm)	個体数 (尾)
キジハタ	魚礁上部・内部	8~10	100~150
	魚礁底部	20	1
メバル	魚礁底部	10~25	20
	魚礁内部	5~10	50
ササノハベラ	魚礁上部・底部	15~20	5
ハゼ	魚礁上部・内部	5~10	20
ベラ	魚礁底部	10~15	10
カサゴ	魚礁内部・周辺	20~25	6

a) 考察

調査結果から、海藻量の増大が魚の個体数にも良い影響を与え、資源生産力を向上させていることが確認できた。しかし、それと同時にメバルやカサゴなどの比較的大型の魚の蛸集も発生しており、海藻・稚魚への食害といった問題も過去発生しているのでこれらに対する対策も今後検討する必要がある。

また、追跡調査から放流稚魚の約半数が構造物を住处として生息していることが確認された。既存技術では、設置後3ヶ月程度で歩留まり率は、1%以下まで低減してしまう現状がある中で、これだけの規模の稚魚が魚礁内に留まっているのは、構造物が稚魚にとって好適な餌場・隠れ場を提供しているということであり、構造物が形成する内部空間が稚魚の大型魚による捕食圧の低減効果を発揮し、歩留まり率向上に大きく寄与していることが確認された^{36) 37) 38) 39) 40) 41)}。なお、2013年の5月の海藻着生量の調査時においても、藻場構造物の周辺にメバルの稚魚やイカナゴを200~300尾確認しており、現在も良好な環境を保持している。(図4.17, 4.18参照)



図 4.15 魚礁底部のメバル



図 4.16 魚礁底部のキジハタ



図 4.17 イカナゴの稚魚



図 4.18 メバルの稚魚

(3) 多孔質体の海藻の着生量及び状況

2012年11月27日篠尾地先(図4.1 設置海域参照)において、新たに4基の研究対象構造物の沈設が行われた(図4.14 参照)。設置水深は、約8mであり、構造物上の多孔質体、コンクリート、石材(既存の投石礁)、鋼材の各基質上に着生した海藻量を比較した。4か月経過後の海藻の着生状況をモニタリングし、構造物上の多孔質体、海底面に設置した多孔質体、コンクリート、石材(既存の投石礁)、鋼材の各基質上に着生した海藻量を測定した(図4.21)。その結果、図中の写真に示した構造物上の多孔質体に約1,800g/m²、海底面の多孔質体に約160 g/m²、コンクリート基質に約70 g/m²、石材基質に約170 g/m²、鋼材基質に0 g/m²の海藻がそれぞれ着生し、構造物上の多孔質基質に最も多くの海藻が着生した(図4.21, 図4.22 参照)。これはコンクリート基質上の海藻量の約26倍、石材の約10倍に相当する。調査時において、注目されたのは、海底面に設置した多孔質基質、コンクリート基質、鋼材および石材には、浮泥が堆積しており、海藻胞子の着生を阻害する要因となることが考えられる。一方、造物上部の多孔質基質は、既存の基質で問題となっている浮泥による目詰まりもなく、構造物の有する流れの制御機能が実海域でも発揮されていることが示唆された。今後は、2010年度に沈設された既存の2基の構造物とともに、ダイバーによる潜水調査等により継続して調査を行う。



図 4.19 構造物沈設状況図



図 4.20 沈設直後の構造物

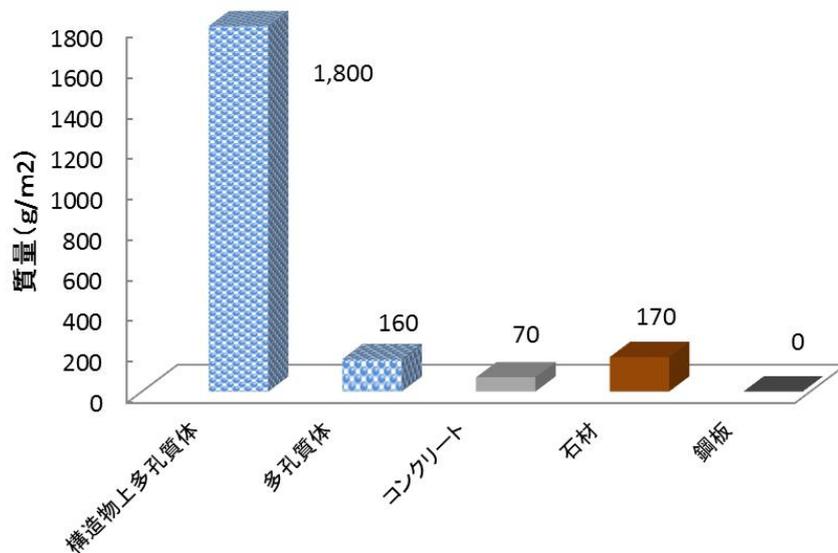


図 4.21 基板別の海藻（ガラモ）の着生量



図 4.22 突起部に付着した海藻



図 4.23 構造物内部空間に滞留する魚類

(4) 藻場構造物に付着した海藻による窒素および炭素固定量について

これまでの視認確認調査より本研究対象の藻場構造物にはホンダワラ類（シダモク）が優占種となっていることから、窒素固定量の計算には窒素含有率の平均値（1.55%）⁴³⁾を用いた計算を行った。ここで、これまでの調査結果より年間の最大現存量を 40kg/m² とする。ホンダワラ類の最大現存量と生産量との比は 1.2（水産基盤整備事業費用対効果分析のガイドライン、2002）より生産量は 48kg/m² となる。よって、本研究対象の藻場構造物は着生面積が 3.3m²/基であることより、1 基あたり 48kg/m² × 3.3m² × 1.55/100 = 2.46kg（0.745kg/m²）の窒素を固定化する。これは、同一場所に設置した投石礁や既存の藻場礁と比較すると、2～4 倍も高い値となっている⁴³⁾。

香川県高松市篠尾地先及び鎌野地先の海域には 31 基の藻場構造物が設置されており、藻場造成におけるホンダワラ類による窒素固定量は 76.26kg と推定される。日本人の年間の窒素排出量は約 44kg/人年とされていることから、本研究の藻場造成構造物による窒素固定量は年間 1.7 名分の生活排水の浄化に寄与することになる。

また、炭素固定量の計算には、ホンダワラ類（ガラモ）の炭素含有率（36.7%）⁴⁴⁾を用いて計算を行った。ホンダワラ類の生産量は48kg/m²となることから、1基あたり48kg/m²×3.3m²×36.7/100=58.13kg（17.62kg/m²）の炭素を固定化し、31基の藻場造成によるホンダワラ類の炭素固定量は約1,800kgと推察される。よって、藻場構造物に付着した海藻は炭素の固定化にも寄与することになる。

5 章

多孔質コンクリートの底質改善機能

5.1 底質改善多孔質コンクリートの概要

(1) 多孔質コンクリートの特徴

一般的にポーラスコンクリートと称されている多孔質体は、空隙径が 5~10mm および空隙率 20%程度、使用する骨材は天然材料である砕石である。空隙径を 15mm 以上、空隙率 30% 確保した場合、有用水産資源の餌料となる小型生物の着生に優れ、好適な餌場環境を形成できることが検証されているが、本研究開発の多孔質コンクリートは、底質環境改善基質としての構造性能を保持するため、ポーラスコンクリートの河川護岸の構造仕様に準拠し、設計基準圧縮強度を 10N/mm² 以上、空隙率 30%に設定した。同時に、産業副産物である鉄鋼スラグ（高炉徐冷スラグ 2010）を主要骨材とした。また、Ca₁₀(PO₄)₆(OH)₂なる一般組成をもち、カルシウム系イオン交換体であり、重金属イオンに対する吸着効果が注目されている焼成骨粉（以下、HAP）の混入した多機能性多孔質体である。なお、鉄鋼スラグの骨材径を変えることで、空隙径や空隙率の制御も可能な多孔質体となっている。

(2) 多孔質コンクリートの製作及び強度試験

多孔質コンクリート（単位質量1,520~1,674kg/m³）は、水粉体比27%、空隙率30%で配合し、ペーストフロー値を180mmとした。水、セメント（普通ポルトランドセメント）、HAP粉末、混和剤（ナフタリンスルホン酸系の高性能減水剤、セメントの0.5%）、高炉徐冷スラグ（2010）を混練り用ミキサー内に投入後、練混ぜられた材料を型枠へ投入した。振動締固め機を使用して30~60秒間、振動締固め成型を行った後、養生した（図5.1）。養生完了後、硬化した多孔質コンクリート（図5.1、平板W:100cm×L:50cm×H:6cm）を脱型し、所定の出荷時まで屋外保管した。また、重金属吸着材料であるHAP粉末の最適配合を検討するため、全質量に対し、0、5、10、15%混入した標準配合を表5.1に示す。圧縮強度試験は、φ12.5cm×H25cmの円柱供試体を用い、突き棒、ランマおよびバイブレータ等を用い3層に分けて締固めを行い作製した。脱型後、材齢28日まで標準養生を行った後、圧縮強度試験を行った。試験結果を表5.2に示す。

表5.1 多孔質コンクリートの標準配合

配合番号	W/P (%)	空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			C (普通)	W(水)	スラグ [*] (2010)	混和剤	HAP
H-0%	27	30	247	67	1360	1.24	0
H-5%	27	30	244	88	1206	1.22	81
H-10%	27	30	243	108	1060	1.22	157
H-15%	27	30	245	128	919	1.22	228

表5.2 圧縮強度試験結果（材齢28日）

配合番号	H-0%	H-5%	H-10%	H-15%
圧縮強度 (N/mm ²)	10.5	12.6	11.3	9.1



焼成骨粉 (HAP粉末)



高炉徐冷スラグ (2010)



打設状況



多孔質コン表面

図5.1 多孔質コンクリートの製作状況

(3) 多孔質コンクリートの炭酸化

一般のコンクリート製品はアルカリ度が高く、海域へ沈設直後において、漁業者等から水産資源への影響を懸念される意見もある。そこで、図 5.2 に示すように、本研究で製作した多孔質コンクリートを炭酸化養生装置へ搬入し、炭酸ガス濃度 20%の条件下で 24 時間養生した。その後、炭酸化の有無による溶出試験（1L 水溶液中に試料 500g を入れ、96 時間後に計測）を実施し、pH を測定したところ、炭酸化していない多孔質コンクリートでは、セメントのアルカリ成分（水酸化カルシウム）の溶出により、pH10.2 であったが、炭酸化された多孔質コンクリートでは、pH8.3 であった。この結果は、瀬戸内海沿岸部における海水の pH 平均値と同等であり、多孔質体表面の炭酸化処理（24 時間で約 300 μm の深さまで炭酸化可能）により、従来のコンクリートを主としたアルカリ度の高い基質と比較して、炭酸化されたコンクリート製基質では、生物親和性が飛躍的に向上することが期待される。事実、炭酸化し

た多孔質体の海域設置から 3 カ月後における餌料生物着生量を測定した結果、炭酸化されていない多孔質体と比べて 2 倍以上高かったことを確認している。また、このときの付着生物は、筆者らのこれまでの研究結果と同様に、空隙率 30% の多孔質体において、有用稚魚の餌料となる甲殻類、多毛類の着生量が最も多かった^{45), 46)}。



炭酸化装置内に格納



炭酸化養生

図5.2 多孔質コンクリートの炭酸化状況

5.2 金属吸着機能の検証

(1) 金属吸着実験の概要

最適配合を決定するため、多孔質コンクリート全質量に対し、HAPを0, 5, 10, 15%混入した試験体(W:10cm×L:10cm×H:6cm)を用いて各種金属イオンの吸着実験を行った結果、10%以上の混入率では、吸着機能に差が生じないことを確認した(図5.3参照)。そこで、10%HAPを含有させた多孔質コンクリートの各種金属イオン吸着効果について検討した。各種金属イオン溶液200mLに試験体として、HAPを混合した多孔質コンクリートあるいは、混合していないものをそれぞれ20gの質量に成型し加え、硫酸でpH7.0に調整した後、振とうした。0, 1, 8, 24時間後、ろ過により固形物と処理水を分離し、処理水中の各種金属イオン濃度を測定した。

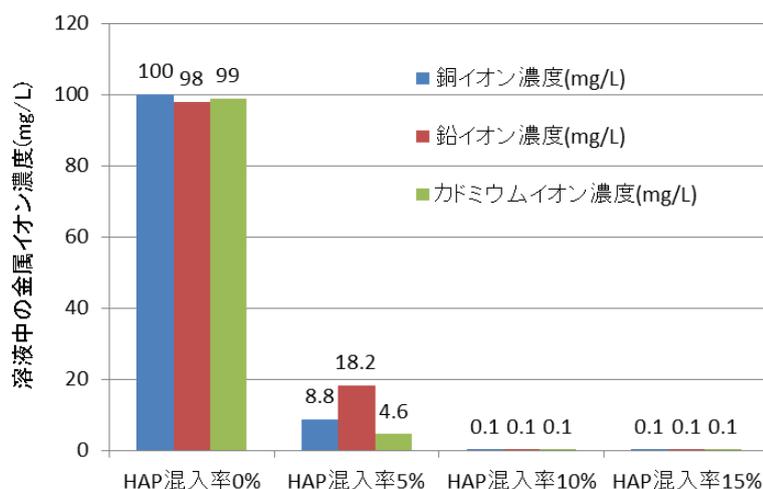


図5.3 HAPの混入の違いによる金属イオン吸着実験結果

(2) 金属吸着実験の結果

表 5.3 に多孔質コンクリートによる各種金属イオン吸着実験結果を示す。24 時間後における 10%HAP を混入させた多孔質コンクリートは、カドミウムイオン、鉛イオン、銅イオン、鉄イオン(3 価)、クロムイオン(3 価)に対する強い吸着効果を示した。また、マンガンイオン、ニッケルイオン、水銀イオン、亜鉛イオンおよびストロンチウムイオンに対しても吸着効果を示した。特に、カドミウムイオンについては、実海域での汚染が懸念される場所も多いことから、底泥からの溶出を抑制するための基礎実験として、カドミウム濃度 390mg/L の汚染土壌 2kg を入れた水槽(3L)での溶出試験も実施し、HAP 含有多孔質コンクリート 1.5kg を投入して吸着機能を検証した。この場合も、水中のカドミウム濃度は 3.2mg/L まで減少し、高い吸着機能が検証された(図 5.4)。一方、HAP を混入させていない場合は、水中のカドミウム濃度に変化は無く、吸着効果は認められなかった。また、表 5.3 中には示していないが、6 価クロムイオンに対する吸着効果は僅か 8%であった。6 価クロムイオンについては、亜硫酸ナトリウム等の還元剤でクロム(3 価)イオンに還元した後、多孔質コンクリートで吸着する方法が有用であると考えられる。

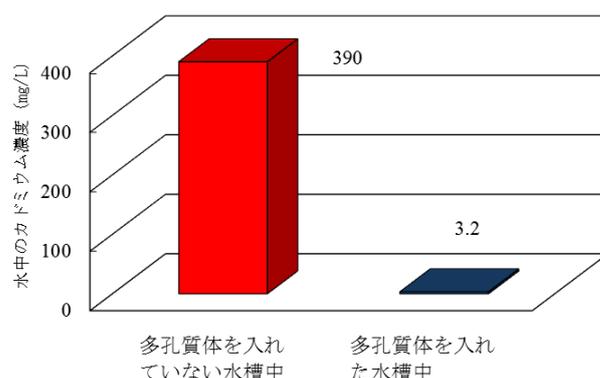


図 5.4 カドミウム汚染土壌を用いた溶出試験結果

表5.3 多孔質コンクリートの各種金属イオン吸着効果

金属イオン	振とう時間(h)	金属イオン濃度(mg/L)	振とう時間(h)	金属イオン濃度(mg/L)
鉛(2価)	0	98	24	0.1
カドミウム(2価)		99		0.1
銅(2価)		100		0.1
鉄(3価)		102		0.1
クロム(3価)		102		2.2
マンガン(2価)		97		39
ニッケル(2価)		97		54
水銀(2価)		48		17
亜鉛(2価)		91		28
ストロンチウム		100		6.3

(3) 実海域における底質改善機能の検討

瀬戸内海では、海底に蓄積する有機物や有害金属等を原因とする海域環境の悪化が懸念されている。底泥中の金属類は、溶出実験により、一部、溶出することが確認されている⁴⁷⁾。実海域における底質改善機能を検証するため、10%HAPを混入（表5.1，配合番号H-10%）させた多孔質コンクリート384kg(W:200cm×L:200cm×H:6cm)を平成20年1月に、図5.5に示した香川県高松市屋島湾地先の水深11mの海底に設置し、平成20年4月（設置後3ヶ月）の時点で海底から引き上げ、ICP発光分光分析による重金属類の吸着量を測定した。

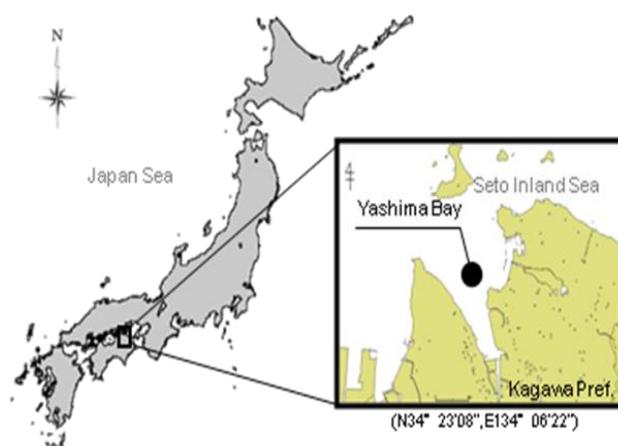


図5.5 多孔質コンクリート設置地点

(4) 底質改善実験結果

(a) 溶出試験

まず、図5.6に示す様に、屋島湾の海底から採取した底泥を用いて、マンガンイオンおよび鉄イオン(3価)の安定不溶化実験を行った。実験は、2L容器に底泥500gを投入し、多孔質コンクリート(W:10cm×L10cm×H:6cm)を加えた後、2時間放置した。

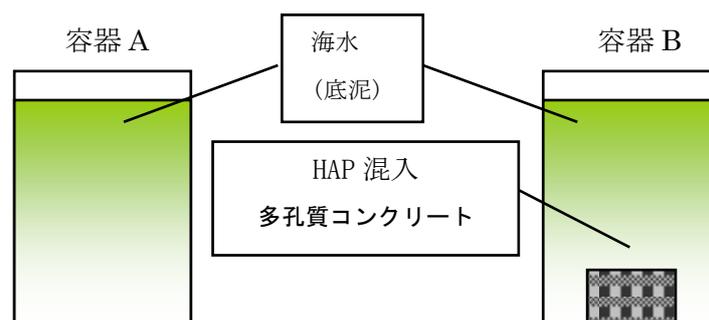


図5.6 多孔質コンクリートの有無による安定不溶化実験

実験の結果、多孔質コンクリートを加える前の状態で、底泥から溶出したマンガンイオンおよび鉄イオンの濃度は、それぞれ4.5mg/Lおよび4.8mg/Lであったのに対し、多孔質体による処理後、マンガンイオンと鉄イオンのいずれも0.1mg/L未満となり、95%以上の高い除去効果が確認された(図5.7)。これらの結果は、海底に蓄積された底泥から溶出する各金属イオンが、良好に安定不溶化されたことを示している。

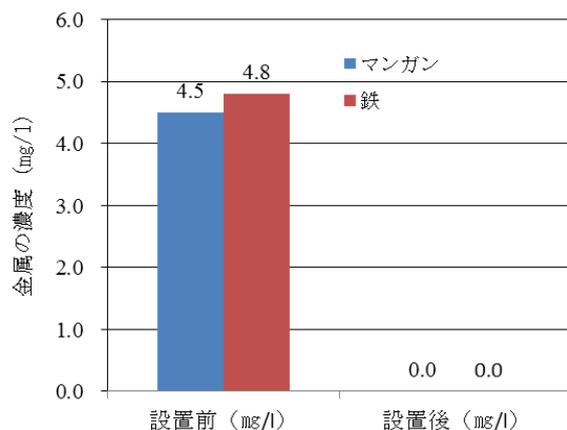


図5.7 底泥からのマンガン，鉄の溶出試験結果

(b) 金属類の吸着実験

次に，多孔質コンクリートに吸着された金属の濃度について，海底設置前と設置後の濃度変化を測定した結果，マンガン：7.2mg/kg，鉛：0.19mg/kg，鉄：42.6mg/kg，銅：0.44mg/kg，カドミウム：0.01mg/kg，亜鉛：2.3mg/kgという結果となり，鉄，マンガン，亜鉛，銅が比較的高い吸着量を示した(図5.8，図5.9参照)。

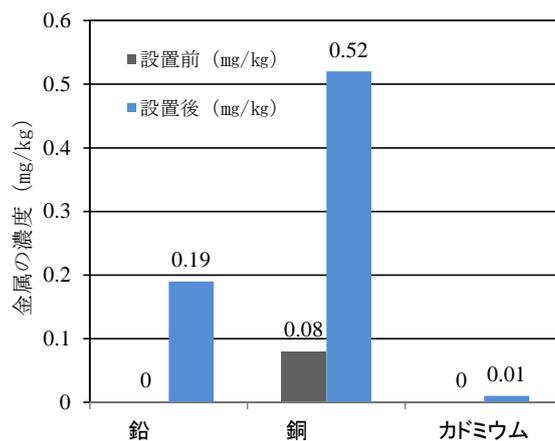


図5.8 多孔質コンに吸着された鉛，銅，カドミウム

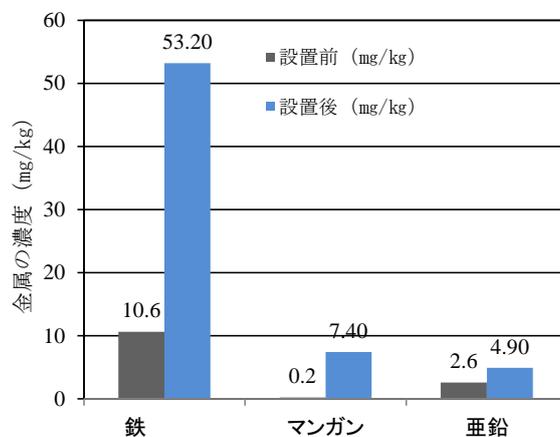


図5.9 多孔質コンに吸着された鉄，マンガン，亜鉛量

多孔質コンクリートを設置した直下の底泥中の各種金属濃度について、多孔質コンクリート設置前後において測定した金属含有実験結果を図5.10～図5.12に示す。瀬戸内海において、特に、底質環境悪化が懸念されている鉛、カドミウム、銅について、多孔質コンクリート設置前後の底泥中の濃度変化は、鉛：31.5mg/kg、カドミウム：0.07mg/kg、銅：8.0mg/kgとなり、いずれの金属も多孔質コンクリート設置後に有意に低下していた。安定不溶化実験、吸着実験および含有実験にわたる一連の多孔質コンクリートによる底質改善機能を検証した結果、いずれの実験においても、本多孔質コンクリートは、従来の技術では機能的に対応が困難であった有害金属吸着かつ安定不溶化を可能とすることが検証された。

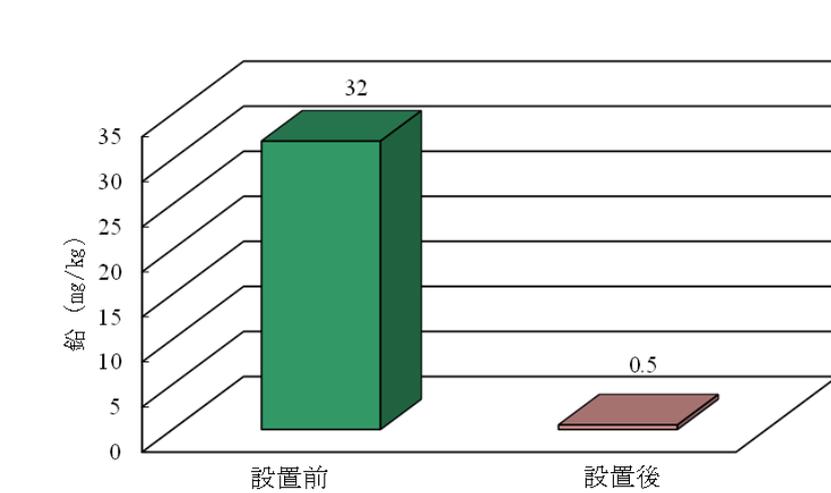


図5.10 底泥中の鉛濃度の変化

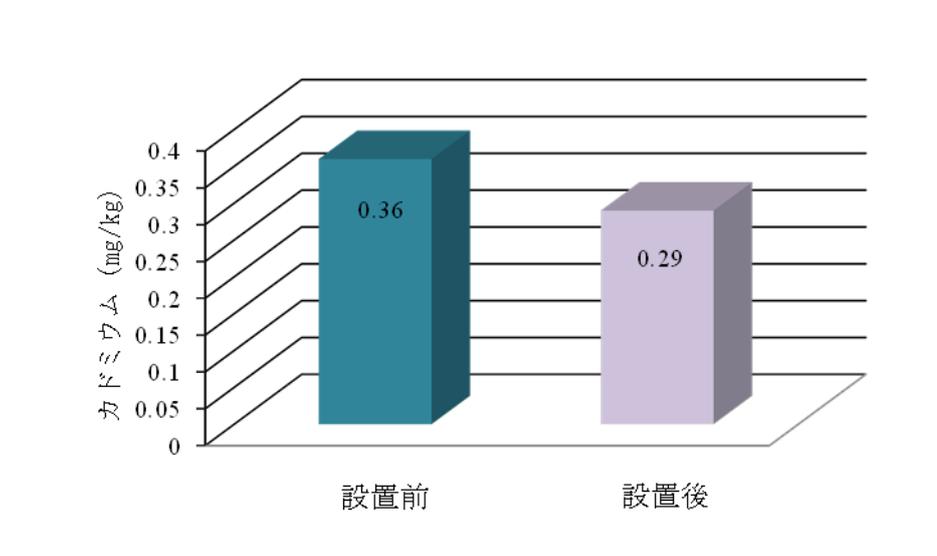


図5.11 底泥中のカドミウム濃度の変化

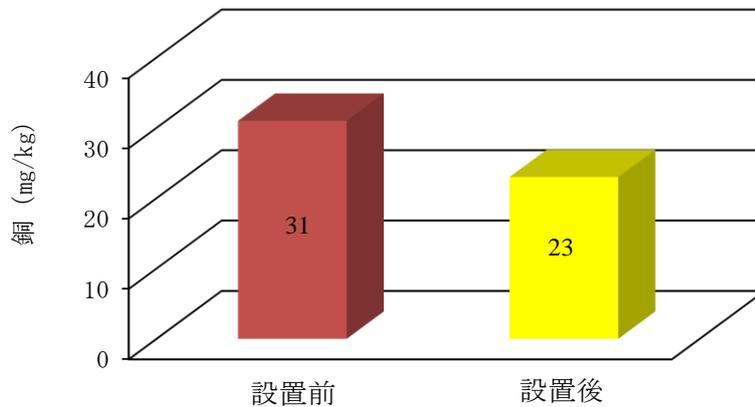


図5.12 底泥中の銅濃度の変化

なお将来的には、吸着機能が飽和状態を迎えることが予想されるため、設置した多孔質コンクリートの取り換え時期を検討する必要がある。金属吸着機能については、現在も定期的に調査を実施しており、設置後2年4カ月が経過した平成22年5月時点では、マンガン：7.6mg/kg、鉛：0.32mg/kg、鉄：66.3mg/kg、銅：0.81mg/kg、カドミウム：0.02mg/kg、亜鉛：3.5mg/kgという結果となり、吸着量は増加傾向にあったが、設置後3年3カ月が経過した平成23年4月の時点では、マンガン：7.8mg/kg、鉛：0.35mg/kg、鉄：68.9mg/kg、銅：0.85mg/kg、カドミウム：0.02mg/kg、亜鉛：3.5mg/kgであった。

この測定結果から、群落光合成式を応用した下記式⁴⁸⁾を用いて、将来的な吸着量を推定し、多孔質体の取り替え時期を検討した。検討結果を図5.13～5.18に示す。

$$Q = b t / (1 + a t)$$

ここで、Q：吸着量、t：吸着期間、b：原点からの立ち上りの勾配、b/a：飽和値

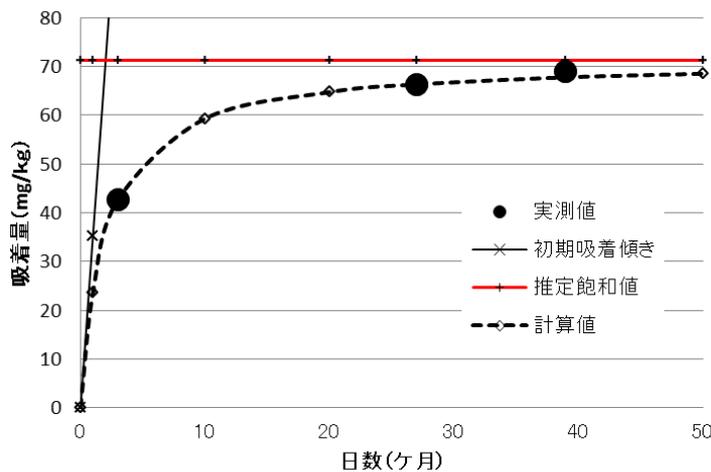


図5.13 多孔質体による鉄の吸着量の推定結果

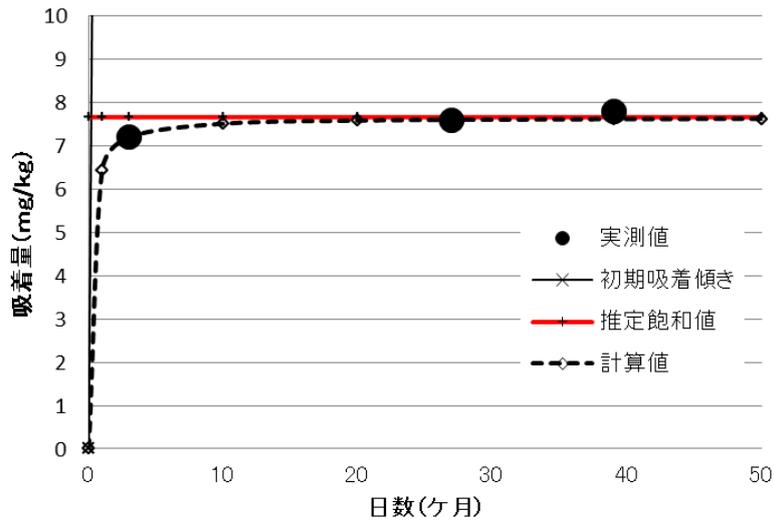


図5.14 多孔質体によるマンガンの吸着量の推定結果

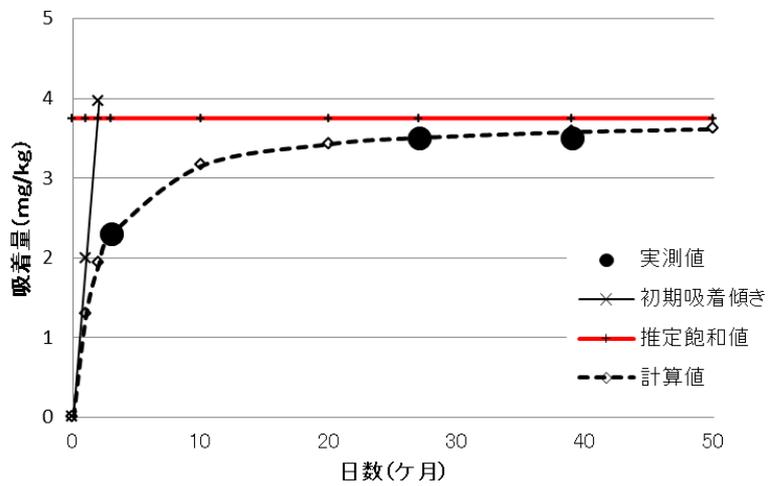


図5.15 多孔質体による亜鉛の吸着量の推定結果

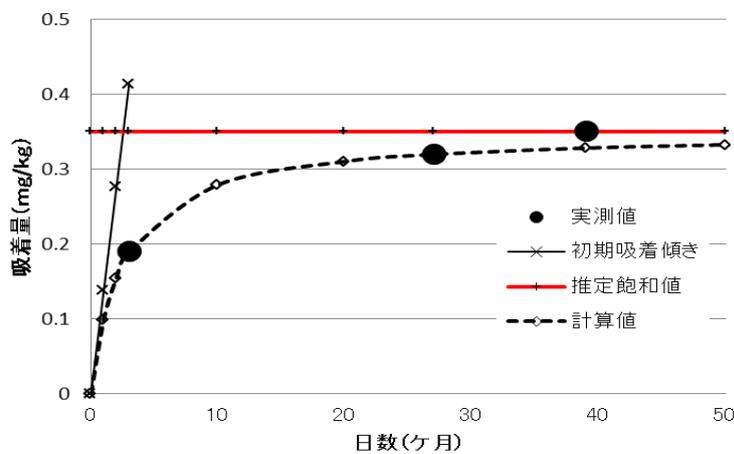


図5.16 多孔質体による鉛の吸着量の推定結果

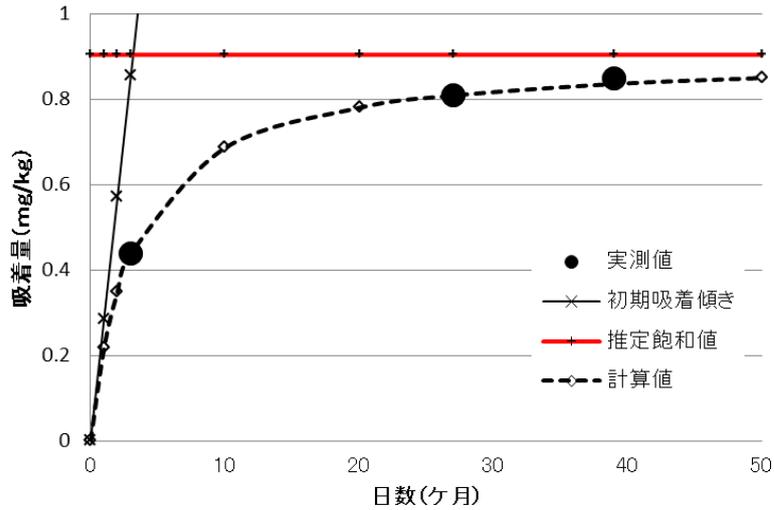


図5.17 多孔質体による銅の吸着量の推定結果

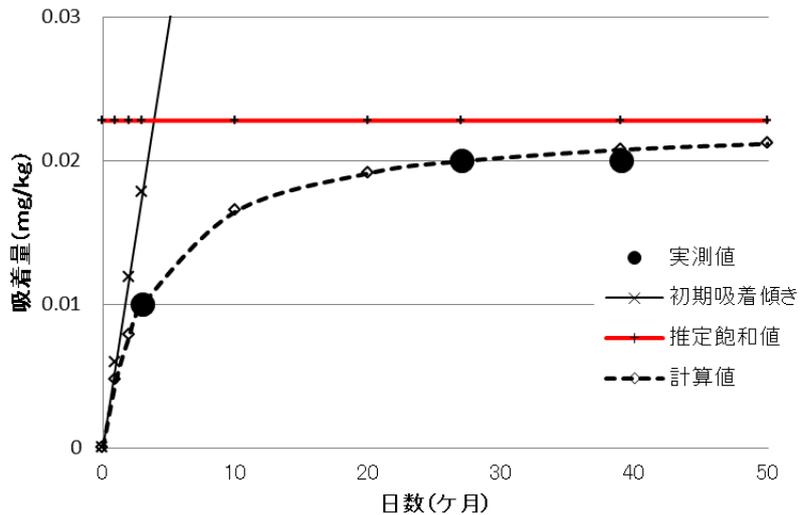


図5.18 多孔質体によるカドミウムの吸着量の推定結果

推定した結果より、吸着量の変化は設置後27ヶ月～39ヶ月の間で僅かなものとなっていたことから、3年程度の間隔で多孔質コンクリートを取り換える必要があると考えられる。実際に、海域ではないものの、図5-19, 20に示した淡水域（香川県坂出市府中湖）で護岸材として本多孔質コンクリートを適用した例では、多孔質コンクリートを装着する部分を着脱可能な構造形式としており、約3年経過した時点での金属吸着量を測定したところ、吸着量の変化は設置当初に比べて小さく、取り換えの時期となっていることが確認されている⁴⁹⁾。

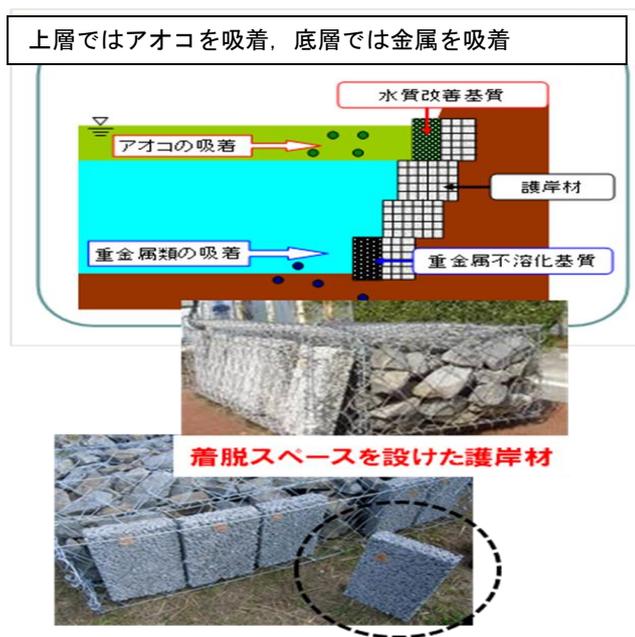


図5.19 多孔質部の着脱を可能とした淡水域での適用例



図5.20 府中湖（坂出市）での現場適用例

5.3 吸着された金属の再資源化の検討

(1) 金属の再資源化実験の概要

近年、世界的に金属の需要が増しており、有用金属イオンの回収技術開発は、重要な課題の一つである。例えば、世界の銅消費量の年次推移については、上昇傾向にあり、銅の相場については、2003年5月を基準とした場合、約5倍となっている⁵⁰⁾。そこで、本研究における多孔質コンクリートに吸着された金属の中には、有価物として再利用が見込める物質もあり、吸着された物質を回収し、再資源化することは、自然界から有用な資源を産み出すことになる。このため、多孔質コンクリートが吸着した金属の再資源化技術の検討を行った。ここでは、銅、鉛、鉄イオンを吸着した多孔質コンクリート(W:10cm×L:10cm×H:6cm)を0.1%硫酸溶液2.4L中に24時間浸した後、各金属イオンの溶出量を測定した。

(2) 再資源化実験結果

表 5.4 に銅イオンの回収実験の結果を示す。実験の結果、回収前の銅イオン濃度は、2495mg/Lであったのに対し、回収後は、2420mg/Lの濃度であったことから、銅イオンの回収率は、約97%となった。また、鉛、鉄のいずれの金属イオンについても95%、96%が回収され、吸着された金属の再資源化も可能となることが判った。このことは、施工後3年程度経過した後、吸着した金属を回収し、有価物として利用すると同時に、金属を取り除いた多孔質コンクリートを再度、底質改善材や護岸材等に装着するという、メンテナンスを含む一連の回収システムとなることが可能となる。

表5.4 銅イオンの回収実験結果

回収前 (mg/L)	回収溶液量 (L)	銅イオン濃度 (mg/L)	銅イオン量 (mg)
2,495	2.4	2,420	5,808

5.4 結果のまとめ

- (1) 10%HAPを混入した本研究の多孔質コンクリートは、カドミウムイオン、鉛イオン、銅イオン、鉄イオン(3価)、クロムイオン(3価)に対する強い吸着効果を示し、実海域での実験においても、鉛、カドミウム、銅などの有害金属を吸着し、安定不溶化を可能とした。護岸や底質改善材に用いることにより、金属イオンで汚染された海域環境の浄化・整備に有効であることが示唆された。
- (2) これまで不明であった、多孔質体の金属吸着機能について群落光合成法の数理解析により検討した結果、約3年で飽和状態に達することを解明し、多孔質体の交換時期を明確にした。
- (3) 有用な金属については90%以上の回収が可能であり、有効な回収システムとなることが示唆された。
- (4) 本多孔質コンクリートの製作面では、筆者らが有する即脱工法を採用することにより、安定した品質で大量生産が可能であることを確認した。

6章

結論

6.1 本研究の成果

本研究では、構造物底部に滑動防止用スパイク構造、内部に揚力低減用の空孔部を設けた新規藻場造成構造物を設計し、実機実験による摩擦係数を算定した後、海底勾配の急な場所での滑動および転倒に対する安定性を向上させるための新技術の有効性を検証した。また、これまで藻場造成構造物の安定計算の中では考慮されていなかった揚力を低減する技術も検討した。更に、海底設置後の海藻の着生機能について、実海域において既存の着生基質との比較により、本構造物の有する多孔質構造および着脱可能な基質の優位性を確認した。

加えて、焼成骨粉（HAP）を紛体として、鉄鋼スラグ（産業副産物）を骨材とした多孔質コンクリートを製作し、底質中に含まれる有害金属類を吸着かつ安定不溶化可能な底質改善技術の開発を目的と、同時に吸着した金属類の中から有用な物質を再資源化する技術も検討した。

(1) 藻場造成構造物の海底設置時における安定性向上

実機滑動試験を行った結果、藻場造成構造物A（本研究で新規設計）は、最大摩擦係数が砂地盤で $\mu = 0.69$ 、砂利地盤で $\mu = 0.86$ となり、既存の設計値 $\mu = 0.60$ よりも大きな値を示し、スパイク構造が滑動抑制機能に有効であることが確認された。特に砂利地盤における摩擦係数は大きな値を示し、東北震災域の海底条件である砂利地盤に更に有効であると確認された。更に、実験値に基づき、瀬戸内海の一般的な海象条件にて安定計算を行った結果、安定性に優れていると確認された。

(2) 藻場造成構造物の揚力軽減効果

底部から浸入する流れによる揚力の軽減対策として、内部をステージ構造として、その中央部に揚力を低減させるための空孔部を設けた。揚力を考慮した安定計算にて空孔部の適正な割合を定量的に評価し、より安定性に優れた構造物であることを確認した。

(3) 藻場造成構造物の実海域での海藻の着生量及び魚類の蛸集効果

前回調査が行われた2010年度と2012年度の海藻着生量の結果を比較することで、構造物の藻場造成効果を評価する。初めに季節ごとの海藻着生量を比較すると、両年度とも夏期に極小値を示し、そこから春季に向けて上昇していく、同傾向の成長サイクルを形成していることが確認された（4章参照）。次に年間の海藻着生量を比較すると、こちらも大部分は同水準の海藻着生量が確認された、しかし、極大値に注目すると、2010年度の着生量の極大値が $2,203 \text{ g/m}^2$ であったのに対し、2012年度の着生量の極大値は、約 $5,000 \text{ g/m}^2$ となり、2倍以上の大きな差が認められた。また、2013年度の実海域での海藻着生量の調査においては5月31日時点においてガラモ類（シダモク）が $41,000 \text{ g/m}^2$ と着生量は増大し、既存技術に比べて高い値を示しており、良質な環境を保持している。さらに、構造物上部の多孔質基質は、既存の基質で問題となっている浮泥による目詰まりもなく、構造物の有する流れの制御機能が実海域でも発

揮されていることが示唆された。

これらの結果から得られた結論として、構造物沈設により安定した海藻着生サイクルが形成されていること、さらに多孔質体が優れた海藻着生能力を発揮し、時間を経るごとにその効果が表れていることが確認された。ここで重要なことは、春に流れ藻として海藻が流出し、海藻着生量が一時的に減少しても、構造物があることで、着生した海藻胞子が再度芽吹き、安定した成長サイクルを形成していることである。このことが持続的な藻場の形成および海域環境の改善に繋がる鍵になると考えられる。

蛸集魚類に関する調査は、海藻着生状況の確認と並行して計2回行われた。1回目は、2012年8月30日のダイバーによる視認確認調査によりメバルや、ベラといった魚種の蛸集が確認された。また魚礁底部にて20 cm程度のキジハタを視認することができ、前年に放流した稚魚が、構造物を住处として利用していることが確認された。また、2013年の5月の海藻着生状況の調査時にも藻場礁周辺にはメバルの稚魚やイナナゴの稚魚が200~300尾確認されており魚類の蛸集効果が維持されている。

(4) 多孔質コンクリートの有害金属吸着機能について

多孔質コンクリートの全質量に対して、HAPを0, 5, 10, 15%混入した試験体を製作し、各種金属イオンの吸着実験を行った結果、10%が最適配合であることを確認した。また、本研究の多孔質コンクリートは、カドミウムイオン、鉛イオン、鉄イオン(3価)、クロムイオン(3価)に対する強い吸着効果を示し、実海域で実験においても、鉛、カドミウム、銅などの有害金属を吸着し、安定不溶化とし、有用な金属は、再資源化可能であることを確認した。底質改善材として使用することで、金属イオンで汚染された海域環境の浄化・整備に有効であることが示唆された。また、これまで不明であった、多孔質体の金属吸着機能について、群落光合成法の数理解析により検討した結果、約3年程度で飽和状態になることを解明し、多孔質体の交換時期を明確にした。

6.2 今後の展望

(1) 東北震災域における藻場造成技術の確立

2011年3月11日に発生した東日本大震とそれにとまなう津波は、陸上部のインフラ施設や住環境のみならず、三陸沿岸の海洋生物の生活の場である生産力の高い藻場・干潟生態系にも甚大なダメージを与えた⁵¹⁾。大震災からすでに2年半以上経過したが、東北地域の沿岸一帯の復興事業は、全体的に遅延しており、全国の4割近くのシェアを誇っていたワカメ生産コンブや魚介類といった豊かな海洋資源の生産も徐々に復活はしてきているが、かつての様な生産力にはほど遠い状況である。原因としては、震災による海域環境変化に伴う栄養塩の低下、さらに海底の地盤沈下により海藻の光合成効率が落ち、生育不良を起こしたことなどが考えられる。水産業が生活の基盤をなす漁港や漁民にとって海域環境の悪化は、生活再建に密接に関わる問題であり、水産業全体の漁業活動を持続させていくためにも海域環境の改善を行い、生物生産性を高めることが今後の課題となっている。また、大震災による大量の瓦礫や有害物質による海域環境問題は、日々深刻化しており、これら有害物質を削減する

ための取組はようやく始まりつつという状況である。

香川大学工学部が中心となって組織する産学官の研究グループは、これらの問題を解決するために本研究で開発した多孔質体を用いた藻場造成構造物を沈設することで藻場造成を行い震災域の漁業の復興を目指す研究をしている。これまでに構造物沈設のため、岩手県宮古市重茂漁港にて海象条件・海底状況等の調査を行った結果、海底には、津波により破壊された護岸などのコンクリート片が点在しており、そのコンクリート片にワカメといった海藻類の着生が確認されている（図 6.2, 図 6.3 参照）。しかし、それら全てにおいて海藻の着生が認められたわけではなく、着生の兆しがみえない箇所が多くみられる。そこで本研究で開発した藻場造成構造物を用い同海域での実証実験のため、岩手県宮古市重茂漁港内（図 6.1 参照）に 2013 年の 8 月 6 日に 4 基（HAP 混入 2 基, HAP 無混入 2 基）沈設し、現在藻場造成機能及び海域環境改善技術の検証を実施し（図 6.4, 図 6.5 参照）、11 月の調査においてコンブの着生が確認された（図 6.6 参照）。この技術を確立させることで、震災を受けた東北地方の沿岸海域の海域環境改善のために、安定的かつ生産力高い藻場造成の技術を確立させ、海域環境回復による震災復興に貢献したい。

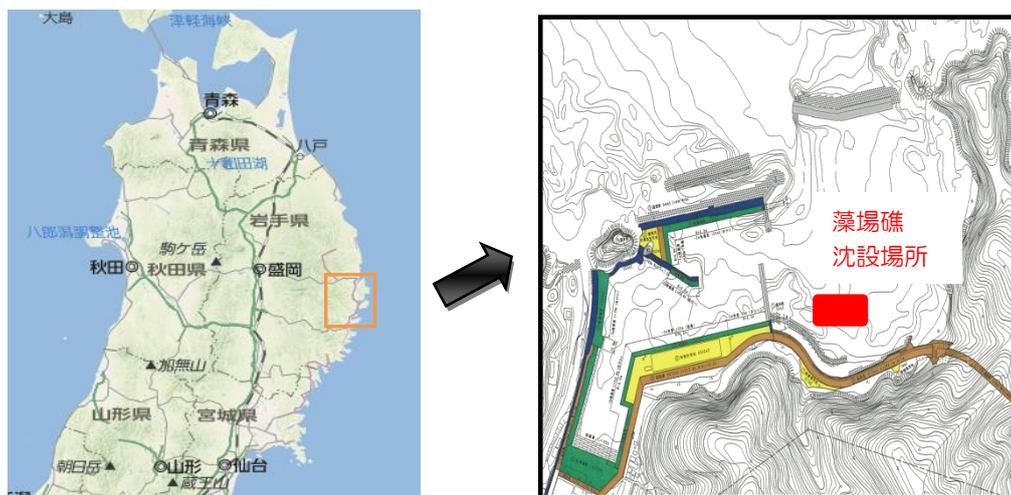


図 6.1 藻場礁の設置場所



図 6.2 潜水調査風景



図 6.3 海底状況



図 6.4 沈設作業の状況

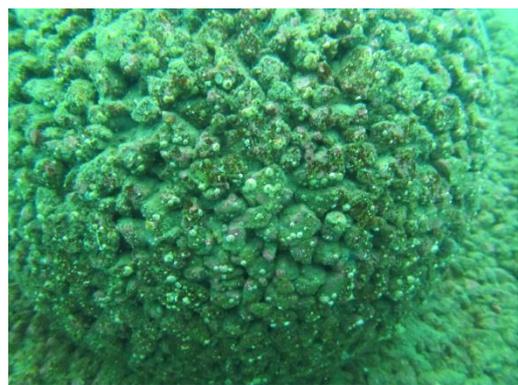


図 6.5 沈設後の状況 (2013. 9. 25 撮影)

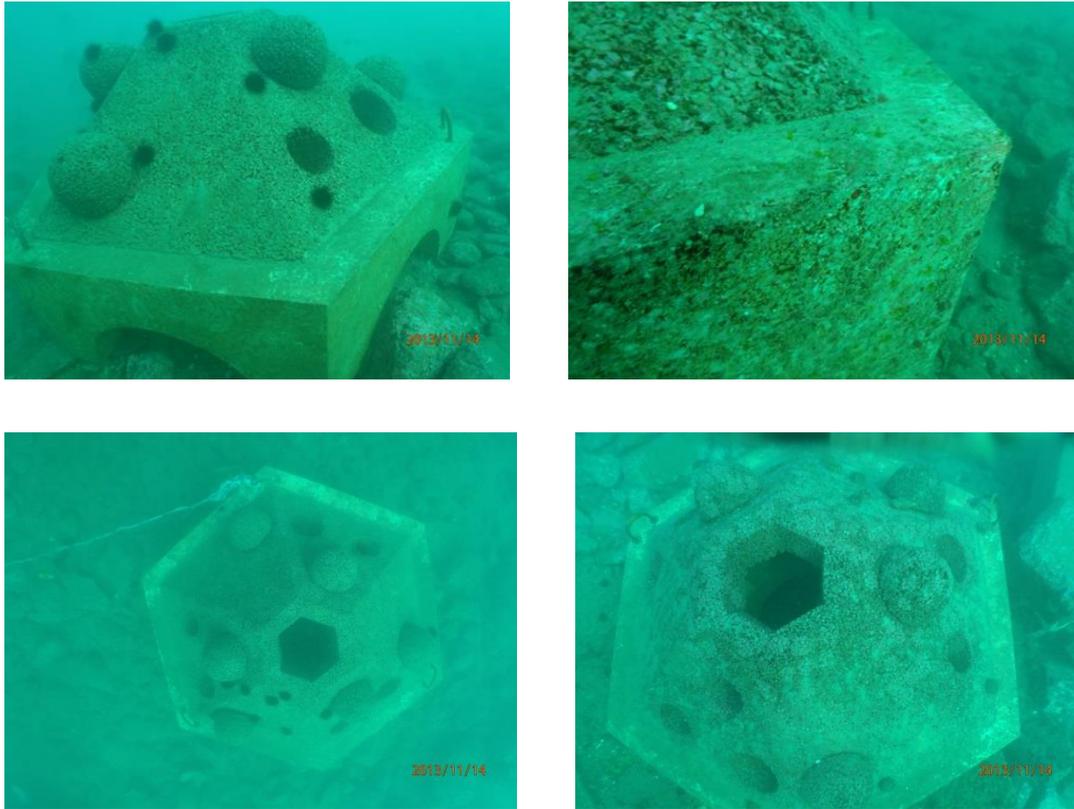


図 6.6 沈設後の状況 (2013. 11. 14 撮影)

(2) 地盤条件による滑動抑制に有効なスパイク形状の確立

スパイク構造が滑動抵抗性に有効であることは確認されたが、地盤条件ごとの最適なスパイクの形状は解明されていないため、今後、追加実験などにより最適形状を検討する必要がある。

(3) 有害金属吸着機能を有する持続性に関する検証とHAPのコストダウン

海および淡水域での重金属吸着機能の持続性に関する検証実験を継続し、震災域の海域改善も含めた機能性の評価を行いたい。また、現在非常に高価である焼成骨粉（HAP）のコストダウンと資源の有効活用を図るため、産業廃棄物となっているハマチやサワラなどの魚の残渣（魚骨）原料とした、HAP生成技術の確立を実現して行きたい。（図 6.7、図 6.8 参照）



煮沸状況



魚骨（煮沸、水洗後）

図 6.7 魚骨の煮沸、水洗



電気炉（焼成前）



焼成中



電気炉（焼成後）



粉砕機



粉砕した魚骨

図 6.8 魚骨の焼成，粉砕（HAP 生成）

謝辞

本研究を進めるにあたり、終始適切かつ熱心なご指導をしていただいた、指導教員の香川大学大学院工学研究科、末永慶寛教授に対し、謹んで感謝の意を表します。また、末永教員には、数々の助成金事業研究などへの参加、シンポジウムでの研究発表等、この3年間に渡り多くの有益かつ貴重な体験をさせて頂きました。これらの経験は、社会人としての見聞及び視野を広げる大きな機会となりました。ここにあらためて謝意を表します。

本研究を遂行するにあたり、3年間の長期に渡りご指導並びにご支援を賜りました、副指導教員の香川大学大学院工学研究科、増田拓朗教授、松島学教授には深く感謝申し上げます。さらに、専門的な見地でご指導を賜りました、香川大学大学院工学研究科、掛川寿夫教授、角道弘文准教授、ならびに愛媛大学連合農学研究科、多田邦尚教授、香川大学瀬戸内圏研究センター、本城凡夫特任教授を始めとする諸先生方に感謝の意を表します。

さらに、現地観測、分析などに対する貴重なご意見やご協力をいただきました、香川県水産試験場・主席研究員、宮川昌志博士、香川県農政水産部副主幹、藤原宗弘博士、香川県長尾土木事務所技師、松内勇貴様、日特建設株式会社技術部、安岡かおり博士、株式会社クロシオ代表取締役、君川佳司様、(独)水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所屋島庁舎閉鎖循環システムグループ長、山本義久博士、高砂水産代表、高砂一義様、日本興業株式会社常任顧問、河田弘様、同社開発部、松山哲也博士、山地功二様、細川恭平様、株式会社サンクス代表取締役、十河一司様、同社技術部、青木響子様には深く感謝いたします。末永研究室の井上将吾様を始め研究室の皆様には、ご協力をいただきまして大変有難うございました。

最後に、本研究でご協力、ご支援いただきました全ての人たちに感謝すると同時に、本研究での成果を今後も発展させることで、海域の環境改善に貢献する有用な技術を開発し、水産資源の回復に寄与して行きたいと思っております。

2014年2月 亀山 剛史

参考文献

- 1) 瀬戸内海環境情報センター URL : <http://seto-eicweb.pa.cgr.mlit.go.jp/index.asp>
- 2) 瀬戸内ネット URL: <http://www.seto.or.jp/seto/index.htm>
- 3) 香川県水産業基本計 URL:www.pref.kagawa.jp/suisan/gyoseibi/data/amamo-sisin.pdf.
- 4) 香川県水産課 www.pref.kagawa.jp/suisan/gyoseibi/data/amamo-sisin.
- 5) 磯尾典男, 高橋達人, 岡田光正: 藻場造成基質としての炭酸固定化の評価, 日本水産学会誌, 66 (4), pp. 647-650, 2000.
- 6) 鈴木操, 小山田久美, 高橋達人, 渡辺圭児, 藻場造成用鉄鋼スラグ炭酸固化体の開発, コンクリート工学, pp. 14-20, 2004.
- 7) 水産庁/藻場の働きと現状
[URL:http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/index.html](http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/index.html)
- 8) 『稚魚 生残と変態の生理生態学』 pp. 35-38
- 9) 小路淳: 藻場とさかな, 魚類生産学入門, pp. 5-6, pp. 32-38, pp. 62-65, 2009.
- 10) 水産庁/藻場の種類
[URL:http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/syurui.html](http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/tamenteki/kaisetu/moba/moba_genjou/syurui.html)
- 11) 境一郎: 磯焼けの海を救う, pp48-50, 1997.
- 12) いであ株式会社
URL: http://www.ideacon.jp/contents/inet/inet_top01.htm vol.10, vol.11
- 13) 亀山剛史, 松山哲也, 安岡かおり, 掛川寿夫, 末永慶寛: 有害金属吸着機能を有する新規多孔質コンクリートの開発, 土木学会論文集(B3), Vol. 68, No. 2, pp. 570-575, 2012.
- 14) 末永慶寛, 宮川昌志, 山中稔, 藤原宗弘, 星野高士, 堀田健治: 水産資源増殖構造物の流動制と生物蝟集機能, 生態工学会, Journal of Eco-Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 115-120, 2005.
- 15) 安岡かおり: 産業副産物を利用した水圏環境改善技術に関する研究, 香川大学修士論文, pp. 26-29, 2007.
- 16) Kameyama, T., M. Fujiwara, K. Yasuoka, Y. Matsuuchi, M. Miyagawa and Y. Suenaga 2011: Research on the Seaweed Rootage by Current Control Structure, The Proceedings of the 21st (2011) ISOPE CONFERENCE, pp. 1172-1178.
- 17) 水上繁樹, 谷山正樹: 魚礁の滑動抵抗に関する実験, pp. 1-4, 1997.
- 18) 佐藤道郎, 熊谷勝朗, 内山裕三: 魚礁の滑動に関する実機実験, pp. 1-2, 1994.
- 19) 瀬戸雅文: 魚礁スパイクの滑動に関する報告書, pp. 1-8, 2002.
- 20) 水産庁監修: 漁港・漁場の施設の設計の手引き, 上巻, 第5章, pp. 180-182, 2003.
- 21) 水産庁監修: 漁港・漁場の施設の設計の手引き, 下巻, 第2章, pp. 676-679, 2003.

- 22) 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針編集委員会：沿岸漁場整備開発事業施設設計指針，1992.
- 23) Mizukami, S and M. Taniyama, 1997 : Experimental Study on the Slide Resistance of Artificial Reef, pp.1-4.
- 24) Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries, 2003 : Guideline for the Planning of Fisheries Port and Fisheries Ground, Chapter 5, pp.180-182.
- 25) Miyagawa, M., M. Tochino, M. Aminaka, M. Fujiwara, Y. Suenaga and H. Kakegawa, 2009: Research on the Safer Shelter for Released Fish Juveniles, PACON International, Recent Advances in Marine Science and Technology 2008, pp.8-14.
- 26) Nihon Kogyo Co., LTD, 2005 : Experimental Research on the Increase of the Slide Resistance of Artificial Reef Spike, pp.3-10.
- 27) Seto, M. 2002 : Report of the Slide Experiment of Artificial Reef Spike, pp.1-8.
- 28) Miyagawa, M., Fujiwara, M. and Suenaga, Y. 2011, Research on the Seaweed Rootage by Current Control Structure, Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, pp. 1210-121.
- 29) Nakamura, M. 1984, Sea water tillage, in Mito, S., “New approach for stock enhancement on inshore fishery, Summary of findings in primary period of Marine Ranching Project” , Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council, pp.134-142.
- 30) Takahashi, M. 2004. The sea of anchovy and the sea of jellyfish, AquaNet. Soubunsha Ltd., Tokyo, 5, pp.50-51.
- 31) Aminaka, M., Yasuoka, K., Nagatomi, T., Kakegawa, H. and Suenaga, Y. 2011, Research on improvement of Bottom Sediment Environment by Porous Material, Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, pp. 3160-3167.
- 32) Yasuoka, K., Suenaga, Y., Yamanaka, M. Hoshino, T., Kakegawa, H. and Ahn, H. 2007, Study on the Porous Material for Improvement of Marine Biological Environment, Recent Advances in Marine Science and Technology 2006, pp.53-62.
- 33) Eldridge, M. B., Whipple, J. A., Bowers, M. J., Jarvis, B. M. & Gold, J. 1991 : Reproductive performance of yellowtail rockfish *Sebastes flavidus*. *Env. Biol. Fish.* 30, 91-102.
- 34) Fujiwara, M., Miyagawa, M. and Suenaga Y. , 2011: Field Research on The Appropriate Growth Conditions for *Zostera* Bed: Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, pp. 3060-3067.
- 35) Kimigawa, K. and A. Suenaga, 2011 : Stability Calculation Report of Sea-Mark Reef Consideration of Sea Bottom Slope, pp.4-6.
- 36) Yamanaka, M., K. Yasuoka, T. Nagatomi, H. Kakegawa and Y. Suenaga, 2011 : Research on Improvement of Bottom Sediment Environment by Porous Material, Proceedings of the 34th IAHR World Congress 2011, pp. 3160-3167.
- 37) Ministry of agriculture, forestry and fisheries (2009): Fisheries of Japan - 2008/2009, White Paper on Fisheries, p.26.
- 38) Miyagawa M., Tochino, M., Aminaka, M., Fujiwara, M., Suenaga, Y. and Kakegawa, H. (2009): Research on the safer shelter for released fish juveniles, PACON International, Recent

Advances in Marine Science and Technology 2008, 8-14.

- 39) Yasuoka, K., Suenaga, Y., Yamanaka, M., Hoshino, T., Kakegawa, H. and Ahn, H. (2007) : Study on the Porous Material for Improvement of Marine Biological Environment, Recent Advances in Marine Science and Technology 2006, 8, No.1, 53-62.
- 40) Sasaki, T., Miyagawa, M., Kanda, M., Abe, M., Yamaoka, K. and Suenaga, Y. (2009): Ecological study on released artificial and natural juveniles of the red-spotted grouper at Ibuki-jima island in Seto Inland Sea, Eco-engineering, 21(1), 15-26.
- 41) Suenaga, Y., Miyagawa, M., Hoshino, T., Yasuoka, K., Masuda, K. and Kimigawa, K. (2005): Techniques of Restoration System of Marine Biological Environment, PACON International, Recent Advances in Marine Science and Technology 2004, 233-240.
- 42) 山本昌幸, 藤原宗弘, 山賀賢一, 棚野元秀: 瀬戸内海中央部における流れ藻の構成種 pp. 1-2, 水産増殖, 第 50 巻第 3 号, pp. 375-376, 2002.
- 43) 明田定満, FRP 炭化材を用いた海域環境改善技術に関する研究: 平成 21 年度香川大学大学院工学研究化博士論文, pp. 145, 2010.
- 44) 村岡大祐: 三陸海岸の藻場における炭素吸収量把握の試み
URL: <http://tnfri.fra.affrc.go.jp/tnf/news65/muraoka.htm>
- 45) Yasuoka, K., Y. Suenaga, T. Hoshino, H. Kakegawa and Hee-Do Ahn : Research on the Relationship between Prey Abundance and Fish Aggregation. PACON International, Proceedings of Pacific Congress on Marine Science and Technology 2007, pp. 86-95. 2007.
- 46) 末永慶寛, 河原能久, 山本直樹, 田中陽二: 海域生物環境改善技術の開発, 土木学会論文集, 環境部門 No. 755/VII-30, pp. 29-36, 2004
- 47) 安岡かおり, 末永慶寛, 松島学, 増田光一: 閉鎖性海域における水産養殖からの負荷を考慮した環境影響評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 618 号, pp. 123-129. 2007.
- 48) 植物生態学講座 3 『群落の機能と生産』 pp. 94-95
- 49) 藤澤一仁, 瓜生義孝, 末永慶寛: 府中湖の水質改善対策について, 第 46 回 (社) 工業水道協会研究発表会講演要旨, pp. 60-63, 2011.
- 50) (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構: 金属資源動向資料, pp. 2-8, 2012.
- 51) 玉木仁, 村岡大祐: 地震とそれにもない発生した津波が藻場・干潟生態系に及ぼした影響
URL: www.isenshu-u.ac.jp/tama/JSWE_vol134_2011.pdf

付録 I

1. 構造物の安定計算

1.1 滑動に対する力の釣り合いと安全率

構造物が滑動，すなわち横方向へ水平移動するのは，設計流体力 F が働くからである．また，滑動に対する抵抗力として，海底面と構造物底面の間に摩擦力 F_R が働く．摩擦力 F_R は，構造物の水中重量と摩擦係数との積であり，次式で求められる．

$$F_R = \mu W_0 (1 - w_0 / \sigma_G)$$

μ : 構造物と海底面との摩擦係数

W_0 : 構造物の空中重量 (ton)

w_0 : 海水の単位体積重量 (1.03 ton/m³)

σ_G : 構造物材料の単位体積重量

上式の $W_0(1 - w_0/\sigma_G)$ の部分が水中重量である．

設計流体力 F に対する摩擦力 F_R の比率が構造物に対する安全率であり，この値が 1.2 以上であれば安定であるとみなす．すなわち，安全率を S_{FS} とすると，以下の式が成立する．

$$S_{FS} = \frac{F_R}{F} = \frac{\mu W_0 (1 - w_0 / \sigma_G)}{F} \geq 1.2$$

上式が成立すれば，構造物は流体力による滑動に対して安定とみなす．

1.2 転倒に対するモーメントの釣り合いと安全率

構造物を転倒，すなわち支点を中心に回転させようとする力は，支点から力の作用点までの鉛直方向の距離 l_A と 1.2 で求めた設計流体力 F との積 M (モーメント) である．

構造物を転倒させないようにしようとするモーメント M_R は，支点から藻礁の重心位置までの水平方向の距離 l_V と構造物の水中重量 $W_0(1 - w_0/\sigma_G)$ の積である．

M および M_R は次式で求められる．

$$\begin{cases} M = F \cdot l_A \\ M_R = W_0 \cdot \left(1 - \frac{w_0}{\sigma_G}\right) \cdot l_V \end{cases}$$

l_A : 支点から力の作用点までの鉛直方向の距離

l_V : 支点からの構造物の重心距離までの水平方向の距離

W_0 : 構造物の空中重量 (ton)

w_0 : 海水の単位体積重量 (1.03 ton/m³)

σ_G : 構造物材料の単位体積重量

構造物を転倒させようとするモーメント M に対する、構造物を転倒させないようにするモーメント M_R の比率が転倒に対する安全率であり、この値が 1.2 以上であれば安定であるとみなす。すなわち、安全率を S_{FL} とすれば、以下の式が成立する。

$$S_{FL} = \frac{M_R}{M} = \frac{w_0 \left(1 - \frac{w_0}{\sigma_G}\right) \times I_V}{F \times l_A} \geq 1.2$$

上式が成り立てば、流体力による転倒に対して安定とみなす。

1.3 揚力に対する力の釣り合いと安全率

水底と直立壁底面との間に間隙がある場合は、波による揚圧力が作用する。この揚圧力は、図 1.1 のように、直立壁底面の前端から後端に向かって直線的に減少し、かつ、後端で 0 となるような分布をするものとする。なお、浮力は静水面下に働くものとする。

$$P_u = \frac{w_0 H}{\cosh 2\pi h / L}$$

p_u : 直立壁底面に作用する揚圧力 (ton/m²)

w_0 : 海水の単位体積重量 (1.03 ton/m³)

h : 設置水深 (m)

L : 設計波長 (m)

H : 設計波高 (m)

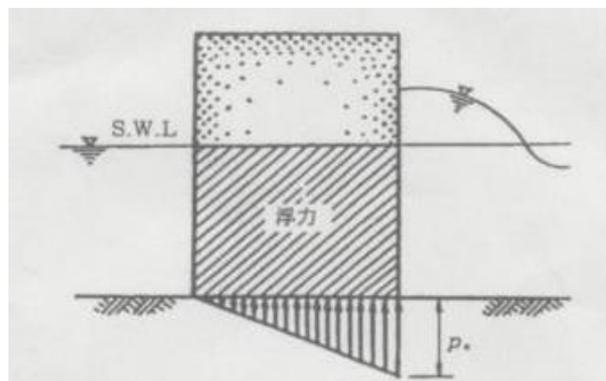


図 1.1 直立壁底面に作用する揚圧力

付録Ⅱ

香川県高松市庵治町篠尾地先海域 藻場礁 調査結果

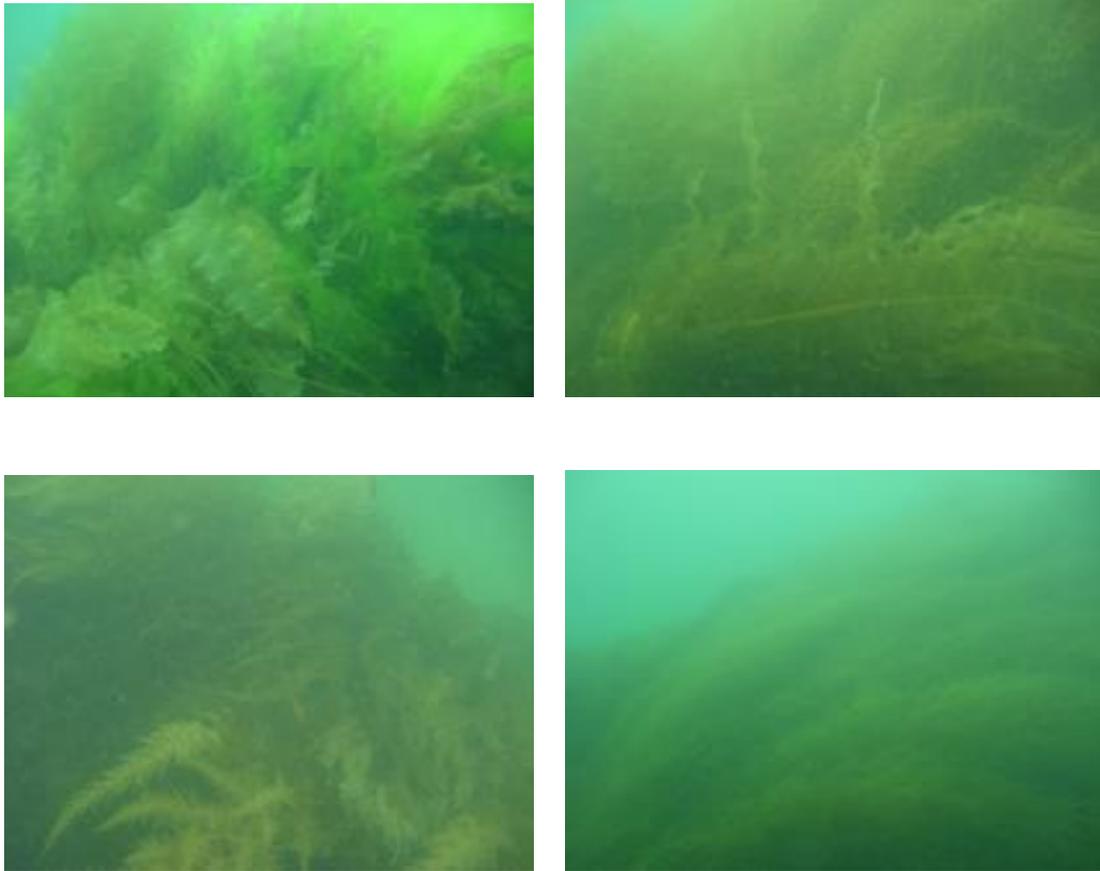


図 2.1 海藻の着生状況（平成 25 年 3 月 29 日）

海藻の着生量

・ガラモ（シダモク）

乾重量 38.4 kg/m²

・ワカメ

乾重量 10.5 kg/m²

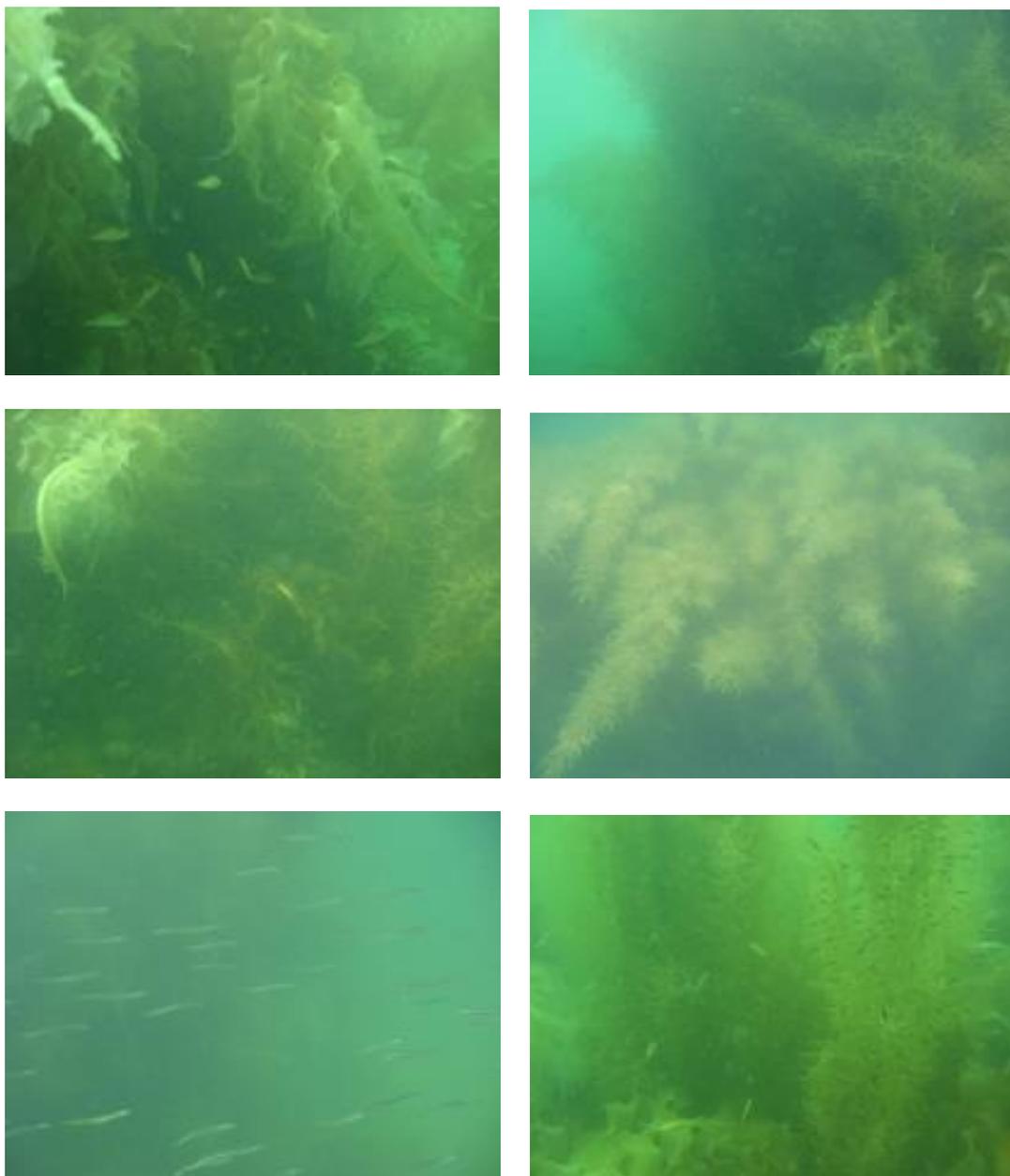


図 2.2 海藻の着生状況 (平成 25 年 5 月 17 日)

海藻の着生量

・ガラモ (シダモク)

乾重量 47.6 kg/m²

・ワカメ

乾重量 12.4 kg/m²

藻場礁内部, 周辺にメバルの稚魚, イカナゴを 200~300 尾確認

香川県高松市庵治町篠尾 藻場礁 調査結果

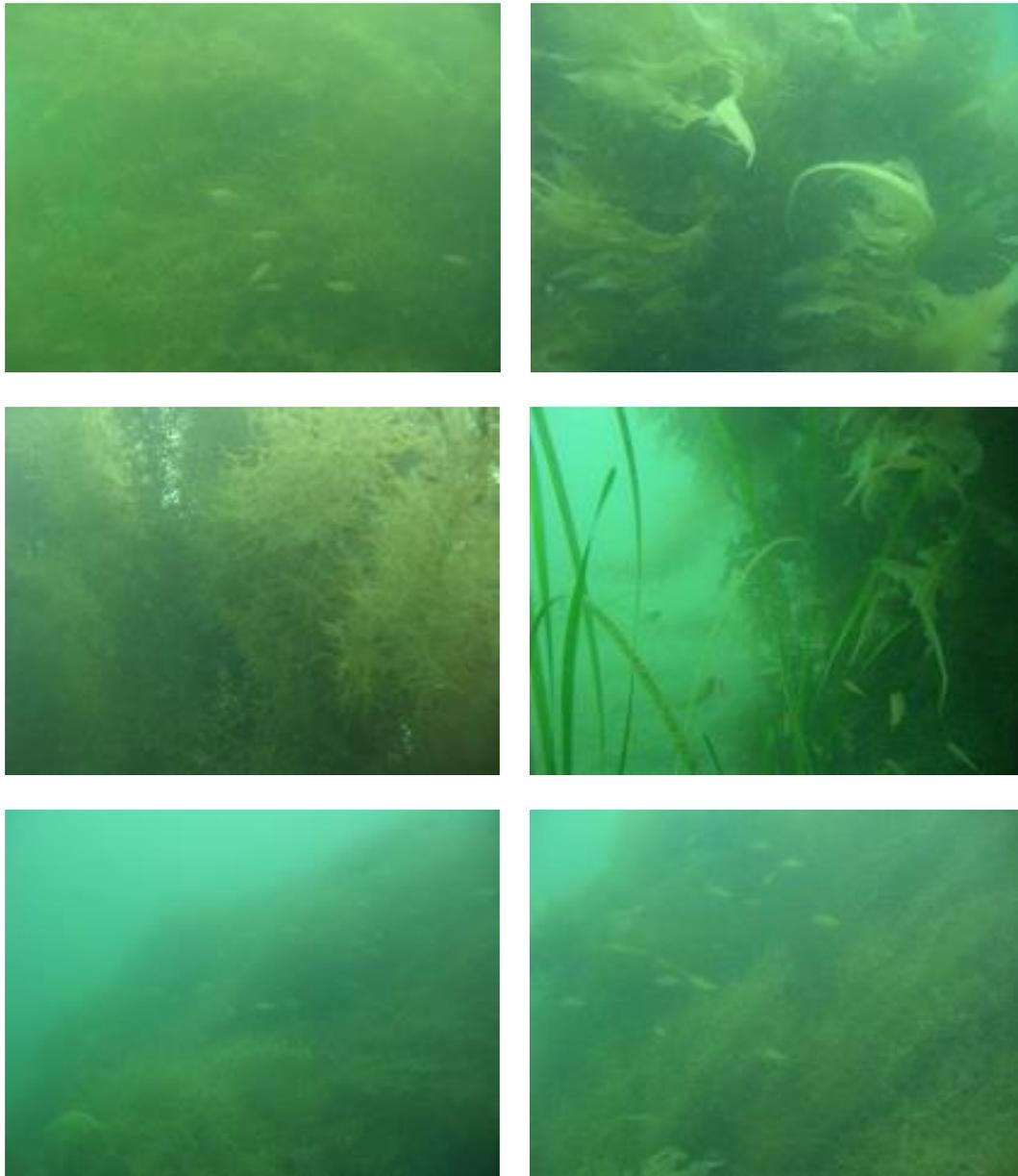


図 2.3 海藻の着生状況 (平成 25 年 5 月 31 日)

海藻の着生量

・ガラモ (シダモク)

乾重量 41.0 kg/m²

・ワカメ

乾重量 1.9 kg/m²



図 1.4 採取したガラモ

藻場礁内部, 周辺にメバルの稚魚を 300~500 尾確認