

水工学シリーズ 05-B-8

沿岸環境の修復・再生技術の動向

大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所
水域・生物環境研究室 海洋水理チームリーダー

上野 成三

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2005 年 8 月

沿岸環境の修復・再生技術の動向

Latest trend of coastal environment restoration technology

上 野 成 三

Seizo UENO

1. はじめに

沿岸域の環境問題として、水質・底質の悪化や沿岸生態系の劣化が進行している中、環境修復・再生に対する必要性が増している。我が国では、21世紀「環（わ）の国」づくり会議報告書（2001年7月）、新・生物多様性国家戦略（2002年3月）、自然再生推進法（2003年1月施行）が取りまとめられ、自然再生事業を推進する方向性が明確になった。これをうけて、自然再生型公共事業という新しい公共事業の概念が生まれ、覆砂、干潟、アマモなどの沿岸環境の修復・再生事業が全国で急速に増加している。しかし、自然再生事業の計画・実施段階になると、「どのような自然を再生すればよいのか？」という根源的な問題から、「どれくらいの範囲をどのような材料で自然再生すればよいのか？」という設計、計画的な要素まで幅広い課題に直面することになり、事業関係者は大変な労力を費やしながらかつて試行錯誤的に事業を推進しているのが実情である。自然再生事業の事業計画では、行政関係者、専門家だけでなく、地域住民、NPOを含む幅広いメンバーにより全体計画を作成する。その際の合意形成に至るプロセス自体が自然再生事業の重要な要素となっている。事業計画の策定においては、当該地域の地理的、社会的特性に合致した地域固有の計画策定が必要不可欠であるとともに、全国の自然再生事業の成功（失敗）事例を網羅して事業計画に反映する必要がある。既に発行されている干潟や藻場造成技術に関するマニュアル類や実施報告（例えば、国土交通省港湾局監修/海の自然再生ワーキンググループ著(2003)、日本港湾協会(2005)など）などは事業計画に大いに参考となるものの、現在、全国で実施中の干潟・アマモ場の造成事業から得られる最新の技術や調査結果をもとに事業計画を常に見直す必要がある。

本報では、全国の沿岸環境再生事業の計画の一助になればと願い、最新情報や著者らのグループが研究開発中の知見を取り入れながら、沿岸環境の修復・再生技術の動向をとりまとめる。まず、第2章「沿岸環境修復・再生技術の概要」として、沿岸環境の修復・再生の意義を述べた後、計画・設計、施工、管理の流れと各技術の分類を行う。その後、代表的な各技術として、第3章「覆砂」、第4章「干潟造成」、第5章「アマモ場造成」について、設計と施工の技術内容、実施例、課題をとりまとめる。第6章では干潟・アマモの再生事業の一例として英虞湾で実施中のプロジェクト（三重県地域結集型共同研究事業）を紹介する。

2. 沿岸環境修復・再生技術の概要

2.1 沿岸環境の修復・再生とは？

自然再生推進法における自然再生の定義は、「過去に損なわれた生態系その他の自然環境を取り戻すために、関係行政機関、関係地方公共団体、地域住民、NPO、専門家等の地域の多様な主

体が参加して、自然環境の保全、再生、創出等を行うこと」としている（国土交通省，2003）。また、海の自然再生ハンドブック（国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ 著,2003）では、「自然再生とは、保全、再生、創出等の様々な取り組みを含み、人間の側から積極的に、より望ましい環境を生み出す取り組みと定義する」と記載されている。この2つの文章から、以下の2つのポイントがあると著者は解釈している。一番目のポイントは、自然環境を全く手をつけずに「保全」するだけでなく、積極的に「再生」、「創出」すること。すなわち、この点で自然再生型（公共）事業が法的に明確に意義付けられたと言えよう。2番目のポイントは、自然再生計画の策定は、事業者側だけでなく、地域の幅広い主体の合意のもとに行うということ。これは、公共事業一般のパブリックインボルブメントとして今や異論の余地はなく、特に、沿岸域の自然再生事業の場合、漁業者、一般市民、港湾関係者、観光事業者など様々なステークホルダーの合意形成なしでは事業が成立しない。

このような自然再生の定義に基づいて、具体的な事業計画の議論を始めると、「どのような自然環境を取り戻せばよいのか？」という根本的な問題に突き当たる。この問いに対して、「高度成長期の前の昔の自然に戻せば良い」、「〇〇海で泳げるようにしたい」、「赤潮、青潮が無い海にしたい」などと多様な意見が出され、数々の議論を重ねた末に、全体の基本計画がまとめられる。ただし、地域毎にこのような熱心な議論をもとに出された計画には、覆砂、浅場、干潟、アマモの自然再生計画が必ずと言って良いほど含まれている。大変、短絡した物の考え方であるのは十分に承知しているが、著者の考えとしては、沿岸域の自然再生とは、干潟、浅場、アマモ場の修復や再生を重点的に行うことと位置づけたい。

沿岸域の自然再生を考える上でもう一つ重要な概念として、沿岸生態系の全体システムの自律的な再生として捉えなおすことがあげられる。具体的には、単に干潟やアマモ場をバラバラと個別に作っていくのではなくヨシ原―干潟―アマモ場が連続した環境再生を行うこと（図-1参照）、また、生活史の一部を干潟に依存する魚介類にとって空間的に離れた干潟間の相互作用が重要で

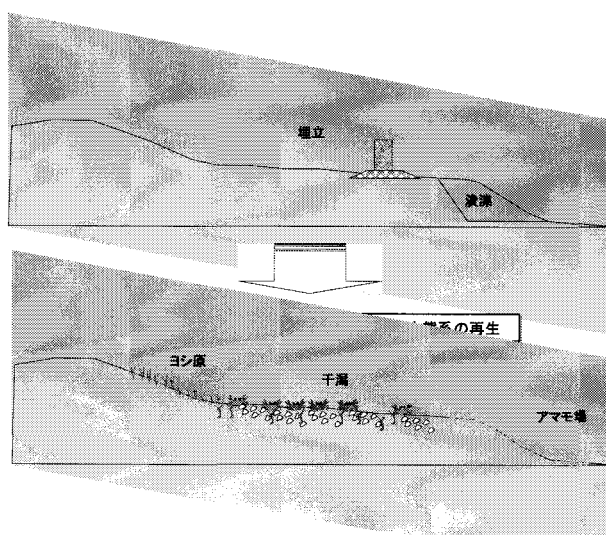


図-1 ヨシ・干潟・アマモ場の連続性(田中ら,2003)

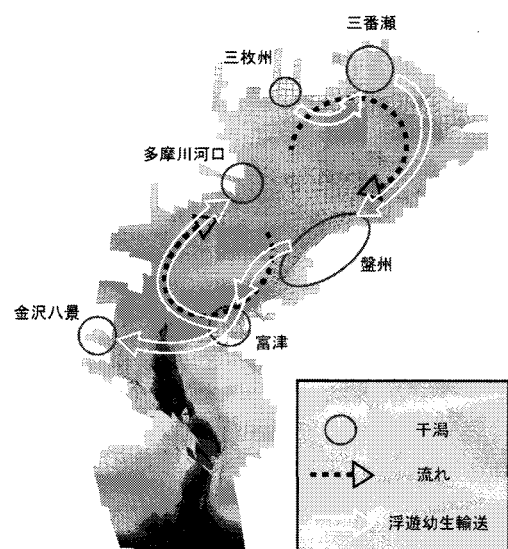


図-2 干潟ネットワーク(田中ら,2003)

あることから、干潟ネットワークの構築を行うべきであること（図-2参照）が上げられる（田中ら，2003，2004）．沿岸生態系システムの再生を実現するには、一つの干潟やアマモ場の造成に際して生態系の基本場として有効に機能し、かつ、複数の干潟・アマモ場が全体の沿岸生態系システムの中で相互補完的に機能することが重要となる．

2.2 順応的管理／計画・設計，施工，管理の流れ

自然再生事業の進め方のフローとして、順応的管理(Adaptive management)の位置づけを図-3に示す(古川,2005)．自然再生事業を進める際に、既往の事業（例えば、防波堤、護岸、栈橋の建設事業）とは異なり、自然再生効果の不確実性が高い．そこで、当初計画で想定していなかった問題点が生じた場合に計画を修正するという順応的管理の考え方が導入されつつある．順応的管理では、自然再生事業の効果確認（モニタリング）と状況に応じた計画修正（フィードバック）が重要な要素となる．

自然再生事業の計画・設計面では、覆砂、干潟、アマモ場の材料や構造諸元を設定する．そ

の際、既往の研究や事業の結果を有効に利用するとともに、その効果について、低次生態系モデルなどの数値シミュレーションやHEP(Habitat suitability Procedure)などの生態系評価モデルなどを用いて、事前評価を行う必要がある．我が国では、数値シミュレーションによる事前評価が主流であるものの、水質、底質などの評価に限定された検討に留まっている．今後は、HEP、WET、HGMなどを用いた生態系や生物生息環境に関する事前評価を含めた検討が必要となる（土木学会，2000）．

自然再生事業の施工面では、覆砂、干潟、アマモ場の構築を行う．その際、施工対象海域が潮間帯、もしくは、水深が数メートル以下の浅海域となるため、通常の作業台船による海上施工が困難な状況にある．また、従来の埋立工事で用いられてきた施工方法の準用から、生物生息環境場の造成を重視した新たな施工法の開発へ転換する必要がある．一例としては、現状の施工は、従来の埋立工事で用いられてきた底開バージによる直投式やスラリー圧送式の施工方法が主として採用されており、出来高形状に合わせて土砂を効率的に盛り立てていくという観点が主流となっている．これに対して、干潟設計の最新状況から生物生息の観点から干潟材料の粒度分布を最適化する必要が明らかになっており、底質が分級せず所定の粒度分布を維持できる施工方法を新たに開発する必要がある．

2.3 沿岸環境修復・再生技術の分類

沿岸環境の修復・再生技術の代表例である覆砂、干潟造成、アマモ場造成を対象として、設計、施工技術の一覧を表-1に示す．各技術の内容については、次章以降で説明する．

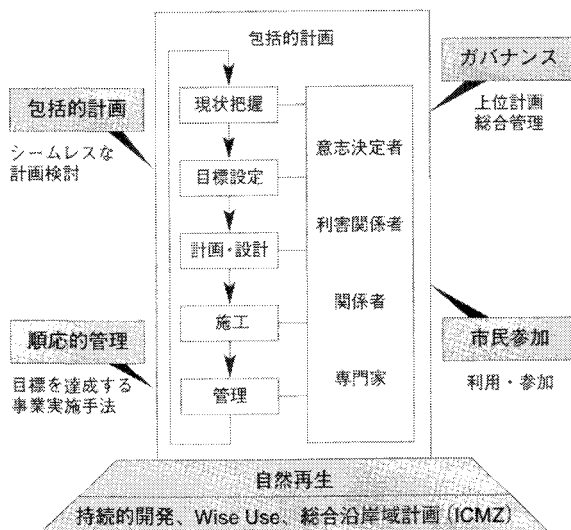


図-3 順応的管理の位置づけ(古川,2005)

表-1 覆砂，干潟造成，アマモ場の設計，施工技術の分類

大分類	設計/施工	設計要素/施工法	備考
覆砂	設計	覆砂範囲，覆砂厚の設定	
		覆砂材の設定（砂，砂代替材）	
		覆砂効果の事前評価 （生態系モデル，HSIモデルなど）	
	施工	底開バージによる直投式	濁り大
		グラブ台船，バックホー台船による直投式	濁り大
		トレミー管式	
		散布管式	
		ブラインド覆砂工法	薄層覆砂，濁り小，
		底泥置換覆砂工法	砂不要，薄層覆砂，濁り小，
干潟造成	設計	干潟諸元の設定 （勾配，水深，平面形状など）	
		干潟材の設定（砂，ヘドロなど）	
		地形安定の検討 （海浜変形モデル，水理実験）	
		干潟効果の事前評価 （生態系モデル，HSIモデルなど）	
	施工	底開バージによる直投式	
		グラブ台船，バックホー台船による直投式	
		トレミー管式/散布管式	
		スプレッター式	
アマモ場造成	設計	アマモ場移植の適地選定 （水深，範囲，底質安定など）	
		アマモ移植方法の選択 （播種法，株植法，シートなど）	
		アマモ生育の事前評価 （波浪モデル，HSIモデルなど）	
	施工	種子の発芽処理	水温，塩分制御による前処理
		直播法	
		播種法（シート式，マット式など）	
		株植法（粘土結着法，竹串結着法）	
		機械式移植法	ガット船，バックホーなど
		マット設置・移設法	播種，株植が不要，

3. 覆砂技術

3.1 覆砂技術の概要

内湾や湖沼などの閉鎖性水域では底泥汚濁が悪化しやすいことから，底泥の酸素消費と栄養塩溶出により貧酸素化や富栄養化が進行するケースが多い．このような水域での水質改善対策として，汚濁底泥の浚渫，もしくは，覆砂が実施されるケースが多い．しかし，汚濁底泥の浚渫については，浚渫土の処分場所の確保が困難なこともあり，大規模な浚渫が実施しにくい状態にある．一方，覆砂についても，良質な砂質土の確保が困難な状態になっていることから，大規模な覆砂事業は航路浚渫などにより多量な良質土砂が発生する場合に限定されつつある．

覆砂による環境改善効果として，底泥からの栄養塩溶出の抑制，底泥の酸素消費の抑制，底生生物相の変化（泥質を好んで生息する生物相から砂質を好んで生息する生物相に変化）が上げられる（干山，1998）．

3.2 覆砂の設計技術

(1) 覆砂厚の設定

干山(1998)は、覆砂厚の設定に対して、栄養塩溶出削減、底生生物の生息深度、底曳網漁業などによる海底攪乱、施工精度の観点から、各々の必要最小限の覆砂厚を整理した(表-2)。その結果、環境改善効果の発現と維持のために必要と考えられる覆砂厚30cmに施工性への対応としての20cmを加えた50cm程度が、適正覆砂厚さの目安となると記述している。

表-2 必要覆砂厚さ（干山(1988)に加筆）

区分	項目	必要厚等	備考
環境改善効果	溶出削減効果	30cm以上	溶出試験より算定
	溶出削減効果(持続性)	30cmで20年 50cmで30年	数値計算結果より算定
	底生生物相	10cm以上	多毛類、二枚貝類、甲殻類、棘皮類の生息深度より算定
覆砂形状の維持	海域利用(漁業の影響)	10cm以上	底曳網漁業による海底攪乱より算定
施工性	施工精度	±10～20cm	コンベアーバージ式、バージアンローダー式の施工実績より算定
	めり込み厚	2～10cm	コンベアーバージ式、バージアンローダー式の施工実績より算定

上記の結果によると、覆砂厚の設定でクリティカルになるのは溶出削減効果と施工精度となっているが、その妥当性について検討を加える。まず、溶出削減効果から決まる必要覆砂厚（30cm以上）について、覆砂効果を追跡した事例では、覆砂範囲が狭いため周囲の海底で巻き上げられた底泥が再堆積したり、流域からの汚濁負荷流入により有機物が堆積するなど、浮泥の再堆積に起因して溶出削減効果が低下する場合がある。すなわち、浮泥の再堆積が顕著な水域では、覆砂の本来の原理上、溶出削減効果を長期間維持するのはかなり困難である。実際の覆砂の効果としては、浮泥の再堆積が少ない水域で覆砂を行い底質を泥質から砂質に変えることによって多様性の高い底生生物相を再生し、健全な沿岸生態系システムを修復することを主眼におくべきと考える。その結果、環境改善効果に対する覆砂の必要厚さは底生生物の生息深度から決まる10cm以上となり、従来の必要厚さ30cm以上に比べて、覆砂厚さが大幅に低減される。次に、施工精度から決まる必要覆砂厚（20cm以上）について、後述する現在の最新の覆砂工法では、従来型の散布管方式に比べて極薄層の覆砂が可能となっており、砂のめりこみや底泥地盤のすべりが生じずに±5cm程度の施工管理が可能となっている。これらの知見をもとに必要覆砂厚を再検討すると、底生生物相の再生を主目的とした環境改善効果から決まる覆砂厚（10cm以上）に施工精度から決まる覆砂厚（5cm以上）を加えた15cm以上が適正覆砂厚の目安とすべきと考える。この結果は、従来の必要覆砂厚の約1/3であり、使用可能な砂質土量が同じであれば約3倍の面積の覆砂が可能となる。覆砂効果を効率的に発現させるには極力広い範囲を覆砂することが重要であり、使用可能な砂質土量には限りがある現状を考えると、覆砂厚の低減により覆砂範囲を拡大することは環境修復・再生事業として合理的な設計手法であると言える。

(2) 覆砂材の設定

覆砂材としては、原則として、有機物含有量、シルト含有量が少ない砂質土が選定されることが多い。しかし、最近の調査報告例では、砂質土にある程度の有機物やシルト質土を加える方が

底生生物の種類数や個体数が増加することから（国分ら，2004；上野ら，2004），底生生物相の再生を主目的とする覆砂において，適度な量の有機物やシルト質土を含有した浚渫土を覆砂材として使用することも可能と考えられる．また，近年，砂質土の確保が困難な状況を受けて，砂の代替材として高炉水砕スラグを用いた覆砂も実施されている（宮田，2000）．

3.3 覆砂の施工技術

覆砂の施工に要求される事項として，覆砂材を薄く均一で散布すること，現周辺海域に極力濁りを発生させないことなどの基本事項に加えて，海底に堆積している浮泥を巻き上げないこと（浮泥を巻き上げてしまうと覆砂後の表層に再堆積して覆砂の効果が低減してしまう），覆砂材の分級が極力生じないこと（幅広い粒度分布を持つ覆砂材の場合，覆砂施工時に分級が生じると表層にシルト質土が堆積しやすくなる）などにも配慮することが望ましい．

覆砂の施工法として，底開バージによる直投式，グラブ台船，バックホー台船による直投式，散布管方式，トレミー管方式などが用いられている（図-4，干山，1998）．底開バージ，グラブ台船，バックホー台船による直投式は，工費としては安価であるが，薄層で均一な覆砂の施工が困難であり，濁りの発生も多い．散布管方式，および，トレミー管方式は，ある程度薄層の覆砂が可能であり，濁りの発生も直投式に比較して低減される．また，濁りの発生をさらに低減できる工法として，二重トレミー管方式を採用した施工も実施されている．

最近では，10～20cm程度の超薄層覆砂が可能で，かつ，濁りの発生が大幅に低減された新工法が実用化されている．その例として，ブラインド覆砂工法と底泥置換覆砂工法の概念図を図-5に示す．ブラインド覆砂工法は，台船に装備したブラインド式覆砂装置に砂を入れ，所定の厚さに均した後にブラインドを開き，砂を一定の厚さで面状に海底へ落下させる工法で，薄層でも層厚管理が確実に行えること，かつ，砂が落下する際の汚濁発生が少ないこと，水深が浅くても効率よく施工が可能なこと等の長所がある（佐竹，1996；守屋ら，2003）．底泥置換覆砂工法は，汚濁底泥の下に堆積する砂質土をジェット水流により底泥表層に湧き上がらせて覆砂する工法で，外部からの砂投入が不要なこと，薄層の覆砂が可能なこと，濁りや底泥の巻き上げが少ないことなどの長所がある（大谷ら，2003）．これらの新覆砂工法は，従来工法に比べて，3.2で述べた15cm程度の薄層の覆砂が可能で濁りの発生が大きく低減できることから，今後の普及が期待される．

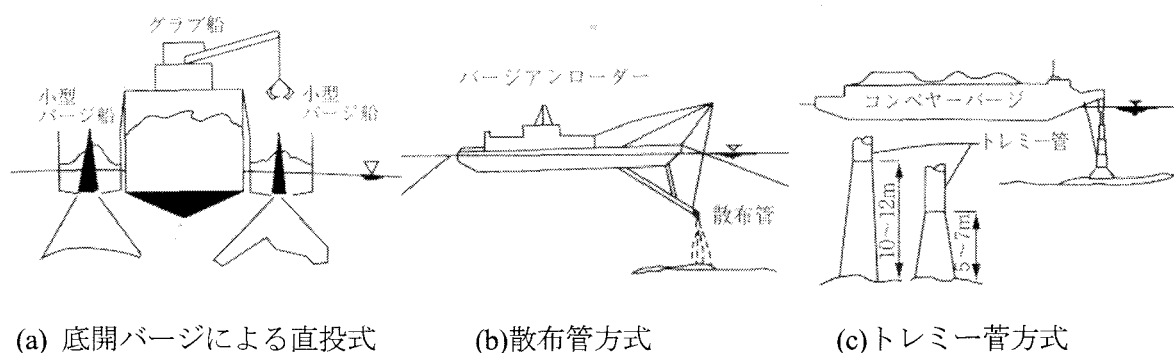
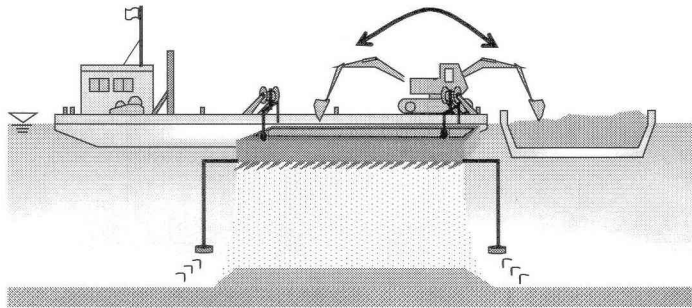
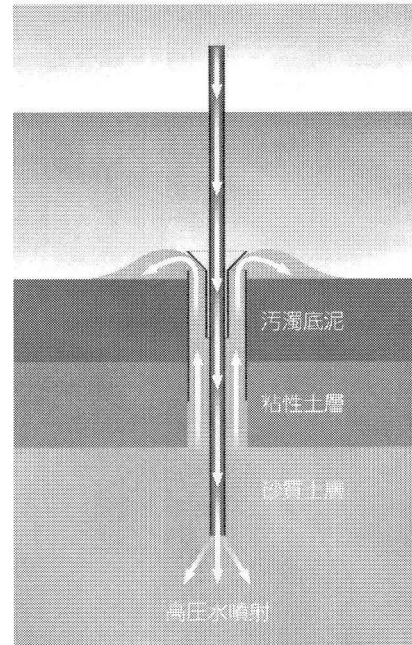


図-4 覆砂の施工法（干山(1998)より抜粋）



(a)ブラインド覆砂工法 (佐竹,1996)



(b)底泥置換覆砂工法(大谷ら,2003)

図-5 最新の覆砂工法

3.4 覆砂の実施例

覆砂事業とその効果検討の報告例（例えば、堀江(1996), 潮崎(1998)）の内、干山(1998)を抜粋して香川県東部に位置する津田湾の覆砂事業を紹介する。本事業は運輸省第三港湾建設局高松港工事事務所（当時）が実施したもので、事前調査、覆砂工事、追跡効果調査が行われた。事前調査によると、当該海域の底質は泥分70%以上、COD30mg/gDW以上を示し、底泥汚濁が進行した状態にあった。この海域において、底泥汚濁の進行した湾中央部（面積約42万 m^2 ）に覆砂厚50cmで覆砂を実施した（図-6参照）。覆砂材は近隣の浚渫工事からの発生土砂を用いて、散布管方式で覆砂を実施した。覆砂後の追跡調査によると、栄養塩溶出量の削減、および、覆砂層の底質CODが、施工直後（平成3年度）から調査期間の最新時期（平成7年度）に至るまで維持できている結果と示されている。また、図-7に示す底生生物の種類数、個体数の経年変化によると、覆砂区域外に比べて、覆砂区では生物の種類数、個体数ともに増加しており、底生生物の生息環境が改善されている状況が示されている。



図-6 津田湾における覆砂区域 (干山,1998)

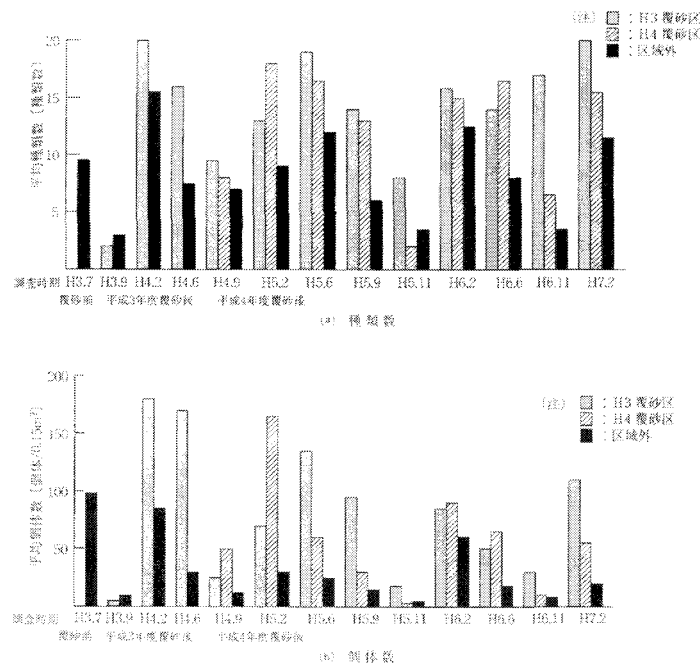


図-7 覆砂区域内外での底生生物の種類数・個体数の経時変化 (干山,1998)

3.5 覆砂技術の課題

覆砂事業は過去の実績が豊富であることから、他の環境修復・再生技術に比べて、設計・施工技術の完成度が高いと言える。さらに、近年、薄層覆砂が可能で濁りの少ない新技術も実用化されより高度な施工が実現できる状態にある。ただし、一方で覆砂効果が期待通りに持続できない場合もあり、覆砂の有効性を疑問視する状況も見受けられる。3.2で述べたように、覆砂効果が持続できない事例の多くは、汚濁底泥の範囲に比べて覆砂範囲が狭いことや、流域からの汚濁負荷が多いため覆砂後に有機物の堆積が生じることなどの計画段階の問題が上げられる。従来の計画では、最も底泥汚濁の進んだ区域を優先的に覆砂してきた事例が見受けられるが、このような区域は覆砂範囲に比べて広範囲に汚濁底泥が分布し、かつ、汚濁負荷の流入が顕著な場合が多いので、概して、覆砂効果の持続が困難な区域である。そこで、覆砂による環境再生を効果的に実現するためには、覆砂の実施区域を覆砂効果の発現・維持が容易な区域から開始し、底生生物相の復活を先行させる戦略が必要と考える。具体的には、流域からの汚濁負荷が少なく、かつ、貧酸素化が生じにくい水深が浅い地点を優先して覆砂を実施し、底生生物相を復活させて沿岸生態系の再生を図った上で、覆砂の範囲を除々に水深の深い区域へ移行するという方法が望ましいと考える。

4. 干潟造成技術

4.1 干潟造成技術の概要

潮汐の干満により干出と没水を繰り返す干潟は、鳥類、魚類、貝類、甲殻類、多毛類、海草藻類、付着珪藻類などの多様な生物の生息地であり、干潟の持つ水質浄化機能、生物生産機能は沿岸域の生態系システムの重要な要素となっている。また、潮干狩りやバードウォッチングなど人

が自然と触れ合う親水機能も干潟の重要な機能の一つにあげられている。近年、この干潟を人工的に造成する試みが数多く実施されており、干潟造成技術の知見が蓄積されてきた。干潟造成とは、基本的には土砂を盛り立てて干潟地形を造成するものであり、工法的には従来の埋立造成と共通する部分が多い。しかし、干潟造成が埋立造成と大きく異なる点として、沿岸生態系の再生という観点に立った設計と施工が必要なことがあげられる。

干潟造成の設計、施工方法については、「国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著(2003b)の海の自然再生ハンドブック、その計画・技術・実践、第2巻干潟」に詳細が取りまとめられている。本章では、この海の自然再生ハンドブックを参考に、最新の知見も加えた内容を取りまとめる。

4.2 干潟造成の設計技術

(1)干潟造成の規模の設定

干潟造成の適正規模について合理的な設定方法は未だ整理されていないのが現状である。基本的な考え方として、沿岸生態系システムの最小ユニットとして干潟造成を行う視点に立てば、沿岸環境の構成要素であるヨシ原、干潟、アマモが一体となった規模で干潟造成を行うべきと考える(田中ら、2003)。そのためには、岸沖方向の干潟造成規模は、アマモの生息範囲であるDL-1m～-5mのレベルからヨシの生息範囲であるDL+2m～+5mの範囲を確保するのが望ましい。従来の干潟造成では、ヨシ原やアマモ場と一体となった干潟を造成するという視点が欠けていたことから、今後、ヨシー干潟－アマモ場をセットで再生できる規模の干潟造成が増加することに期待したい。一方、沿岸方向の規模については生態学的な根拠を設定できるだけの知見が蓄積されておらず、今後の課題である。

(2)干潟造成の形状（勾配、水深帯）の設定

干潟造成の形状諸元として干潟の勾配や水深帯については、生物生息環境と地形安定の2つの観点から設定する必要がある。

生物生息環境の観点からは、国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著(2003b)によると、干潟の水深帯（地盤高）に応じて各生物の生息範囲が変化することから、特定の生物の出現を期待する場合には、その生物が最も好む水深帯（地盤高）の範囲をできるだけ広くなるように設定すると記述されている。しかし、干潟の造成目的として特定生物の出現を期待することは、アサリなどの有用水産種を対象とした干潟造成を除けば、沿岸生態系の再生という干潟本来の目的と合致しない恐れがあり、むしろ、多種多様な生物が生息する干潟の水深帯（地盤高）を設定すべきと考える。

干潟の水深帯（地盤高）の参考データとして、三番瀬干潟における水深と底生生物の種類数・個体数の関係を図-8(a)に示す。この結果によると、水深帯がDL-2m～+1mの範囲で底生生物の個体数が増加し、種類数もほぼ同様の傾向にあることから、干潟造成の形状として、DL-2m～+1mの水深帯を極力広く設定することにより多種多様な底生生物の増大が期待できる。この結果は、既往の研究結果(風呂田、1983；上野ら、2001、2002；矢持ら、2003；国分ら、2004)と同様であり、底生生物の一般的な出現特性であると考えられる。ただし、鳥類の内、シギ・チドリ類は干出す面積が広い方が摂餌に適していること、深い水深帯を好んで生息する底生生物も存在すること

などを考慮する必要がある、単に生物種と個体数の増大のみを目的として干潟造成の水深帯をDL-2m～+1mの範囲のみに限定することは望ましくないことに留意する必要がある。

地形安定の観点に基づいた干潟勾配の設定については、現状の海岸工学の知見にもとづけば、Sunamura・Horikawa(1974)による侵食・堆積条件の推定パラメータやその他の海浜勾配の推定公式を参考に設定することができる。ただし、海底勾配が極端に緩やかな干潟の地形変化を検討する際には、砂浜海岸を対象としてきた既往の海岸工学の知見を再検証する必要がある、現在、各種の研究が進行中である（姜ら,2000; 内山ら,2000; 柿木ら,2000; 許ら,2003; 湯浅ら,2005）。

(3)干潟材料（底質，粒度分布）の設定

従来の干潟造成は砂質土が多用されてきたのに対して、生物生息環境の観点からは干潟材は適度に有機物やシルト質土を含有する方が底生生物の種類数や個体数が増大することが明らかになってきた（上野ら, 2001,2002,2004; 国分ら,2004）。その一例として、三番瀬干潟における底質（強熱減量）、泥分（シルトと粘土の含有率）と底生生物の種類数・個体数の関係を図-8(b),(c)に示す。底生生物の個体数は強熱減量2～7%、泥分10～40%の範囲で増大し、種類数も同様の傾向を示した。これは、干潟の造成材として、今まで多用されてきた清浄な砂質土より、有機物や泥分を適度に含有した底泥を使用した方が生物量が増大することを意味している。

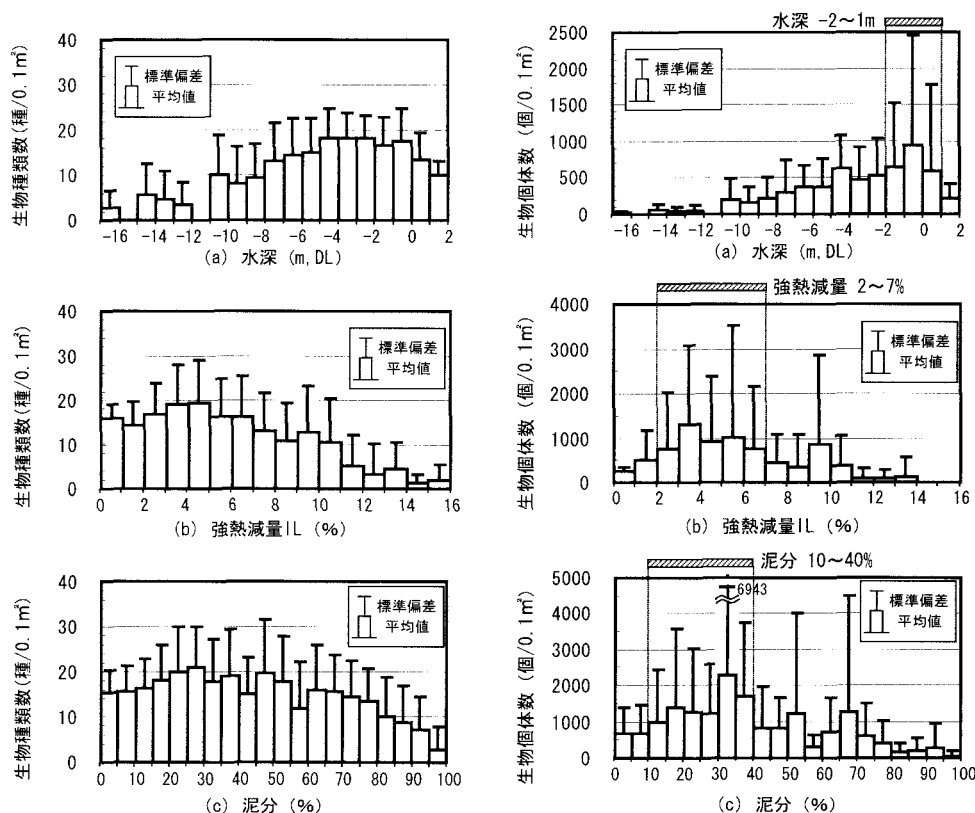


図-8 水深，強熱減量，泥分と生物種類数・生物個体数の関係（上野ら,2004）

(4)干潟の底生生物の再生効果の事前評価

現在の干潟設計では、地形変化モデルや水質モデルにより事前評価が行われるものの、生物生息環境の観点からの検討はほとんどなされていない。一方、干潟生物の生息環境評価モデルの開

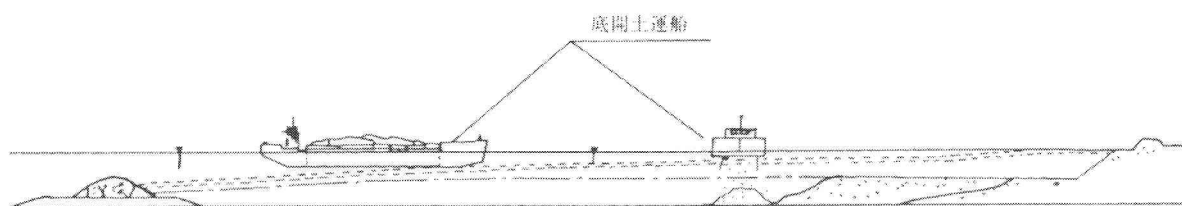
発が進んできたことから（新保ら,2000, 2001; 林ら,2002など），設計段階の干潟諸元をもとに底生生物の再生状況を事前評価することが可能となってきた（田中ら,2003,2004）．今後，生物環境の観点から干潟の設計諸元を事前評価することが必要と考える．

4.3 干潟造成の施工技術

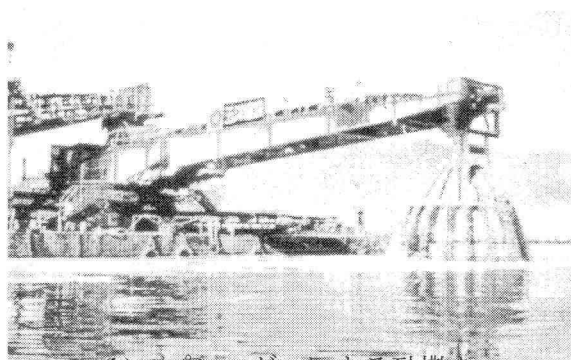
干潟造成の施工技術は従来の埋立造成の施工技術を準用する場合が多い．しかし，干潟造成では潮間帯における施工が要求されるため，水深が深い場合と浅い場合で施工方法を変更する必要がある（図-9）．水深が深く作業台船の進入が可能な条件では，3.3で述べた覆砂の施工法と同じく，底開バージ，グラブ船，バックホー台船による直投式の工法，散布管やスプレッダーによる砂播きが用いられる．水深が浅くなり作業台船の進入が困難な条件では，砂をスラリー状にしてポンプ圧送したり，陸上からバックホーやクラムシェルにより撒き出す工法を用いる．

浚渫土を用いて干潟造成を行う場合，干潟の下層に粘性土を撒き出しその表層に覆砂をする場合がある．その際，下層の粘性土の圧密特性を事前に検討する必要があるとともに（車田・小久保,2002），顕著な圧密沈下が生じる場合には余盛りや沈下後の土砂投入などの対策が必要となる（日経コンストラクション，2005）．また，粘性土の上に覆砂をする際にすべりや混合を防止するためにネットの敷設が必要となる場合がある（佐藤ら，2004）．

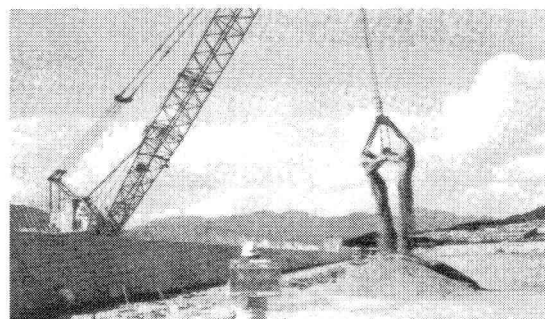
これらの施工技術は，基本的には埋立造成の施工技術を準用したものであり，今後，生物環境を重視した干潟造成を実現するためには，従来の埋立造成技術では実現困難である底質粒度分布の維持や干潟の微地形の造成が可能な新たな施工技術を開発する必要がある．



(a)底開バージによる直投式



(b)スプレッダーによる砂撒き



(c)クラムシェルによる砂撒き

図-9 干潟の施工方法

（国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著(2003b)より抜粋）

4.4 干潟造成の実施例

代表的な干潟造成の事例として、航路浚渫土砂を用いて干潟を造成した瀬戸内海の尾道系崎港3地区(大山, 2004), 三河湾(小椋, 2004), 現地発生土を用いた東京湾の大森地区(伊藤, 2004; 岩本・岡村, 2004)がある。また、干潟造成だけでなく、アマモやその他の環境修復・再生技術を組み合わせた研究開発事業も大阪湾の尼崎港(上嶋・中西, 2005), 阪南2区(古川ら, 2005), 三重県の英虞湾(上野, 2004)で実施されている。この内、英虞湾の事例は6章で詳しく紹介する。

4.5 干潟造成技術の課題

干潟造成の実績が増える中、干潟の水深、干潟土壌の底質、粒径に対する底生生物の生息状況については多くの知見が蓄積されてきたものの、解決すべき課題は数多くのこされている(図-10)。主要な検討課題として、干潟地形の維持については、圧密沈下、波浪による侵食の原因により造成直後から2, 3年で大きく地形変化が生じて底生生物相が変化する場合があること(桑江, 2005), 干潟地形や土壌の特性として、干潟の透水性にとってテラス部の大きさを確保する必要があること(姜, 2001), 干潟地盤の固さにより底生生物相が変化すること(中瀬ら, 2000), 干潟の微地形に依存してシギ・チドリ類が摂餌行動を取ること(越川ら, 2004)などがあげられ、従来考慮されていない干潟の造成諸元を整理し再検討する必要がある。また、施工技術についても、従来の埋立造成技術の準用ではなく、生態系再生の観点から干潟造成に特化した施工技術を開発する必要がある。

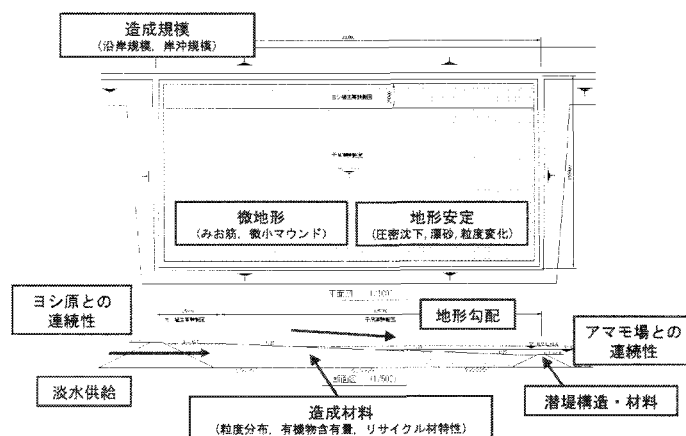


図-10 干潟造成技術の課題（上野, 2003）

5. アマモ場造成技術

5.1 アマモ場造成技術の概要

アマモ場は、「海のゆりかご」と呼ばれるように、幼稚仔魚の成育場、魚介類の産卵場として重要な役割を持つとともに、光合成により水中や底泥中の栄養塩を吸収し、かつ、酸素供給する水質・底質浄化機能を有している。全国でアマモ場造成事業が進行しており、いくつかの成功例が報告されるようになった。アマモ関連の研究は1980年代から始まり、アマモの生育環境に関するデータ・知見が蓄積された(Phillips, 1980; 川崎ら, 1990)。現在ではアマモ場造成のマニュアル類が整備され(国土交通省港湾局監修/海の自然再生ワーキンググループ著, 2003c; Fonsecaら, 1998), 合理的な手法に基づいたアマモ場造成が可能なレベルに達しつつあると言える。本章では、既往のマニュアル類に最新の知見を加えた内容を取りまとめる。

5.2 アマモ場造成の設計技術

アマモ場造成の設計諸元として、干出、光、勾配、砂面変動（シールズ数）、水温、塩分、水

質、底質などの条件を設定する必要がある（国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著,2003c）。高山ら(2003)は、アマモに関する既往の知見に加えて、新たに実施した江奈湾における藻場調査データに基づいて、アマモの生息地環境評価モデル（Habitat Suitability Index Model, HSIモデル）を構築した。本HSIモデルの構成として、アマモの光合成に関わる因子として海底日射量（川崎ら,1990；安部, 2003；森田・竹下, 2003），アマモの定着に関わる因子としてシールズ数（中瀬ら, 1992, 1993；島谷ら, 2000），乾燥に弱いアマモの干出条件の因子として干潮時の水深（相生, 1989；川崎ら, 1990），アマモの生理的因子として水温（川崎ら, 1990；安部, 2003；Abeら, 2003）と塩分（川崎,1990；Phillips,1980）を選定した。アマモHSIモデルのSIの構成を表-3に、江奈湾におけるアマモ分布の観測値とHSI値を図-11に示す。

以上より、アマモ場造成の設計諸元の設定については、アマモの基本生育条件に関する既往研究の蓄積があり、HSIモデルによる設計、事前評価が可能な段階まで進んでいる。残された課題としては、水中・底泥中の栄養分や競合生物によるアマモへの影響解明があげられる。

表-3 アマモHSIモデルのSI構成（高山ら, 2003）

環境因子 (単位)	記号	S I					備考
		0	0~1	1	1~0	0	
海底日射量 (E/m ² 日)	E	0<E<2	2<E<6	6<E	-	-	年平均値
シールズ数 (-)	ψ	$\psi<0$	0< ψ <0.1	0.1< ψ <0.4	0.4< ψ <0.6	0.6< ψ	年未超過確率90%
水深 (m, DL)	h	h<0	0<h<0.25	0.25<h	-	-	干潮時水深
水温 (°C)	T	T<-2	-2<T<0	0<T<28	28<T<30	30<T	2月・8月の平均値
塩分 (PSU)	S	S<10	10<S<17	17<S<34	34<S<40	40<S	年平均値

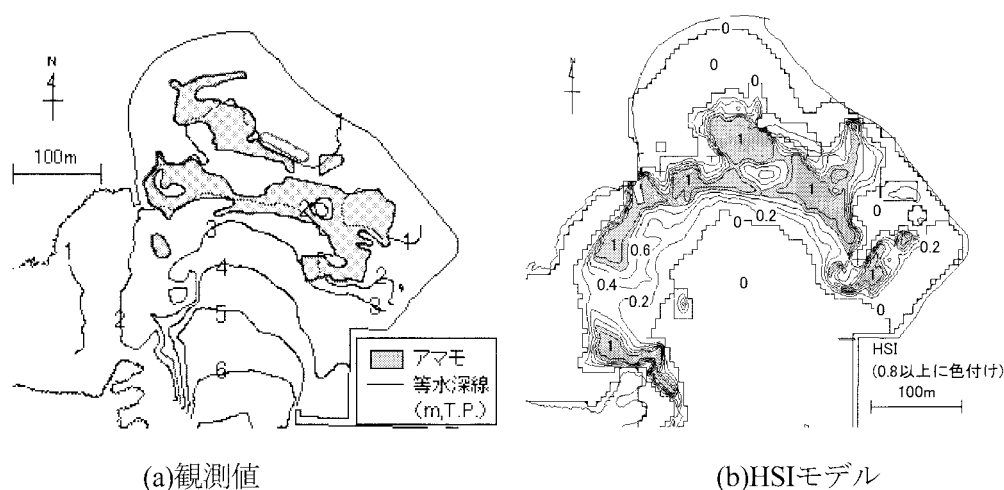


図-11 アマモHSIモデルによる計算結果（高山ら,2003）

5.3 アマモ場造成の施工技術

アマモの移植方法は播種法と株植法が主として用いられている（Phillips, 1980；国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著,2003c；團ら, 1998；Fonsecaら, 1998；Morita, 2000；前川, 2002,2003）。播種法は既存のアマモ場から種子を採取し移植地に播種するもので、

直接海に撒く直播法、直播法の低い発芽・定着率を改良した方法として、粘土に種子を混入したコロイダルシリカ法、土嚢やマットに種子、土、栄養分などを混入した土嚢法、マット法などが実施されている。一方、株植法は、既存のアマモ場から株ごとアマモを採取し移植するもので、土なし法と土付き法に大別される。土なし法では、アマモ株を田植えのように移植する田植法、竹串、鉄棒、粘土などに固定して移植する固定法などがある。土付き法では、土ごと採取したアマモを移植するプラグ法（ポット法）、マット状に株と土を採取し移植するマット法（芝生法）などが実施されている。さらに、種子に塩分調整した前処理を施して発芽率を向上させる技術も実用化されている（前川,2004; 山木ら,2004）

一般に、移植が主として潜水作業によるため作業効率が悪いことから、アマモ移植の機械化施工も進んでおり、専用のバケット機構を有したバックホー台船や移植シートの敷設専用のクレーン台船の開発も行われている（図-12）。さらに、高山ら(2004)は多大な労力を要する播種・株植作業を全く行わないでアマモ移植を行う方法を実用化している（図-13）。この移植法は、まず、天然のアマモ場にマットを敷設し、このマット上に落下した種子が自然発芽・生長することによりアマモが定着したマット（アマモマット）が自然に形成され、このアマモマットを本移植地に移設しアマモ移植を完了するものである。この移植法は、移植作業がマットの敷設と移設のみで効率的な移植が可能であり、かつ、既存のアマモ場破壊の懸念も無いことから、従来の移植法の問題点を解決したものと言える。

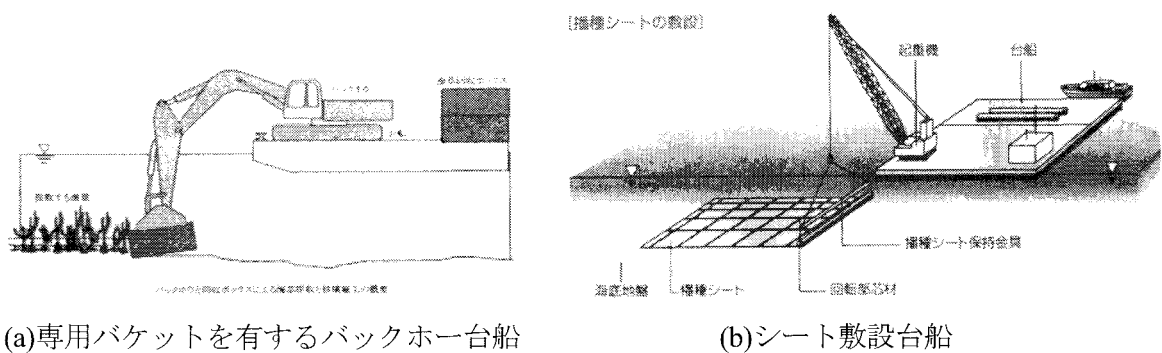


図-12 アマモ移植の機械化施工

（国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著(2003c)より抜粋 ）

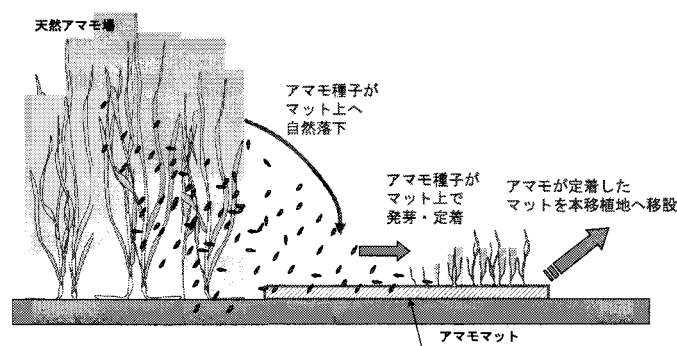


図-13 播種・株植が不要なアマモ移植方法（高山ら,2004）

5.4 アマモ場造成の実施例

アマモ移植の代表的な事例としては、瀬戸内海の尾道糸崎港の百島地区（大山，2004），広島県似島（マリノフォーラム21海洋環境保全研究会浅海域緑化技術開発グループ，2002）が成功例としてあげられる．また，希少種であるコアマモの移植事例として中津港（矢野，2004），市民と協働したアマモ移植事例として横浜市金沢八景（木村ら，2004），干潟・アマモを一体として再生する事例として阪南2区（古川ら，2005），三重県の英虞湾（上野，2004）で実施されている．この内，英虞湾の事例は6章で詳しく紹介する．

5.5 アマモ場造成技術の課題

アマモ場造成の課題として，競合生物や漁業活動との競合に関する知見と対策を蓄積する必要がある．また，施工面の課題として，アマモ移植は潜水作業が主体であり労力，費用がかかることから，移植効率を向上させる必要がある．また，移植先の遺伝子攪乱を事前に防止するために，アマモの遺伝子マップの作成が急務である．

6. 沿岸環境修復・再生事業の一例：英虞湾の再生プロジェクト（上野(2005)の抜粋）

6.1 英虞湾再生プロジェクトの経緯

三重県の伊勢志摩地方に位置する英虞湾は真珠養殖発祥の地として古くから発展してきた．しかし，英虞湾の環境は，都市や集落からの下水排水，有機汚泥の堆積，貧酸素水・赤潮の発生などの水質や底質の悪化が顕著化し，ここ数年では，新型渦鞭毛藻ヘテロカプサ・サーキュラリスカーマによる有害赤潮の発生や，貝柱の赤変化に代表される感染症問題により，もはや英虞湾で一年を通しての真珠養殖が困難な状態にある．そこで，大学，県の研究機関や地元の漁業者とともに，英虞湾の環境再生に資する対策案を検討し，その検討過程において，都市排水や養殖事業からの負荷削減などに加えて，英虞湾自体の自然浄化能力の強化が必要であり，特に，干潟の再生が必要との認識が強まってきた．英虞湾の海岸地形は典型的なリアス式海岸であり，沿岸各部には細長い谷状地形が形成されており，この谷状地形に沿って沿岸の干潟から陸域の湿地までが連続する水際帯が数多く存在している．しかし，この谷状地形は沿岸部を堤防で締め切ると容易に陸地化できることから，高度成長期を中心に盛んに田畑への転換がなされた．三重県が実施した最近の衛星画像解析結果によると，英虞湾全体の干潟面積の70%，海域面積の10%が既に消滅している状態にあることが判明し(国分，2005)，英虞湾の自然浄化能力が大きく損なわれたと考えられる．このような状況下，英虞湾で既に失われた干潟を再生するために，地元漁業者の研究組織である立神真珠研究会が主体となり，三重県，大成建設の協力の元に，小規模な干潟再生実験に2000年に着手した．その後，2002年には地域の市民，行政，大学，企業などが連携する英虞湾再生コンソーシアムが設立され，干潟再生実験のみならず，アマモ移植，ヘドロ浄化などの様々な取り組みが始まった．さらに，2002年12月に三重県が申請した研究提案が科学技術振興機構の公募型事業に採択され，現在，三重県地域結集型共同研究事業「閉鎖性海域における環境創生プロジェクト」の中で，大規模な干潟・アマモ場造成事業や造成後の長期追跡モニタリングが継続されている．なお，本干潟再生実験の取り組みは，平成13年度土木学会環境賞を受賞した．

6.2 小規模現地実験を通した要素技術の開発

一般に、人工干潟の造成には清浄な山砂や海砂が使用されるが、良質な砂の不足に加えて、砂採取地での環境破壊が懸念されている。一方、底泥浄化事業として実施される汚濁底泥の浚渫では、浚渫ヘドロの処分が大きな問題となっている。このような観点から、浚渫土砂を利用した人工干潟の実施例が増加してきた。その造成方法としては、浚渫土を干潟の内部に敷設し、その上から清浄な山砂あるいは海砂を覆砂する方法が一般に採用されている（図-14上図）。この場合、浚渫土は干潟の「あんこ」として地下に封印され、単なる嵩上げ材料として利用されているにすぎない。また、干潟表面に清浄な砂で覆砂を行うと栄養分が不足して底生生物の復活が遅れるとの指摘もある。一方、浚渫ヘドロに多量に含まれる有機物は生物の栄養源であることから、重金属やダイオキシン類などの問題がなければ、浚渫ヘドロは干潟生態系への栄養供給材料として利用できる可能性がある。さらに、好気的環境にある干潟生態系では浚渫ヘドロ中の有機物の酸化分解が促進され自然浄化が進むと期待される。これは、従来、不要物として処分されてきた浚渫ヘドロを有効な資源と見なして再利用するもので、資源循環型の新しい干潟再生技術と言えよう。そこで、英虞湾における干潟再生実験では、浚渫ヘドロを地下に封印せず、現地盤土と混合して干潟を造成することにより、干潟生態系への栄養供給を確保しつつ、浚渫ヘドロ自体の浄化を行うという新しい発想で、現地実験を実施した（図-14下図）。浚渫ヘドロを用いた干潟では、干潟土壌にヘドロ分が多すぎると底質の嫌気化が進行して底生生物の生息に適さないものとなることから、健全な干潟環境を維持するために干潟土壌に浚渫ヘドロをどの程度混合すれば良いかという数値条件を明らかにすることが最重要課題である。

そこで、英虞湾立神浦に現地盤土（砂質土）と浚渫ヘドロを所定の割合で混合した6区画の干潟実験区を造成し、水質・底質の変化、底生生物の復活状況を3年間にわたり追跡モニタリングを実施して、干潟生態系に対して最適な浚渫ヘドロの混合率、底質粒度の最適条件を明らかにした。干潟実験区の平面図を図-15に示す。浚渫ヘドロは英虞湾の真珠養殖漁場で浚渫され脱水処理されたものを粉碎して用いた。浚渫処理土のCODは約37mg/g-dry、と高く、長年の養殖漁場利用により

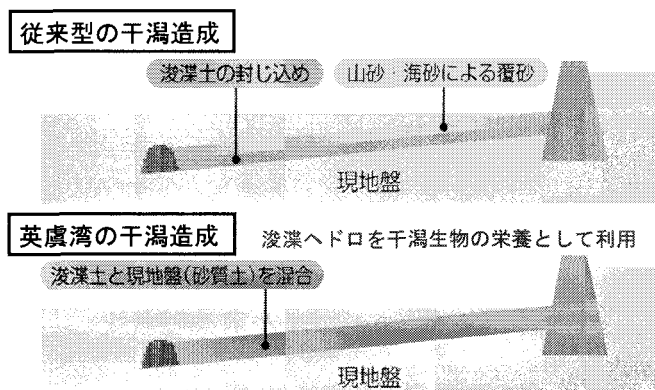


図-14 浚渫ヘドロを用いた干潟再生工法の特徴

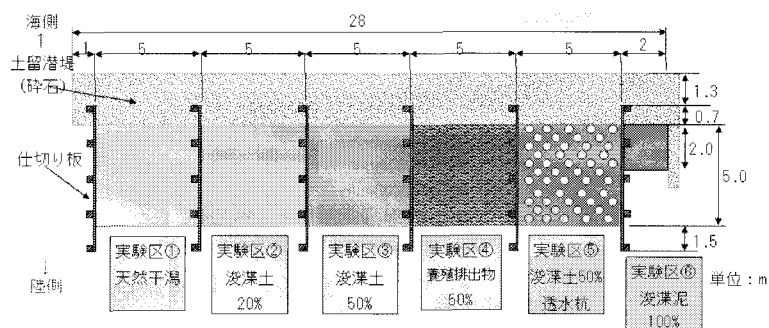


図15 干潟現地実験場の平面図

有機汚濁が進行したヘドロであると言える。各実験区の浚渫ヘドロの混合割合は、実験区①で浚渫ヘドロ0%（現地盤土のみ）、実験区②で浚渫ヘドロ20%、実験区③で浚渫ヘドロ50%とした。実験区④、⑤は本報では割愛する。人工干潟は2000年9月29日に完成した。さらに1年後、2001年9月30日に浚渫ヘドロのみで造成した実験区⑥を増設した。各実験区の水質、底質、底生生物の変化について、2000年10月から2003年9月まで3年間にわたる追跡モニタリングを実施した。

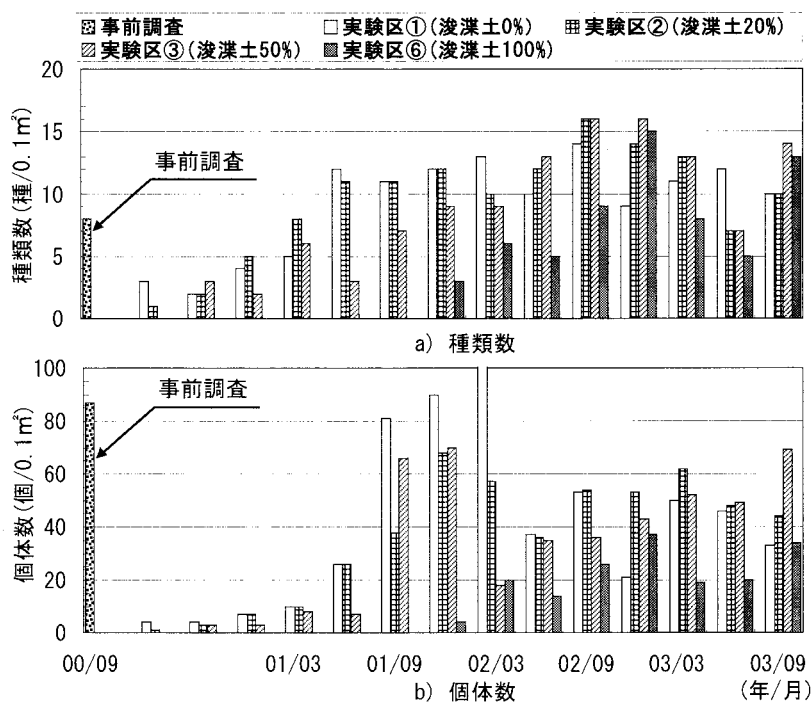


図-16 干潟現地実験における底生生物の種類数と個体数の経時変化
(国分ら，2004)

干潟実験区①（現地盤）、②（浚渫ヘドロ20%）、③（浚渫ヘドロ50%）、⑥（浚渫ヘドロ100%）における底生生物の追跡モニタリング結果について、底生生物の種類数及び個体数の経時変化を図-16に示した。干潟土壌を混合した造成直後では各実験区ともほとんど底生生物が見られなかったのに対して、2ヶ月後から増加し、種類数は造成後約半年で、個体数は造成後約1年で、事前調査とほぼ同じ数まで増大した。干潟造成によるインパクトから底生生物が回復するまでの期間は約1年と意外に早い。造成後1年半を経過すると、底生生物の種類数、個体数とも、年レベルとしてはほぼ安定した状態に達した。

全実験区に出現した底生生物の種類数と干潟土壌のCOD、粘土・シルト含有量の関係を図-17に示す。前述したように、底生生物が安定的に生息するまでに約1年の遷移期間が必要であることから、1年以前と1年以降で分けてデータを示した。COD、粘土・シルト含有量の各項目ともに、底生生物の種類数の変動パターンはある範囲で極大値を示すことから、底生生物の生息にとって、干潟土壌の性状に最適条件が存在することが分かる。この傾向は、底生生物の個体数も同様な結果となる。図-17によると、底生生物の生息に対する干潟土壌の最適条件は、CODで3～10mg/g-dry、粘土・シルト含有量で15%～35%の範囲であることが示された。すなわち、干潟土壌が多量の有機物を含むほど底生生物は減少する一方で、逆に、有機物含有量が少なすぎても底生生物の減少につながることを示している。特に、従来の人工干潟造成に多用されてきた清浄な砂質土に比べて、浚渫ヘドロを適度に混合した有機物を含む土壌の方が底生生物の生息に適していることが示されたことから、浚渫ヘドロを干潟の造成材に用いる意義が明確になった。なお、上記の小規模

干潟再生実験の詳細は上野ら(2001,2002), 国分ら(2004)を参考にされたい。

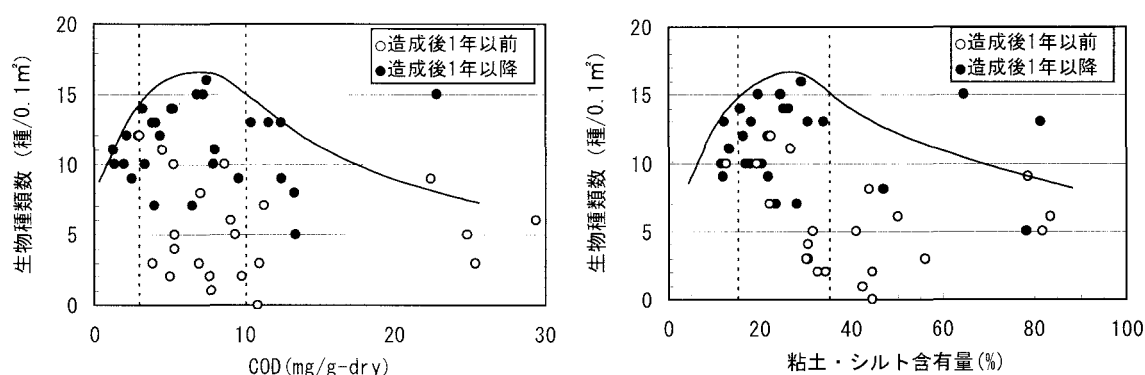


図-17 底生生物の種類数と干潟土壌のCOD, 粘土・シルト含有率の関係(国分ら,2004)

6.2 大規模干潟・アマモ場造成

英虞湾における小規模干潟実験の成果を受けて、三重県では平成15年度三重保全地区英虞湾漁場環境保全創造事業として、浚渫工事と干潟造成工事が一体となった環境再生事業が実施された。その内容は、英虞湾の片田地区において海底に堆積したヘドロを浚渫し、その一部を立神地区に運搬して現地盤土と混合攪拌して干潟造成を行うものであり、小規模干潟実験の約30倍の規模となる面積3,000m²の大規模干潟が造成された。また、翌年の平成16年度にはさらに面積4,200m²の大規模干潟が追加造成された。これらの事業は、ヘドロ浚渫による汚染源の除去と、その浚渫ヘドロを利用した干潟造成による環境再生が一体化した環境事業の新展開と言える。また、干潟造成地の沖側には約1000m²のアマモ移植を実施した。

造成した大規模干潟の平面図を図-18に、完成した干潟の状況を写真-1に示す。干潟実験区は3つに分かれており、浚渫ヘドロの混合率が30%の実験区①、および、③とヘドロ混合率が50%の実験区②である。干潟造成工事は、干潟造成範囲を貝殻土嚢で仕切る仕切工、浚渫ヘドロ、もしくは、混合土を所定の厚さで撒き出す撒出し工、撒き出した浚渫土と現地盤土を混合攪拌する攪拌工で構成される。潮干帯が主とした施工場所となる人工干潟の造成工事は、施工時の潮位により気中・水中と施工環境が大きく変化する。そのため、浚渫ヘドロと砂質土を混合した人工干潟の施工には、気中・水中の全く異なる環境に対応した施工方法の確立が必要となる。そこで、設計にもとづいた最適混合率を確保した均質な干潟を造成するために、潮汐の影響、人工干潟の施工場所を考慮して、①陸域施工：ロータリースタビライザーを装着した泥上車により浚渫ヘドロと現地海底の砂質土を現位置で混合する方法(写真-2)、②海域施工：浚渫ヘドロと砂質土を陸上混合ヤードで混合して造成する方法(写真-3)、の2種類の工法で施工した。また、施工環境による違いを評価するため、それぞれの工法に対して気中・水中の条件を加えた。2003年度施工の実験区①と②では、陸域施工パターンとして浚渫ヘドロを先に撒き出した後に砂質土と浚渫ヘドロを現位置で混合した。2004年度施工の実験区③では、海域施工パターンとして陸上ヤードで浚渫ヘドロと砂質土を混合した後に主として海上施工により混合土を撒き出した。上記の2パターンの施工により、浚渫ヘドロと砂質土の混合攪拌工については現位置および陸上ヤードで施工法が確立し、混合後の干潟土の撒出し工については陸域および海域での施工法が確立できたことになる。

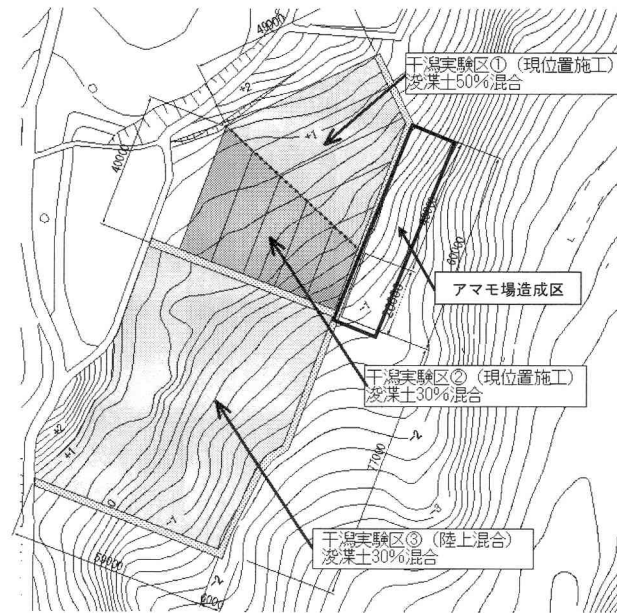


図-18 大規模干潟造成区の平面図



写真-1 大規模干潟の完成状況



写真-2 ロータリースタビライザー付き
泥上車による現位置混合の状況



写真-3 攪拌バケット(ドライブミキシング)
による混合攪拌の状況

6.3 追跡モニタリング

今回造成した干潟については、三重県地域結集型共同研究事業「閉鎖性海域における環境創生プロジェクト」の中で、長期的に追跡モニタリングが実施されている。現在、2003年度に造成した干潟は完成後約1年が経過しており、追跡モニタリングの結果によると、小規模干潟実験と同様に、底生生物の順調な増加が確認されている。

三重県地域結集型共同研究事業では3つの研究テーマで構成されており、その一つの研究テーマである「沿岸環境創生技術の開発」において今回造成した人工干潟の長期的な環境モニタリングを実施中である。特に、三重県、三重大、民間企業などの研究機関に加えて、地元で結成された団体である英虞湾再生コンソーシアムの協力を得ながら、科学的、かつ、継続的な追跡調査が実施されている。また、干潟のみならず、アマモ場の造成、干潟・アマモ場の物質循環なども主要な研究課題となっており、干潟・アマモ場の沿岸環境を取り巻く新技術が開発されつつある。また、その他の2つの研究テーマである「底質改善技術の開発」、および、「環境動態シミュレーションシステムの開発」も推進中であり、浚渫ヘドロの固化や活用に関する新技術開発、英虞湾の環境をリアルタイムで観測し予報するシステムの開発などが進められている。この内、英虞湾のリアルタイム観測システムは既にインターネットでデータが公開されており、地元漁業者に広く使われている (<http://www.agobay.jp/agoweb/index.jsp>)。

上記のように、英虞湾では浚渫ヘドロを用いた干潟造成という新しい環境再生事業が具体化し、さらに、英虞湾の環境を多面的に捉え新しい環境創生技術の開発を目指した産官学+民の取り組みが進められており、今後の成果が期待される。

7. まとめ

沿岸環境の修復・再生の代表技術として、覆砂、干潟造成、アマモ場造成を対象に設計、施工技术の動向をとりまとめた。沿岸環境の修復・再生技術には、本報で対象とした技術以外にも、外洋性藻場造成、サンゴ移植などの技術が実用化されていることを付記する（国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著、2003c,2003d）。

なお、本報の内、英虞湾の干潟・アマモに関する内容は三重県・三重大・大成建設の共同研究成果であり、干潟の連続性や干潟・生物のHSIモデルに関する内容は大成建設・鹿島建設の共同研究成果である。

参考文献

【沿岸環境再生全般】

運輸省港湾局監修／エコポート（海域）技術推進会議編集（1999）：自然と生物にやさしい海域環境創造事例集，（財）港湾空間高度化センター港湾・海域環境研究所，249p.

運輸省港湾局監修／エコ・コースト（港湾海岸）技術WG編集（2000）：エコ・コースト事業リファレンス・ブック，（財）港湾空間高度化センター港湾・海域環境研究所，55p.

国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著（2003a）：海の自然再生ハンドブック，その計画・技術・実践，第1巻総集編，（財）港湾空間高度化環境研究センター，107p.

国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著（2003b）：海の自然再生ハンドブック，その計画・技術・実践，第2巻干潟編，（財）港湾空間高度化環境研究センター，137p.

国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著（2003c）：海の自然再生ハンドブック，その計画・技術・実践，第3巻藻場編，（財）港湾空間高度化環境研究センター，110p.

国土交通省港湾局監修／海の自然再生ワーキンググループ著（2003d）：海の自然再生ハンドブック，

その計画・技術・実践, 第4巻サンゴ礁編, (財) 港湾空間高度化環境研究センター, 103p.
 国土交通省河川局砂防部保全課海岸室監修/自然共生型海岸づくり研究会編著(2003): 自然共生型海岸づくりの進め方, (社) 全国海岸協会, 73p.
 国土交通省(2003): 特集自然再生, ~次世代に豊かな自然を~, 国土交通, 2003年3月号, pp.9-33.
 田中昌宏・上野成三・林文慶・新保裕美・高山百合子(2003): 沿岸自然再生の計画・設計を支援する環境評価手法に関する一考察, 土木学会論文集, No.741,VII-28, pp.89-94.
 田中昌宏(2004): 沿岸生態系の環境評価, 一生態系連続性の配慮に向けて一, 2004年度(第40回)水工学に関する夏期研修会講義集, Bコース, pp.B-5-1-B-5-15.
 土木学会(2000): 沿岸域における広域環境問題の取り組み, 第Ⅲ期地球環境問題研究小委員会調査研究報告.
 (社)日本港湾協会(2005): 特集港湾行政のグリーン化, 港湾, 第82巻, pp.4-45.
 古川恵太(2005): 港湾環境施策における順応的管理の適用性について, 特集港湾行政のグリーン化, 港湾, 第82巻, pp.12-15.

【覆砂関係】

干山善幸(1998): 覆砂の設計, 沿岸の環境圏(平野敏行監修), フジ・テクノシステム, pp.1147-1158.
 大谷英夫・上野成三・小林峯男・岡田和夫・織田幸伸(2003): 底泥置換覆砂工法の開発と施工, 海洋開発論文集, 第19号, pp.421-426.
 佐竹和比古(1996): ブラインド方式による覆砂工法, Marine Voice21, Vol.188, pp.26-27.
 潮崎俊也(1998): 三河湾の海域環境改善, 沿岸の環境圏(平野敏行監修), フジ・テクノシステム, pp.1169-1183.
 堀江毅, 井上聡史, 村上和男, 細川恭史(1996): 三河湾での覆砂による底質浄化の環境に及ぼす効果の現地実験, 土木学会論文集, No.533/II-34, pp.225-235.
 宮田康人(2000): 高炉水砕スラグの海底設置実験, 第15回海洋工学シンポジウム要旨集, pp.339-346.
 守屋典昭・老田尚志・池田省三・車田佳範(2003): 汚染底泥上の薄層覆砂技術「スラリー式ブラインド覆砂工法」, ヘドロ, 第88巻, pp.35-40.

【干潟関係】

上嶋英機・中西敬(2005): 閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化, 一環境修復技術のベストミックスによる物質循環構造の修復一, 環境技術, 第34巻, 第5号, pp.322-326.
 古川恵太・岡田知也・東島義朗・橋本浩一(2005): 阪南2区干潟創造実験, 一都市臨海部に干潟を取り戻すプロジェクト一, 海洋開発論文集, 第30巻, (印刷中).
 岩本裕之・岡村知忠(2004): 現地発生土を利用した人工干潟造成, ヘドロ, 第91巻, pp.28-34. 伊藤晴司郎(2004): 海と文化の再生を求めて, 一(仮称)大森ふるさと浜辺公園整備事業一, 土木施工, 第45巻, 7号, pp.16-21, 2004.
 今尾和正・鈴木輝明・浮田達也・高倍昭洋(2003): 底生生物の出現動向から見た人工干潟の効果評価, 水産工学, 40巻, 1号, pp.29-38.
 今村均(1998): 人工干潟造成の現状と課題, 沿岸の環境圏(平野敏行監修), フジ・テクノシステム, pp.1112-1121.
 上野成三(2003): 英虞湾と大阪湾における干潟再生実験事例と干潟造成技術の課題, 第9回ジョイントシンポジウム「干潟生態系の危機ーその現状と再生方策ー」講演集, 沿岸環境関連学会連絡協議会, pp.83-92.
 上野成三・高山百合子・湯浅城之(2004): 人工干潟の設計資料として整理した三番瀬干潟における底生生物の出現特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1006-1010.
 上野成三(2004): 干潟再生の実際ー動き始めた三重県・英虞湾再生プロジェクト一, 土木施工, 第45巻, 7号, pp.48-54.
 内山雄介・加藤一正・栗山善昭・古川恵太(2000): 東京湾盤洲干潟の漂砂特性について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.521-525.
 大山洋志(2004): 浚渫土を用いた干潟・藻場再生事業, 一尾道糸崎港3地区の干潟一, 土木施工, 第44巻, 7号, pp.38-43.
 小椋進(2004): 失われた干潟・浅場の回復のために, 一三河湾における環境改善の取り組み一, 土木施工, 第44巻, 7号, pp.69-74.
 柿木哲哉・滝川清・山田文彦(2000): 白川・緑川河口域の干潟形成に及ぼす潮位・潮流と河川流入の影響, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.636-640.
 姜閔求・高橋重雄・野々村治・高野忠志・黒田豊和(2001): 人工干潟地盤の耐波安定性に関する基礎実験, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.526-530.
 姜閔求・高橋重雄・奥平敦彦・黒田豊和(2001): 自然および人工干潟における地盤の安定性に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1311-1315.
 木村賢史(1998): 水質浄化場としての人工干潟(海浜)の設計, 沿岸の環境圏(平野敏行監修), フジ・テクノシステム, pp.1121-1136.

- 許東秀・牛木賢司・高木祐介・岩田好一朗(2003):人工干潟の地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1221-1225.
- 桑江朝比呂(2005): 造成された干潟生態系の発達過程と自律安定性, 土木学会論文集, No.790/VII-35, pp.25-34.
- 車田佳範・小久保裕(2002): 浚渫土を利用した人工干潟の造成技術, 地盤工学会, 粘土地盤における最新の研究と実際に関するシンポジウム発表論文集, pp.291-296.
- 越川義功・田中昌宏・林文慶・上野成三・高山百合子・勝井秀博: 水鳥の生活行動パターンからみた沿岸湿地帯における微地形の重要性, 水工学論文集, 第48巻, pp.1315-1320, 2004.
- 佐藤敦・鶴ヶ崎和博・庄田明宏・大石富彦・原口和靖(2004): 生分解性シートを用いた人工干潟造成, 土木学会第59回年次学術講演会講演集, 6-250, pp.499-500.
- 新保裕美・田中昌宏・池谷毅・越川義功(2000): アサリを対象とした生物生息地適性評価モデル, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1111-1115.
- 新保裕美・田中昌宏・池谷毅・林文慶(2001): 干潟における生物生息環境の定量的評価に関する研究-多毛類を対象として-, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1321-1325.
- 曹慶鎮・丁仁永・西嶋渉・滝本和人・岡田光正(2003): 人工干潟の創出及び復元における斜面勾配の影響, 土木学会論文集, 207号, VII-26, pp.23-30.
- 細川恭史(2000): 干潟生態系の保全と修復, 環境修復のための生態工学(須藤隆一編), pp.191-224.
- 中瀬浩太・林英子・芝原達也(2000): 市民参加による人工干潟の環境管理, 日本沿岸域学会研究討論会2000後援概要集, No.13, pp.14-17.
- 日経コンストラクション(2005): 特集自然再生の潮流, 干潟, 水際線を延ばして野鳥のエサ場を回復, 広島県五日市地区人工干潟修復工事, 日経コンストラクション, 4月8日号, pp.51-53.
- 風呂田利夫(1983): 日本全国沿岸海洋誌, 第9章東京湾 IV生物, 東海大学出版会, pp.373-387.
- 矢持進・平井研・藤原俊介(2003): 富栄養浅海域における生態系の創出-人工干潟現地実験場での生物と窒素収支の変遷-, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1246-1250.
- 湯浅城之・上野成三(2005): 干潟地形を対象とした地形と底質粒度に関する二次元水理実験, 海岸工学論文集, 第52巻, (印刷中).
- 林文慶・高山百合子・田中昌宏・上野成三・新保裕美・織田幸伸・池谷毅・勝井秀博(2002): 沿岸域における複数生物の生息地環境評価-生態系連続性の配慮にむけて-, 水工学論文集, 第46巻, pp.1193-1198.
- Sunamura, T. and K. Horikawa(1974): Two-dimensional beach transformation due to waves, Proc. 14th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.920-938.
- 【アマモ関係】**
- 相生啓子(1989): 海草の生態とその保護 沿岸の浅海に生える海の水草, 採集と飼育, 第51巻8号, pp.352-356.
- 上野成三・高山百合子・前川行幸・原条誠也(2003): 播種・株植が不要なアマモ移植方法の現地実験, 海岸工学論文集, pp.1261-1265.
- 上野成三(2004): 干潟再生の実際-動き始めた三重県・英虞湾再生プロジェクト-, 土木施工, 第45巻, 7号, pp.48-54.
- 大山洋志(2004): 浚渫土を用いた干潟・藻場再生事業, 一尾道糸崎港3地区の干潟-, 土木施工, 第44巻, 7号, pp.38-43.
- 川崎保夫・石川雄介・丸山康樹(1990): アマモ場造成の適地選定手法, 沿岸海洋研究ノート, 第27巻, 第2号, pp.136-145.
- 木村尚・工藤孝浩・森田健二(2004): アマモ・リバイバル・プロジェクト, 一市民活動としてのアマモ場造成, 土木施工, 第44巻, 7号, pp.62-68.
- 島谷学・中瀬浩太・熊谷隆宏・月館真理雄(2000): アマモ種子の埋没機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.1171-1175.
- 高山百合子・上野成三・勝井秀博・林文慶・山本克則・田中昌宏(2003): 江奈湾の藻場分布データに基づいたアマモのH S Iモデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp.1136-1140.
- 高山百合子・上野成三・湯浅城之・前川行幸(2004): 播種・株植が不要なアマモ移植方法の最適移植時期について, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.1181-1185.
- 團昭紀・和泉安洋・森啓介・広澤晃・寺脇利信(1998): 底質安定化マットの播種によるアマモの繁茂, 水産工学, vol.35, No.1, pp.37-42.
- 中瀬浩太・田中裕一・檜山博昭(1992): 海浜変形予測手法を用いたアマモ場成立条件に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.1006-1010.
- 中瀬浩太・田中裕一(1993): 海浜変形予測手法によるアマモ場成立条件の現地への適用, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.1061-1065.
- 古川恵太・岡田知也・東島義朗・橋本浩一(2005): 阪南2区干潟創造実験, 一都市臨海部に干潟を取り戻すプロジェクト-, 海洋開発論文集, 第30巻, (印刷中).

マリノフォーラム21海洋環境保全研究会浅海域緑化技術開発グループ(2002):平成13年度浅海域緑化技術の開発に関する報告書, 24p.

前川行幸(2002):アマモ場再生実験～アマモ場再生の重要性～, 第2回英虞湾の再生を考えるシンポジウム講演集, pp.11-15.

前川行幸(2003):アマモ場再生実験～英虞湾に適したアマモ移植～, 第3回英虞湾の再生を考えるシンポジウム講演集, pp.16-19.

前川行幸(2004):沿岸環境創造技術の開発, 三重県地域結集型共同研究事業, 一閉鎖性海域における環境創生プロジェクト, 平成16年度研究成果発表会講演集, pp.11-16.

森田健二・竹下彰(2003):アマモ場分布限界水深の予測評価手法, 土木学会論文集, No.741,VII—28, pp.39-48.

矢野米生(2004):絶滅危惧種「コアマモ」の移植に関する試み, 一中津港海域環境調査, 土木施工, 第44巻, 7号, pp.8-14.

山本克則・小河久朗・難波信由・林文慶・越川義功・田中昌宏(2004):アマモ場造成に向けた新しい種苗生産技術, 月刊海洋, Vol.36, No.11, pp.846-850.

Abe, M., N. Hashimoto, A. Kurashima and M. Maegawa (2003): Estimation of light requirement for growth of *Zostera marina* in central Japan, Fisheries science, (in printing).

Fonseca, M. S., W. J. Kenworthy and G. W. Thayer (1998): Guideline for the conservation and restoration of seagrasses in the United States and adjacent water, NOAA's coastal ocean program, Decision analysis series No.12, National Oceanic and Atmospheric Administration, 222p.

Morita, K (2000): Restoration of eelgrass, Environmental Sciences, pp.159-164.

Phillips, R. C. (1980): Planting guideline for seagrasses, Coastal engineering technical aid, No.80-2, Coastal engineering research center, U.S. army corps of engineers, 27p.

【英虞湾】

上野成三・高橋正昭・原条誠也・高山百合子・国分秀樹(2001):浚渫ヘドロを利用した資源循環型人工干潟の造成実験, 海岸工学論文集, Vol.48, pp.1306-1310.

上野成三・高橋正昭・高山百合子・国分秀樹(2002):浚渫土を用いた干潟再生実験における浚渫土混合率と底生生物との関係について, 海岸工学論文集, Vol.49, pp.1301-1305.

上野成三(2005):英虞湾における浚渫ヘドロを利用した干潟再生工法について, ヘドロ, No.93, pp.29-35.

片倉徳男・高山百合子・上野成三・小林峯男・国分秀樹・奥田圭一(2005):浚渫ヘドロを用いた干潟再生工法におけるヘドロ混合の設計・施工計画, 海洋開発論文集, 第30巻, (印刷中).

国分秀樹・奥村宏征・上野誠三・高山百合子・湯浅城之(2004):英虞湾における浚渫ヘドロを用いた干潟造成実験から得られた干潟底質の最適条件, 海岸工学論文集, Vol. 51, pp.1191-1195.

国分秀樹(2005):英虞湾における干潟の消失と人工干潟造成, 英虞湾の再生を考えるシンポジウム2005講演集.

(財) 三重県産業支援センター(2004): 三重県地域結集型共同研究事業, 一閉鎖性海域における環境創生プロジェクト, 平成16年度研究成果発表会講演集, 34p.