

自然に近い造成干潟の地盤環境の研究

Research on Geo-Environment of Naturalized Artificial Intertidal Flat

篠崎 孝	Takashi SHINOZAKI	(復建調査設計株式会社環境技術部)
松永康司	Yasushi MATSUNAGA	(国土交通省広島港湾空港技術調査事務所)
土田 孝	Takashi TSUCHIDA	(広島大学大学院工学研究科)
高橋俊之	Toshiyuki TAKAHASHI	(復建調査設計株式会社環境技術部)
川上佐知	Sachi KAWAKAMI	(復建調査設計株式会社環境技術部)

本研究では、現地調査等により自然干潟に近い生物生息がみられる造成干潟における地盤環境を明らかにした。干潟基盤表層の性状についてみると底生生物の種類数は、シルト・粘土分が概ね 10%程度でピークを示し、5~20%において平均値を上回る種類数が出現していた。COD 含有量については概ね 2~3mg/g 程度でピークを示し、1~5mg/g において平均値を上回る種類数が出現していた。強熱減量については概ね 2%程度でピークを示し、1~4%において平均値を上回る種類数が出現していた。また、干潮時における干潟表面からの地下水位の低下幅については概ね 10cm 以下、サクシオンについては概ね 1kPa 以下で平均値を上回る種類数が出現していた。また、浸透流解析の結果、中詰材に活用されたシルト・粘土分を主体とする浚渫土砂が、地下水位の低下幅の抑制に寄与していることを明かした。

キーワード：造成干潟，サクシオン，地下水位，浚渫土砂，浸透流解析 (IGC: B-12/E-7)

1. はじめに

2003 年より「自然再生推進法」が施行され、沿岸域においては干潟や藻場の再生（保全、修復、創造）が強く求められている。また、瀬戸内海においても、これまでの開発等に伴い失われた環境の回復を目指し、環境修復にかかる施策を総合的かつ計画的に推進するための「瀬戸内海環境修復計画」が平成 17 年 1 月に策定された。この中では、今後約 20 年間で藻場・干潟等の浅場を約 600ha 修復することが目標とされている。そのような行政の取り組みをはじめとして、市民にも瀬戸内海沿岸域の環境修復の必要性及び重要性が認識されつつある。

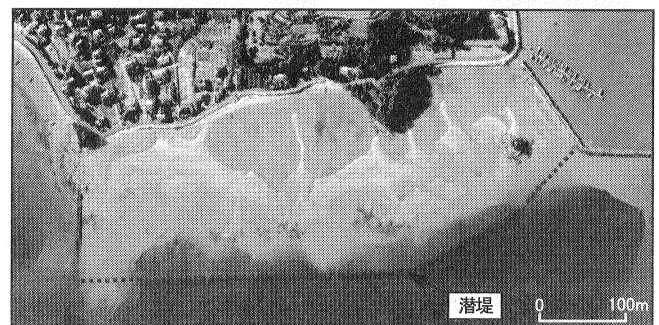
しかし、藻場・干潟の再生に必要な科学的な知見は不足しており、またそれを実現する為の設計・施工・維持管理技術の確立も不十分である。そのため、現状では藻場・干潟等の再生に対するニーズと造成技術のギャップが大きく、造成干潟に対する否定的な評価¹⁾も存在する。

一方で、浚渫土砂を中詰材に活用して造成された尾道糸崎港海老地区造成干潟（以下、海老地区造成干潟という。）は、周辺の自然干潟と同程度の底生生物現存量及び貴重種の生息が報告²⁾されており、自然に近い砂泥質の造成干潟として社会的にも高く評価（2003 年度土木学会環境賞受賞）されている。しかし、海老地区造成干潟がなぜ自然に近い生物生息機能を発揮する干潟となったのか、その要因は明らかになっていない。本研究は、海老地区造成干潟の地盤環境に着目し、現地調査等により機能発揮要因と物理的必要条件を明らかにし、その実現手法を提案することを目的とする。

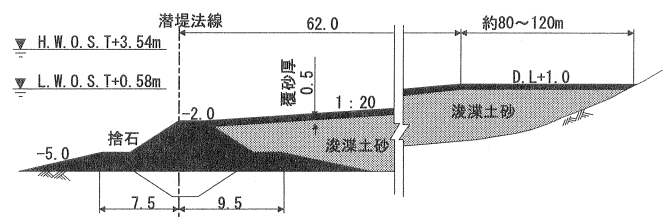
2. 海老地区造成干潟の現地調査

2.1 海老地区造成干潟の概要

調査対象の海老地区造成干潟は、広島県尾道市東部の小半島の南岸に位置する。造成規模は、面積約 16ha、岸沖方向約 200m、汀線方向約 600m である（図-1 (a)）。断面構造は、沖側に捨石構造の潜堤を設置し、中詰材に尾道糸崎港の港湾整備で発生したシルト・粘土分主体の浚渫土砂を有効活用している。また、表層は 0.5m 厚の覆砂が行われている。覆砂は、広島県忠海沖及び高根島沖の海底から採取された中央粒径約 2.0mm、シルト・粘土分含有量わずか 0.3%の海砂を用いている。（図-1 (b)）



(a) 海老地区造成干潟の平面形状



2.2 調査方法

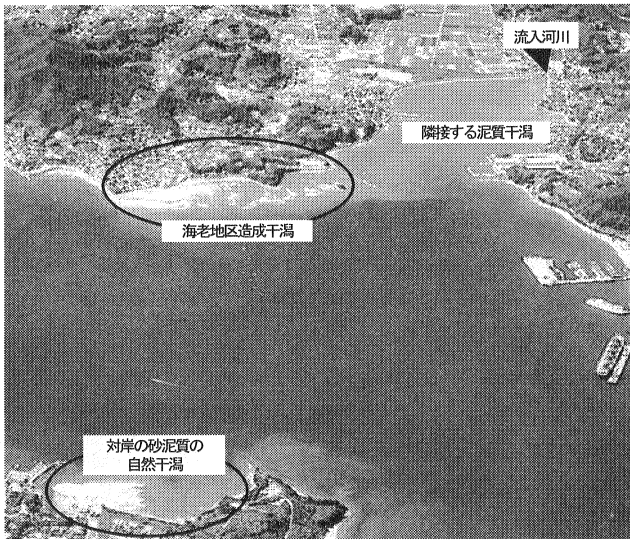
図-2(a), 図-2(b)に示す海老地区造成干潟の15地点及び対岸の砂泥質の自然干潟3地点において、干潟表層の底生生物、地盤高、底質及び保水性等について夏季、秋季及び冬季の3回の現地調査を実施した。

底生生物の試料採取は、各調査地点においてステンレス製採泥器(25cm×25cm)を用いて干潟表面から20cmの深さまでの底質を採取し、1mm目のふるいに残ったマクロベントスの種類数、個体数及び湿重量の計測を行った。

底質は、底生生物と同時期に同一地点、同一層の土壌を採取し、粒度組成、COD及び強熱減量の分析を行った。

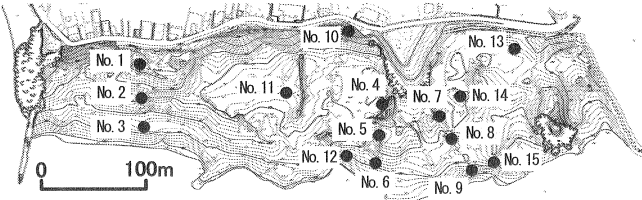
干潟基盤表層の保水性は、多孔塩ビパイプを干潟表面に突き刺し、地下水の見える深さまでパイプ内の土壌を取り除き、安定のために1時間程度放置した後、最干潮時を中心に干潟基盤表面からの地下水位の低下幅を計測した。また、サクシオンについては埋設型土壌水分センサー³⁾及び携帯型土壌水分センサーにより最干潮時を中心に計測した。サクシオンとは土壌間隙中の水分保持の程度を評価する指標であり、間隙空気圧 U_a と間隙水圧 U_w の差 (サクシオン = $U_a - U_w$) で定義される。干潟基盤表層の水分保持の程度とサクシオンの概略的な対応は、サクシオンの値が小さい程、水分保持の程度が高く、サクシオンの値が大きい程、水分保持の程度が低い状態を示す。また、サクシオンは底生生物の巣穴の掘削活動や巣穴住活動と密接な連動があることが佐々ら⁴⁾によっても指摘されている。

なお、造成時(平成元年)の覆砂材料中には0.3%しか含有されていなかったシルト・粘土分が、現状の干潟基盤表層の覆砂中には鉛直方向にほぼ均一に10%程度含有されている。(図-3)



(a) 海老地区造成干潟と周辺の自然干潟の位置関係

※: 図中のコンター線は地盤高について10cm間隔で表示



(b) 海老地区造成干潟の地形及び調査地点

図-2 海老地区造成干潟の周辺地形及び調査地点

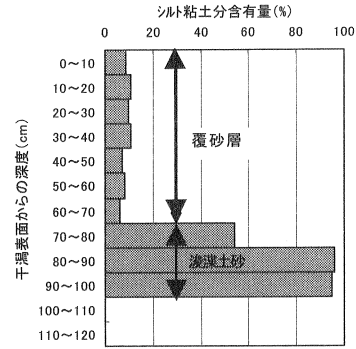


図-3 干潟基盤中の細粒分含有率の鉛直分布

想定される覆砂中へのシルト・粘土分含有の供給源としては以下の3つが挙げられる。

- 供給源① 中詰材に活用した浚渫土砂からの供給
- 供給源② 海老地区造成干潟背後陸域からの供給
- 供給源③ 隣接する泥質干潟及び流入河川からの供給

シルト・粘土分の供給源を明らかにするために、以上想定される各供給源の底質から抽出されたシルト・粘土分について走査型電子顕微鏡により粒子形状及び含有される珪藻の微化石等の観察を行うとともに、表-1に示す項目について蛍光X線測定装置による化学分析を実施した。さらに、定方位連続地層採取法⁵⁾により造成干潟表層から浚渫土砂に至る連続した不攪乱地層採取を実施した。

表-1 化学分析項目

項目	試験項目
分析成分	SiO ₂ TiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ MnO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O P ₂ O ₅

3. 調査結果及び解析

調査結果の解析では、今回実施した調査に加え、海老地区造成干潟で過去に実施された既存調査結果^{6), 7), 8)}も含めて解析した。

3.1 干潟基盤の地形的安定

図-4に示すとおり、造成当初、在来地盤及び浚渫土砂の圧密沈下が要因と推定される約1m程度の地盤低下が観測された。現地の土質条件に基づき実施した圧密沈下計算結果によると、造成後4年間で圧密度は90%程度まで進行し、約0.9mの圧密沈下が発生する結果となった。これは現地観測の結果と良く整合する。

また、海老地区造成干潟の場合、平常時で平均波高10cm程度台風等の異常時においても有義波高50cm未満の非常に静穏な海域に立地している。そのため圧密沈下収束後は、砂州地形等の一部を除いて全体としては短期的及び長期的にも10~20cm程度の地形変化であり、侵食または堆積への一方向への地形変化はみられず、長期的に安定した地形を維持している。なお、海老地区造成干潟では地盤沈下がほぼ収束し数年を経過した頃よりアマモの生育が確認され、その後も分布範囲を拡大している。つまり、アマモの生育に代表される生態系の形成には、地盤の安定が重要であると考えられ、海老地区造成干潟に隣接する別の造成干潟においても同様のことが指摘されている⁹⁾。

3.2 干潟基盤の物理的条件と底生生物の関係

図-5 に、底生生物の種類数と地盤高の関係を示す。底生生物の種類数は、地盤高が概ね平均水面 M. S. L.+2.06m より低い場合に平均値を上回る種類数が出現している。

図-6、図-7 及び図-8 に、底生生物の種類数とシルト・粘土分、COD 含有量及び強熱減量の関係を示す。底生生物の種類数は、シルト・粘土分が概ね10%程度でピークを示し、5~20%において平均値を上回る種類数が出現している。また、COD 含有量が概ね2~3mg/g 程度でピークを示し、1~5mg/g において平均値を上回る種類数が出現している。強熱減量についても概ね 2%程度でピークを示し、1~4%において平均値を上回る種類数が出現している。以上、地盤高及び干潟基盤表層の性状(シルト・粘土分含有量、COD 含有量及び強熱減量)と生物生息の関係に関する知見は、他の干潟における既存の調査・研究事例^{10), 11), 12)}でも報告されており、同様の傾向が海老地区造成干潟においても確認された。

図-9 に、底生生物の種類数と干潮時の干潟基盤表面からの地下水位の低下幅及びサクションの関係を示す。干潟基盤表層の保水性が高い場合、つまり地下水位の低下幅及びサクションが小さい程、底生生物の種類数は多くなる傾向を示している。干潟と砂浜の基本的な違いとして、一般に干潟では干潮時にも干潟基盤表面からの地下水位の低下幅が小さく、干潟表層に湿潤な環境が維持される。このことが生物生息の重要な条件であることが、姜ら¹³⁾によっても指摘されている。

3.3 覆砂中へのシルト・粘土分の供給源の解明

表-2 に干潟基盤表層の覆砂に含有されるシルト・粘土分の供給源として想定される各箇所のシルト・粘土分粒子の電子顕微鏡観察結果の概要を示す。また、写真-1 に代表的な電子顕微鏡写真を示す。シルト・粘土分に含有される珪藻の微化石について、造成干潟覆砂表層と造成干潟背後陸域及び隣接する泥質干潟及び流入河川を比較すると、造成干潟覆砂表層は中心目の沿岸性の種類であるのに対して、造成干潟背後陸域及び隣接する泥質干潟及び流入河川は羽状目の淡水~汽水性の種類となっている。一方、造成干潟の覆砂表層、覆砂下層及び中詰材の浚渫土砂については、シルト・粘土分の粒子形状、含有される珪藻の微化石の種類及び珪質海綿骨針の含有量には有意な相違は認められない。

また、表-3に示す化学分析結果についてクラスター解析による鉱物組成の類似性評価を行った。なお、SiO₂は珪藻等の植物プランクトンの被殻、CaOは貝類の殻等を構成する主要物質であり、造成後の生物生息の影響を受けている可能性があることから解析データから除外した。また、サンプリング誤差を低減するために各地点3検体分析を実施し、その平均値を用いて解析した。図-10にクラスター解析結果を示す。覆砂表層と覆砂下層及び中詰材の浚渫土砂に含有されるシルト・粘土分の化学分析結果は比較的類似している。しかし、覆砂表層と造成干潟背後陸域及び隣接する泥質干潟及び流入河川の河床堆積物に含有されるシルト・粘土分は、ほとんど類似していない。つまり、覆砂表層のシルト・粘土分は、海老地区造成干潟背後陸域や隣接する泥質干潟及び流入河川から供給された可能性は低く、中詰材の浚渫土砂から供給された可能性が高い。この結果は顕微鏡観

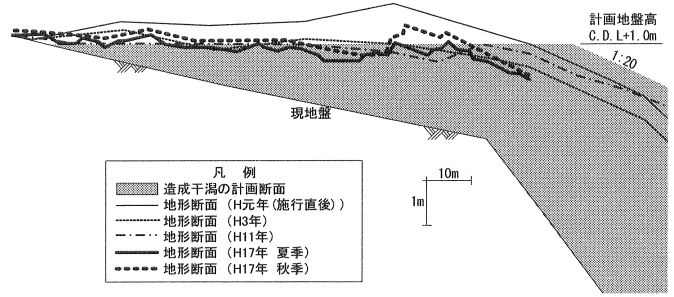


図-4 海老地区造成干潟の経年的な地形変化

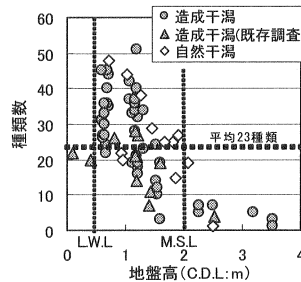


図-5 干潟基盤の地盤高と底生生物種類数の関係

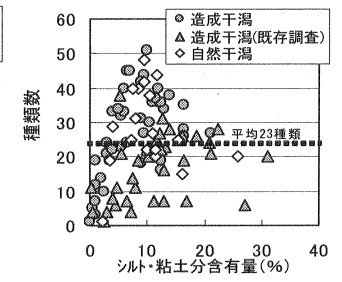


図-6 干潟基盤のシルト・粘土分含有量と底生生物種類数の関係

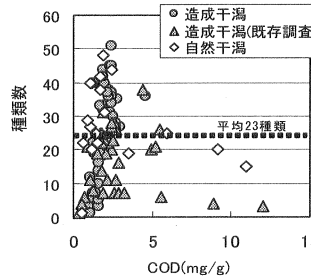


図-7 干潟基盤の COD 含有量と底生生物種類数の関係

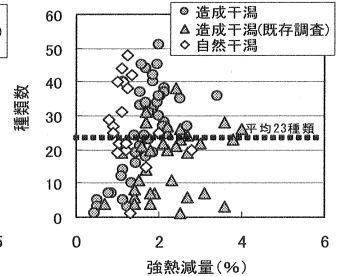


図-8 干潟基盤の強熱減量と底生生物種類数の関係

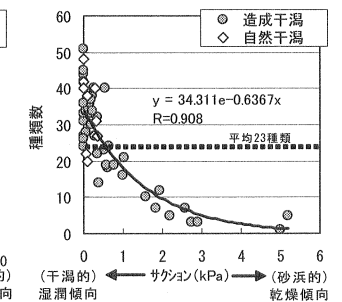
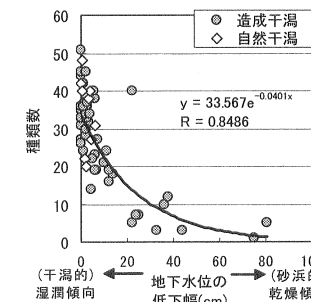


図-9 干潟基盤の保水性(地下水位の低下幅及びサクション)と底生生物種類数の関係

表-2 シルト・粘土分粒子の電子顕微鏡観察結果の概要

調査地点	試料番号	粒子形状 角ばった塊状 平板状 表面がざらざらとした塊状	珪藻												
			特徴的な種類												
			目	羽状目	コアミケイソウ属	タイコケイソウ属	タラシオケイソウ属	フナガタケイソウ属	ササノハケイソウ属	コメツブケイソウ属	クチビルケイソウ属	珪質海綿骨針			
海老地区 造成干潟	覆砂 表層	U-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		U-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		U-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	下層	M-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		M-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		M-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	中詰材の 浚渫土砂	L-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		L-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		L-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
海老地区背後陸域 (小水路河床堆積物)	C-1			○	○									×	
	C-2			○	○									×	
	C-3			○	○									×	
隣接する泥質干潟及 び流入河川(河口部 河床堆積物)	R-1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	
	R-2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	
	R-3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	

※: 粒子形状、珪藻については該当または確認されたものを○としている。
珪質海綿骨針については、○: 多く含む、△: まれに含む、×: 含まない

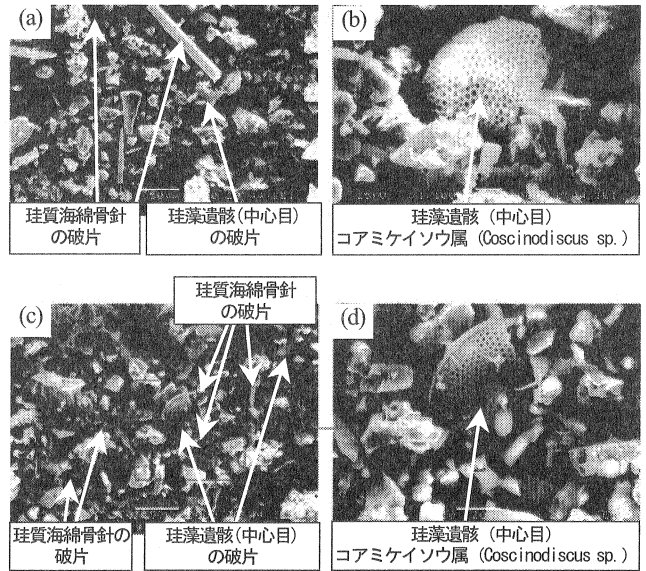


写真-1 干潟基盤覆砂表層 (a), (b) と中詰材の浚渫土砂 (c), (d) のシルト・粘土分粒子の電子顕微鏡写真

表-3 化学分析結果

調査地点	試料番号	Al ₂ O ₃ wt. %	Fe ₂ O ₃ wt. %	MnO wt. %	MgO wt. %	Na ₂ O wt. %	K ₂ O wt. %	TiO ₂ wt. %	P ₂ O ₅ wt. %
海老地区造成干潟	表層 U	15.57	4.97	0.09	2.09	3.13	2.39	0.62	0.12
	下層 M	16.51	5.51	0.11	2.39	3.16	2.47	0.65	0.12
海老地区背後陸域 (小水路河床堆積物)	中詰材の浚渫土砂 L	17.17	5.52	0.10	2.19	2.56	2.50	0.66	0.09
	C	15.11	5.28	0.23	0.78	2.72	2.01	0.46	0.73
隣接する泥質干潟及び流入河川(河口部河床堆積物)	R	15.27	5.72	0.12	1.37	2.12	2.39	0.83	0.23

察の結果とも良く整合する。

次に中詰材の浚渫土砂のシルト・粘土分が覆砂表層に含有されることとなった要因について考察する。

図-11に海老地区造成干潟の覆砂表層のシルト・粘土分含有量の経年変化を示す。覆砂材料のシルト・粘土分含有量の初期値0.3%が、造成後最初の調査(平成2年)には2.7%、平成3年には4.5%、そして平成7年には11.3%となり、その後不規則に増減しつつ概ね10%前後で推移している。海老地区造成干潟の覆砂の施工は、水搬施工によって実施されている。水搬施工は、覆砂材を大量の水と一緒に排砂管より噴出する工法であり、施工時に浚渫土砂表面のシルト・粘土分の巻き上げが発生したと考えられる。つまり、覆砂工事完了(平成元年10月)から約半年後の平成2年3月のシルト・粘土分含有量の初期増加は、覆砂施工時の浚渫土砂の巻き上げによる覆砂中への混入が要因である可能性が高い。しかし、平成3年以降の時間経過に伴うシルト・粘土分含有量の増加は、覆砂施工時以外の要因によるものと考えられる。

筆者らはシルト・粘土分を含む覆砂層に波浪による水圧変動が作用することにより、覆砂層中のシルト・粘土分が上方に移動し表面から流出する可能性があること、シルト・粘土分の塑性が流出のしやすさに大きく影響していることを室内実験から確認¹⁴⁾している。そこで、海老地区造成干潟でシルト・粘土分が維持されている要因として覆砂下位の浚渫土砂からの供給について検討を行った。図-12に示すように、浚渫土層(5cm)の上に覆砂層(10cm)がある地盤に変動水圧を载荷し、载荷前後の覆砂層内のシルト・粘土分含有率を調べた。その結果、シルト・粘土分の覆砂層内への移動はみられなかった。

ただし、海老地区造成干潟においては干潟基盤表層に多くの底生生物の巣穴が確認された。定方位連続地層採取法により採取した海老地区造成干潟の鉛直方向の地層において、スナモグリ類の巣穴が覆砂から覆砂下位の浚渫土砂にまで到達していることが確認された(写真-2(a))。スナモグリ類は巣穴を形成す

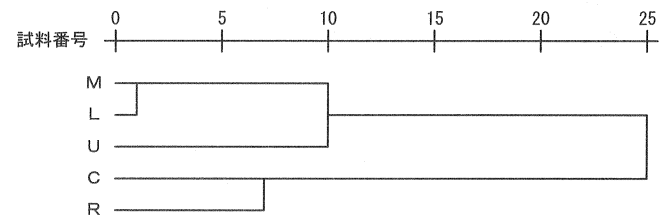


図-10 鉱物組成分析に基づくクラスター解析結果(試料番号は表-3に示されるとおりである。)

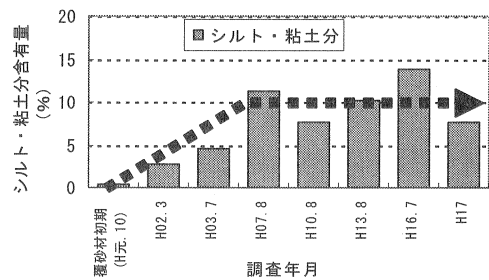


図-11 海老地区造成干潟覆砂表層のシルト・粘土分含有量の経年変化

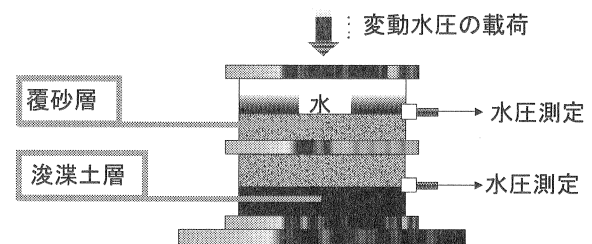
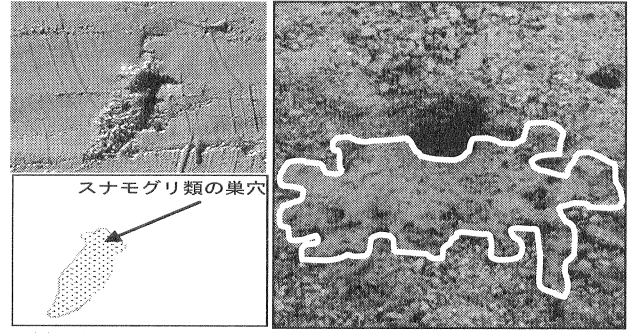


図-12 浚渫土砂と覆砂層への変動水圧载荷実験

る際、下方の堆積物を上方へ移動させて巣穴外部へ運搬する。今回の調査によると、海老地区造成干潟のスナモグリ類の生息密度は、平均約19個体/m²が確認されている。また、カニの巣穴とみられる巣穴からもシルト・粘土分が干潟基盤表層に供給されている状況も確認された(写真-2(b))。

干潟造成後に中詰材の浚渫土砂のシルト・粘土分が覆砂中へ供給された要因の一つとして、スナモグリ類をはじめとする底生生物による擾乱作用が存在することが明らかとなった。



(a) 浚渫土砂中のスナモグリ類の巣穴 (b) カニと思われる巣穴からのシルト・粘土分の供給

写真-2 底生生物による干潟基盤の擾乱の痕跡

4. 造成干潟の機能発揮要因と物理的必要条件

調査・解析結果より、海老地区造成干潟における生物生息機能発揮の連関を整理すると図-13のとおりとなる。

まず、海老地区造成干潟の立地条件として、波浪が非常に静穏な海域にあるため干潟基盤は10~20cm程度の地形変化(浸食/堆積)を繰り返しつつも、長期的に安定した地形を維持していると考えられる。

次に、造成後約4年程度で収束したと推定される圧密沈下後の干潟基盤の地盤高が、生物生息に適した平均潮位よりも低い地盤高を形成したものと考えられる。

また、覆砂施工時に、水搬施工により中詰材に活用された浚渫土砂表面のシルト・粘土分が巻き上げられ、覆砂中に一部混入した。その後時間経過とともに生物擾乱等の作用により、中詰材の浚渫土砂からシルト・粘土分が覆砂中に徐々に供給・含有され、それらシルト・粘土分は有機物の吸着を促し、生物生息に適した干潟基盤の性状に変化したものと考えられる。

更に、覆砂中のシルト・粘土分は覆砂部分の透水性を低下させ、中詰材の浚渫土砂は覆砂下位の難透水層として機能し、地下水位の低下を抑制すると共に、水分保持の効果により保水性の高い干潟基盤を形成したものと考えられる。

以上、整理すると図-14に示すとおり、海老地区造成干潟の地盤環境については、静穏な波浪条件による干潟基盤(地形)の安定、生物生息に適した干潟基盤の地盤高、干潟基盤表層の性状(シルト・粘土分及び有機物含有量)及び保水性の4つの物理的必要条件が満足され、干潟基盤の長期的な安定及び干潟生態系の復元力の発揮が可能となり、自然に近い生物生息機能を生揮する造成干潟になったものと考えられる。

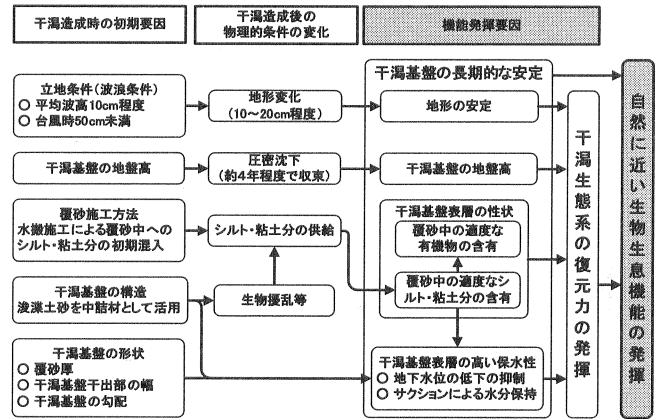


図-13 海老地区造成干潟の機能発揮の連関図 (インパクト・レスポンス・フロー)

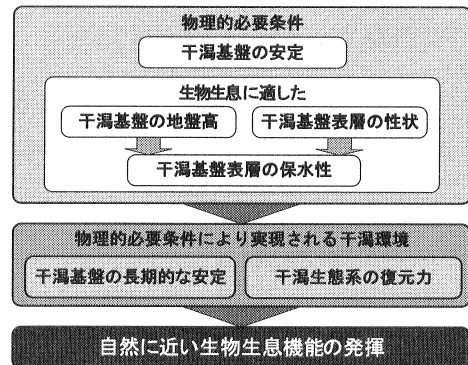


図-14 海老地区造成干潟の機能発揮要因とその物理的必要条件の関係

5. 干潟基盤表層の保水性と干潟形状の関係

先に干潟の機能発揮要因の1つとして挙げた「干潟基盤表層の保水性」については、これまで造成干潟の設計上、十分には考慮されていなかった項目である。本研究では、「干潟基盤表層の保水性」を実現するための指標の1つとして干出時の干潟基盤中の地下水位の低下幅に着目し、浸透流解析によって干潟の形状及び物理的条件による差異について検証した。

5.1 現況の地下水位に対する再現解析

解析に先立ち、干潟基盤表層の地下水位の浸透流解析による再現性の検証を行った。

(1) 解析条件

現況の地下水位の再現解析に用いた基盤の透水係数は、現地粒度組成より、クレーガーによるD₂₀と透水係数の関係¹⁵⁾から設定し、再現計算の断面図は、現地横断測量、覆砂厚調査を実施し設定した。

また、陸側境界の地下水位は、海老地区造成干潟において1潮汐間の連続観測、干出時の干潟基盤中の地下水位は横断的な変化点において塩ビパイプを用いて計測した。

(2) 支配方程式

干潟域では干出時に大気圧以下の不飽和領域が出現する。こうした飽和・不飽和領域の浸透特性を統一的に取り扱う浸透流解析モデルはDarcy則に基づき、以下のとおりとなる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - q = (\beta S_s + C(\psi)) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 K_x, K_z は x, z 方向の透水係数、 ψ は圧力水頭、 S_s は比貯留係数、 $C(\psi) \equiv d\theta/d\psi$ は比水分容量、 β は以下のとおりである。なお、不飽和浸透特性は文献 (16), (17) より設定した。

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{： 不飽和領域} \\ 1 & \text{： 飽和領域} \end{cases} \quad \dots \dots (2)$$

また、岸側及び沖側の境界では観測値より水位条件を与え、干潟表面は潮汐の変動に応じて水の出入りがあるように浸出面とし、最下端では不透水面として取り扱った。

(3) 再現性の検証結果

再現計算の結果を図-15に示す。浸透流解析により干潟基盤中の地下水位変動を精度良く再現でき、適用モデルの妥当性が確認された。

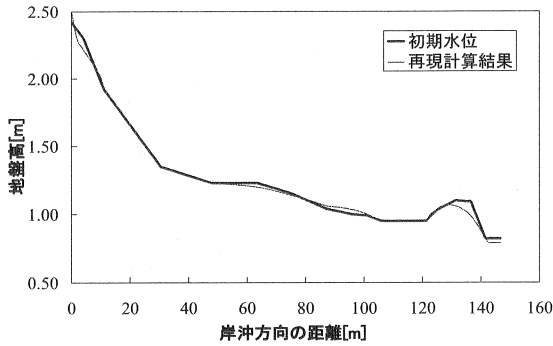


図-15 干潟基盤中の地下水位の現況再現結果

5.2 基盤特性の違いによる地下水位変動特性の解析

(1) 解析ケース

本研究では、表-4に示す干潟基盤の各種物理パラメータ（覆砂下位の浚渫土砂の有無、覆砂厚、透水係数、地盤高、テラス幅及びテラス勾配）を変化させた場合の地下水位の低下幅に与える影響の程度を解析した。また、検討に当たっては海老地区造成干潟の平均的な断面を基本的なモデル断面として設定し、潮汐の振幅は海老地区の干満差 2.96m と同程度として以下の式で与えた。

$$l = z_0 + A \cos(at - \epsilon) \quad \dots \dots (3)$$

表-4 浸透流解析ケース

解析 case	パラメータ		干潟基盤構造		干潟基盤性状	干潟基盤(テラス)形状		
	浚渫土砂の有無	覆砂厚	浚渫土砂の有無	覆砂厚	覆砂部の透水係数※1 (cm/sec)	地盤高 (比高※2)	幅	勾配
case1 (浚渫土砂の有無)	case1-1	有	有	0.5 m	3.9×10^{-2}	0.5 m	150 m	flat
	case1-2	無	有	0.5 m				
case2 (覆砂厚)	case2-1	有	有	0.5 m	"	0.5m	150m	flat
	case2-2	有	有	1.0 m				
case3 (透水係数)	case3-1	有	有	0.5 m	2.9×10^{-2}	0.5m	150m	flat
	case3-2	有	有	0.5 m	4.4×10^{-2}			
	case3-3	有	有	0.5 m	6.5×10^{-2}			
case4 (テラス地盤高)	case4-1	有	有	0.5m	3.9×10^{-2}	±2.5 m	150m	flat
	case4-2	有	有	0.5m		±1.5 m		
	case4-3	有	有	0.5m		±0.5 m		
case5 (テラス幅)	case5-1	有	有	0.5m	3.9×10^{-2}	0.5 m	50 m	flat
	case5-2	有	有	0.5m			150 m	
	case5-3	有	有	0.5m			250 m	
case6 (テラス勾配)	case6-1	有	有	0.5m	3.9×10^{-2}	0.5~2.0m	150 m	flat
	case6-2	有	有	0.5m				1/100

※1 浚渫土砂の透水係数は 1.0×10^{-8} cm/sec としている
 ※2 最干潮時の水面から干潟基盤(テラス)表面までの高さ

ここに、 z_0 は平均水面、 A は潮汐振幅、 $a (= 2\pi/T)$ は潮汐の角速度、 ϵ は位相差、潮汐周期 T は半日周潮 (12.42 時間) の M2 分潮である。境界条件は、干出時岸側水位を干潟地盤高に、その他の境界は再現性の検証ケースと同じとした。

(2) 解析結果

各ケースの解析結果を、図-16に示す。また、各ケースの地下水位変動特性の特徴について以下に述べる。

【case1】浚渫土砂の有無による地下水位変動特性

case1-1(覆砂下位に浚渫土砂が存在する場合)では、地下水位の低下幅は約 20cm であった。一方、Case1-2(覆砂下位に浚渫土砂が存在しない場合)では、地下水位の低下幅は約 30cm であった。覆砂下位に浚渫土砂を中詰め材として活用した 2 層構造の干潟では、浚渫土砂が難透水層として機能し、地下水位の低下幅を抑制する効果がある。

【case2】覆砂厚の違いによる地下水位変動特性

覆砂厚が薄い場合、つまり case2-1(覆砂厚 0.5m)は、case2-2(覆砂厚 1.0m)より、地下水位の低下幅は小さくなっているもののその差は約 3cm であり、覆砂厚の違いによる影響は比較的小さい。

【case3】透水係数の違いによる地下水位変動特性

透水係数の低下に応じて地下水位の低下幅は顕著に小さくなることが確認された。透水係数は、粒径及び干潟基盤(覆砂)中のシルト・粘土分の含有量が増加するほど低下することから、設計上有効なコントロールポイントなる。

【case4】比高の違いによる地下水位変動特性

比高が小さい、つまり干潮位と地盤高との差が小さく、干出時間が短くなる程、地下水位の低下幅は抑制される。

ここに、比高とは $h = z_g - l_{min}$ で表され、 h は比高、 z_g は地盤高、 l_{min} は L.W.L である。つまり、比高が大きいくほど地盤高は高い位置にあることを意味し、同時に干出時間は比高が大きいくほど長くなる。

【case5】テラス幅の違いによる地下水位変動特性

テラス先端部における地下水位の低下幅は case5-3(テラス幅 250m)が最も大きく、case5-1(テラス幅 50m) と case5-2(テラス幅 150m) とでは地下水位の低下幅に大きな差はないものの、case5-1(テラス幅 50m)の場合はテラス全体で地下水位の低下がみられる。以上より、テラス幅を長くすることにより、地下水位の低下幅は抑制されるが、あるテラス幅以上になるとテラス幅の延長による地下水位の低下幅抑制の効果がほとんどなくなることが確認された。つまり、テラス幅を長くすることは、地下水位低下抑制の効果自体よりも、地下水位の低下幅が小さい干潟基盤を相対的に広く確保できることに意義がある。

【case6】テラス勾配の違いによる地下水位変動特性

case6-1 (テラス勾配 flat) と case6-2 (テラス勾配 1/100) の両ケースのテラス先端部の地下水位の低下幅には、ほとんど差異はみられない。しかし、1/100 の勾配がある case6-2 においてはテラス先端部だけではなく、地盤高が高く、一番早くから干出し始める岸側での地下水位の低下幅についても大きくなることが確認された。つまり、保水性の高い干潟基盤を空間的に広く整備するためには、テラス部に勾配を設けるより、勾配がないフラットな形状にする方が有利である。

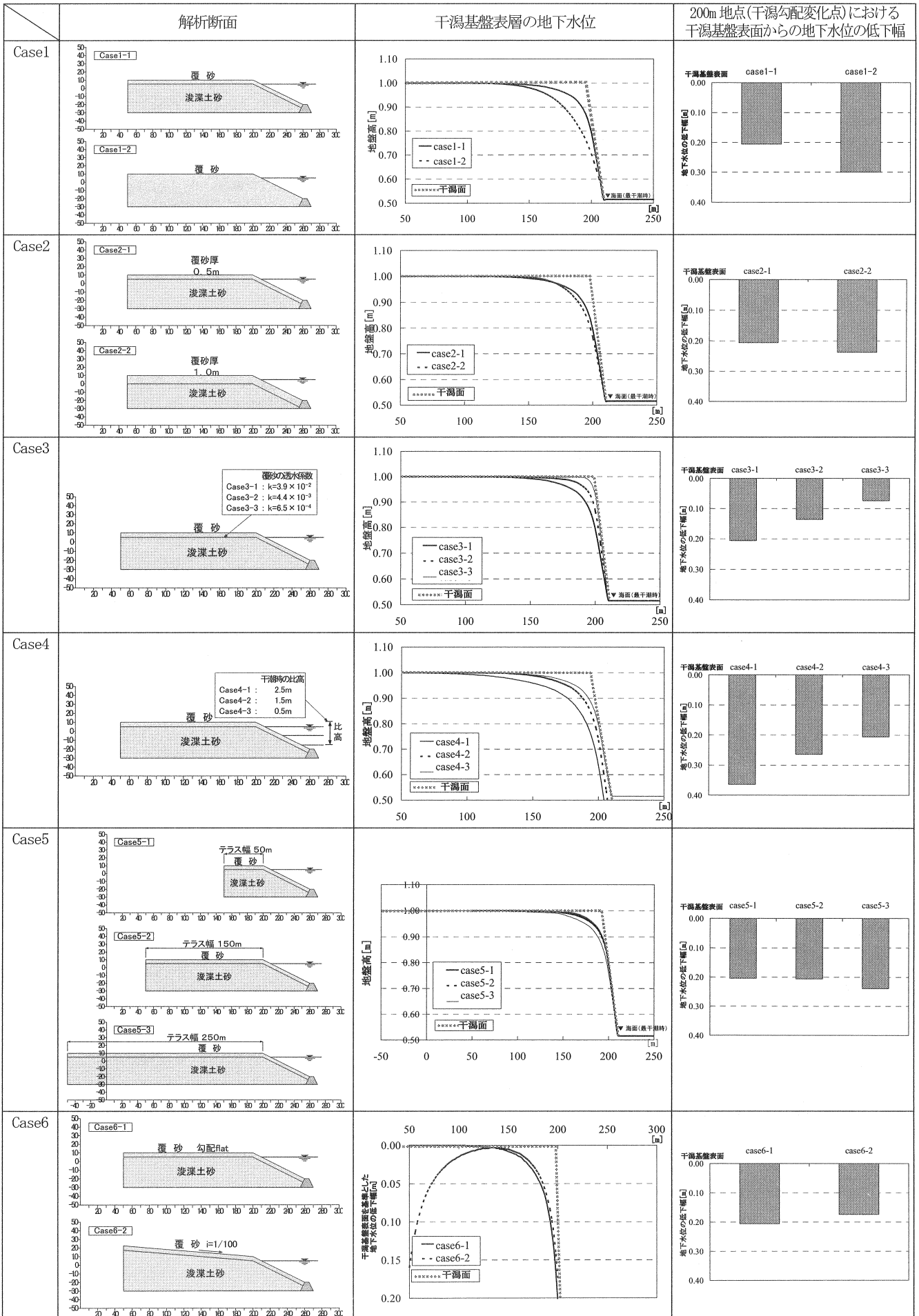


図-16 浸透流解析結果

6. まとめ

本研究の主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 海老地区造成干潟の機能発揮要因とその物理的必要条件について明らかにした。
- (2) アマモの生育に代表される生態系の形成には、圧密沈下の収束及び波浪に対する地形変化等に対する地盤の安定が重要と考えられる。
- (3) これまで知見のなかった干潟基盤表層の保水性と底生生物の現存量との関係を明らかにした。今回の調査結果によると、地下水位の低下幅については概ね10cm以下、サクシオンについては概ね1kPa以下で平均値を上回る種類数が出現している。
- (4) 覆砂下位の中詰材として活用された浚渫土砂は、覆砂中へのシルト・粘土分の供給源として機能している可能性が高いことを明らかにした。
- (5) 覆砂下位の中詰材として活用された浚渫土砂は、難透水層として機能し、地下水位の低下幅を抑制する効果があることが確認された。
- (6) 従来、浚渫土砂は、干潟を経済的に造成するための材料として認識される一方で、造成後の沈下の要因や土砂処分としてのマイナスイメージがあったが、(3)、(4)のとおり、生物生息機能の発揮の観点からも有効な材料と考えられる。
- (7) 生物生息に適した干潟基盤表層の保水性を実現するためには、シルト・粘土分を主体とした浚渫土砂の活用等により覆砂下位に難透水層を設置すること、覆砂中に適度なシルト・粘土分を含有させ透水性を小さくすること、干潮位と干潟面との比高を小さくする(干潟面の地盤高を低くすること)が有効である。

- 5) 原口強・畠山浩晃・木村晃・高木俊男・市原季彦・高田圭太、海底砂質堆積物の定方位連続地層採取方法と河口テラスの形成過程, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 566-570, 2004.
- 6) 運輸省第三港湾建設局, 尾道糸崎港人工干潟における生物生息状況調査報告書, 平成10年10月, 1998.
- 7) 運輸省第三港湾建設局, 平成11年度尾道糸崎港人工干潟総合取りまとめ調査, 平成11年11月, 1999.
- 8) 国土交通省中国地方整備局, 平成13年度尾道糸崎港干潟における生物生息状況等調査報告書, 平成14年1月, 2001.
- 9) 春日井康夫・大山洋志・高畑利信・木邑聡美, 尾道糸崎港人工干潟におけるアマモ場の回復, 平成15年9月, 2003.
- 10) 桑江朝比呂: 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, No790/VII35, pp. 25-35, 2005.
- 11) 国分秀樹・奥村宏征・上野成三・高山百合子・湯浅城之: 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, 第51巻, pp. 1191-1195, 2004.
- 12) 上野成三・高山百合子・湯浅城之: 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, 2004.
- 13) 姜閔求・高橋重雄・奥平敦彦・黒田豊和: 自然・人工干潟の地形及び地盤に関する現地調査, 港研資料, No. 1010, 2001.
- 14) 土田孝・吉牟田卓・浅海綾一: 一次元水圧変動による海底地盤表層からの細粒分移動に関する研究, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 491-495, 2006.
- 15) 土質工学会: 土質工学ハンドブック, 1982.
- 16) 土質工学会: 根切り工事と地下水-調査・設計から施工まで-, 1991.
- 17) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き, 2002.

(2007年6月29日 受付)

謝辞

本研究は、平成16年度及び平成17年度の瀬戸内海海域環境技術検討調査検討会及び委員会(委員長: 土田孝)のもとで進められた調査の成果であり、委員及び国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所の各位に感謝の意を表します。

また、当該干潟を管理する浦島漁業協同組合のご理解とご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 花輪伸一・古南幸弘: 人工干潟の問題点と課題, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 43-48, 2002.
- 2) 春日井康夫・久本忠則・中山康二・松本英雄: 広島県尾道糸崎港における干潟再生事業, 海洋開発論文集, Vol. 19 pp. 107-112, 2003.
- 3) 佐々真志・渡部要一: 砂質干潟の生態土砂環境場に果たすサクシオンの役割, 港湾空港技術研究所報告第45巻第4号, 2006.
- 4) 佐々真志・渡部要一, 砂質干潟の土砂環境場におけるサクシオン動態とその果たす役割, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 981-985, 2005.