

人工干潟の創出及び復元における斜面勾配の影響

曹 慶鎮¹・丁 仁永²・西嶋 渉³・滝本和人⁴・岡田光正⁵

¹正会員 博士(工) 群馬大学助手 工学部建設工学科(〒376-8515 桐生市天神町一丁目5-1番地)

E-mail : kjcho@ce.gunma-u.ac.jp

²工修 広島大学大学院 工学研究科博士課程後期 (〒739-8527 東広島市鏡山1丁目4-1)

³工博 広島大学助教授 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1丁目4-1)

⁴工博 広島大学助教授 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1丁目4-1)

⁵正会員 工博 広島大学教授 大学院工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山1丁目4-1)

自然と同様な人工干潟の造成に関する設計因子を明らかにすることを目的とし、復元した人工干潟における土壤構造の変化を調査した。また、広島湾内における10ヶ所の自然及び人工干潟土壤の経年変化を調べた。干潟を復元するときに傾斜を緩やかにして、シルト含有量や細菌現存量が高い土壤を投入すれば自然干潟と同様な人工干潟の造成が一時的には可能であった。しかし、造成から2年以上経過後には、斜面勾配が大きくなりシルト含有量及び細菌現存量が減少した。自然干潟と同様な土壤構造を持つ人工干潟を造成するためには、勾配を緩やかにすると土壤中に存在するシルトの流出が減少し、海水中のシルトは沈降しやすくなり、シルト含有量、細菌現存量も自然干潟と同様になると考えられる。自然と同様な人工干潟を創出しても、港堤のように維持管理の手法がされないと日常的な海水流動によって徐々に干潟土壤の洗掘が起こると考えられる。

Key Words : constructed tidal flat, creation and restoration, slope, shearing stress

1. はじめに

沿岸域の親水性機能を含め、自然にやさしい環境作りといった人間と自然が調和し得る環境保全・整備を望む声が高まってきている。人々の強い要望に応える形で水と触れ合える場の確保、あるいは海洋生物の資源保護を目的として干潟の人工的な復元・創出が行われている¹⁾⁻³⁾。人工的に造成された干潟は1970年代から現在まで約900haにものぼる⁴⁾。

人工干潟が自然干潟の代替物である以上、その構造・機能は自然干潟に準じたものにする必要がある。李ら⁵⁾⁻⁸⁾は広島湾内に存在する10ヶ所の自然及び人工干潟を調査し、その構造や機能の違い、類似性について考察している。その結果、自然干潟土壤では人工干潟土壤と比較して、シルト分や有機物量が多く、細菌密度が高いことがわかっている。また、自然干潟では表層のみ好気的でそれ以深は嫌気層が発達していたのに対し、人工干潟では土壤深部まで好気層が広がっていた。さらに李らは人工干潟の中にも自然干潟と類似の構造・機能を持つ干潟が存在することを報告し、人工干潟が自然干潟と類似した構造・機能を持てるかどうかは、造成された干潟勾

配に依存すると示唆している。すなわち、自然干潟のように勾配が1/100程度になっている人工干潟ではその構造・機能は自然干潟と類似し、勾配が大きい人工干潟では自然干潟と構造・機能が大きく異なると報告している。

では、単純に人工干潟を自然干潟並みに緩勾配に造成すれば、自然干潟と同様な構造・機能を発現し、また長期間維持できるのであろうか。造成場所が本来有する海水流動、また土砂の供給等の物理的な要因によって必ずしも造成時の状態が維持されるとは限らず、長期的には異なる状態に変化する可能性がある。

本研究では人工干潟造成後の干潟土壤の構造を土壤勾配を中心に調査することによって、造成された干潟の長期的な変化を明らかにし、人工干潟の造成における設計因子を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

(1) 対象干潟の概要

調査研究対象には自然干潟3ヶ所及び人工干潟7

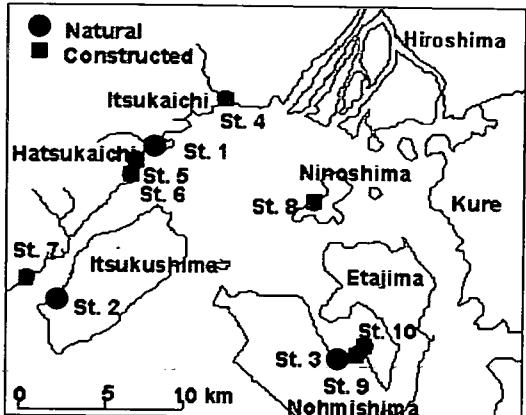


Fig. 1 Location of sampling stations for tidal flats in Hiroshima Bay area.

Table 1 Characteristics of 10 tidal flats surveyed in this study.

Origin	Site No.	Area (ha)	Year of construction	purpose
Natural	1	24.0	-	-
	2	4.7	-	-
	3	3.3	-	-
Constructed	4	24.0	1990	mitigation
	5	3.2	1996	oyster culture
	6	6.7	1996	oyster culture
	7	1.2	1984	bivalve culture
	8	5.0	1987	bivalve culture
	9	2.3	1987	bathing resort
	10	2.3	1987	oyster culture

ヶ所を選定した。Fig. 1 に対象干潟の位置を示す。これらの干潟については、1996年5月と2000年11月に調査を行った。Table 1 に調査した自然及び人工干潟の概況を示す。人工干潟はカキやアサリの水産養殖、海水浴場、消滅した干潟のミチゲーションなどの目的で造成されたものである。

St.6では1995年から1996年3月にかけて工事を実施し、潮流や波などにより洗堀を防ぐため、前浜から120mの外浜（海方面）に土留堤を気象庁が定めてある広島湾基準面から+2.5mの高さまで積み上げた。

St.9の人工干潟は、1987年に人工的に造成された干潟である。その後、1996年8月から1997年1月にかけ、海岸環境整備事業として洗堀を受けた干潟土壤の補充、及び干潮時に露出土壤面積を拡大するための覆土工事が施工された。覆土工事は前浜から外浜への距離108mまで、覆土量9,550 m³、4/100の勾配で行った。この覆土工事には長崎県産の黒色の海砂を用いたため、親水性に悪影響を及ぼすと判断された。このため韓国仁川の黄色の河口砂を用いて、

1998年1月～3月まで前浜から外浜への距離28mまで、勾配は0/100、7,960 m³覆土工事を実施した。また、2000年2～3月に前浜から外浜への距離5mまで、勾配は0/100で1,700 m³の覆土工事を行った。なお、これらの工事に関する情報は広島県大柿土木事務所から収集した。

(2) 土壌の採取

St.9の人工干潟では、覆土工事前の1996年5月と復元工事直後の1998年6月、7月、8月、10月及び12月、さらに2年後の2000年11月に土壤を採取した。干潟の土壤採取地点は気象庁が定めた広島湾基準面から+1.2mとし、汀線に沿って中央と左右3m間隔で3地点の土壤を採取し分析に供した。採取時期はいずれも大潮の干潮時とした。No.9以外の干潟では、1996年5月と2000年11月に同様な方法で土壤の採取を行った。

土壤は内径10.5cmのポリカーボネート製円型管を深さ30cmまで土壤に挿し込んで採取した。採取した土壤は実験目的によってそのまま、あるいは深さ別に分けて実験室に持ち帰った。深さ別に測定する場合、人工干潟では5cm間隔、自然干潟では0～2、2～5cm、5cm以下は5cm間隔で土壤を分けた。

(3) 土壌の物理化学的な特性

干潟土壤の構造変化を明らかにするために斜面勾配、粒径分布（シルト含有量）、酸化還元電位（ORP）及び地下水位を測定した。斜面勾配の測定は満潮時（気象庁が定めてある広島湾基準面から+321cm地点）に海岸線から海に向かって10m間隔で水深を計測して求めた。粒径分布（シルト含有量）を測定するための土壤サンプルは、蒸留水で洗浄・脱塩し、30%の過酸化水素水で有機物を分解した後、乾燥した。乾燥したサンプルはふるい法⁹⁾で礫(>4.75mm)、細礫(2.0～4.75mm)、粗砂(0.425～2.0mm)、細砂(0.075～0.425mm)、シルト(0～0.075mm)の5種類に分けた。

ORPは土壤の深さ方向の変化を測定した。硫酸還元菌などの活動に伴う変化を避けるため、測定は4℃の低温室で行った。使用した電極は直径10mmの多点電極（東亜電波製、HM-50V型）で、比較電極として飽和塩化銀電極（東亜電波製、HS-205C型）を用いた。

干潟土壤内における海水の地下水位は現場で測定した。多数の細孔（直径0.25cm）を持つ内径12cmのポ

リカーボネット製円筒管を土壤に挿し込み、地下水の見える深さまで円筒管内の土壤を取り除いた。安定のために一日以上放置後、大潮時の1996年12月26日(潮位5~9cm)、2000年12月11日(潮位5~10cm)に潮流に伴う地下水位の変化を測定した。

(4) 全菌数

土壤中の全菌数はDAPI法を用いて測定した¹⁰⁾⁻¹²⁾。土壤サンプル1 g (湿重量) をオートクレーブ滅菌した人工海水 (スーパー・マリンアートフォミュラ、千寿製薬) 9 mlに懸濁し、15分間ボルテックス(G-560, Scientific Industries, INC., New York)にかけたものを原液とした。原液を滅菌済みの人工海水で 10^{-3} まで段階希釈し、滅菌ホルマリンを終濃度が2%となるよう加え、固定した。ホルマリン固定したサンプル1mlに0.3% DAPI (4'-6-diamidino-2-phenylindole) 溶液を100 μ l加え、暗所で10分間染色した。その後、吸引ろ過装置を使用し、ファンネルにろ過滅菌したPBS(Phosphate Buffer Saline)と染色したサンプルを合計10 mlになるように入れた。これを1 ml min⁻¹の速度で吸引濾過し、ニュクレポアフィルター (ϕ 0.20 μ m, NMS, #8456) 上に染色した菌体をろ取した。ろ紙上の菌体計測には落射型蛍光顕微鏡を用いた。

(5) 流速測定

St.9 の人工干潟では海水の流速を測定し、流速から計算によってせん断応力を求めた。海水の流速測定には超音波ドップラー流速計 (ADV-field, NORTEK, INC., Norway) を用いた。測定は気象庁が定めた広島湾基準面から+1.5 m の地点、土壤表面から5 cm の高さで測定した。なお、水深が約50cm になってから測定を開始した。流速サンプリング周波数 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0.4 Hz 及び 0.2 Hz それぞれに対してデータを採取したが、2 Hz以下の周波数で求めたせん断応力は信頼性が低かったため、10 Hz でせん断応力を求めた。流速は大潮時 (1997年10月30~31日と1998年12月30~31日) に1潮流間にわたって測定した。また、測定地点は干潟中央の同じ場所で、大潮時に行った。

流速測定で得られた3方向の速度は、水平2方向及び鉛直方向であり、主流方向をu、横方向をv、鉛直方向をwとした。ここでは、干潟斜面から沖側を主流方向とした。水平流速2成分u, vの10分間平均値から式(1)に従って水平平均流速 (\bar{U}) を求めた。なお、平均時間を10分、5分及び1分間として水平流速の平均値を求めたが、平均時間が10分になると一定値が得られたため、10分間を採用した。

$$\bar{U} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

ここで、 u, v : 水平流速 (cm sec⁻¹)
 \bar{U} : 水平平均流速 (cm sec⁻¹)

(6) せん断応力の計算

干潟における流れを考えた場合、水深が浅いので変動流速は波による影響も大きいと考えられる。しかしながら、潮の往復流れや波については浅い水域では複雑な流动となっているため、分離することが極めて困難である。

したがって、本研究では潮の往復流れや波による流れ等全体の流れから変動流速成分を求め、せん断応力の形にあらわして、変動流を検討した。そのせん断応力は流速の乱れから Reynolds せん断応力¹³⁾⁻¹⁵⁾として求めた。この方法では干潟土壤表面近くのせん断応力は土壤表面のせん断応力と等しいと仮定し、各流速成分の変動流速から求めた。

全体の流れに対する変動流速成分からせん断応力を次式(2)~(7)に従って計算した。まず、2成分の水平流速を u, v とし、鉛直流速 w とすると、水平流速及び鉛直流速のそれぞれの変動流速は u', v', w' となる。各々の変動流速成分を用いて、せん断応力を求めた。

$$u' = u - U \quad (2)$$

$$v' = v - V \quad (3)$$

$$w' = w - W \quad (4)$$

$$\tau_{uw} = -\rho u' w' \quad (5)$$

$$\tau_{vw} = -\rho v' w' \quad (6)$$

$$\tau_{total} = \sqrt{\tau_{uw}^2 + \tau_{vw}^2} \quad (7)$$

ここで、

u', v', w' : 各変動流速成分(m sec⁻¹)

u, v, w : 各流速成分(m sec⁻¹)

U, V, W : 各平均流速(m sec⁻¹)

τ_{uw} : u と w 方向のせん断応力(N m⁻²)

τ_{vw} : v と w 方向のせん断応力(N m⁻²)

τ_{total} : u と w , v と w の合成せん断応力(N m⁻²)

ρ : 海水の密度(kg m⁻³)

ただし、海水の密度は20°C, 30%における1,025 kg m⁻³を用いた。また、平均流速は海洋分野では平均流速として10分平均値を用いることが多い。10, 5分など時間別平均を比較した結果、誤差は5%以内であった。従って、干潟におけるせん断応力は瞬間変動流速分布と10分間の平均値で比較した。10分間の平均値についてはまず母集団の分布、すなわち、

せん断応力が正規分布であり統計的に意味を持つことを確認した。

3. 結果及び考察

(1) 覆土人工干潟における土壤構造の経時変化

Fig. 2 は St.9 における覆土前と覆土後 6 ヶ月間の勾配変化 (a) と覆土 2 年後の勾配変化(b)を示す。Fig. 2(a)から広島湾基準面から+321cm の海岸線から沖合 40mまでの勾配が 1996 年の 2.8/100 から 1998 年の覆土工事によって 1.0/100 (1998 年 3 月の覆土工事完了時の勾配は同上の海岸線から 5mまで 0/100) に変化したことが読み取れる。しかしながら、Fig. 2(b)に示すように 2000 年には再び 3/100 (1.2/30) に戻っていることがわかった。この勾配は 1996 年とほとんど同じであり、覆土された土壤は長期的には洗掘され、もとの干潟形状に戻ったことを意味する。一方、覆土後の短期的な変化 (a) をみると斜面勾配に大きな変化はなく 6 ヶ月間は投入した土壤による緩やかな勾配は維持できていた。

干潟土壤の洗掘は、台風等によってもたらされる強い流動によって一気に起こることも考えられた。このため、広島県の約 500Km 周辺を通過した台風の記録を調べた。台風は 1998 年 9 月和歌山県に上陸した台風 7 号、台風 8 号と 10 月岡山県に上陸した台風 18 号がある。また、1999 年 9 月岡山県に上陸した台風 16 号と同月下旬市に上陸した台風 18 号があり、2000 年には台風はなかった。復元後 6 ヶ月間 (1998 年 5 月から 12 月)、広島県周辺を通過した台風が三つ(台風 7 号、8 号、18 号)あったが勾配変化はなかった。したがって、本干潟土壤の洗掘は日常的な海水流動によって起ったと推定されるが、詳細は不明である。

Fig. 3 は St.9 における広島湾基準面から +1.2m 地点の覆土前、後 (6 ヶ月間の平均) と 2 年後の土壤表面 (0~5cm) におけるシルト含有量、細菌現存量の変化を示す。覆土前のシルト含有量は 0.05%、覆土直後の 6 ヶ月間は平均 1.6% (0.8~2.2%, サンプル数 n=15) と覆土前と比較して 32 倍 (16~44 倍) 高い値になった。しかし、覆土 2 年後の 2000 年のシルト含有量は 0.96% に減少した。シルト含有量が高い土壤を覆土工事に用いたものの、それが 6 ヶ月間は維持されたが 2 年後には洗掘されて勾配が大きくなり、シルトが流出したことを意味する。

細菌現存量も同様な変化を示した。1996 年の測

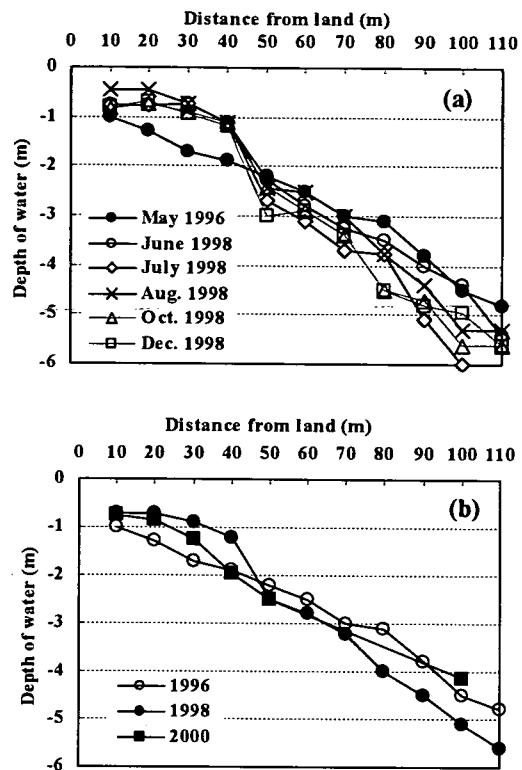


Fig. 2 Monthly (a) and annual (b) variations of slope in the tidal flat at St. 9.

定値 $0.11 \times 10^9 \text{ cells g}^{-1}$ に比較して、覆土後は $1.16 \sim 2.08$ (平均 $1.46 \times 10^9 \text{ cells g}^{-1}$) と 11~19 倍になった。しかし、覆土 2 年後の 2000 年には $1.3 \times 10^9 \text{ cells g}^{-1}$ に減少した。St.9 における覆土後のシルト含有量及び細菌現存量は覆土前と比較して高くなり、6 ヶ月間は大きな変化はなくその状態が維持できたが、2 年 8 ヶ月経過後には減少した。

シルト含有量は海水からの供給や逆に海水流動による流出など、物理的因子によって決定される。すなわち、海水の流れが強い場合、海水中のシルトは沈降しにくく、土壤中に存在するシルトは巻き上げられ、土壤外へ流出するものと考えられる。逆に、海水の流れが弱い場合には海水中のシルトが、沈降しやすくなり、土壤中に堆積すると考えられる^{16~18}。また、干潟や砂浜土壤中の細菌の大部分は粒子表面に付着しているため、土壤中の細菌現存量は構成粒子のサイズに影響を受け、粒子が小さいほど細菌現存量が大きくなる傾向がある^{19, 20}。

以上のように、干潟を覆土する時に勾配を緩やかにし、シルト含有量や細菌現存量が高い土壤を投入す

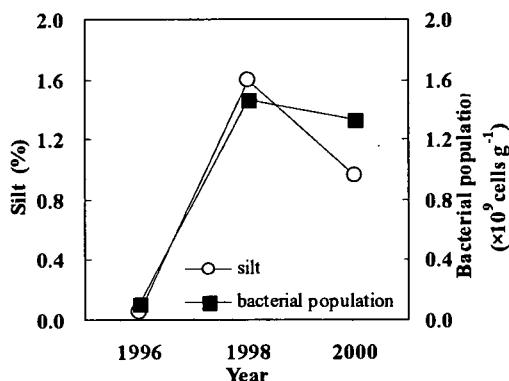


Fig. 3 Variations of silt content and bacterial population in tidal flat sediment at St. 9.

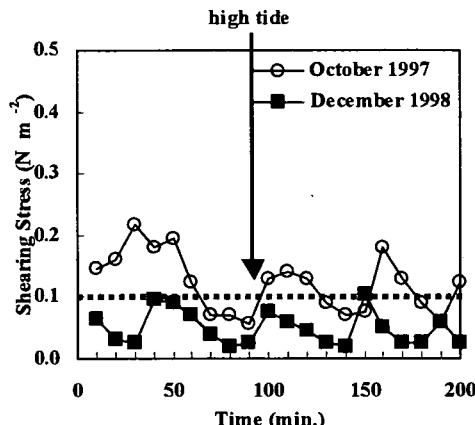


Fig. 4 Temporal variation of 90 percentiles of shearing stress in October 1997 and December 1998. Dotted line indicate the critical value (0.1 N m^{-2}) for silt movement.

れば自然干潟と同様な人工干潟の造成が可能である。そして、ある期間(本研究では6ヶ月間)は斜面勾配、シルト含有量及び細菌現存量に大きな変化はなく投入した土壤環境が維持できていた。しかし、覆土から長期間(本研究では2年8ヶ月)経過後には斜面勾配が大きくなり、シルト含有量及び細菌現存量も減少した。これは日常的な海水流動によって徐々に干潟土壤の洗掘が起こり勾配が大きくなり、シルトが流出したためと考えられる。

(2) 覆土人工干潟における海水流動の影響

覆土前後の同地点における満潮前後のせん断応力を計算した結果を Fig. 4 に示す。データは一潮汐間行った流速測定結果から 10 分毎のせん断応力を計算し、それらのせん断応力の値の頻度を%として求めた。最終的にはせん断応力をそれらの%累積分布として表した。その累積分布の 50, 75, 90% 値のどの%値を用いても、せん断応力の変動はほぼ同じ傾向を示したので、90% 値を代表値として用いた。その結果、せん断応力は覆土前(1997 年 10 月)と比べて覆土後(1998 年 12 月)には低くなっていることがわかった。

シルト(0.075mm)が移動する限界せん断応力をして Mehta²¹⁾ らの実験値と岩垣の式²²⁾ を用いて計算した $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ を用いて、覆土前(1997 年 10 月)と後(1998 年 12 月)のせん断応力がシルト限界せん断応力を越える割合を計算した(Fig. 5)。なお、土壤の粘着力については考慮されていない。シルトの限界せん断応力を越える割合は、それぞれ 3~28%

(平均 14.4%) と 0~11% (平均 3.2%) であった。

なお、風速のような気象条件は海水流動に影響を与える。このため、各流速測定日の風速を気象庁の記録から調べた。覆土前(1997 年 10 月)、ならびに覆土後(1998 年 12 月)における満潮後 10 分間隔の平均風速はそれぞれ 3.2 ($2.5\sim4.9$, $n=8$), 4.6 ($1.5\sim5.9$, $n=8$) m sec^{-1} であった。覆土前より覆土後がむしろ高い風速を示し、風速の影響より勾配の影響が大きかったと考えられる。

以上の結果は、緩勾配の干潟に変えることによってシルトが流出しにくくなることを意味する。しかしながら、長期的には運び込まれた土壤が流出し、覆土前の土壤勾配に戻ったことから考えると干潟を緩勾配にすることによって日常的な流動条件を弱めただけでは必ずしも十分ではないと考えられる。

(3) 広島湾干潟における勾配と土壤構造の関係

自然と同様な人工干潟の設計因子として勾配が重要なことを明らかにするために、1996 年と 2000 年における広島湾 10 カ所の干潟調査の結果を用いて勾配とシルト含有量、細菌現存量と関係について検討した。

Fig. 6 は調査干潟における勾配の変化を示す。自然干潟(St. 1, 2, 3)の勾配はほぼ同じあるいは緩やかになった。人工干潟(St. 4, 6, 7, 8)では高くなった。また、自然と同様な人工干潟(St. 10)の勾配も若干高くなった。これから人工干潟は干潟土壤の洗掘が起こり、勾配が高くなる傾向にあることを示す。しかし、人工干潟(St. 6)の勾配変化は自然と同様

な人工干潟 (St. 10) より少なかった。St.6では1995～1996年に外浜に潜堤（コンクリートブロック）を設置しており、干潟土壤の洗掘が起こり難くなつたと考えられる。したがって、このように自然と同様な人工干潟を創出しても、潜堤のように維持管理の手法がされないと日常的な海水流動によって徐々に干潟土壤の洗掘が起ると考えられる。

Fig.7は広島湾干潟における勾配とシルト含有量(a)、細菌現存量(b)と関係を示す。自然干潟の勾配は1.6/100以下であり、シルト含有量と細菌現存量はそれぞれ2.7～8.7%と $1.6 \sim 2.5 \times 10^9 \text{ cells g}^{-1}$ であった。1996年と2000年における自然と同様な人工干潟 (St.10) の勾配は0.7/100, 1.1/100であり、シルト含有量と細菌現存量もそれぞれ2.6, 8.2%と2.3, 4.4× $10^9 \text{ cells g}^{-1}$ でほぼ自然と同じ値を示した。人工干潟の勾配は点線円の2ヶ所を除いて1.1～4/100であり、シルト含有量と細菌現存量はそれぞれ0.03～1.28%と $0.1 \sim 1.3 \times 10^9 \text{ cells g}^{-1}$ であった。李ら⁷⁾によると自然干潟の勾配が人工干潟より小さく土壤中のシルト含有量が人工干潟より多くその結果として細菌数も増加したと推測された。したがって、勾配が緩やかになるにつれてシルト含有量ならびに細菌現存量が大きくなることがわかった。

勾配が1/100以下であってもシルト含有量と細菌現存量が低い点線円の2ヶ所は1996年のSt.6とSt.7の結果（勾配0.4/100, 0.7/100, シルト含有量0.9, 0.4%, 細菌現存量0.4, $0.2 \times 10^9 \text{ cells g}^{-1}$ ）である。これはカキ養殖場として造成した直後のデータであり、造成に用いた土壤の含有量が低かったためと考えられる。また、勾配が3.8/100と高くて、シルト含有量と細菌現存量が低い値を示した1点（細菌現存量 $1.3 \times 10^9 \text{ cells g}^{-1}$, シルト含有量0.96%）は、1998年に覆土工事を行って2年経過後の2000年のSt.9の結果を示す (Fig.3参照)。

Fig.8は広島湾干潟における勾配と大潮における地下水位の最低値(a), ORP が正の値を示す深さすなわち、酸化層の深さ(b)との関係を示す。電極の長さ(30cm)の限界で-25cm以上の深さは-25cmとした。自然干潟、自然と同様な人工干潟及び人工干潟の大潮における地下水位の最低値はそれぞれ-1.5～-3, -0.5～-2 及び-12～-37cm であった。また、それらの酸化層はそれぞれ-1～-7, -15～-25以上及び-2～-3cm であった。勾配が緩やかになるにつれて最低地下水位が浅くなり、ならびに酸化層の厚さは小さくなることがわかった。これは勾配が大きくなるにつれてシルト含有量が減少し (Fig.7), 空隙率が増加したため海水が浸透する透水層が厚くなつ

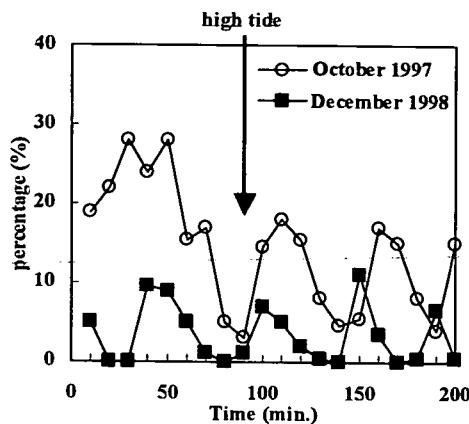


Fig. 5 Temporal variation of the percentage of shearing stress larger than the critical value ($0.1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$) for silt movement in October 1997 and December 1998.

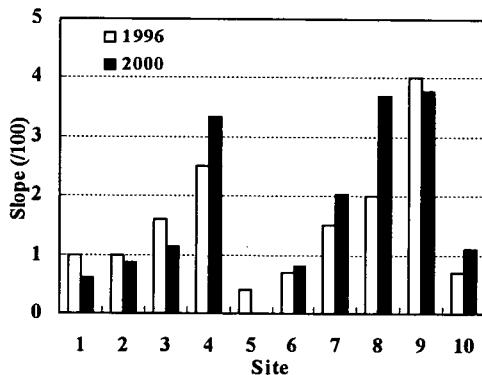


Fig. 6 Variations of slope in tidal flats in 1996 and 2000 at Hiroshima Bay area.

たために酸化層が厚くなつたと考えられる。

したがって、自然干潟と同様な土壤構造を持つ人工干潟を造成するためには、まずシルトが流出し難くするために干潟の斜面勾配を緩やかにすることが重要である。また、勾配を緩やかにすると土壤中に存在するシルトの流出が減少し、海水中のシルトは沈降しやすくなり、シルト含有量、細菌現存量も自然干潟と同様になると考えられる。しかしながら、自然と同様な人工干潟を創出しても、潜堤のように維持管理の手法がされないと日常的な海水流動によって徐々に干潟土壤の洗掘が起ると考えられる。

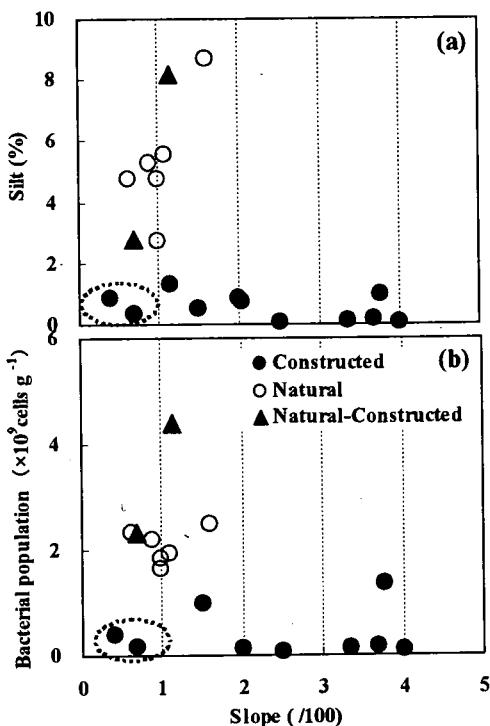


Fig. 7 Relationship between silt content and bacterial population in soil and slopes of tidal flats. Dotted circle indicates the St. 6, 7 at 1996. Natural-Constructed means the natural-like-constructed tidal flat of St. 10.

4. 結 論

自然と同様な人工干潟の造成に関する設計因子を明らかにすることを目的とし、復元した人工干潟における土壤構造の変化の追跡調査した。また、広島湾内における 10ヶ所の自然及び人工干潟土壤の経年変化を調べた。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 干潟を復元するときに傾斜を緩やかにして、シルト含有量や細菌現存量が高い土壤を投入すれば自然干潟と同様な人工干潟の造成が一時的には可能であった。しかし、造成から 2 年以上経過後には、斜面勾配が大きくなりシルト含有量及び細菌現存量が減少した。
- 2) 自然干潟と同様な土壤構造を持つ人工干潟を造成するためには、勾配を緩やかにすると土壤中に存在するシルトの流出が減少し、海水中のシルトは沈降しやすくなり、シルト含有量、細菌現存量も自然干潟と同様になると考えられる。
- 3) 自然と同様な人工干潟を創出しても、潜堤の

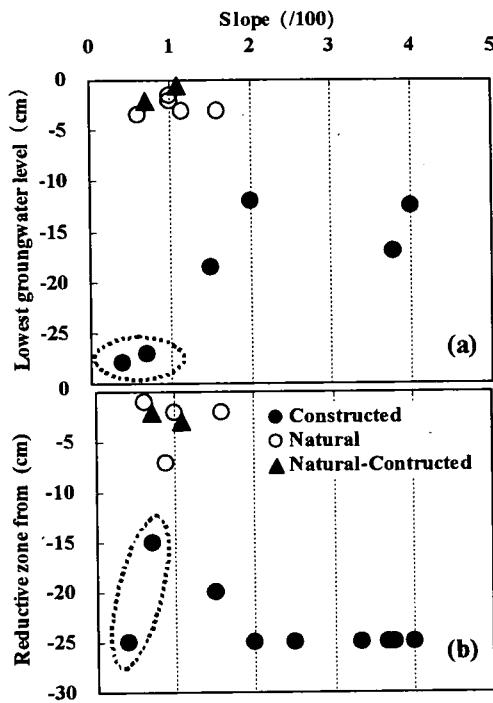


Fig. 8 Relationship between slope and lowest groundwater level (a), depth of oxidative zone (b) of tidal flats.

ように維持管理の手法がされないと日常的な海水流動によって徐々に干潟土壤の洗掘が起こると考えられる。

謝辞：本研究は日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「環境負荷の影響評価と軽減」の中、研究プロジェクト「沿岸油濁の生態系に与える負荷の評価とその軽減」の一環として行われた。ここに記して謝辞を表します。

参考文献

- 1) 栗原康編者：河口・沿岸域の生態学とエコテクノロジー、東海大学出版会、東京、p. 118, 1988.
- 2) 小倉陸夫、今村均：人工干潟の創造技術について、ヘドロ、Vol. 64, pp. 64-74, 1995.
- 3) 福田和国、横山正樹、羽原浩史：ミチゲーションを目的とした人工干潟造成事業、土木施工、Vol. 33, pp. 53-60, 1992.
- 4) Hosokawa, Y.: Some Mitigation Works Along Coast of Japan, *proceedings of the 1st joint meeting of CEST panel*

- of the US-JAPAN cooperative program in natural resources*, pp.65-68, 1998.
- 5) 李正奎, 西嶋涉, 向井徹雄, 滝本和人, 清木徹, 平岡喜代典, 岡田光正 : 自然及び人工干潟における構造と有機物分解能の比較 - 広島湾におけるケーススタディ -, 水環境学会誌, Vol. 20, pp.175-184, 1997.
 - 6) Lee, J.G., Nishijima, W., Mukai, T., Takimoto, K., Seiki, T., Hiraoka, K. and Okada, M. : Factor to determine the functions and structures in natural and constructed tidal flats, *Water research*, Vol. 32, pp.2601-2606, 1998.
 - 7) 李正奎, 西嶋涉, 岡田光正 : 干潟造成における立地選定と土壤構造を決定する因子に関する研究, 水環境学会誌, Vol. 22, No.7, pp.595-599, 1999.
 - 8) 李正奎, 鄭正朝, 西嶋涉, 岡田光正, 馬場栄一 : 干潟の土壤構造に及ぼす海水の流動の影響, 水環境学会誌, Vol. 22, No.8, pp.677-682, 1999.
 - 9) 中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓 : 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会, 東京, pp.64-74, 1995.
 - 10) Meyer-Reil, L.A., Dawson, R., Liebezeit, G. and Tiede, H. : Fluctuations and interactions of bacterial activity in sandy beach sediments and overlying waters, *J. of Mar. Biol.* Vol. 48, pp.161-171, 1978.
 - 11) Porter, K.G. and Feig, Y.S. : The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 25, pp.119-125, 1980.
 - 12) Zimmermann, R., Iturriaga, R. and Becker-Birck, J. : Simultaneous determination of the total number of aquatic bacteria and the number thereof involved in respiration, *Appl. Environ. Microbial.*, Vol. 36, pp.926-935, 1978.
 - 13) 日本海洋学会編 : 沿岸環境調査マニュアル [底質・生物篇], 恒星社厚生閣, 東京, pp.15-23, 1986.
 - 14) French, J. R. and Clifford, N. J. : Characteristics and Event structure of near-bed turbulence in a macrotidal saltmarsh channel, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 34, pp. 49-69, 1992.
 - 15) Dyer, K. R. and Soulsby, R. L. : Sand transport on the continental shelf, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 20, pp.295-324, 1988.
 - 16) DeJonge, V.N. and Clifford, N. J. : Wind and tide Induced resuspension of sediment and microphytobenthos from tidal flats In Ems estuary, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 40, pp.766-778, 1992.
 - 17) Wang, F. C., Lu Tiesong and Sikore Walter, B. : Intertidal marsh suspended sediment transport process, Terrebonne Bay, Louisiana, U. S. A., *J. of Coastal Research*, Vol. 9, pp.209-220, 1993.
 - 18) Smaal, A.C. and Haas, H.A. : Seston dynamics and food availability on Mussel and Cockle Beds, *Coastal and Shelf Science*, Vol. 45, pp.247-259, 1997.
 - 19) Meyer-Reil, L.A., Dawson, R., Liebezeit, G. and Tiede, H. : Fluctuations and interactions of bacterial activity in sandy beach sediments and overlying waters, *Marine Biology*, Vol. 48, pp.161-171, 1978.
 - 20) Weisel, W. and Rheinheimer, G. : Scanning electron microscopy and epifluorescence investigation of bacterial colonization of marine sand sediments, *Microb. Ecol.*, Vol. 4, pp.175-188, 1978.
 - 21) Methta, A. J. and Partheniades, E. : Resuspension of deposited cohesive sediment beds, *Coastal Engineering*, Vol. 18, pp.1569-1588, 1982.
 - 22) 土木学会編 : 水理公式集, 東京, p.227, 1985.

(2002. 1.30 受付)

EFFECTS OF SLOPE IN CREATION AND RESTORATION OF CONSTRUCTED TIDAL FLAT

Kyung-Jin CHO, In-Young CHUNG, Wataru NISHIJIMA, Kazuto TAKIMOTO and Mitsumasa OKADA

The objective of this study is to identify the controlling factors to construct tidal flat ecosystem having similar characteristics to natural ones. The change of soil structure at constructed tidal flats that were restored was investigated. Furthermore, annual change of soil structure at 3 natural and 7 constructed tidal flats in Hiroshima Bay was studied. When the slope of the restored tidal flat was small and soil with high content of silt and bacterial population was used, constructed tidal flat similar to natural tidal flat was temporarily created. However, the slope of the tidal flat increased again and the silt content and bacterial population also decreased after two years of the restoration. It is important to make a slope of the tidal flat gradual for the construction of the tidal flat with a similar soil structure to that in a natural tidal flat. Then, the outflow of silt which exists in the soil decreases and the silt subsides easily. It is supposed that if techniques for the maintenance and management like making a breakwater are not applied to the restored tidal flat, washout of tidal flat soil occurs gradually because of daily seawater flow even if a constructed tidal flat similar to the nature was created.