

浚渫土を活用して造成した干潟生態系の評価

中野陽一^{*} 石井亮^{**} 中井智司^{***}
 西嶋渉^{***} 岡田光正^{***}

Ecosystem Developed in Artificial Tidal Flat Made by Mixture of Sand and Dredged Soil

Yoichi NAKANO^{*}, Ryo ISHI^{**}, Satoshi NAKAI^{***},
 Wataru NISHIJIMA^{***} and Mitsumasa OKADA^{***}

* Ube National College of Technology, Department of Chemical and Biological Engineering, 1-14-2 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-855 Japan

** Sanyo Techno Marine, Inc., 1-3-17 Horitomecyo, Nihonbashi, Chuo-ku, Tokyo 103-0012 Japan

*** Hiroshima University, Graduate School of Engineering, Faculty of Engineering, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527 Japan

Abstract

This research was carried out to investigate effects of dredged soil (DS) addition to artificial tidal flat sediment on the emerging benthic ecosystem via this amendment of silt & clay content. Prior to use, DS was treated with poly aluminium chloride (PAC) or a paper sludge-derived agent (PS) for coagulation or solidification for ease of its treatability, whereas dewatered DS was also prepared without any treatment. These DSs were respectively mixed with mountain sand to attain 25% of silt & clay content on the basis of inorganic component, and then the mixtures were used for construction of artificial tidal flats. In the control experiment, natural tidal flat sediment with the same silt & clay content was used. The total wet-weight and number of macrobenthos in the artificial tidal flats were larger than those in the control tidal flat, while polychaetes *Capitella* sp. and a gastropod *Batillaria cumingii* were the dominant species in the constructed tidal flats. These results confirmed the feasibility of using DS as an additive of silt and clay to improve benthic ecosystems in constructed tidal flats. In use of DSs treated with PAC and PS, negative impact by these agents was not observed on the number and species of emerging macrobenthos.

Key words : artificial tidal flat, dredged soil, tidal flat ecosystem, silt and clay, paper sludge-derived agent

1. はじめに

自然干潟は護岸工事・土地造成のための埋め立てなどにより年々減少を続け、1945年以降その40%が消滅している¹⁾。自然再生法の施行により、人工干潟造成が盛んに試みられている。^{2~6)}干潟の造成においては、干潟生態系が本来有する生物生息機能、物質循環機能、生物生産機能などの諸機能を造成干潟上で復元・創出することが目的となる。そのためには多様な生物が生息・生育できる物理化学的環境を造成干潟上に整えることが必要になる。筆者らは、干潟生態系を構成する細菌やベントスはその生育環境と密接な関係があり、特に土壌中のシルト・クレイの存在量はその数や種類に強い影響を及ぼすことをこれまで明らかにしてきた^{7~9)}。国土交通省が作成した「干潟造成技術マニュアル」¹⁰⁾中でも、自然干潟が

有する干潟の諸機能を造成干潟上で再現するためには、土壌中のシルト・クレイの重要性が指摘されている。

そこで本研究では、港湾の維持活動に伴って排出される浚渫土（維持浚渫土）の利用に着目した。浚渫土はシルト・クレイ分に富み、細菌や堆積物食者の餌となる有機物を豊富に含むことから、干潟造成材料としての可能を持つ。これまでも浚渫土は干潟造成に利用されてきたが、用途は中詰め材であり、その上部では山砂あるいは海砂による覆砂が行われてきた^{5, 11)}。すなわち、浚渫土をシルト・クレイ源、あるいは細菌や堆積物食者の餌となる有機物源として積極的に利用するのではなく、干潟の嵩上げの材料として利用してきた。

このような現状の中、「英虞湾再生プロジェクト」（三重県地域結集型共同研究事業）において浚渫土をシルト・クレイ源及び有機物源として活用した干潟造成に関す

* 宇部工業高等専門学校 物質工学科 〒755-855 山口県宇部市常盤台2-14-1
 ** 三洋テクノマリン(株) 〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町1-3-17
 *** 広島大学大学院工学研究科 〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1

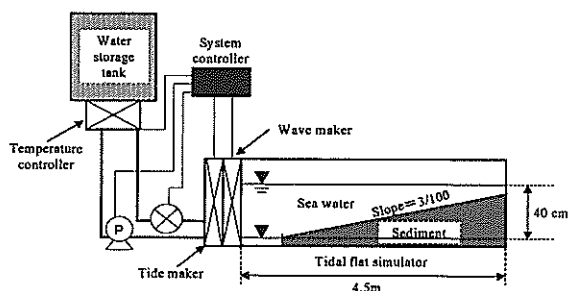


Fig.1 Schematic diagram of the tidal flat simulator.

Table 1 Operating conditions of the tidal flat simulator.

Slope	3/100
Wave period	0.8 sec
Wave height	10 mm
Tidal amplitude	40 cm
Tidal period	12 h

る研究が行われた。この中で上野ら³⁾は、浚渫土を現地盛土と混合して干潟を造成し、造成後6ヶ月程度で多毛類、二枚貝類、甲殻類などの天然干潟と同様の多様性を示した。

本研究では、様々な要因が影響する現場実験を補助するため、管理されたクローズ型の干潟シミュレータを使って浚渫土を活用して造成した干潟の生態学的評価を行った。具体的には、浚渫土をシルト・クレイ及び有機物源として加えた人工干潟における干潟土壌環境の物理化学的特性、底質表面の藻類量やマクロベントスの出現状況といった生物学的特性を把握し、これらと同じシルト・クレイ含有量を持つ自然干潟のものと比較評価した。また、浚渫土は減容積及びハンドリング性を高める目的で凝集・固化処理されることがあるため、凝集・固化処理された浚渫土が干潟造成に使用された場合についても検討した。

2. 実験方法

2.1 干潟シミュレータ

Fig. 1に本研究で用いた干潟シミュレータの概略を示す。干潟シミュレータは、閉鎖系でかつ造波、潮汐、温度などの物理化学的条件を制御することが可能である。縦4.5 m、横0.8 m、深さ1.0 mの干潟部、造波装置、貯水タンクから構成されており、コンピューターシステムによって運転を制御した。干潟シミュレータの運転条件は、広島湾内の干潟の観測データに基づき、Table 1のように決定した。

干潟シミュレータ内に試験土壌を2 m³充填し、傾斜勾配を3/100に調整した。干潟の造成後、広島県内の自然干潟より採取したマクロベントスを移植した。マクロベントスの移植では、表層から10 cmの干潟土壌（広島県竹原市吉名干潟）を1 mmでふるい、ふるい上に残ったマクロベントスを含む土壌30 lをシミュレータ内の干潟土壌表面に均等に添加した。

2.2 実験系列

実験系列として、自然干潟土壌をそのまま用いて造成した干潟（自然系列）、未処理の浚渫土を山砂と混合して造成した干潟（浚渫土系列）、浚渫土をペーパースラッジ固化剤¹¹⁾（Paper Sludge-derived agent : PS系列）あるいはポリ塩化アルミニウム（Poly Aluminium Chloride : PAC系列）で凝集・固化した後、山砂を混合して造成した干潟を設定した。各干潟のシルト・クレイ含有率はすべて25重量%とした。予備混合を数回を行い、粒度分布を測定したのち土壌の混合割合を決定した。その後、土壌の混合はコンクリートミキサーを用いて15分間混合した。最終的に、混合終了後に干潟シミュレータに投入前に任意に3ヶ所から土壌を約200g採取し、粒度分布を測定してシルト・クレイ含有率を確認した。

目的の実験に用いた浚渫土は三重県英虞湾より採取されたものである。浚渫土中の有機物含有量（強熱減量）は14重量%であり、無機物の98重量%がシルト・クレイである。シルト・クレイ含有率、有機物含有率が高い典型的な維持浚渫土である。なお、この数字は浚渫土系列で使用した浚渫土のデータであり、PS系列、PAC系列に使用した浚渫土とは採取時期は異なる。また、実験に用いた山砂中の無機成分の内シルト・クレイ含有率は3重量%、有機物含有量（強熱減量）4重量%である。自然干潟土壌は広島湾内に発達した自然干潟（広島県竹原市吉名干潟）から採取した。実験は2005年4月から10月にかけて行った。

2.3 分析項目

干潟土壌の物理化学的特性として、粒度分布、強熱減量、酸化還元電位、全窒素、全リン及び土壌からの溶出可能リンを測定した。粒度分布は日本工業規格JIS A1204に準拠した。本方法では、無機成分中のシルト・クレイ分を測定するため、6%過酸化水素溶液を添加して干潟土壌の有機物を分解し、110±5℃の乾燥炉で約1時間加熱処理した。なお、この方法ではPS、PACによって造粒された粒子は、上記処理の過程で破壊されるため、もともと使用した浚渫土の粒度が反映される強熱減量は日本工業規格JIS A1226に準拠して測定した。干潟土壌の深さ方向の酸化還元電位は、10点電極式酸化還元電位計を干潟土壌に挿入して測定した。電極の長さは30cmで、表層から5cmまでは1cmごとに、30cmまでは5cmごとに電極が取り付けられており、ポイントごとに酸化還元電位を測定した。干潟土壌の透水係数は変水位透水性測定器（大起理工業製）を用いて測定した。

干潟土壌の全窒素は、底質調査方法とその解説¹²⁾に基づき、96%硫酸によって土壌を処理した後にケルダール法によって定量した。また、全リンも同報に基づき、65%硝酸及び60%過塩素酸による処理の後、モリブデン青法により分析した。なお、この手法によって求める全リンには、生物によって利用できない画分、すなわち、実際には溶出しないリンも含まれる。そこで、利用可能なリンの量を推定するため、酸抽出可能なリン酸をトルオーグ法によって求めた¹³⁾。

一方、干潟土壌の生物学的特性として、人工干潟に出現したマクロベントスの種の同定と個体数の測定を行なった。マクロベントス測定用土壌は、10 cm×10 cm×10 cmのコドラートを設置して採取した。また、底質表面微細藻類の存在量はクロロフィルaで評価した。クロロフィ

ルa量は干潮時に干潟表面から1 cmまでの深さの土壌を1~2 g採取して90%アセトン抽出後、吸光度法¹⁴⁾で求めた。

3. 結果および考察

3.1 造成した干潟の物理化学的性質

Fig. 2に造成した人工干潟の粒度分布を示す。自然干潟と比較して浚渫土を活用して造成した干潟は、中砂分が少ないが、シルト・クレイ含有率はいずれの系列とも25%に調整できていることが確認できた。Fig. 3に各干潟の深さ方向における酸化還元電位を、Fig. 4に各干潟の強熱減量を示す。(図中のバー表記は標準偏差を示す。)深さ方向の酸化還元電位を測定したところ、いずれも表面1 cmにおいても還元層が形成されていた。有機物含有量が高い干潟、すなわち強熱減量が大きな干潟では底質が還元化することは一般に知られている。広島湾の人工干潟及び自然干潟の強熱減量は0.8-1.6重量%であり^{8), 15)}、今回造成した干潟の強熱減量が3重量%以上と高かったことから還元層の発達が著しかったと考えられる。

なお、浚渫土系列で使用した浚渫土自体の強熱減量は14重量%であり、このため浚渫土系列の強熱減量は、自然系列よりも高かった。同様に、PS系列、PAC系列の強熱減量も自然系列より高くなった。なお、浚渫土系列とPS系列、PAC系列の強熱減量が若干異なっているのは、用いた浚渫土の採取時期の違いと考えられる。

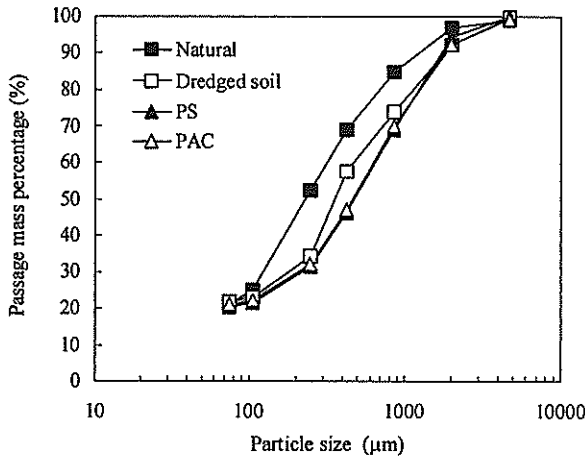


Fig. 2 Particle size distributions of the sediments

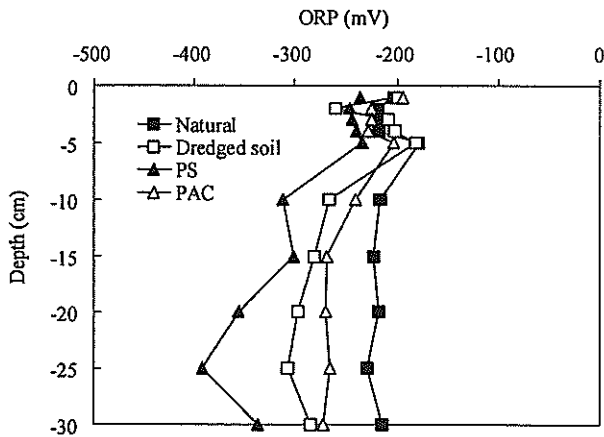


Fig. 3 Vertical profiles of ORP in the sediments.

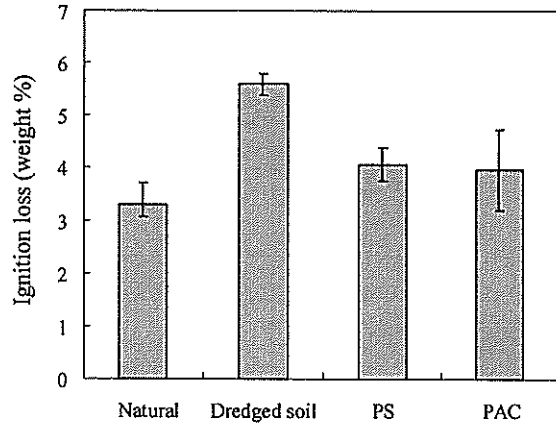


Fig. 4 Ignition loss of the sediments.

また、潮汐変動に伴う土壌中の水位(地下水位)の変動を測定したところ、いずれの系列とも干潮前後においても土壌表面からの水位の低下は1 cm以下となった。また、各土壌の自然干潟系列、DS系列、PS系列及びPAC系列の透水係数はそれぞれ、 $4.8 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、 $0.22 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、 $0.24 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 、 $0.24 \times 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ となった。砂浜の透水係数は $10^{-1} - 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ であり¹⁶⁾透水性が極めて低い土壌であることがわかった。このような低い透水性も還元層の発達に寄与したと考えられる。

3.2 浚渫土を活用した人工干潟の生物学的特性

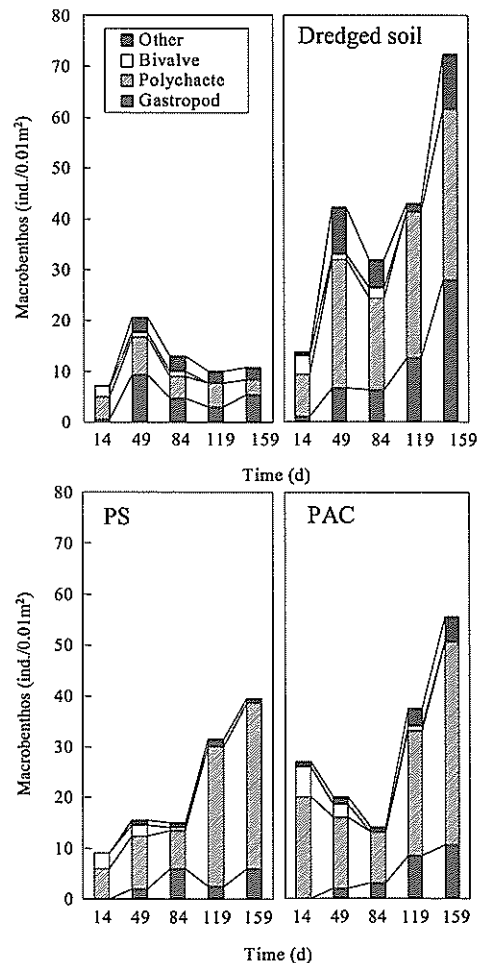


Fig. 5 Changes in populations of macrobenthos in the artificial tidal flats.

Table 2 Macrobenthos identified in the sediments after 159 days.

Species	Population (ind.0.01m ⁻¹)				
	Natural	Dredged soil	PS	PAC	
Gastropoda	<i>Batillaria cumingii</i>	5.3	26.0	6.0	10.5
	<i>Retusa insignis</i>	0.0	2.0	0.0	0.0
Polychaeta	<i>Ceratonereis erythraeensis</i>	2.3	17.0	21.0	17.5
	<i>Exogone breviantennata</i>	0.0	0.3	0.0	0.5
	<i>Capitella sp.</i>	0.3	11.7	9.5	16.0
	Capitellidae	0.3	2.7	2.0	5.5
	<i>Aonides oxycephala</i>	0.0	1.3	0.0	0.0
	Cirratulidae	0.0	0.7	0.0	0.5
Sipunculoidea	<i>Sipunculoidea</i>	0.3	0.0	0.0	0.0
Nematomorpha	<i>Nematomorpha</i>	2.0	6.0	1.0	4.5
Others		0.0	4.7	0.0	0.5
Total		10.7	72.3	39.5	55.5

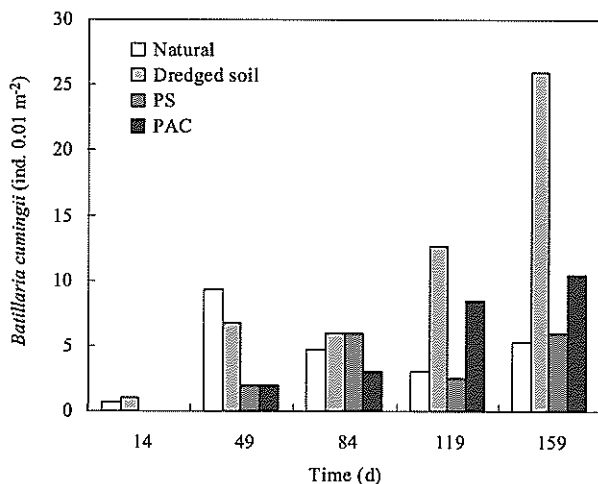


Fig. 6 Changes in population of the gastropod *Batillaria cumingii* in the artificial tidal flats.

Fig. 5に各干潟におけるマクロベントス個体数の経日変化を示す。自然系列では、49日目に一時的な増加が見られたが大きな変動はなかった。一方で、浚渫土系列ではマクロベントス数の顕著な増加が起こり、最終的(159日目)には同時期の自然干潟系列と比較して5.8倍となった。また、PS系列、PAC系列においては、造成初期には浚渫土系列のような顕著な増加は起こらなかったが、84日目を以降急激な増加がみられた。最終的にはPS系列が同時期の自然干潟系列と比較して2.7倍に増加し、PAC系列が4.2倍となった。PS系列、PAC系列で増殖に遅れが生じた原因として、浚渫土が凝集剤や固化剤で造粒されたために造粒された粒子内に有機物も固定され、生物への利用が制限されたことにあると推定している。

Table 2に実験終了時(159日目)におけるマクロベントスの同定結果を示す。自然干潟系列に出現したマクロベントスが6種であったのに対して、浚渫土系列で9種、PS系列で6種、PAC系列で6種のマクロベントスが出現した。浚渫土を活用したいずれの系列とも自然干潟系列と比較して、マクロベントス個体数が多く、種類数も同等以上であったことから、浚渫土を活用して造成した人工干潟では同程度のシルト・クレイ含量を持つ自然干潟と比べて、マクロベントスの種類数において同等以上、量に対しては勝ることがわかった。

浚渫土系列で顕著に増加したマクロベントスは、腹足類のホソウミナ(*Batillaria cumingii*)と堆積物食者であるイトゴカイ科の多毛類(*Ceratonereis erythraeensis*, *Capitella sp.*など)であった。ホソウミナは、全個体数

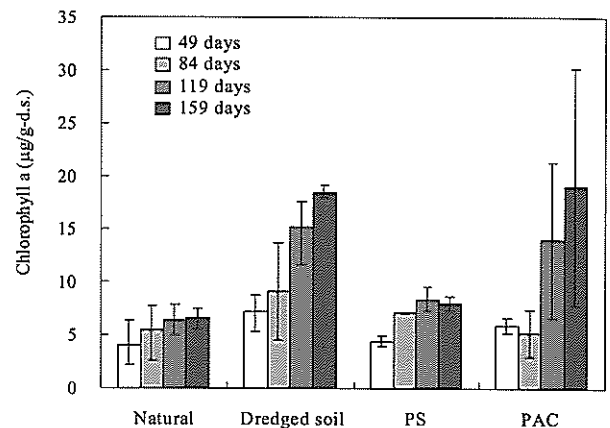


Fig. 7 Changes in chlorophyll a in the artificial tidal flats.

の20%を占め、多毛類のイトゴカイ科は30%を占めた。Fig. 6に示すように、ホソウミナは、浚渫土系列で顕著に増加し、PAC系列で一定の増加が観察された。腹足類は底質表面微細藻類を餌として摂取することが報告されている¹⁷⁾。そこで、各干潟土壌の土壌表面1 cmまでのクロロフィルa量を比較した(Fig. 7)。浚渫土系列におけるホソウミナの増加は119日目、159日目において顕著であり、その時期にクロロフィルaの増加も見られた。また、浚渫土系列ほど顕著ではないが、PAC系列で119日目、159日目に高いクロロフィルa濃度を示し、それに対応したホソウミナの増加が観察され、ホソウミナの増加は餌となる底質表面微細藻類の増加に起因したものであることが推定された。ただし、底質表面微細藻類の増殖速度とホソウミナの捕食速度は不明であり、Fig. 7のクロロフィルa濃度はこれらの正味の速度で示された。

強熱減量が14重量%と高い浚渫土では、有機物とともに窒素、リンの含有量が大きいことが予想された。そこで干潟造成材料の全窒素、全リンを分析した結果、山砂ではそれぞれの含有量は9.4 µg-N·g⁻¹、210 µg-P·g⁻¹であったのに対し、浚渫土では220 µg-N·g⁻¹、360 µg-P·g⁻¹となった。このように、浚渫土では特に窒素分が多いことがわかった。

N及びPは藻類にとって必須の栄養素であり、浮遊性微細藻類のN:P比は概ね16:1(レッドフィールド比)となることが知られている¹⁸⁾。人工干潟上に出現した底生藻類のN:P比は未測定であるが、この比に近い値をとると予測される。そこで、概算のため浮遊性微細藻類のN:P比を用いた。このN:P比に基づけば、山砂のみでは極端な窒素制限になっていることとなる。ただし、栄養塩の全量測定では、鉱物構成元素も測定されるため、まず藻類に利用可能な栄養塩として、山砂の酸抽出可能なリン酸を分析した。その結果、48.7 µg-P₂O₅·g⁻¹(0.44 µmol-P·g⁻¹)となり、N:P比16:1とした場合、このリンに見合う窒素の量は98.2 µg-N·g⁻¹(7.0 µmol-N·g⁻¹)と計算された。しかしながら、山砂における全窒素は9.4 µg-N·g⁻¹と、全ての窒素が利用可能であるとしても、この値は計算値よりも極めて低い。これに対し、浚渫土の全窒素含有量は220 µg-N·g⁻¹と極めて大きく、浚渫土を加えた干潟土壌においては、浚渫土は窒素源として底質表面微細藻類の増殖に寄与したと考えられる。

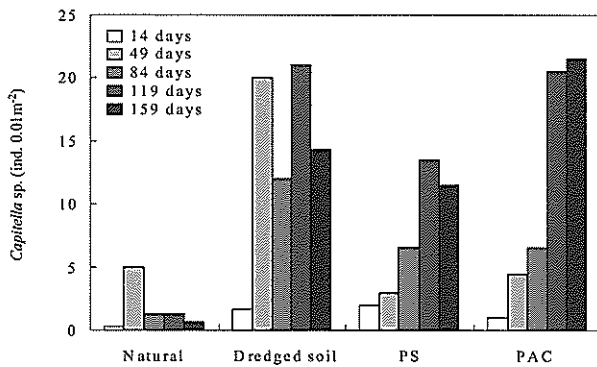


Fig. 8 Changes in population of *Capitella* sp. in the artificial.

Fig. 8に各干潟土壌におけるイトゴカイ科の多毛類数の経日変化を示す。浚渫土、PS系列、PAC系列のいずれも自然干潟系列と比較して、顕著に高くなった。上記3系列は浚渫土の高い強熱減量（14重量%）を反映して自然干潟系列と比べて1.5～2.0倍高い強熱減量を示した。イトゴカイ科の多毛類は、堆積物食者であり土壌中の有機物を捕食することが報告されており¹⁶⁾、浚渫土として持ち込まれた有機物を餌として増殖したと推定される。浚渫土といっても、採取場所等によってその物理化学特性には違いがあるが、航路などの維持浚渫では今回実験に用いたような高シルト・クレイ含量、高強熱減量を示すものが一般的であり^{3,5)}、このような浚渫土を活用した人工干潟では、多毛類などの堆積物食者の増殖が期待できると考えられる。

ただし、以上の結果は浚渫土が多量の有機物と栄養塩を干潟に供給したこと起因すると考えられる。そのため、長期的にはそれらの有機物や栄養塩類が消費されるにつれてマクロベントス量は低下していき、同一の場所であれば自然干潟内のマクロベントス量に近づいていく可能性がある。

4. 結論

本研究は、浚渫土をシルト・クレイ及び有機物源として加えた人工干潟における干潟土壌環境の物理化学的特性、底質表面の藻類量やマクロベントスの出現状況といった生物学的特性を評価した。この際、凝集・固化処理された浚渫土が人工干潟の造成に使用された場合についても検討した。以下に主要な結論を示す。

1) 浚渫土を活用して造成した人工干潟では、同一のシルト・クレイ含有量の自然干潟と比較して、数と量の両面において同等以上の豊かな干潟生態系を構成し得る可能性が示された。特に多毛類、腹足類の生息数が大きいことが特徴であった。

2) PAC及びPSで凝集・固化した浚渫土を利用した場合には、未処理の浚渫土を利用した場合に比べ、マクロベントスの増加に2～3ヶ月の遅れが表れたが、出現種数と量に顕著な違いは表れなかった。

謝辞

本研究は三重県地域結集型共同研究事業「英虞湾再生

プロジェクト」の助成を受けて行なわれた。ここに謝意を表す。

(原稿受付 2008年1月7日)

(原稿受理 2008年7月28日)

参考文献

- 1) 環境庁編 (1995) 平成6年度版環境白書, pp. 369-371, ぎょうせい, 東京.
- 2) 倉和夫 (1993) 海の生態系と生息環境の創造はかる広島港五日市地区の人工干潟造成, 新都市開発, 31(13), pp. 27-31.
- 3) 上野成三, 高橋正昭, 原条誠也, 高山百合子, 国分秀樹 (2001) 浚渫土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, 48, pp. 1306-1310.
- 4) 中瀬浩太, 林栄子 (2002) 埋立地に造成した人工干潟の環境変化と環境管理 東京港野鳥公園の事例, 海洋開発論文集, 18, pp. 31-36.
- 5) 春日井康夫, 久本忠則, 中山康二, 松本英雄 (2003) 広島県糸崎港における干潟再生事業, 海洋開発論文集, 19, pp. 107-112.
- 6) 古川恵太, 岡田知也, 東島義郎, 橋本浩一 (2005) 阪南2区における造成干潟実験—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, 21, pp. 659-664.
- 7) 李正奎, 西嶋渉, 向井徹雄, 滝本和人, 清水徹, 平岡喜代典, 岡田光正 (1997) 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ー, 水環境学会誌, 20, 1 pp. 75-184.
- 8) 李正奎, 西嶋渉, 向井徹雄, 滝本和人, 清水徹, 平岡喜代典, 岡田光正 (1998) 自然及び人工干潟の有機物浄化能の定量化と広島湾の浄化に果たす役割, 水環境学会誌, 21, pp. 149-156.
- 9) 丁仁永, 国次純, 平岡喜代典, 曹慶鎮, 向井徹雄, 西嶋渉, 瀧本和人, 岡田光正 (2003) 潜堤の設置が干潟生態系に及ぼす影響, 水環境学会誌, 26, pp. 431-436.
- 10) 今村均 (1997) 浚渫土の生物生息環境創造への有効利用, 用水と廃水, 39(7), pp. 603-610.
- 11) 今井大蔵, 加藤忠哉, Ahmed H. A. Dabwa (2006) ペーパーセラジ焼却灰を主原料とする底質安定改良材を用いた海洋環境再生技術の開発, 紙パルプ技協誌, 60, pp. 80-88.
- 12) 環境庁水質保全局水質管理課編 (1996) 改訂版 底質調査方法とその解説, pp.76-81, (社)日本環境測定分析協会, 東京.
- 13) 財)日本土壌協会編 (2004) 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質及び植物体分析法, pp. 79-81, (財)日本土壌協会, 東京.
- 14) 千原光雄, 西澤一俊 (1985) 藻類研究法, pp.395-399, 共立出版, 東京.
- 15) Lee, J. G., Nishijima, W., Mukai, T., Takimoto, K., Seiki, T., Hiraoka, K., and Okada, M. (1998), Factors to Determine the Functions and Structures in Natural and Constructed Tidal Flats, *Water Research*, 32(9), pp. 2601-2606.
- 16) 須田有輔, 早川康博 (2002), 砂海岸の生態学, 427p, 東海大学出版会, 神奈川.
- 17) Pascal, R. (2004), Utilization of food sources by invertebrates in a man-made intertidal ecosystem, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 84, pp. 323-326.
- 18) Goldman, J. C., McCarthy, J. J., and Peavey, D. G. (1979) Growth rate influence on the chemical composition of phytoplankton in oceanic waters. *Nature*, 279, pp. 210-215.