PS灰改質材を用いて改質した浚渫土の 水域の植物生育基盤への適用性

浜谷 信介¹・加島 史浩²・竹山 佳奈²・和栗 成樹³・山内 裕元³・
岩本 裕之⁴・山中 亮一⁵・上月 康則⁵

¹ 正会員 五洋建設(株)環境事業部(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: Shinsuke.Hamatani@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株)環境事業部(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

³ 正会員 ジャイワット(株)(〒299-0268 千葉県袖ヶ浦市南袖 29)

⁴ 正会員 五洋建設(株)土木 2020 事業部(〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

⁵ 正会員 徳島大学 環境防災研究センター(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

近年、浚渫土を浅場造成の材料として活用し、生物の生育地を整備する事例が見られる。この際、浚渫土は強度増加や施工性向上のために改質材を添加、混合して改質土とすることがあり、改質土には生物生育地としての安全性や適用性が求められる。そこで本研究では、浚渫土に製紙汚泥焼却灰を原料とする改質材を添加、混合した改質土を植物生育基盤へ有効利用することを目的として、淡水条件及び海水条件での植栽試験をおこない、供試土壌の強度、pH 変化、および、供試植物の地上部の本数と草丈を調査した。その結果、改質土が植物生育基盤として適用可能であることがわかった。

Key Words : dredged soil, paper sludge ash, modified material, vegetation soil, waterside

1. 緒論

我が国では水域の水質浄化や航路・泊地の維持、増深のために水底から除去された浚渫土の処理が問題となっており、処分場不足や資源の有効利用の観点から¹⁾、浚渫土を浅場造成の材料として用いて生物の生息地とする事例^{2),3)}がある。この際、浚渫土が粘性土であったり水分や有機物が多く利用しにくい場合には、強度増加や施工性向上のために改質材を添加、混合することがある。

一方、建設業以外の産業分野からも多くの産業廃棄物が排出されており、リサイクルが求められている。製紙業では2015年度の産業廃棄物の有効利用率は有姿ベースで97.0 %⁵⁾と高い水準を示しているが、紙はリサイクルを繰り返すうちに繊維がもろくなったり微細化して最終的にはリサイクルできない製紙汚泥(以下、PSとする。)となる。PSは減容化やバイオマスエネルギー利用のために燃焼しても大量のPS灰が残るため、PS灰の再資源化や新規用途の拡大が課題となっている⁴⁾。このような中、PS灰粒子の表面が多孔質で吸水性能が高くかつ水を強く保持して離さないという特性が着目され、PS灰を基材とする泥土改質材の技術開発がおこなわれている⁵⁾。このPS灰改質材は建設分野への適用についても研究や実用化が進み、近年ではさらに生物に対する影響の確認がおこな

われている。望月ら(2006)はコマツナの発芽試験によりPS灰改質土の生物に対する安全性を示し⁶⁾、また今井ら(2011)は人工干潟でPS灰改質土を用いたアサリの飼育試験をおこない良好な生育を確認した⁷⁾。さらに久保田ら(2010)、増田ら(2012)は人工干潟でのPS灰改質土区への底生生物の加入定着試験をおこない生物に対する安全性を示した^{8),9)}。このようにPS灰改質土の生物に対する安全性は室内試験や小規模な現地試験で確認されているが、実地での使用に関する知見はまだ少ない。

そこで、高含水比の浚渫土をPS灰改質材によって改質した材料の淡水域及び海水域での植物生育基盤への適用性を明らかにすることを目的として、湖沼浚渫土と海域浚渫土にPS灰改質材を添加、混合したものを植栽土壌として用いて、淡水条件と海水条件での植栽試験をおこなった。

2. 試験材料

(1) 浚渫土

湖沼浚渫土は内陸の湖沼から採取したもので、中央粒径 $D_{50}=0.015$ mm、シルト・粘土分 96.81 %、強熱減量 14.9 %、含水比 290 %であった。海域浚渫土は都市臨海

部の運河から採取したもので、中央粒径 $D_{50}=0.096$ mm、シルト・粘土分 42.98 %、強熱減量 6.5 %、含水比は湖沼浚渫土と同じ 290 %に水分調整した。粒度組成を図-1に示す。なお、強熱減量は東京湾における底質の評価方法¹⁰⁾に基づく評価点を参考にするとして5段階中で下から2,3番目に相当する値であり、いずれも富栄養といえる。

(2) PS 灰改質材及び改質土

本研究で用いた PS 灰改質材（以下、改質材とする。）は、PS 灰に特殊薬剤を混合して処理した CaO (45 %), SiO_2 (25 %), Al_2O_3 (15 %)を主成分とする粉末状の物質であり、製品安全データシートにより、通常取扱い条件では危険性、有害性、環境影響に問題がないことを確認している。この改質材を泥土に添加、混合すると吸水により瞬時に強度発現が起こる。その後、時間経過に伴って水和反応による固化が起こり、強度が緩やかに増大する。

事前の配合試験を基に、湖沼浚渫土に 500 kg/m^3 、海域浚渫土に 300 kg/m^3 の改質材の添加量を設定した。強度を図-2に示す、浚渫土に改質材を添加、混合した後、所定の気中養生期間を設け、湖沼改質土、海域改質土を作製した。気中養生期間は、湖沼改質土は14日間（平成27年11月5日～19日）、海域改質土は13日間（平成28年5月2日～15日）であった。その後、これらの改質土をスコップで解砕して直径数 cm までの粒状にし、図-3に示すような供試土壌とした。

図-1 浚渫土の粒度組成

図-2 事前配合における改質土の強度(JIS A 1228)

(3) 供試植物

供試植物には、浅場の代表的な植物であるヨシを用い、淡水条件の試験ではこれに加えてヒメガマも用いた。また、淡水条件の試験では出自の均一性を考慮して購入個体を、屋外で実施した海水条件の試験では地域性を考慮して近傍からの採取個体を用いた。

3. 試験方法及び調査項目

(1) 試験方法

淡水条件及び海水条件の植栽試験ケースを表-1に、植栽試験状況を図-4に示す。

a) 淡水条件での植栽試験

改質土の植物生育基盤としての適用性を確認するため、屋内で淡水条件での植栽試験をおこなった。

図-3 供試土壌に用いた改質土

表-1 植栽試験ケース

条件	試験場所	試験ケース	供試土壌	供試植物	試験容器
淡水	実験室	対照区 (ヨシ)	川砂	-	鉢 直径 15cm 深さ 11.5cm
		改質土区 (ヨシ)	湖沼改質土 [*])	ヨシ 購入物1株/鉢 ×各ケース3鉢	
		対照区 (ヒメガマ)	川砂	-	
		改質土区 (ヒメガマ)	湖沼改質土 [*])	ヒメガマ 購入物1株/鉢 ×各ケース3鉢	
海水	実海域の運河内に整備された実験水路	対照区	川砂区	川砂	プランター 幅 23cm 長さ 50cm 深さ 18.3cm
		浚渫土区	浚渫土	-	
		改質土区	海域改質土 ^{**)}	ヨシ 地下茎4本/プランター ×各ケース1プランター	

^{*}) 14日気中養生後に解砕して直径数 cm までの粒状にしたものを、1層毎に高さ 3cm から 25 回の自由落下で振動を加えて 3 層に分けて充填。

^{**)} 13日気中養生後に解砕して直径数 cm までの粒状にしたものを、1層毎に高さ 3cm から 25 回の自由落下で振動を加えて 3 層に分けて充填。

図-4 植栽試験状況

湖沼改質土を有孔の植木鉢(直径15 cm 深さ11.5 cm)に充填し、ヨシとヒメガマの購入個体をそれぞれ1株/鉢で3鉢ずつ植えた。また比較対照のために、供試土壤に川砂を用いたものを3鉢設けた。これらの鉢をト口舟に並べて水道水を土壤表面上まで冠水させ、屋内の窓側の日当たりの良い場所に静置した。試験開始が秋季の平成27年11月19日であったことから、植物の繁茂期である春季から夏季の環境を再現するために、サーモスタットを用いて水温を23℃程度に調整した。実際の浅場では浅場域内外で水交換があることを考慮して、試験開始2ヶ月目までは1～2週間に1回の頻度でト口舟の中の水道水を全て入れ替えた。

b) 海水条件での植栽試験

淡水条件試験と同様に、改質土の海水域での植物生育基盤としての適用性を確認するため、兵庫県尼崎市の臨海部に位置する北堀運河にある「尼崎運河水質浄化施設」¹¹⁾内の「栄養塩回収水路」(以下、実験水路とする。)で植栽試験をおこなった。この実験水路の位置を図-5に示す。尼崎市は瀬戸内式気候で、近傍の大阪のアメダスデータでは試験期間中(平成28年5月～12月)の日平均気温は8月で29.5℃、12月で9.4℃、降水量は最大で40.5mm/hであった。この実験水路は、ポンプを用いて北堀運河から表層水と底層水を汲み上げ、系統ごとに流量25 L/minで常時流している。1系統の水路は幅30 cm、水深20 cmで、流速は41.7 cm/minと緩やかである。

海域改質土で作製した供試土壤を、植栽プランター(長さ50 cm、幅23 cm、深さ18.3 cm、有孔)に充填して植物生育基盤とし、ヨシの地下茎を4本/プランターで植えて供試体とした。比較対照のため、供試土壤に川砂と浚渫土を用いた実験区も設けた。これらのプランターを平成28年5月15日に、塩分が高くなり過ぎないことを期待して表層水の系統の実験水路に地下水位2 cm程度の高さに配置した。また、試験条件の把握のために実験水路での塩分の測定をおこなった。

図-5 海水条件植栽試験場所位置

(2) 調査項目

供試土壤と供試植物を対象に調査を実施した。浚渫土は改質材を添加、混合すると強度が増大するが、植物の良好な生育のためには土壤の強度は根や地下茎の伸長可能な範囲にある必要がある。また改質土はアルカリ分の溶出によって一時的にpHが高くなる^{7),8),9)}が、植物は弱酸性～中性を好む傾向がある¹²⁾ため、改質土の利用にはpH変化の把握が重要である。これらのことから、供試土壤の強度及び間隙水のpHの測定をおこなった。

また、供試植物の地上部の本数の計数と草丈の計測を実施した。淡水条件は平成27年11月19日から平成28年3月3日まで1週間から10日に1回の頻度、海水条件は平成28年5月15日から12月16日まで月1回の頻度で調査をおこなった。

4. 試験結果

(1) 改質土の強度及びpH変化特性の把握

JIS A 1228に基づいて測定した締め固めた改質土の強度は、図-2に示した通り、湖沼改質土は改質7日目で2,779 kN/m²、海域改質土は改質14日目で871 kN/m²であった。しかし植栽試験で用いた供試土壤は締め固めをおこなっていない。また本研究で用いた改質材は含水比が強度増大に影響し改質土の強度は水中では横ばいになることがわかっている¹³⁾。そこで、植栽試験で用いた供試土壤の実際の強度を確認するため、淡水条件、海水条件の試験開始後、それぞれ425日目、280日目に、簡易ポータブルコーン試験により、締め固めない強度を測定した。結果を図-6に示す。また、供試土壤表面の状況を図-7に示す。淡水条件の対照区と改質土区、海水条件の川砂区では204～240 kN/m²でほぼ同程度の値を示していた。海水条件の浚渫土区は0 kN/m²、改質土区は614 kN/m²であり、改質による強度増大が見られた。

図-6 供試土壤の強度(簡易ポータブルコーン試験)

図-7 改質土区の供試土壤表面

土壌間隙水の pH 測定結果を図-8 に示す。淡水、海水条件ともに試験開始直後は pH 10 程度のアルカリ性であったが、その後 pH は漸減し、2 ヶ月程度で対照区と同等の中性域になっていた。

(2) 植栽試験

a) 淡水条件での植栽試験

淡水条件の植栽試験の地上部の合計本数と平均草丈の変化量を図-9 に示す。地上部の本数は、ヨシは試験開始 49 日目まで対照区、改質土区ともに増加し、それ以降は対照区は漸増し、改質土区はほぼ横ばいとなった。105 日目には対照区で 17 本の増加（初期値 41 本）、改質土区で 13 本の増加（初期値 55 本）となった。ヒメガマは対照区と改質土区ともに試験開始後に多少の増減があった後、49 日目以降は横ばいとなり、105 日目には対照区で 3 本の減少（初期値 17 本）、改質土区では 5 本の増加（初期値 16 本）であった。平均草丈は、ヨシは試験開始から 105 日目までで対照区で 9.0 cm の減少（初期値 7.6 cm）、改質土区では 8.2 cm の増加（初期値 8.0 cm）が見られた。ヒメガマの草丈は試験開始から 105 日目までで対照区で 15.2 cm の増加（初期値 1.8 cm）、改質土区では 22.0 cm の増加（初期値 6.0 cm）が見られた。このうち 105 日目の平均草丈を図-10 に示す。対照区と改質土区の草丈の平均値の間で t 検定（5%水準）をおこなったところ、ヨシ、ヒメガマともに有意差は見られず、同程度の生育を確認することができた。このことから、淡水条件において改質土が植物の生育を阻害しないことが実証できた。

b) 海水条件での植栽試験

植栽試験をおこなった実験水路の塩分を測定した結果、図-11 に示ように塩分 12.24~23.11 であり、ヨシの生育範囲内¹⁴⁾であった。

図-8 改質土の土壌間隙水の pH 変化

図-9 植栽試験結果（淡水条件）

図-10 植栽試験 105 日目の平均草丈（淡水条件）
(エラーバーは標準誤差を示す)

図-11 実験水路の塩分

植栽試験の地上部の合計本数と平均草丈の変化量を図-12 に示す。地上部の本数は試験開始以降継続的に増加しており、試験開始 215 日目までで、川砂区で 19 本の増加(初期値 3 本)、浚渫土区で 25 本の増加(初期値 3 本)改質土区で 14 本の増加(初期値 4 本)であった。平均草丈は川砂区で 20.2 cm の増加(初期値 27.3 cm)、浚渫土区で 5.9 cm の増加(初期値 26.2 cm)、改質土区で 4.4 cm の増加(初期値 28.7 cm)であった。このうち 245 日目の平均草丈を図-13 に示す。各区の草丈の平均値の間で分散分析(5%水準)をおこなった結果、有意差はみられず、同等の生育を確認することができた。このことから、海水条件においても淡水条件と同様に、改質土でも植物が生育可能であることが実証できた。

5. 考察

土壌の強度について、JIS A 1228 に基づく締め固めた強度は値が過大となり植物の生育基盤の実態を示していないと考えられる。そこで、植栽試験の供試土壌の締め固めない強度について、地力増進基本方針¹⁵⁾に示された水田土壌の目標の強度を参考にして比較した。その結果、図-14 に示すように、水田土壌の主要根群域の強度目標値が 980 kN/m^2 以下であるところ、供試土壌の強度は植物生育に適した範囲にあった。解砕した改質土を浅場の表層材として水中へ撒き出した場合、植物の生育に適した 600 kN/m^2 程度までの強度になることが確認できた。なお、海水条件の改質土区の土壌強度は淡水条件の改質土区と比較して大きい値を示した。これは、淡水条件の供試植物には植栽用に育成された購入個体を株植えて用いたために旺盛に生長し、その結果、根による耕運作用で土壌の強度に影響をおよぼしたが、海水条件の供試植物は地下茎を 4 本ずつ植えたのみであったため、試験期間中には土壌に影響を与えるほどの根の伸長がなかったためと思われる。

また土壌間隙水の pH について、改質土は 2 ヶ月程度で中性域になった。これは植物の良好な生育を阻害する高 pH の影響が経時的に軽減することを示している。

以上により、改質土は植物生育基盤として有効であると判断できた。さらに植栽試験により、淡水、海水の両条件での適用性を実証することができた。今後も調査を行い、長期的な適用性や、植物のクロロフィル濃度、呼吸量などへの影響も明らかにしていきたい。

また本研究では改質土を気中養生後に解砕して浅場の表層材として撒き出すことを想定している。しかし改質土は、材料となる浚渫土の含水比や改質後の養生条件により添加量や強度、pH などが異なる。そのため今後も、試験や実地でのデータの蓄積が必要と考える。

また、海水条件の植栽試験での浚渫土区の土壌強度は非常に小さく、簡易ポータブルコーン試験で 0 kN/m^2 の計測値を示した。植栽試験をおこなった実験水路は流れが緩やかでほとんど攪乱が起こらない。このような静穏条件では植栽土壌にそれほどの強度は必要ないと思われるが、通常、自然条件では流れや風などの外力による攪乱があるため、土壌には植物体を支持できるだけの強度が求められる。今後、外力の影響やその制御と、土壌強度や改質材の添加量の関係についても明らかにしていきたい。

図-12 植栽試験結果(海水条件)

図-13 植栽試験 245 日目の平均草丈(海水条件)

図-14 植栽試験に用いた改質土の締め固めない強度と水田土壌の強度の文献値の比較

*) 文献¹⁵⁾及び山中式土壌硬度計の目盛から作成

**) 文献¹⁶⁾及び山中式土壌硬度計の目盛から作成

6. 結論

湖沼浚渫土および海域浚渫土に改質材を添加，混合した改質土の，植物生育基盤としての適用性に関する試験の結論を記す．

改質土は解砕して水没させると植物の根の伸長可能な範囲の土壌強度になることが確認できた．土壌間隙水の pH も改質数ヶ月後には中性域になり，植物の良好な生育に影響が無いと評価できた．

改質土は淡水条件と海水条件でも植物生育基盤として適用可能であることが実証できた．

以上のことから，浚渫土が軟弱で施工性が悪い場合でも，改質材を添加，混合することで，植物の生育に影響をおよぼすことなく強度増加や施工性向上を図ることが可能であり，浅場の表層材として利用できることが示された．

謝辞：本試験にご協力頂いた徳島大学工学部建設工学科の鶴江智彦氏，上田敦史氏，瀧口裕己氏，尼崎運河（まるまる）クラブ，尼崎市立成良中学校尼崎ネイチャークラブの関係各位に謝意を表す．

参考文献

- 1) 吉田幸司，松原博幸，日高厚：湖沼浚渫底泥の脱水処理による減容化と処理土の有効利用事例，環境技術，Vol.35，No.6，pp.442-446，2006．
- 2) 中瀬浩太，鶴飼亮行，岩本裕之：粘性土よりなる浚渫土砂の干潟への適用性に関する研究，海洋開発論文集，第 23 巻，pp.591-596，2007．
- 3) 竹山佳奈，佐々真志，中瀬浩太，牧野武人：造成した干潟の底生生物相の初期遷移および好適地盤環境条件と微地形の効果，土木学会論文集 B3(海洋開発)Vol.70，No.2，pp.1116-1121,2014.
- 4) 日本製紙連合会：2016 年度「環境行動計画（廃棄物対策）」フォロー・アップ調査結果（2015 年度実績）（オンライン），<http://www.jpa.gr.jp/docs/stats/followup.php>，参照 2016-11-18
- 5) 内山智幸，養嶋裕典，松嶋景一郎，尾谷賢，鈴木善人，野田良巳：古紙スラッジのリサイクル，北海道立工業試験場報告，No.298，pp.125-132，1999．
- 6) 望月美登志，今井五郎，斉藤悦郎，吉野広司：製紙スラッジ焼却灰を基材にした泥土改良工法の開発と適用事例，基礎工，pp64-69，2006．
- 7) 今井大蔵，金子聡，江草清行，勝又英之，太田清久，鈴木透，Ahmed H. Dabwan：ペーパースラッジ焼却灰系凝集固化剤を用いた人工干潟におけるアサリの成長，紙パ技協誌，第 65 巻，第 11 号，pp66-74，2011．
- 8) 久保田健，五十嵐学，増田龍哉，滝川清，志村吉彦，寺澤一雄，小野寺勇雄，福岡大造：PS 灰造粒物による閉鎖性海域における底質環境改善技術の開発，海洋開発論文集，第 26 巻，pp675-680，2010．
- 9) 増田龍哉，久保田健，志村吉彦，寺澤一雄，小野祐司，福岡大造，五十嵐学，滝川清：ペーパースラッジ灰造粒物の現地適用性に関する検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.68，No.2，_492- _497，2012．
- 10) 七都県市首脳会議環境問題対策委員会水質改善対策専門部会：東京湾における底生生物調査指針および底生生物等による底質評価方法，全国公害研会誌，Vol.25，No.2，pp55-61，2000．
- 11) 一色圭佑，山中亮一，上月康則，大熊康平，沓掛安宏，森紗綾香，角元陽一，川井浩史，中西敬，橋丘真：尼崎運河水質浄化施設の水質浄化機能と生態系サービスの評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.71，No.2，_1489- _1494，2015．
- 12) JA 全農肥料農薬部：だれにもできる土壌診断の読み方と肥料計算，（社）農山漁村文化協会，p.78，2013．
- 13) 加島史浩，竹山佳奈，浜谷信介，和栗成樹，山内裕元，鶴飼亮行，岩本裕之：PS 灰系改質材の水域利用における性状の把握および施工方法の提案，土木学会論文集 B3(海洋開発)，第 73 巻，印刷中，2017．
- 14) 高田英夫：塩と生物 - 海洋生物開発の基礎，創元社，pp.127，1974．
- 15) 農林水産大臣：地力増進基本指針，2008．
- 16) 山根一郎編：水田土壌学，（社）農山漁村文化協会，p100，1982．

(2017.2.2 受付)

APPLICABILITY OF MODIFIED SOIL MADE OF DREDGED SOIL AND PAPER SLUDGE ASH AS VEGETATION SOIL OF WATERSIDE

Shinsuka HAMATANI, Fumihiro KASHIMA, Kana TAKEYAMA, Naruki WAKURI,
Hiromoto YAMAUCHI, Hiroyuki IWAMOTO,
Ryoichi YAMANAKA and Yasunori KOZUKI

Recently, shallow place as habitat is constructed by use of dredged soil. In this case, dredged soil is often added modified material in order to increase strength and workability. This modified soil is required to be safe and applicable for habitat. Hence, this study aims to use modified soil, that made of dredged soil and paper sludge ash, as vegetation soil of waterside. By plant test under fresh water condition and seawater condition, strength and pH of modified soil and number and height of the test plants has been checked. As a result, modified soil has shown applicability as vegetation soil of waterside.