

再生二水石膏により農地土壌に改質したため池底泥土の特性

○ 鴫田稔¹・筒井雅行²・平田貴博¹・小島淳一¹・野口真一³・西川美穂³

¹ (株) アイコ・² 飛島建設 (株)・³ (一社) 泥土リサイクル協会

1. はじめに

石膏ボードは、不燃性、防火・耐火性、遮音性、断熱性及び施工性等に優れるため、建築内装材として多用されている。このため、高度経済成長期に建てられた住宅が解体時期を迎えていることなどにより、廃石膏ボードの排出量は今後右肩上がりに増加することが予測されている。しかし、解体系の廃石膏ボードの再資源化率は 50%以下¹⁾と推察され、廃石膏ボードを最終処分する場合には管理型処分場での処分が義務付けられている²⁾ことから、処理費並びに処分場の残余容量を考慮すると、再資源化促進が喫緊の課題となっている。一方、我が国の農業用ため池は築造年度が古く³⁾、堆砂による機能低下が顕在化している。しかし、ため池底泥土(以下、「底泥土」と称する。)は含水比が高く流動性に富むドロドロな状態、或いは粘性が高いベタベタな状態を示すことから、そのままでは再利用はもとより、取り扱うこと自体も難しい。本研究は、廃石膏ボード由来の再生二水石膏により底泥土を改質して得られた農地用土壌の特性について述べるものである。

2. 研究概要

研究開発は、①室内試験、②実証試験、③機能監視の3部構成からなる。室内試験では底泥土及び改質材の特性を把握するための土質試験及び各種分析、並びに改質土の適正配合を見出すための配合試験と改質土の土質試験を行った。実証試験では、室内配合試験の結果を踏まえ、実機での実現可能性の検証と、実機処理土の特性を確認した。機能監視では、実機処理土を用いて模擬畑を設置し、改質土の特性が経時的にどう変化するかを確認した。

3. 廃石膏ボードの現状

石膏ボードが廃材となったものを廃石膏ボードと呼ぶが、**図-1**に示すように、排出プロセスと排出時の形状などから「製造時廃材(製造系廃石膏ボード)」、「新築時廃材(新築系廃石膏ボード)」、「解体時廃材(解体系廃石膏ボード)」の3つに区分される⁴⁾。このうち、製造系廃石膏ボードは工場内でリサイクルされることから市場に出回ることなく、また、新築系廃石膏ボードは石膏ボード企業を中心に再生資材として利用されている。これに対し、解体系廃石膏ボードは年々排出量が増加して年間数百万トンが排出されているとの推計⁵⁾があり、石膏とボード紙の分離及び下地材や金物などの雑物の選別除去、石膏の破砕等の中間処理によって減容化や再資源化が行われているが、リサイクルに係る体制や品質管理を含めた再資源化技術、大量消費が見込める利用分野が確立されていないことなどにより、リサイクルされずに最終処分される割合が高い。また、廃石膏ボードを埋立処分した場合、条件が揃うと、石膏ボードに含まれる有機物の分解副産物を栄養源とする硫酸塩還元菌により硫酸イオンが還元されて硫化水素ガスが発生する。このため、廃石膏ボードを埋立処分する場合には、紙と石膏を分離したうえで管理型処分場に処分することが義務付けられている。しかし、管理型処分場は安定型処分場に比べて処理コスト及び維持管理費が高く、また、残余容量も限られている。こうした実情を踏まえ、廃石膏ボードのリサイクルシステムを確立するための指針策定⁶⁾や、再利用技術に関する研究開発⁷⁾が進められている。

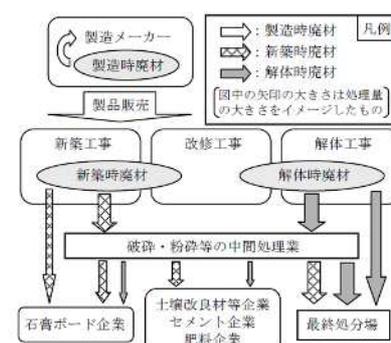


図-1 廃石膏ボードの処理フロー⁴⁾

4. 底泥土の現状

ため池とは、降水量が少なく、付近に取水できるような大きな河川がない地域において、農業用水を確保するために人工的に造られた貯水施設である。ため池は灌漑のほか、洪水調節や土砂流出防止、生物の生息・育成の場、親水空間として地域住民への憩いの場の提供など、多面的な機能を有している。1950年代後半には全国におおよそ28万か所のため池があった。その後、灌漑設備の近代化や、営農者の高齢化に伴う離農、農地転用等に伴う需要低下などからため池の数は漸減し、2022年12月時点では15.2万か所まで減少したが、いまでも重要な灌漑施設としての役割を担っている。

我が国のため池の約7割は江戸時代以前に築造、或いは築造年度が不明とされ、築造後長い年月が経過しているものが

Characteristics of Pond Bottom Mud Modified to Agricultural Soil by Recycled Dihydrate Gypsum

TOKITA Minoru¹, TSUTSUI Masayuki², HIRATA Takahiro¹, KOJIMA Jun-ichi¹, NOGUUCHI Shin-ichi³, NISHIKAWA Miho³

(¹AICO Co., Ltd., ²Tobishima Corporation, ³Mud Recycling association)

KEYWORDS: Pond Bottom Mud, Recycled Dihydrate Gypsum, Modification, Agricultural Soil, Loosening the Compacted Soil, Soil Hardness

多い。このため、池底には流水によって運ばれてきた土砂等が堆積し、貯水容量の減少といった機能低下を引き起こすだけでなく、底樋操作に支障をきたし、緊急放流ができないことによる二次災害のリスクといった安全面の障害に加え、水質悪化やそれに伴う悪臭など、生活環境への影響が顕在化している。また、築造年代が古いため池の堤体は、現行耐震基準を満足しなかったり、老朽化や経年劣化による堤体の弱体化により、頻発する集中豪雨や大地震に対する安全性が懸念されている。このように変状をきたしているため池は、改修や補強により機能回復させることが急務であるが、その際に底泥土を浚渫または落水掘削により撤去する必要がある。しかし、底泥土は一般に細粒土を主体とし、流動性または粘性が高いため取扱いにくく、再資源化は困難を極める。

以前は、稲作が終わった晩秋から早春にかけての農閑期に、施設の点検・補修、底泥土除去による有効貯水量の確保と水質改善、捕獲した魚類を冬場の食料とするなどを目的として掻い掘りが行われ、除去した底泥土は農耕地の豊饒化のために客土として利用されていた。しかし、近年では農業従事者の高齢化などによりあまり実施されることがなくなり、代わって農業農村整備事業等により、底泥土の浚渫も含めて、ため池の防災・減災対策が行われるようになった。その結果、まとまった底泥土が発生することから、脱水・乾燥処理、古紙やPS灰等の吸水材添加による含水比及び流動性低下、セメントや石灰等の固化材添加による化学的安定処理により作業性（取り扱いやすさ）及び品質を向上させて、盛土材や築堤材などの地盤材料として有効利用することに取り組まれるようになった。

一方、建設発生土の有効利用率は平成20年度以降上昇傾向にあり、直近の平成30年度の調査⁸⁾では79.8%となっている。しかし、場外搬出量に対する有効利用率は55.7%に留まっており、4割強の建設発生土は工事間利用できておらず、内陸受入地で処理されている。このため、底泥土を処理して地盤材料として有効利用できる性状に改質したとしても、建設発生土と競合して、建設資材として使用することは難しいことが考えられる。

ところで、底泥土の活用方策に関する既往の研究は、①堤体改修材料⁹⁾、②保育ブロック用資材¹⁰⁾、③干潟創出材料¹¹⁾、④緑化基盤材料¹²⁾、⑤農地客土材¹³⁾、¹⁴⁾等が行われている。このうち①は、ため池を対象に、堤体改修と底泥土の除去処分を同時に達成できるように開発された堤体改修技術であり、設計・施工指針（案）や積算指針（案）が整備され、施工実績も十数例ある。しかし、当該技術は堤体改修が必要な場合には底泥土が有効に利用されるが、そうでない場合には別途処分を検討しなければならない。また、②～④は、研究の域を脱していないものもあり、実用化された技術もあるが、底泥土の消費量が限られている。そうした中、⑤は、底泥土は田畑の土砂が流入してきたものであるとの認識の下、農地に還元するという発想に基づくものであるが、発芽・育成といった実践的な研究が主で、農地土壌としての利用に関する基礎的な研究はほとんどなされていない。

そこで、本研究においては、底泥土が一般客土に比べて肥沃であることに加え、発生地近傍で消費（地産地消）することで運搬費などの経費が抑えられることを踏まえ、農業の生産性向上、農業構造の改善を目的とした畑の大区画化及び水田の畑地化・汎用化（水田において畑作物の栽培を行えるように整備すること）における嵩上げ用客土（基盤土、作土）、或いは降雨で湛水する畑の畝立てとして底泥改質土を有効利用することに取り組むこととし、建設発生土との競合を回避した。

表-1 農地土壌（作土）に求められる品質

5. 農地土壌に求められる品質と判定指標

農地土壌に求められる品質は、表-1に示すように物理特性、理化学特性、生物特性に大別できるが、その内容は多岐にわたる。本研究は、物理特性を改善した底泥土について農地土壌としての適性を評価するものであるが、改質の適否を一つの指標だけで判定することは難しい。いま、畑の作土を対象とすると、求められる物理的品質は土壌が団粒化して膨軟であることに総括される。土壌構造は図-2に示すように2つに大別¹⁵⁾され、土壌の微細粒子が結合せずに単一粒子の状態で存在する単粒構造に対し、土中生物の分泌物や腐植、菌類などの接着作用により、土壌微細粒子が集合して微小な団塊を形成する団粒構造とがある。畑の土壌は団粒構造を形成することで保水性、排水性、通気性、保肥性などが良好となり、作物の成長に適した状態となるが、そのためには、底泥土について以下に述べる3つの特性を改善することが必要である。第一に、自然状態の底泥土は流動性または粘性が高いドロドロまたはベタベタな状態であるが、作土として利用するにはこれをバラバラの状態にする、すなわち、土の含水状態（コンシステンシー）を改善することが重要となる。第二に、土壌粒子は細かい粒子（粘土）から粗い粒子（礫）まで様々であり、土壌の性質はその粒子と組成割合に依存する。粒径を所定の大きさに区分し、その組成を示したものが土性（粒度）であり、国際土壌学会では表-2に示すように12

要求品質	改善目標	具体的診断・調査項目
物理特性	・空気や水が入るための隙間を増やす ・土壌の団粒構造の形成を促進し、土壌を膨軟にする	1. 水分 2. 土性（粒度組成） 3. 透水性 4. 保水性 5. 通気性 6. 土壌硬度（緻密度） 7. 三相（固相、液相、気相）分布
理化学特性	・好適 pH に保つ ・作物の生育に必要な養分のバランスを保つ	1. pH 2. 塩基濃度（電気伝導率；EC） 3. 保肥力（陽イオン交換容量；CEC） 4. 交換性塩基 5. リン酸吸収係数 6. 微量要素
生物特性	・微生物の数や種類を増やす	1. 土壌微生物数 2. 腐植 3. 有機炭素含有量

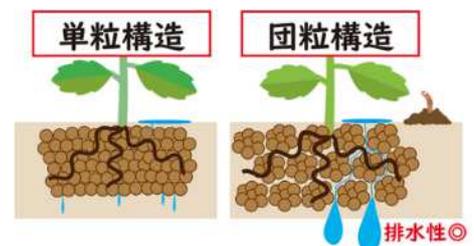


図-2 単粒構造と団粒構造¹⁵⁾

の土性に区分している¹⁶⁾が、普通畑における土性の改良目標はSL(砂壤土)～LiC(軽埴土)とされており¹⁷⁾、土性三角図表で表すと図-3に示す網掛けの範囲となる。すなわち、改質の第二目標は土性の改善である。第三に、土壌は土粒子、水及び空気により構成されているが、それぞれの部分の容積を固相、液相、気相、その組成比率を三相分布という。三相分布の理想的な比率は土壌種別によっても異なるが、一般には固相が45～50%、液相が20～30%、気相は20%以上¹⁸⁾といわれており、土壌の肥沃性や作物の生育には、この土壌三相の適正な関係が決め手となり、三相分布の状態を知ることが土壌診断の基本であり、また土壌三相の適正範囲をつくり出すことが土壌改良の目標となる。

以上のことから、改質土の物理的な品質判定項目はコンシステンシー、土性(粒度)、三相分布の3つとした。

6. 試料土

試験に供した底泥土は、技術の汎用性を高めるため異なる2か所のため池(貯水池)から採取した試料を用いた。一つは、ため池改修工事のために落水干陸した山口県の農業用ため池からバックホウで採取したもの(以下、「底泥土Y」と称す。)で、もう一つは、施設維持管理のために水位を低下させた新潟県の貯水池から泥上掘削機で採取したもの(以下、「底泥土N」と称す。)で、それぞれの底泥土の有姿を写真-1に示す。なお、試料の諸性質については改質土と併せて後述するが、特徴的なことは、底泥土YはpHが9.1とアルカリ性を示したこと、底泥土Nは自然含水比が $w_n=56.7\%$ と液性限界 $w_L=48.8\%$ より大きいことである。

7. 改質材

改質主材は、改質土を農地土壌として使用することに鑑みて、pHが中性域($5.8 \leq \text{pH} \leq 8.6$)の石膏を選定し、廃石膏ボードの処理問題や循環型社会の構築を踏まえて、廃石膏ボード由来の再生石膏に決定した。石膏は、硫酸カルシウム(CaSO_4)を主成分とする鉱物で、結晶水の存在形態により二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)、無水石膏(CaSO_4)に分類される。二水石膏は自然界で非常に安定しており、水とほとんど反応しない。この二水石膏を $150 \sim 180^\circ\text{C}$ で加熱すると結晶水全体の $3/2$ を失って半水石膏に、 200°C 以上で加熱すると結晶水全てを失って無水石膏に転化する。半水石膏に水を加えると再び二水石膏に転化するが、その際に結晶が絡み合って短時間で硬化するという特性を有する。分子量の計算から、半水石膏1,000gは186gの水分を結晶水として取り込んで1,186gの二水石膏を生成するため、底泥土の含水比低下の面からは二水石膏より半水石膏の方が効果的であるが、半水石膏は添加量によっては改質土を硬化させ、作土としてはふさわしくない性状になることが懸念されたことから、改質主材には硬化特性を有さない再生二水石膏(G)を採用した。なお、改質土の品質や性能を安定或いは向上させることを目的に、安定材として消石灰(SL)を、助材としてクリンカアッシュ(CA)を添加することを検討した。

本技術は、底泥土の物理的性質を改善して農地土壌への適用を試みるもので、底泥土の化学的特性を積極的に改善するものではないが、本技術により底泥土を改質したときに化学的特性がどうなるかを把握しておくことも重要なことから、化学試験を実施した。表-3は改質材の化学試験結果を示す。特徴的なことは、再生二水石膏のpHは中性域であるが、消石灰及びクリンカアッシュのpHはアルカリ性であることと、主成分の関係から、再生二水石膏はカルシウムイオンと硫化物イオン濃度が、消石灰はカルシウムイオン濃度が高いことである。また、リサイクルにおいては、再生資材が生活環境保全上支障がないことは大前提であることから、使用材料の環境安全性について確認した。表-4は改質材の重金属等溶出量を示す。改質材単味には土壌環境基準は適用にならないが、照合すると再生二水石膏のふっ素溶出量が基準値を超過していることが確認された。

表-2 土性区分¹⁶⁾

粘土含量	土性区分	略記号	粘土(%)	シルト(%)	砂(%)
15%以下	砂土(Sand)	S	0~5	0~15	85~100
	壤質砂土(Loamy Sand)	LS	0~15	0~15	85~95
	砂壤土(Sandy Loam)	SL	0~15	0~15	65~85
	壤土(Loam)	L	0~15	20~45	40~65
	シルト質壤土(Silt Loam)	SiL	0~15	45~100	0~55
15~25%	砂質埴壤土(Sandy Clay Loam)	SCL	15~25	0~20	5~85
	埴壤土(Clay Loam)	CL	15~25	20~45	30~65
	シルト質埴壤土(Silty Clay Loam)	SiCL	15~25	45~85	0~40
25~45%	砂質埴土(Sandy Clay)	SC	25~45	0~20	55~75
	軽埴土(Light Clay)	LiC	25~45	0~45	10~55
	シルト質埴土(Silty Clay)	SiC	25~45	45~75	0~30
45%以上	重埴土(Heavy Clay)	HC	45~100	0~55	0~55

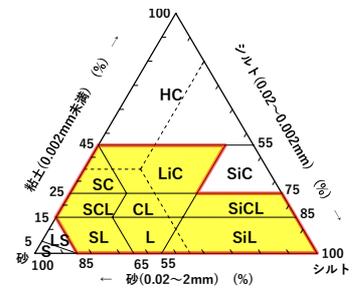


図-3 土性改良目標¹⁷⁾



(a) 底泥土Y(山口県ため池)



(b) 底泥土N(新潟県貯水池)

写真-1 底泥土有姿

表-3 改質材の化学試験結果

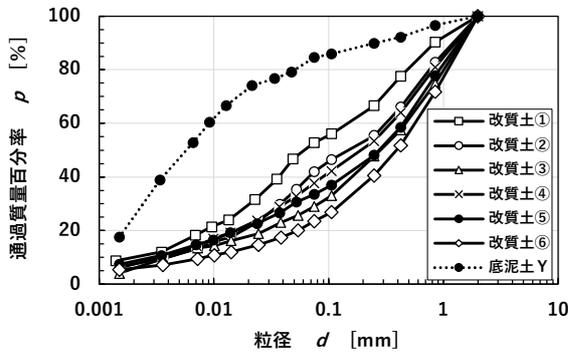
試験・分析項目	細目	単位	分析結果			摘要
			再生二水石膏(G)	消石灰(SL)	クリンカアッシュ(CA)	
土懸濁液のpH		-	7.8	12.7	9.8	JGS 0211
土懸濁液の電気伝導率		mS/m	251	892	4.48	JGS 0212
土の水溶性成分	ナトリウム	mg/g	0.17	0.017	0.002	JGS 0241
	カリウム	mg/g	0.33	0.016	0.010	
	カルシウム	mg/g	8.0	8.8	0.11	
	マグネシウム	mg/g	0.079	<0.001	0.014	
	塩化物イオン	mg/g	0.049	0.032	0.001	
	硫化物イオン	mg/g	15	0.54	0.012	

8. 室内配合試験

室内配合試験では、自然含水比の底泥土に、図-4に示す各種組成（配合）の改質材を $p=200\text{kg/m}^3$ 添加した改質土の土性（粒度）、コンシステンシー及び三相分布により最適配合を選定した。

8.1 土性（粒度）

JIS A 1204 で規定される粒度試験は、沈降分析による土粒子の粒径測定精度を向上させるため、団粒化している土粒子を一つ一つの粒子に分散させ、試験中に再び結合しないように分散剤を加える。しかし、土壌学分野では、元々団粒を形成している土粒子構造を破壊して単粒構造にすることに意味はなく、むしろ団粒構造を形成している土粒子は、分散させることなく団粒径で評価すべきとされている。そこで、山田らの提案¹⁹⁾に基づいて、水中篩分法と沈降分析を併用した方法により改質土の土性（粒度）を評価した。図-5は、改質土の粒径加積曲線を示す。同図には底泥土も併記しているが、改質土は底泥土と比べて右下にシフトしており、粗粒化（団粒化）したことが分かる。なお、粒径加積曲線のシフトは、土粒子構造が団粒化したことによるものだけではなく、試験法の違いによるものも含まれていることに注意されたい。



(a) 底泥土 Y

表-4 改質材の重金属等溶出量（環告第46号）

計量の対象	単位	基準値 ^{注1)}	計量結果			摘要
			再生二水石膏 (G)	消石灰 (SL)	クリンカアッシュ (CA)	
カドミウム及其化合物	mg/L	(≤ 0.01) ^{注2)}	0.002	<0.001	<0.001	
六価クロム化合物	mg/L	(≤ 0.05)	<0.01	0.02	<0.01	
水銀及其化合物	mg/L	(≤ 0.0005)	<0.0005	<0.0005	<0.0005	
セレン及其化合物	mg/L	(≤ 0.01)	0.002	0.002	<0.002	
鉛及其化合物	mg/L	(≤ 0.01)	<0.005	<0.005	<0.005	
ひ素及其化合物	mg/L	(≤ 0.01)	<0.005	<0.005	<0.005	
ふっ素及其化合物	mg/L	(≤ 0.8)	8.2	0.05	<0.05	
ほう素及其化合物	mg/L	(≤ 1)	0.04	0.08	0.08	

注1) 改質材単味には土壌環境基準は適用にならないが、参考までに示した
注2) カドミウムの基準値は、2021年4月1日より0.003mg/Lに強化された

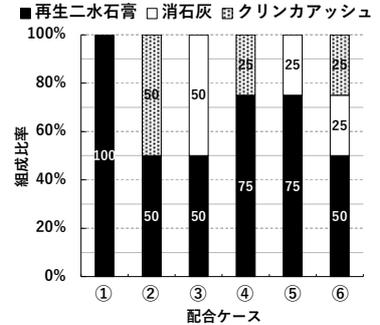
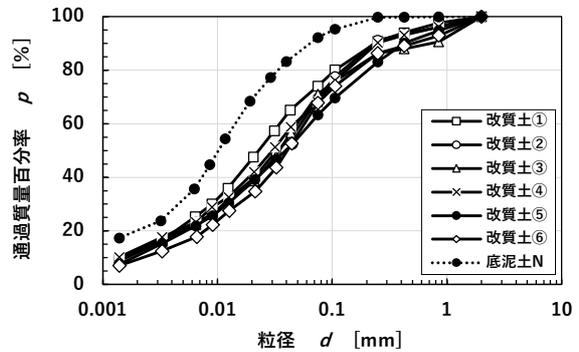


図-4 改質材の組成



(b) 底泥土 N

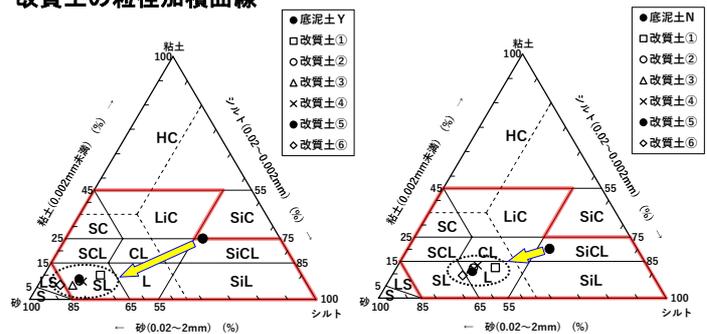
注) 底泥土の粒度試験は JIS A 1204 に、改質土は山田らの方法に基づく

図-5 改質土の粒径加積曲線

改質の結果、図-6に示すように、いずれの配合の底泥土も改質材の組成に関わらず細粒分組成比が減少、粗粒分組成比が増加し、土性の目標範囲外である SiC（シルト質埴土）だった底泥土 Y は、配合⑥が LS（壤質砂土）となって目標範囲内に収まらなかったが、それ以外の配合は目標範囲内の SL（砂壤土）に移行、元々土性の目標範囲内である SiCL（シルト質埴壤土）に位置した底泥土 N は、目標範囲内の L（壤土）もしくは SL（砂壤土）に移行した。

8.2 コンシステンシー

粘性土に改質材を添加した場合、一般に改質土の液性限界 w_L は小さくなり、塑性限界 w_P は大きくなるので塑性指数 $I_P (=w_L - w_P)$ は小さくなることとされるが、土のコンシステンシーは粒度の影響を受けるため、原泥と改質材の相対粒度によっては必ずしもこれと同じ傾向を示すとは限らない^{20), 21)}。傾向が一定しないということは、一見、コンシステンシー特性は改質適否の判定指標となりえない感があるが、図-7に示すように、コンシステンシー指数 $I_c (= (w_L - w) / I_P)$ と液性指数 $I_L (= (w - w_P) / I_P)$ は土の相対的な硬軟、安定性を表すことから、改質良否を評価する適切な指標と考えられる。表-5は、改質土のコンシステンシー特性を示す。いずれの改質土



(a) 底泥土 Y

(b) 底泥土 N

図-6 改質土の土性三角図表

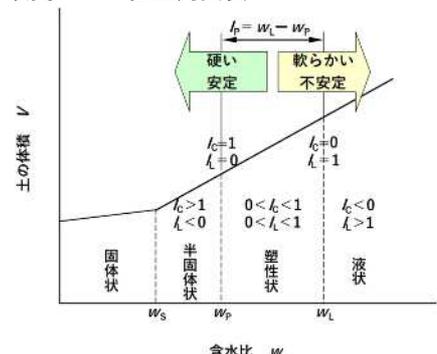


図-7 土のコンシステンシー境界

も、配合にかかわらずwは低下し、 I_c は1に近づくか1より大きくなり、 I_L はゼロに近づき、改質により安定状態になったことを示した。

表一五 改質土のコンシステンシー特性

(a) 底泥土Y

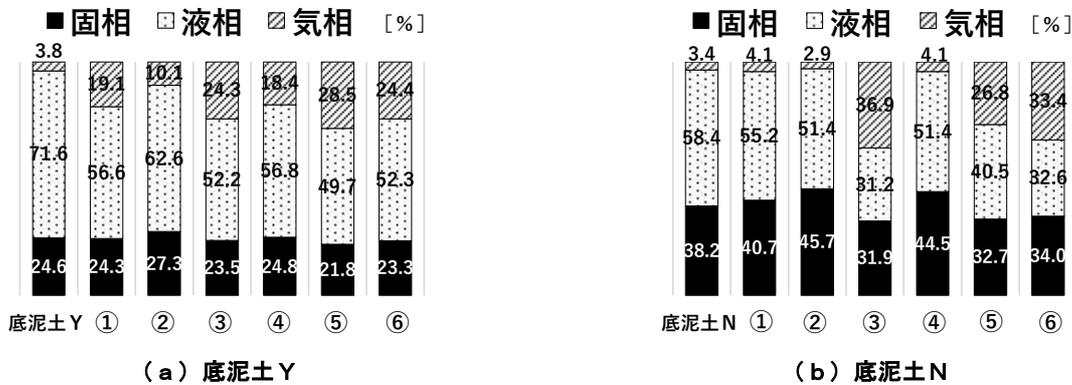
項目	底泥土Y	改質土					
		配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
G:SL:CA	-	100:0:0	50:0:50	50:50:0	75:0:25	75:25:0	50:25:25
ρ_d (Mg/m ³)	0.645	0.637	0.716	0.617	0.651	0.572	0.610
w(%)	111.1	88.9	87.3	84.6	87.3	86.8	85.8
w _L (%)	124.0	125.1	127.9	118.5	122.1	115.3	118.1
w _p (%)	46.4	62.1	59.6	68.7	59.0	62.1	67.9
I_p	77.6	63.0	68.3	49.8	63.1	53.2	50.2
I_c	0.17	0.57	0.59	0.68	0.55	0.54	0.64
I_L	0.83	0.43	0.41	0.32	0.45	0.46	0.36

(b) 底泥土N

項目	底泥土N	改質土					
		配合①	配合②	配合③	配合④	配合⑤	配合⑥
G:SL:CA	-	100:0:0	50:0:50	50:50:0	75:0:25	75:25:0	50:25:25
ρ_d (Mg/m ³)	1.031	1.123	1.237	0.860	1.215	0.892	0.922
w(%)	56.7	49.2	41.5	36.2	42.3	45.4	35.3
w _L (%)	48.8	50.6	49.7	59.4	48.7	62.7	58.8
w _p (%)	34.3	31.8	29.4	42.0	31.1	37.1	35.3
I_p	14.5	18.8	20.3	17.4	17.6	25.6	23.5
I_c	-0.54	0.07	0.40	1.33	0.36	0.68	1.00
I_L	1.54	0.92	0.60	-0.33	0.64	0.32	0.00

8.3 三相分布

図一八は、JIS A 1104 (骨材の単位容積質量及び実積率試験方法) に準じて、 ϕ 150mm, H300mmのサミットモールドに充填した底泥土及び改質土の三相分布を示す。一般に、団粒が発達すると土壌の固相率が減少し、乾燥密度が小さくなるといわれる²²⁾。いずれの改質土とも、消石灰を添加した配合③、配合⑤及び配合⑥は固相率が減少し、乾燥密度も低下して、かつ、気相率が20%を超えたことから、これらの改質土は膨軟な状態に近づいたことを示唆している。



図一八 改質土の三相分布

8.4 実証試験配合

室内配合試験において、土性(粒度)、コンシステンシー特性及び三相分布から改質適否を判定したが、要求品質を満足した配合は、土性:配合①~⑤、コンシステンシー:配合①~⑥、三相分布:配合③、⑤、⑥となり、3要件全てを満足したのは配合③及び配合⑤となった。今回の研究開発の目標の一つは、廃石膏ボード由来の再生石膏の活用促進であることから、再生石膏の使用量が多い配合⑤を実証試験における設計配合とした。

8.5 改質土の化学特性及び環境安全性

表一六は、配合⑤(G:SL:CA=75:25:0)の改質土の化学特性を示す。改質土のpHは、アルカリ性の安定材(消石灰)を添加したことでアルカリ性を示した。また、カルシウムと硫化物イオンを豊富に含む再生二水石膏とカルシウムを主成分とする消石灰を添加したことで電気伝導率が高くなった。これは肥料養分濃度が上昇したことを示すが、適正範囲(50~100mS/m)を超えているため、塩基濃度障害(肥焼け)を起こすことが懸念される。また、カルシウムを主成分とする再生二水石膏と消石灰を添加したことで、改質土のカルシウムイオン濃度は原泥と比べて12~300倍に増加したが、拮抗作用(互いにその効果を打ち消すように働く作用)により交換性塩基であるカリウム及びマグネシウムの吸収が阻害されることが予測される。

表一七は、配合⑤の改質土の重金属等溶出量を示す。再生二水石膏単味ではふっ素溶出量が基準値を超過していたが、改質土では基準値内に収まった。ふっ素溶出量はpHに依存し、中性域で少なく、酸及びアルカリ領域で多くなるといわれている²³⁾。今回改質によってpHが高くなったにもかかわらず基準値内に収まったのは、消石灰による重金属

表一六 改質土の化学試験結果

試験・分析項目	細目	単位	分析結果				概要
			底泥土Y		底泥土N		
			原泥	改質土⑤	原泥	改質土⑤	
土懸濁液のpH	-	-	9.1	12.6	6.9	11.8	JGS 0211
土懸濁液の電気伝導率		mS/m	26.8	794	8.5	153	JGS 0212
土の水溶性成分	ナトリウム	mg/g	0.023	0.062	0.009	0.007	JGS 0241
	カリウム	mg/g	0.034	0.020	0.020	0.016	
	カルシウム	mg/g	0.530	6.8	0.020	6.9	
	マグネシウム	mg/g	0.012	0.001	0.006	<0.001	
	塩化物イオン	mg/g	0.011	0.026	0.004	0.010	
	硫化物イオン	mg/g	0.720	9.2	0.039	11.0	

表一七 改質土の重金属等溶出量(環告第46号)

計量の対象	単位	基準値	計量結果				概要
			底泥土Y ^(注1)		底泥土N ^(注2)		
			原泥	改質土⑤	原泥	改質土⑤	
カドミウム及びその化合物	mg/L	≦0.01 ^(注3)	<0.001	<0.001	<0.0003	0.0003	
六価クロム化合物	mg/L	≦0.05	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	
水銀及びその化合物	mg/L	≦0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	
セレン及びその化合物	mg/L	≦0.01	<0.002	<0.002	<0.002	0.002	
鉛及びその化合物	mg/L	≦0.01	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	
ひ素及びその化合物	mg/L	≦0.01	0.005	0.010	<0.005	0.005	
ふっ素及びその化合物	mg/L	≦0.8	0.25	<0.08	<0.05	0.18	
ほう素及びその化合物	mg/L	≦1	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	

注1) 本分析は、2020年12月に実施

注2) 本分析は、2021年9~10月に実施

注3) カドミウムの基準値は、2021年4月1日より0.003mg/Lに強化された

等の固定作用（溶出抑制）²⁴や土壌の吸着作用²⁵が機能していることなど考えられるが、特定には至っていない。

9. 実証試験

実証試験では、建設汚泥等を地盤材料に再資源化することを目的に開発したE³（イーキューブ）システム²⁶の処理装置を使用した。同装置は、図-9に示すように、泥土及び改質材供給装置、連続ミキサー（攪拌混合装置）、排出装置（ベルトコンベア）から構成されている。

自然状態の底泥土に室内配合試験で決定した設計配合の改質材を添加し、底泥土及び改質材の供給状況、排出された改質土の性状等について検証した結果、一部装置の軽微な改造をすることで、問題なく対応できることが確認できた。また、写真-2及び写真-3に示すように、粘性または流動性を帯びていた底泥土は改質により団粒化し、指頭法²⁷による土性判定の結果、壤土（L）と砂壤土（SL）の中間的な性状を示し、土性の改良目標範囲内にあることが確認できた。

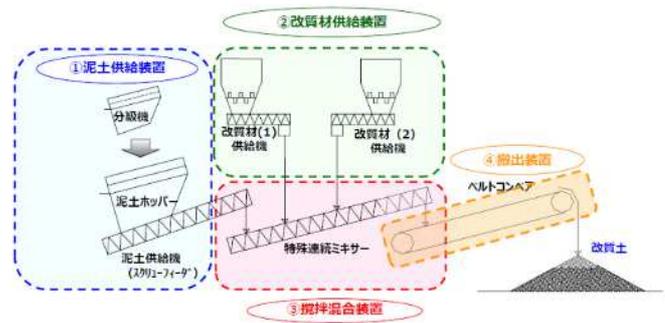


図-9 実証試験処理装置システム概要



(a) 原泥



(b) 改質土

写真-2 底泥土Y



(a) 原泥

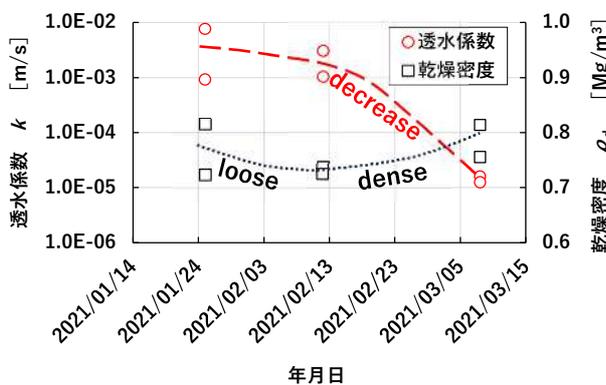


(b) 改質土

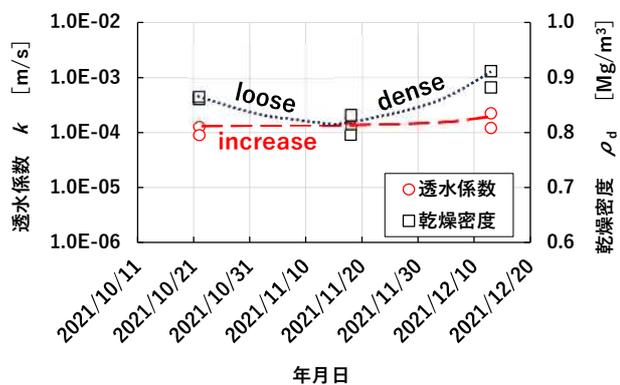
写真-3 底泥土N

10. 機能監視

改質土を用いて幅1.0m、長さ3.0m、深さ45cm、畝高5cmの模擬畑を作り、改質土特性の経時変化を確認した。図-10は、模擬畑からコア cutter（φ75mm）で採取した供試体の透水係数 k と乾燥密度 ρ_d の経時変化を示す。改質土Yの k は時間経過とともに小さくなっているが、改質土Nの k は微増している。一方、 ρ_d は、改質土Y、改質土Nとも減少したのち増加に転じている。一般に、地盤の k は ρ_d が大きいほど小さくなり、改質土Yの終盤と改質土Nの序盤はその理論どおりの挙動（ k と ρ_d の回帰直線の勾配、或いは回帰曲線の接線の傾きが逆）を示したが、改質土Yの序盤と改質土Nの終盤は逆の傾向（ k と ρ_d の回帰直線の勾配、或いは回帰曲線の接線の傾きが同一）を示した。後述の土壌の緻密度（土壌硬度）を見ると改質土Y、改質土Nとも時間経過に伴って緻密化しており、畑が締めりつつあることを示しているが、供試体の ρ_d は改質土Y、改質土Nとも序盤は減少しており、今後その理由について検討していきたい。



(a) 改質土Y



(b) 改質土N

図-10 模擬畑の透水係数と乾燥密度の経時変化

図-11は、緻密度（山中式土壌硬度）の経時変化を示す。1回の測定は5か所の測点で行い、5点の算術平均を「平均値」、最大値と最小値を棄却した3点の算術平均を「測定値」とした。改質土Yは時間経過とともに土壌硬度が大きくなったが、普通畑における緻密度の改良目標値は10~24mm²⁸とされており、目標範囲内に収まっている。なお、

経過観察期間が長くなると改良目標値を超える可能性もあるが、起耕・耕耘により解消されると考えられる。一方、改質土Nも時間経過に伴って土壤硬度が大きくなる傾向を示したが、観察期間中は目標範囲を下回った。土壤硬度が10mmを下回ると根が伸びやすくなるが、機械乗り入れに際しての地耐力不足が発生したり、気相過剰に伴って通気性が良すぎて乾燥したり、逆に液相過多により根腐れを起す可能性もあるが、掘り起こして観察したが特に異常は認められなかった。

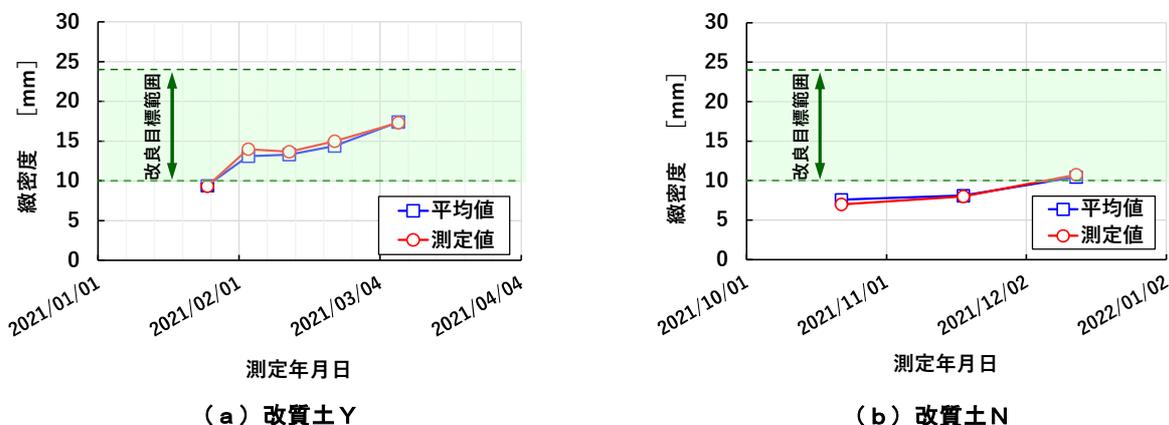


図-1-1 模擬畑の土壤硬度経時変化

図-1-2は、模擬畑の三相分布の経時変化を示す。回帰分析をすると、改質土Y、改質土Nとも気相は減少、液相は増加、固相はほぼ一定という傾向が見受けられ、時間経過に伴って間隙に雨水が入り込み、気相の一部が液相に変わったと推察される。

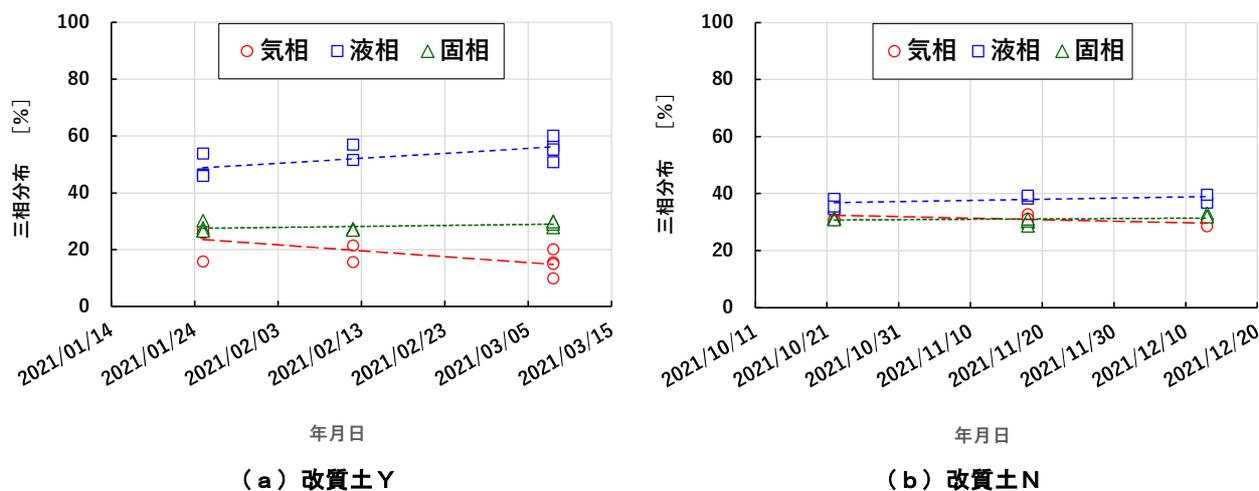


図-1-2 模擬畑の三相分布経時変化

11. まとめ

2か所で採取した底泥土に対し、再生二水石膏を用いて農地土壌への改質を試みた結果、目標とした物理特性を満足する改質土を得ることができた。しかし、一方でpH、EC（電気伝導率）、水溶性成分などの化学的特性において課題が残ったため、今後はこれらの改善に努め、底泥土を農地土壌に改質する技術を確認していきたい。

謝辞：本研究は、農林水産省の補助（官民連携新技術研究開発事業，2農振第2166号，3農振第2049号）を受けて実施したものである。ここに記すことで謝意を示す。

参考文献

- 1) 一般社団法人 石膏ボード工業会：石膏ボードハンドブック 環境編，平成28年4月，入手先〈https://www.gypsumboard-a.or.jp/pdf/Environment_P199-212.pdf〉（参照 2023.4.5）
- 2) 環境省：廃石膏ボードから付着している紙を除去したものの取扱いについて（通知），環廃産発第060601001号，平

- 成 18 年 6 月 1 日, 入手先 (<https://www.env.go.jp/content/900537071.pdf>) (参照 2023.4.5)
- 3) 農林水産省農村振興局: 農業用ため池の管理及び保全に関する法律の概要, 令和元年 6 月, 入手先 (<https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/r0101/attach/pdf/index-14.pdf>) (参照 2023.4.6)
 - 4) 亀井健史・加藤孝明・珠玖隆行: 半水石膏の地盤改良材としての有効利用ー廃石膏ボードの再利用ー, 地盤工学ジャーナル, Vol.2, No.3, pp.245-252, 2007 年
 - 5) 一般社団法人 産業環境管理協会: リサイクルデータブック 2022, p.58, 2022 年 7 月
 - 6) 国立研究開発法人 国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター: 再生石膏粉の有効利用ガイドライン (第一版), 令和元年 5 月
 - 7) 廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討委員会: 廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する検討調査, p.11, 平成 14 年 12 月
 - 8) 国土交通省: 平成 30 年度建設副産物実態調査結果(確定値) 参考資料, 入手先 (https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d11pdf/fukusanbutsu/jittaichousa/H30sensusekka_sankou2.pdf) (参照 2023.4.13)
 - 9) 福島伸二・北島明・石黒和男・池田康博・酒巻克之・谷茂: 固化処理したため池底泥土の盛土材への適用性の研究, 土木学会論文集, No.666, III-53, pp.99-116, 2000.12
 - 10) 柳澤賢一・山寺喜成・宮崎敏孝: 堆積泥土を用いた保育ブロックの開発に関する実験的研究, 日本緑化工学会誌, 30 巻, 第 1 号, pp.289-292, 2004
 - 11) 渡邊圭四郎・杉山行英・伊野波秀房・植田昌明: 浚渫土を地域資源として活用した人工干潟の造成例, 農業土木学会誌, 第 72 巻, 第 8 号, pp.685-688, 2004 年 8 月
 - 12) 山中稔・富田直人・横田耕三・長谷川修一・増田拓朗: ため池底泥焼成物の緑化基盤としての活用に関する基礎的研究, Eco-Engineering, Vol.17, No.4, pp.223-229, 2005
 - 13) 中川靖起・横濱充宏・小野寺康浩: 農業用ダムの貯水敷内堆積土の客土材としての評価, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.693-694, 2005 年 7 月
 - 14) 滝澤倫顕・村上章・西村伸一・村上賢治・伊藤寛之: ため池底泥の農地客土への適用性, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.842-843, 2008
 - 15) 施設園芸.com: 団粒構造とは? 土作りの方法や土壌環境への効果を解説! 入手先 (<https://shisetsuengi.com/news-column/growth-up/growth-up-056/>) (参照 2023.4.20)
 - 16) 新潟県農林水産部: 新潟県における土づくりのすすめ方, 平成 17 年 2 月
 - 17) 農林水産省構造改善局: 土地改良事業計画設計基準 計画 土層改良, p.24, 昭和 59 年 1 月
 - 18) 青森県「攻めの農林水産業」推進本部: 「健康な土づくり」技術マニュアル, p.21, 平成 20 年 12 月
 - 19) 山田宣良・横瀬広司: 団粒分布に基づく土壌の団粒の評価法, 農業土木学会誌, 第 59 巻, 第 4 号, pp.378-391, 1991 年 4 月
 - 20) 重松宏明・加島幸二・重本基成・進藤浩・村尾哲男: 石炭灰混合土の土質特性に関する実験的研究, 第 13 回環境地盤工学シンポジウム, pp.155-158, 2019 年 9 月
 - 21) 望月美登志: PS 灰改質材による浚渫処理土の強度改善効果について, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, I_205-I_210, 2019
 - 22) 山田宣良: 団粒と土壌の理工学性との関係ー土壌の団粒に関する研究 (V) ー, 農業土木学会論文集, 第 130 号, pp.69-74, 1987.8
 - 23) 水野勝・坂井田稔・三輪のり子・大須賀吉政: 再生品の溶出特性に関する研究, 愛知県環境調査センター所報 46, pp.47-54, 2018
 - 24) 川嶋幸徳・森田弘昭: 焼却灰の重金属溶出特性に関する研究, 土木技術資料. 45-9. pp.60-65, 2003
 - 25) 菊池浩貴・石川堅一・高橋末広: トンネル掘削土から発生する自然由来重金属等のリスク評価および対策の検討ー施工現場での迅速な対応に向けてー, 平成 29 年度 中部地方整備局管内事業研究発表会発表論文
 - 26) 飛鳥建設株式会社: 建設汚泥の再資源化システム E³ (イーキューブ) システム (粒状固化工法), 入手先 (https://www.tobishima.co.jp/technology/environment_ground/ground_e3.html) (参照 2023.5.8)
 - 27) JA 全農 肥料農薬部: 土壌診断なるほど! ガイド 読んで, 診て, 作物イキイキ!, p.13, 平成 20 年 12 月
 - 28) 前掲 17)