

(13) 脱水ケーキの土壌緑化基盤材としての再利用に関する現場適用事例

FIELD APPLICATION EXAMPLE ON RECYCLE OF DEWATERED
CAKE AS VEGETATIVE SOIL BASE

山田僚一*, 佐藤俊哉**, 堂免孝志***, 須藤芳雄****, 福埜慎也*****, 丸山俊朗*****

Ryoichi YAMADA*, Toshiya SATO**, Takashi DOMEN***, Yoshio SUTO****, Shinya FUKUNO***** and Toshiro MARUYAMA*****

ABSTRACT ; A huge amount of dewatered cake is generated from water treatment processes in large-scaled construction work sites. Although the dewatered cake has been conventionally disposed as an industrial waste, its recycling becomes a big social concern, and the reuse of the dewatered cake is required. In this paper, we describe a past case in which the dewatered cake generated in the actual hydroelectric power plant expansion construction was recycled as a vegetative soil base. The dewatered cake, a single-grained structure of inorganic particles, was not suitable for the growth and development of vegetation. The improvement of physical and chemical properties of the dewatered cake was then required. The improvement of physical and chemical properties was achieved by mixing bark composts and fermented chicken manure composts with the dewatered cake and by aging them for 14 days. Mixing of such good organic composts improved directly soil in fertilizer aspect, served as a supply source of various microorganisms, expecting improvement effects to the physical properties by those metabolites. This improved soil caused neither germination disorder nor growth disorder to the vegetation, thus, it was shown that the dewatered cake was reusable as a vegetative soil base material with such a procedure.

KEYWORDS ; construction waste, dewatered cake , recycle, vegetative soil base, on-site treatment

1 はじめに

ダム建設工事等の大型建設工事では、濁水処理に伴って発生する脱水ケーキの発生量は膨大なものとなる。建設副産物の再利用が社会的に強く求められるなかで、従来、産業廃棄物として処分されてきた脱水ケーキに対しても、その再利用を求められる場面が増えつつある。脱水ケーキを構成する土砂粒子は、元来、自然界由来の無機粒子であるため、有機物を混合して物性改善を施せば、植物の生育し得る土壌緑化基盤材としての再利用が可能であると考えられる。しかしながら、濁水処理に伴って発生した脱水ケーキを土壌緑化基盤材として再利用に供した研究・実例はほとんど見あたらない^{1), 2), 3)}。筆者らは、奥只見発電所(新潟県・福島県)増設工事における濁水処理に伴って発生する脱水ケーキに、良質の有機資材(コンポスト)を混合・養生す

* 佐藤工業(株)中央技術研究所 (Engineering Research Institute, Sato Kogyo Co.,Ltd.)

** 電源開発(株)奥只見・大鳥増設建設所 (Okutadami-Otori Hydro Project Construction Office, Electric Power Development Co.,Ltd.)

*** 佐藤工業(株)関東支店 (Kanto Branch Office, Sato Kogyo Co.,Ltd.)

**** 佐藤工業(株)土木本部 (Division of Civil Work, Sato Kogyo Co.,Ltd.)

***** (株)サトーマシーナリ (Sato Machinery Co.,Ltd.)

***** 宮崎大学工学部土木環境工学科 (Dep.of Civil and Environmental Engineering, Miyazaki University)

ることによって物性改善を図り、緑化の際の土壌基盤材(以降、植生土壌と称する)として再利用することを研究・実施してきた。このような有機資材を混合することで各種の有機物や微生物が供給され、緻密な無機粒子の集合体である脱水ケーキに、擬似的な団粒構造を形成させることが期待できる。つまり、無機粒子の集合体であった脱水ケーキを、短期間のうちに植物の生長し得る植生土壌として物性改善することが可能である。

奥只見ダムは、越後三山只見国定公園(新潟県・福島県)内に位置し、絶滅危惧種である国の天然記念物イヌワシの棲息も確認されており、工事の進行にあたっては、周辺の環境保全に積極的に取り組んでいる⁴⁾。また、奥只見発電所増設工事を含む奥只見・大鳥発電所増設工事(電源開発㈱)は、平成11年9月30日に、建設工事機関としては日本で初めてISO14001の認証取得に至っている。この環境マネジメントシステム(EMS)における環境目的のひとつとして、「建設副産物ではできるだけリサイクルによる有効利用に努め、利用できない廃棄物は適正に処理する」ことを定めており、これを実現させるための環境目標として、「建設汚泥(脱水ケーキ等)の50%を土壌化資材等として有効利用する」としている。本技術はこの環境目標を実現させるための手段として適用しているものである。

本報告では、脱水ケーキを植生土壌化する際の物性変化について、現場内に設置した植生土壌化プラントにおいて調査した結果と、物性改善を施した植生土壌の利用可能性について、数種の植物を用いて発芽・生育試験を行った結果について述べる。

2 供試材料

脱水ケーキは、骨材製造プラントから発生する濁水をポリ塩化アルミニウム(PAC)とアニオン系高分子凝集剤により凝集沈殿させ、この凝集沈殿汚泥をフィルタープレスにより脱水したものである。フィルタープレスのプレス圧は0.88MPa(9 kg/cm²)であった。骨材原石には、砂岩を主体とする地山を掘削した際に生じたずりを用いている。

有機資材としては、バーク堆肥と発酵鶏糞堆肥(岩手県住田町JAより購入したスミタバークとスミタ鶏糞)を用いた。それぞれ完熟に近い良質の堆肥である。一般にバーク堆肥は土壌物理性の改善効果に優れており⁵⁾、発酵鶏糞堆肥は肥料面・土壌理化学性の改善効果に優れている⁵⁾とされている。

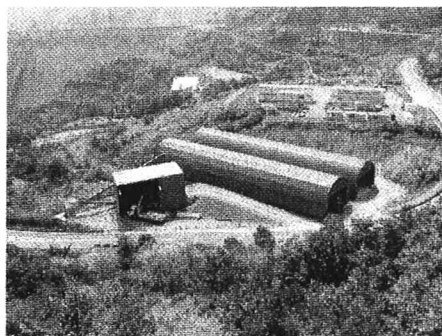


写真-1 プラント全景

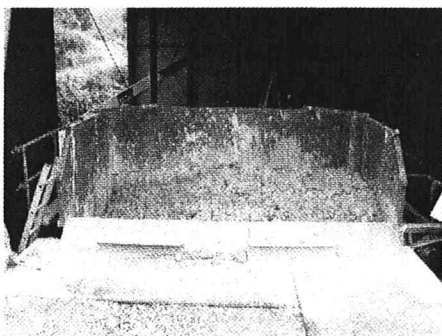


写真-2 脱水ケーキホッパー

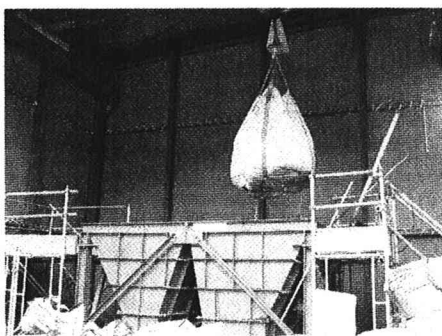


写真-3 有機資材ホッパー

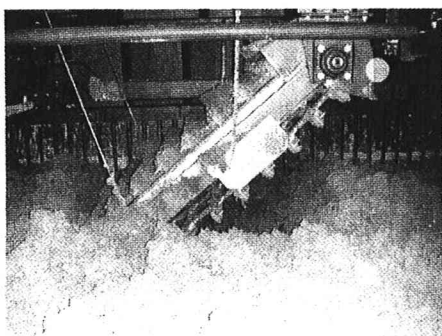


写真-4 切り返し機

3 物性改善の方法

3. 1 植生土壌化プラントの概要

脱水ケーキの植生土壌化プラントは、次のような機器類で構成されている。脱水ケーキホッパー(容量約 $10\text{ m}^3\times 1$ 槽)、有機資材ホッパー(容量約 $4.5\text{ m}^3\times 2$ 槽)、ケーキ解砕機(処理能力; $10\text{ m}^3/\text{hr}\times 1$ 台)、養生槽(長さ $44\text{ m}\times$ 幅 $7.3\text{ m}\times$ 高さ $1.5\text{ m}=\text{約 }482\text{ m}^3/\text{槽/棟}$, 2棟)。各機器類はベルトコンベヤによって連結され、各ホッパーより供給された資材(脱水ケーキ、パーク堆肥、および発酵鶏糞堆肥)が養生槽に搬送される。養生槽内には、スクープ式の切り返し機が設置され、混合土(脱水ケーキと有機資材を混合したものを称し、養生を終了した混合土を改良土と称することとする)の攪拌・混合を行なう。また、送風機(空気供給能; $6.5\text{ m}^3/\text{分}\times 3$ 台)が養生槽ごとに設置され、養生槽底面に敷設されたエア配管よりエアレーションを行なう。

写真-1～写真-6は、これらの主要機器類と、それらの運転状況を示している。

3. 2 物性改善手法

脱水ケーキの植生土壌への物性改善は、次の手順によった。水処理プラントで発生した脱水ケーキは、脱水ケーキホッパーに一時的に貯留され、付属の定量フィーダーによって一定量が連続的に供給される。この脱水ケーキにパーク堆肥と発酵鶏糞堆肥が添加される。有機資材は有機資材ホッパーより、脱水ケーキ：パーク堆肥：発酵鶏糞堆肥 $=100:10:10$ (容量比)の割合となるように、それぞれ供給される。これらの資材は、高速回転する解砕羽根付きのローター2基(押込粗解ローター; 115 rpm , 解砕ローター; 1007 rpm)を内蔵した解砕機に送られ、粉碎されながら、見かけ上、均一に混合される。この混合土は養生槽に投入され、14日間の養生を行なう。養生中の混合土は、エアレーションを受けながら切り返し機によって1～2回/日の頻度で攪拌・混合を受け、養生槽の出口へと移動する。混合土の堆積高さは $1.5\sim 1.8\text{ m}$ である。

図-1に物性改善処理フローを示す。



写真-5 混合土の切り返し状況(1)

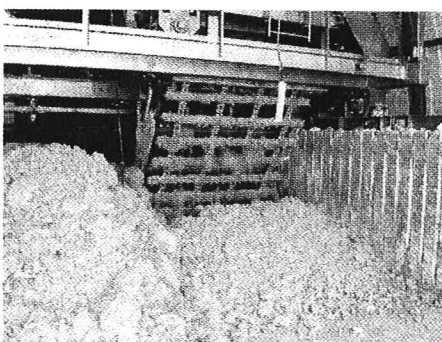


写真-6 混合土の切り返し状況(2)

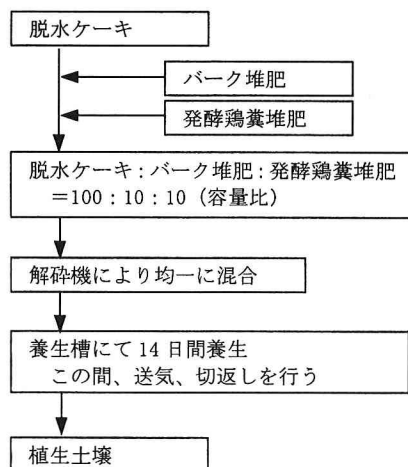


図-1 脱水ケーキの物性改善処理フロー

4 測定項目および測定方法

4. 1 脱水ケーキの物性試験

原料となる脱水ケーキの物理特性を把握するため、pH、含水比、密度の測定と、粒度試験および液性限界・塑性限界試験を土質試験法⁶⁾に拠って実施した。また、理化学特性を把握するため、腐植と有機炭素はチュ

ーリン法⁷⁾、全窒素はケルダール法⁸⁾、陽イオン交換容量(CEC)はセミクロシヨーレンベルガー法⁹⁾、有効態リン酸はトルオーグ法⁸⁾、リン酸吸収係数はリン酸アンモニウム液法⁶⁾に拠って測定した。

4. 2 養生槽内における混合土の物性測定

養生期間中における混合土の物性の経時変化を把握するため、次の測定を行った。混合土の温度は、液体充满圧力式温度計(兵田計器工業製 H4)を用いて、表層から-0.5 m、-1.0 m、-1.4 m の位置で測定した。二酸化炭素(CO₂)とアンモニアガス(NH₃)発生量は、混合土の表層から約30 cm の間隙ガスを捕集し、北川式ガス検知管(光明理化学工業製 炭酸ガス;126SF, 126SA, およびアンモニア;105SD)により測定した。pH および含水比は、表層の試料を採取して分析に供した。三相分布(土壌の固相・液相・気相の占める比率を容積比で示したもの)は、100 ml 容の土壌採取用ステンレス試料円筒(大起理化学工業製 DIK-1801)を用いて混合土試料を採取し、試料含水比を計算することで液相と固相の容積比率を求め(固相の密度は、5.1 項に示すように 2.8 g/cm³ とした)、全体容積から固相と液相の比率を差し引くことで気相の比率を算出した。これらの測定は、養生槽内における混合土について、その投入地点から 5 m ごとに行った。養生槽内における 5 m の距離は、約 2 日間の養生期間に相当する。改良土の理化学特性の分析は、脱水ケーキの分析と同様に行った。対照として、畑土(神奈川県厚木市内)の分析を同様に行った。分析に供した畑土は、肥料の散布が随時行われ、管理が行き届いた肥沃な土壌といえる。

4. 3 植生試験

植生試験は、脱水ケーキと 14 日間の養生を終えた改良土について、コマツナとハツカダイコンを用いて発芽試験を行った。対照区として畑土を用いた。試験期間は播種後 21 日までとし、播種数(10 粒)に対する発芽率を求めることにより発芽障害の有無を確認した。発芽試験には 1 L 容のポットを用いた。さらに、緑化の際の代表的な植物種である芝について生育試験を行った。試験は 13 L 容(25 cm×37 cm×14 cm H)のプラスチックコンテナに改良土を収容して、芝を播種し、発芽状況を確認したうえで生育状況を 8 ヶ月間にわたって観察した。さらに、数種の花弁類(スプレー菊、ピキシータイム、ベゴニアなど)の苗木や、キャベツの幼苗を改良土に移植し、2 ヶ月間にわたって生育状況を観察した。

5 結果および考察

5. 1 脱水ケーキの物性

脱水ケーキの pH は 8~11.5、含水比は 22~29%の間で変動した。密度は 2.78~2.79 g/cm³、液性限界は

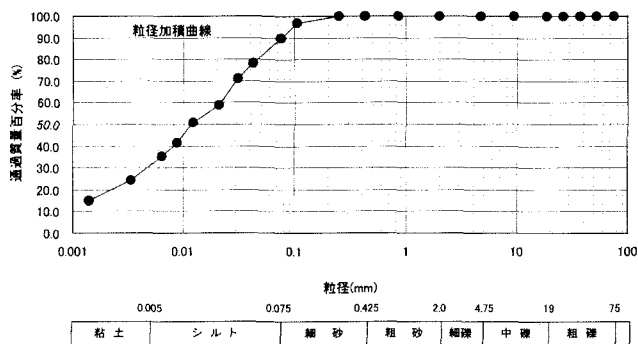


図-2 脱水ケーキの粒径加積曲線

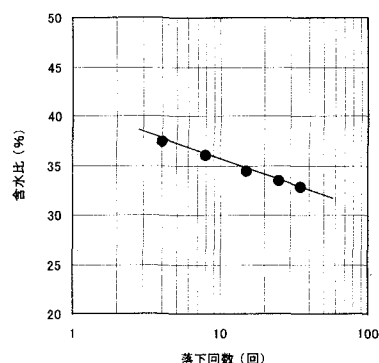


図-3 流動曲線

34%，塑性限界は13%を示した。

この脱水ケーキの外観上の大きな特徴は、含水比が 22～29%と低い値を示したにもかかわらず、外部から振動を与えると、脱水ケーキ表面に容易に水分がしみ出すことであった。また、極めて粒子が細かく、しかも非常に柔らかなため自立性を有さず、極めて粘稠性が高かったことなどが挙げられた。

これらの特徴は、次の試験結果から裏づけられた。すなわち、図-2 に示した粒径加積曲線から、脱水ケーキは細砂分 10%，シルト 60%，および粘土 30%から成る微細な粒子群により構成されていること。図-3 に示した流動曲線は、脱水ケーキの性状が含水比の変化を鋭敏に反映することを示しており、しかも、脱水ケーキ発生時の含水比が液性限界に近いことである。このような結果から、脱水ケーキは振動などの外部からの刺激で水分が遊離しやすい柔らかな性状を呈したものと判断された。

5. 2 養生槽内における混合土の物性変化

図-4 に混合土の物性の経時変化を示す。図には、各測定項目の相互関係を比較するためまとめて示した。結果は平成 12 年 10 月 25 日の測定結果の例である。

混合土の温度は、-0.5 m、-1.0 m、-1.4 m の各深度ではほぼ同じ温度(0～1.5℃の差)を示したため、表層より-1.0 mにおける温度を示した。

(1) 温度

混合土の温度は、養生を開始した直後から上昇し始め、15～20 m 地点(養生約 5～7 日)で最高に達し、温度は 30℃を示した。その後は徐々に低下し、養生終了時の 40 m 地点(養生 14 日目)では 24℃となった。図-4 は、平成 12 年 10 月における測定例であるが、混合土の温度は、外気温の高い夏季には、最高で 45℃に達することもあった。

(2) 二酸化炭素(CO₂)

CO₂ 発生量の経時変化は、温度変化と同様の傾向を示した。5～10 m 地点(養生約 2～3.5 日)までは 800～1,200 ppm であったものが、15 m 地点(養生約 5 日目)でピークに達し、13,000 ppm を示した後、減少傾向を示した。

このような混合土の温度上昇と CO₂ 発生量の増加は、有機資材の混合によって供給された各種の微生物の代謝活動によるものと考えられる。すなわち、温度の上昇は微生物の代謝熱によるものであり、CO₂ の発生は有機物の分解に伴って発生したものと考えられる。温度上昇と CO₂ 発生量の増加は、いずれも 10 m 地点(養生約 3.5 日目)から急速に始まり、15 m 地点(養生約 5 日目)で最大値を示している。このことから、

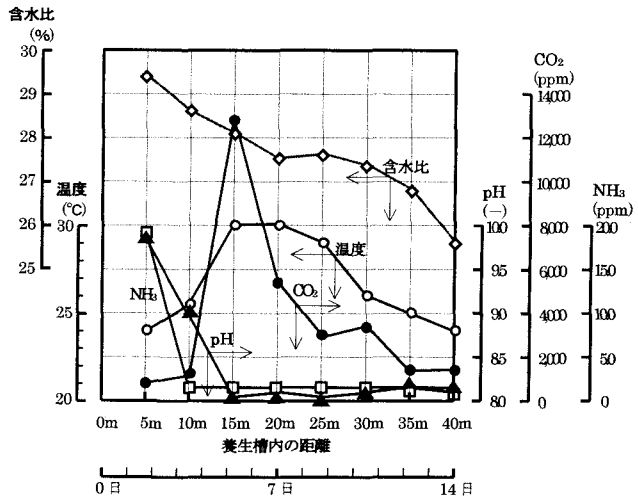


図-4 養生槽内における混合土の物性変化

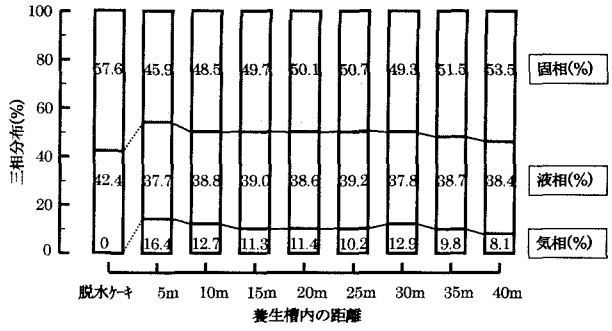


図-5 養生槽内における混合土の三相分布の変化

この時期が養生槽の中でも微生物活動が最も盛んであったことがうかがわれる。一般に、土壌微生物の存在およびその代謝物は、土壌有機物とともに土壌の物性改善に非常に重要であることが知られている^{9), 10), 11)}。脱水ケーキを植生土壌として再利用する際にも、その物性改善に各種の微生物が大きく寄与していると考えられる。

(3) 含水比

含水比は経時的に低下傾向を示した。この含水比の低下は、混合土の温度上昇による水分の蒸発や、自然蒸発によるものと考えられる。

(4) pH

脱水ケーキの pH は、ときに pH 11 程度の高い値を示すことがある。しかしながら、このような脱水ケーキの高 pH は、養生の進行に伴って低下することが示された。脱水ケーキの pH が高い場合でも、混合土 pH は養生開始直後から急速に低下し、15 m 地点(養生約 5 日目)では pH 8 にまで低下した。このような pH の低下は、混合土が切り返しによって空気中の CO₂ に触れることや、徐々に活発になる微生物活動によって発生してくる CO₂ によって中和されたものと考えられる。改良土は土壌基盤として植物を生育させるのであるから、中性であることが望ましい。

(5) アンモニアガス (NH₃)

養生開始直後は、混合土自体の pH が高いため、有機資材中のアンモニア成分が揮散する。そのため、はじめは混合土の間隙ガス中のアンモニアガス濃度も約 20 ppm の高い値を示した。しかしながら、混合土 pH の低下とともにアンモニアガス濃度は低減し、養生 3 日目以降は 1~2 ppm 程度にまで低下した。当初、堆肥などの有機資材を使用するため、アンモニアなどに代表される悪臭の拡散が懸念されたが、養生槽出入り口およびプラント敷地境界における大気中からアンモニアガスは検出されず、プラント周辺への悪臭の拡散はみられなかった。

(6) 三相分布

図-5 に混合土の三相分布の変化を示す。混合土の固相、液相および気相の占める割合は、多少の変動はあるものの、脱水ケーキには存在しなかった気相が約 10% 確保されているのが分かる。脱水ケーキは、凝集汚泥をフィルタープレスによって機械的に圧縮・脱水を施したものであるため、気相がほとんど存在しない。土砂粒子などの無機粒子の緻密な集合体であるため、植物根の伸張し得る空間が全くないといえる。脱水ケーキを植生土壌として再利用するにあたっては、この特性を改善することも重要な要素といえる。

表-1 脱水ケーキおよび改良土の物性比較

	脱水ケーキ	改良目標値	改良土
pH	8 - 11.5	9 以下	7.8 (7.0-8.3)
含水比	22 - 29 %	25-30 % 以下	27% (21-27%)
粒度分布	粘土: 30 % シルト: 60 % 細砂: 10 %	—	—
コンシステンシー	液性限界: 34 % 塑性限界: 13 % 塑性指数: 21 %	—	—
三相分布	固相: 58 % 液相: 42 % 気相: 0 %	固相: 50 % 液相: 20 % 気相: >30 %	固相: 50-60 % 液相: 38-40 % 気相: 5-10 %
植生試験	発芽するものの、 その後の生長認められず。	発芽・生育障害を 起こさないこと。	発芽・生育障害を 認めず。

表-2 脱水ケーキおよび改良土の理化学特性の比較

	脱水ケーキ	改良土	畑土
腐植 (g/kg)	6	22.0	80.4
有機炭素 (g/kg)	3	12.8	46.6
全窒素 (g/kg)	<0.1	1.2	3.8
C/N 比 (-)	計算不可	10.7	12.3
CEC (cmol(+)/kg)	10.3	5.2	36.6
有効態リン酸 (mg/kg)	23	212	331
リン酸吸収係数 (g/kg)	13.1	6.9	17.9

注) 畑土は神奈川県厚木市内において採取した。

表-1 には、改良土と原料とした脱水ケーキの物性比較を、当初の物性改善目標値とともに示す。

改良土の pH と含水比は、いずれも改良目標値を満足していた。改良土の三相分布については、改良目標値とした気相 30%を確保するには至らず、気相 5～10%に止まった。これは、原料とした脱水ケーキの鋭敏で粘稠性の高い物性が原因と考えられる。植生試験においても植生障害は認められず、改良目標値を達成することができたと考えられる。

5. 3 脱水ケーキと改良土の理化学特性の比較

表-2 に脱水ケーキと改良土の理化学特性の比較を示す。

脱水ケーキは、その生成プロセスからも分かるように、きわめて有機物の少ない無機粒子の集合体である。これに対して改良土の理化学特性は、脱水ケーキに比べ著しい改善がなされている。肥沃な畑土にはおよばないものの、腐植、有機炭素などの土壌有機成分、および全窒素などの主要成分が有機資材の添加によって増加しており、有効態リン酸などの顕著な増加も認められた。腐植に代表される土壌有機物の増加は、土砂粒子の団粒化を促進させる効果を期待できるなど⁹⁾、脱水ケーキの物性改善を図るうえで重要である。一方、水処理工程において PAC などのアルミニウム系凝集剤を使用するため、当初は改良土のリン酸吸収係数が極端に高くなり、植生障害を引き起こすことが懸念された。しかしながら、脱水ケーキ自体のリン酸吸収係数は、一般的にリン酸固定能が高いといわれている火山灰性土壌の値(15 g/kg 以上といわれている¹²⁾)よりも低い 13.1 g/kg を示し、改良土ではさらに低い 6.9 g/kg を示した。したがって、凝集剤由来のアルミニウムを原因とするリン酸固定による植生障害の発生は生じないものと考えられる。一方、CEC は、改良土の値が原料とした脱水ケーキの値より低下しており、この原因については不明である。

5. 4 植生試験

発芽試験の結果、改良土を用いた試験区では、発芽率はコマツナで 100%を、ハツカダイコンで 90%を示しており、畑土と同等の発芽率であった。したがって、発芽障害は認められなかったといえる。脱水ケーキを用いた試験区では、発芽はするものの、二葉の発生のみに止まり、葉色の黄変がみられ、その後の生長は全くみられなかった。明らかにチツソ欠乏症などの要素障害が疑われた¹³⁾。

芝の発芽・生育試験においては、播種後 1～2 週間程度から順調な発芽が認められ、その後も順調に生育するのが認めら

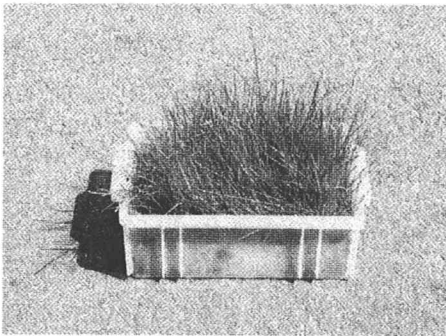


写真-7 芝の播種後 8 ヶ月目の生育状況



写真-8 花卉類の開花状況
(左:ピンクのキンギアム、右:スプレー菊)

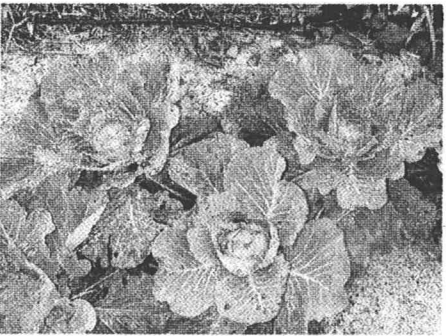


写真-9 キャベツ苗の移植後 2 ヶ月目の生育状況

表-3 植生土壌化プラント移動実績

項 目	実施状況
脱水ケーキ受入れ期間	平成 12 年 7 月 24 日～平成 10 月 25 日
プラント稼働日数	94 日間
脱水ケーキ受入れ総量	2,520 m ³ (約 4,780 t)
改良土生産量	2,810 m ³
日平均生産量	約 30 m ³ /日

れた。8 ヶ月経過後も順調に生育しているのが認められている。各種の花弁類も枯死することなく、終始、花をつけていた。キャベツ幼苗の生育も、移植時は数 cm 程度の苗高であったものが、2 ヶ月後には 10 cm 径程度に結球し、地下部の根も縦横に伸張していることが観察された。

写真-7 に芝の播種後 8 ヶ月目における生育状況を、写真-8 に各種の花弁類の開花状況を、写真-9 に苗移植後 2 ヶ月目のキャベツ生育状況を示す。

このように植生試験の結果、各種の供試植物に対して、発芽障害や生育障害は全く認められなかった。本手法による脱水ケーキの物性改善効果が有効であったことが認められた。

最後に、表-3 に平成 12 年度における植生土壌化プラントの稼働実績について示す。

6. おわりに

従来、産業廃棄物として処分されてきた脱水ケーキの再利用に関する事例について、奥只見ダム増設工事における実績について報告した。

脱水ケーキに良質のバーク堆肥や発酵鶏糞堆肥などの良質の有機資材を混合・養生させることで、短期間に植物の生育可能な植生土壌へと物性改善することが可能であることが示されたといえる。

この植生土壌を工事現場内の造成地へ搬入し、緑化のための吹き付けや木本類の苗の植樹も実施したが、これらの作業が、工事期間の終了間近(平成 12 年 10 月末)であったことや、冬季は現場周辺地域が深い降雪に覆われてしまうため、緑化植物の生育状況の確認には至っていない。今後は、実際の造成地における緑化植物の生育状況についても追跡調査を実施する予定である。

参考文献

- 1) 鎌田照章, 市山健二: 技術開発でコスト縮減 <宇奈月ダム>, ダム技術, No. 150, pp. 44-47, 1999.
- 2) 田窪祐子, 小口深志: 建設工事で発生する脱水ケーキの緑化用土壌への利用に関する研究, 第 32 回地盤工学研究発表会, pp. 101-102, 1997.
- 3) 田窪祐子, 小口深志, 林原 茂: 加熱乾燥した建設汚泥ケーキの植生用土への適用性について, 第 55 回土木学会年次学術講演会(平成 12 年 9 月), pp. 472-473, 2000.
- 4) 清水則一: イヌワシと共存する発電所建設, 土木学会誌, Vol. 86, April, pp. 49-52, 2001.
- 5) 西尾道德, 藤原俊六郎, 菅家文左衛門: 有機物をどう使いこなすか, 農山漁村文化協会, pp. 95-98, 1988.
- 6) 地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会: 土質試験の方法と解説(第1回改定版), 地盤工学会, 2000.
- 7) 日本土壌肥科学会監修: 土壌標準分析・測定法, 博友社, 1961.
- 8) 日本土壌肥科学会監修: 土壌環境分析法, 博友社, 1997.
- 9) Tisdall, J. M. and Oades, J. M.: Organic matter and water-stable aggregates in soils, *Journal of Soil Science*, Vol. 33, pp141-163, 1982.
- 10) 坂本一憲, 大塚麻子, 吉田富男: 土壌の団粒粒径分布におよぼす土壌微生物相の影響, 日本土壌肥科学雑誌, Vol. 67, No. 3, pp. 310-313, 1996.
- 11) 西尾道德: 土壌微生物とどうつきあうか, 農山漁村文化協会, pp. 129-131, 1988.
- 12) 久馬一剛, 庄子貞雄, 鉢塚昭三, 服部 勉, 和田光史, 加藤芳朗, 和田秀徳, 大羽 裕, 岡島秀夫, 高井康雄: 新土壌学, 朝倉書店, pp. 84-85, 1984.
- 13) 清水 武: 要素障害診断事典, 農山漁村文化協会, pp. 186-187, 1990.