

「タイヒシャトル工法」

伐採材・脱水ケーキのリサイクルによる新しい緑化技術



所属名：(株)大林組 土木技術本部技術第一部
発表者： 森田 晃司

1. はじめに

建設副産物の有効利用技術は、ゼロエミッションの思想を反映した循環型社会の構築には必須のものである。建設副産物の有効利用については、様々な工法が考案・開発され、各現場で実用化されているが、脱水ケーキに関しては、高品質な資材化を行なうにはコストがかかるため、有効利用が進んでいるとは言えない。特に、緑化分野では、堆肥化した有機資材を脱水ケーキと混合し、緑化資材として再利用する技術が公開されているが*1、脱水ケーキの物理化学および生物的問題点を技術的に解決した事例はない。

本報では、脱水ケーキや伐採材を発生現場で発酵処理し、緑化用土として再利用する新しいリサイクル技術「タイヒシャトル工法」を、佐賀県の中木庭ダム建設工事における実証試験を通じて確立したので、報告する。

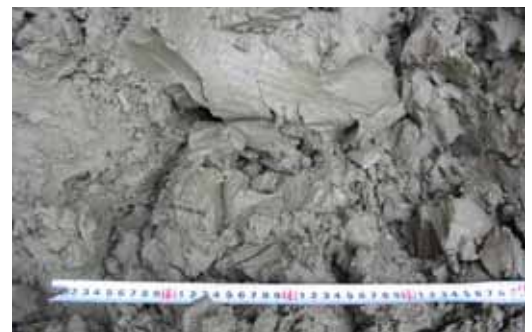


写真 - 1 脱水ケーキ

2. 技術の概要

(1) 脱水ケーキの特性と植物生育の阻害要因

表 - 1 に建設現場から発生する脱水ケーキの土壌としての特性を示す。脱水ケーキは、ミネラルなどの栄養分を豊富に含む一方で、脱水時の高压処理と凝集剤混合の影響で、緻密な単粒構造の粘土塊となっており、有機物を含まず、生育阻害成分となる可溶性アルミニウムを多く含む点が特徴である。なお、中木庭ダム建設工事で発生した脱水ケーキについては、環境庁告示第46号の溶出試験の基準（六価クロム、水銀等）を満足し、汚染土ではないことを確認している。

脱水ケーキは微細な土粒子が凝縮された状態であるため、植物は、根毛の伸張が阻害され、脱水ケーキ中の水分、栄養分、ミネラル分を利用できない。この問題を解決するには、単純に脱水ケーキをほぐす方法が考えられるが、これだけでは土塊は小さくなるものの、微細な土粒子が凝縮されている土の構造自体は変わらず、「土壌」としての本質的な改良はできない。さらに、可溶性のアルミニウムが原因で発根障害が生じ、植物が正常に生育できない可能性も考えられる。

この問題を解決するには、単純に脱水ケーキをほぐす方法が考えられるが、これだけでは土塊は小さくなるものの、微細な土粒子が凝縮されている土の構造自体は変わらず、「土壌」としての本質的な改良はできない。さらに、可溶性のアルミニウムが原因で発根障害が生じ、植物が正常に生育できない可能性も考えられる。

(2) 発酵による土壌化のメカニズム

タイヒシャトル工法では、脱水ケーキと伐採材チップの混合物に発酵促進材を添加し、伐採材の発酵過程を利用して団粒構造に富む「土壌」に改良するメカニズムを利用している。発酵とは、微生物が有機質を分解し、人間にとって有益な物質を作り出す現象のことである。図 - 1 に、土壌化メカニズムの概念図を示す。

無機質の土が発酵により土壌に変化する過程は、森林中に肥沃な表土が生成する過程に類似している。自然の土は、無機質な土粒子に有機質が加わり、そこに生物的な関与があって「土壌」と呼ばれる状態に変わる。森林の表土は、落葉枝などが小

表 1 脱水ケーキの土壌としての特性

区分	指標	特性値または傾向	植物への影響	説明
物理特性	構造	緻密な粘土 (単粒構造)	×	・根が侵入できない ・通気性が悪い
	水分	有効水分量が少ない	×	・根が水を吸収しにくい
生物特性	有機質	有機質を含んでいない	×	・栄養分(窒素)を吸収できない ・有機質(炭素)がないため土中の微生物が増加しない ・窒素(アンモニア)を植物が吸収しやすい状態(硝酸イオン: NO ₃ ⁻)に変えられない
化学特性	微量栄養分 (ミネラル)	Ca ²⁺ 、Mg ²⁺ を多く含む 陽イオン交換容量が大きい (CEC=15 cmolc/kg)	○	・微量栄養分を含んでいる
	栄養分 (リン)	有効態リン酸を多く含む (360 mg/kg)	○	・微量栄養分を保持する能力が大きい ・pH変動に対する緩衝能力が大きい
	pH	8.5 前後 (アルカリ性)	×	・根が栄養分を吸収できない
	生長阻害成分	可溶性アルミニウムを多く含む (790 mg/kg)	×	・発根障害が起きやすい

動物や微生物の作用で分解する現象（生分解）を繰り返しており、このことにより樹木が旺盛に生育することが古くから経験的に知られている。

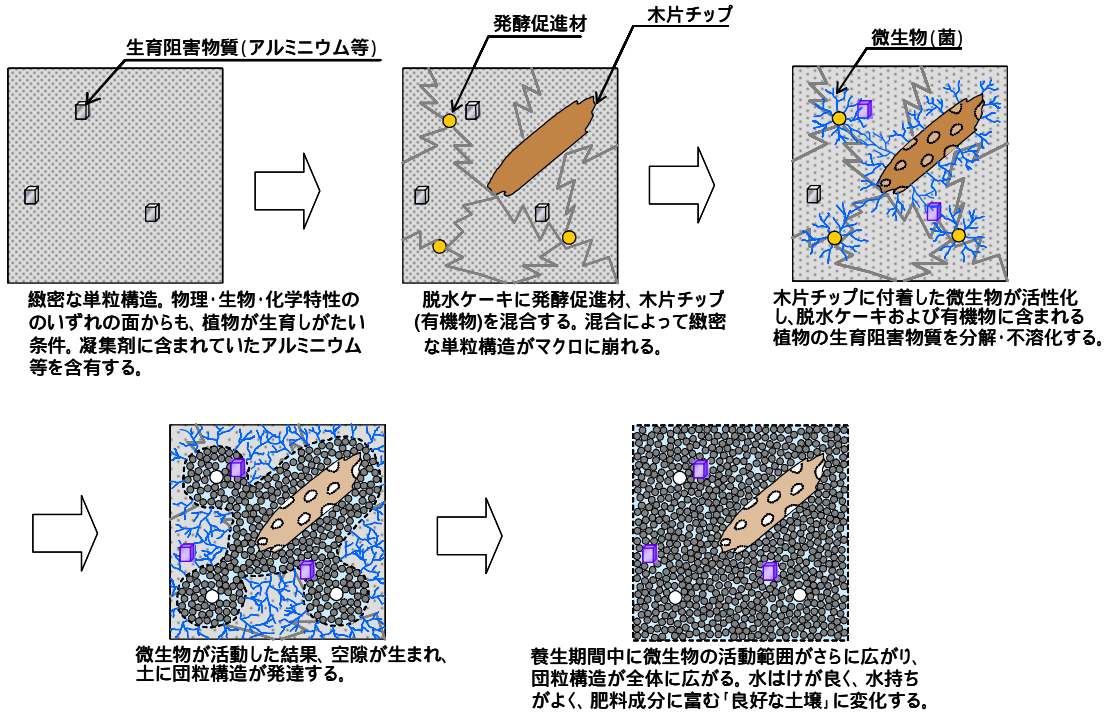


図 - 1 土壌化の概念図

(3) 施工方法

当工法の施工方法を図 2 に示す。

(4) 工期

脱水ケーキの土壌化に要する工期は、養生期間が約 3 ヶ月で、これに準備工・片付けなどを含めて合計約 3.5 ヶ月である。

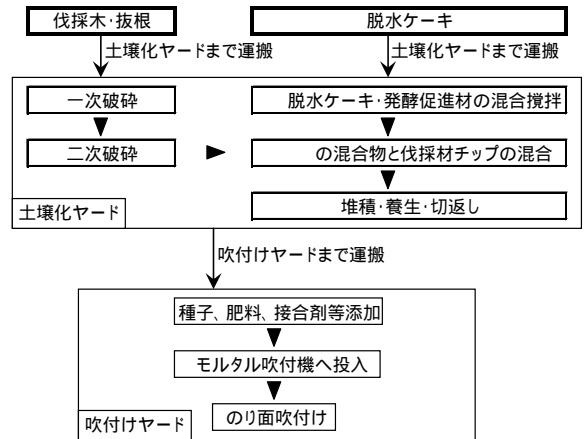


図 2 施工方法

表 - 2 微生物の変化

	サンプル	耐熱性菌	放線菌
試験前	試験1	5.3×10^4	1.0×10^6
	試験2	1.4×10^4	1.0×10^6
試験後	試験1	3.3×10^4	4.7×10^4
	試験2	4.6×10^6	2.0×10^3

3. 実証試験

(1) 発酵シミュレーション試験

現場土壌化試験に先立ち、発酵促進材を添加して発酵させる過程で得られる効果の確認を目的として、小型発酵リアクター装置による発酵シミュレーション試験を実施した。この装置は、発酵容器の温度を容器内の試料土壌に追従させることで、現場で大規模に堆積して発酵させる場合と同様の熱収支を再現させることができる。これにより、従来の実験室レベルでのインキュベーション試験では得られにくい土壌中の微生物による化学物理的な変化を、小容量(1L)でも把握することができ、理想的な形での現場のシミュレーションが可能となる*2。

試験では、脱水ケーキと伐採材チップを 9:1 (重量比) で混合した試料を用意し、発酵促進材を添加しない「試験 1」と、発酵促進材を重量比で 5% 添加した「試験 2」の 2 ケースを実施した。ミキサーにより 90 秒間攪拌・混合後、発酵容器に投入した。

結果を表 - 2、図 - 3 に示す。発酵促進材を混合していない「試験 1」では、温度の上昇、耐熱性菌の増加、炭素ガスの発生が確認されなかったため、微生物は活動していないものと考えられる。

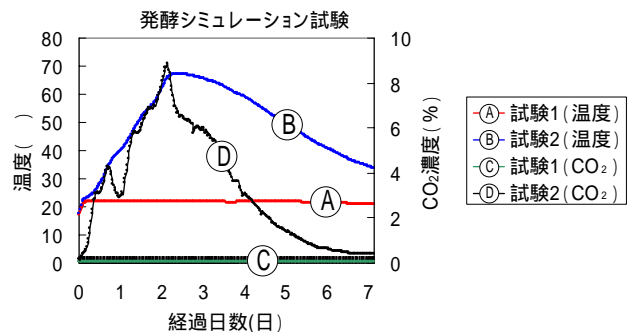


図 - 3 温度、CO₂の変化

これに対し、発酵促進材を添加した「試験2」では、温度の上昇、耐熱性菌の増加、炭素ガスの発生が確認され、活発な微生物活動が起きたものと考えられる。また、温度上昇に伴い放線菌が減少している。

(2)現場土壌化試験

試験ケースの設定

発酵シミュレーション試験の結果を踏まえ、現場土壌化試験を行った。

表 3 に示す4ケースを実施した。

現場土壌化試験では気温や通気条件が発酵シミュレーション試験より厳しいため、土壌化がうまくいかない場合を想定し、通気性を向上させる事と、好気性発酵を促進する土壌中の有機物を増やす事を目的として伐採材チップを増量したケース3、4を設定した。各ケースとも、重量比で5%の発酵促進材を添加している。

試験方法

写真 1 に示したように、脱水ケーキは細粒土(含水比 25.2%)であるため、通常のバックホウのバケットのみによる混合では、資材を均質に混合することが困難であると予想された。したがって、混合を一次混合(脱水ケーキ+発酵促進材)と二次混合(一次混合物+伐採材チップ)の2段階に分け、攪伴機能付特殊バケットを用いて入念に混合・攪伴した。

堆積ヤードの概要を図-4に、施工手順を図-5に示す。

養生期間中は、品質管理として、堆積物内に埋設したセンサーを用いて混合物内の温度およびpHを自動計測した。また、プロアから波型有孔管を通じて粒調碎石層から堆積物に空気を供給する設備を設け、好氣的発酵に必要な風量を理論式から算出し、毎分0.9m³の風量を1日当たり8時間(日中のみ運転)送気した。

試験結果

図 6 に養生初期1ヶ月間の土壌内部の温度変化を示す。エアレーションを行なったケース3の方が、エアレーションのないケース4よりも急激な温度上昇を示し、発酵速度が速く、3ヶ月の養生期間内に十分な発酵が行われたことが確認できた。

完成した土壌を評価するために、物理・化学性、および生物性の分析試験を実施した。その結果を、表-4、図 7 に示す。

未改良の脱水ケーキに比べて、

- 窒素、有機炭素(有機物含有物)、有効態リン酸が増加し、土の養分が増加した。
- 有効水分(植物が利用できる毛細管間隙に保持される水分)量が大幅に増加した。
- 放線菌数が増加した。

等、優れた性質の土壌に変化し、既往の緑化土壌の基準と照らし合わせても遜色ないと判断された。

表 3 試験ケース

試験	配合*	エアレーション	備考
ケース1	9:1	有	シミュレーション試験を現場で再現
ケース2	9:1	無	ケース1のエアレーションなし
ケース3	7:3	有	チップの配合を増量
ケース4	7:3	無	ケース3のエアレーションなし

*:重量比(脱水ケーキ:伐採材チップ)

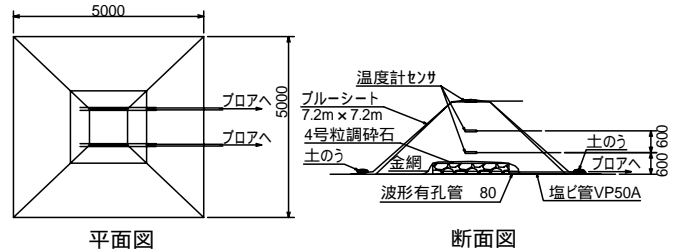


図 - 4 堆積ヤード概要図

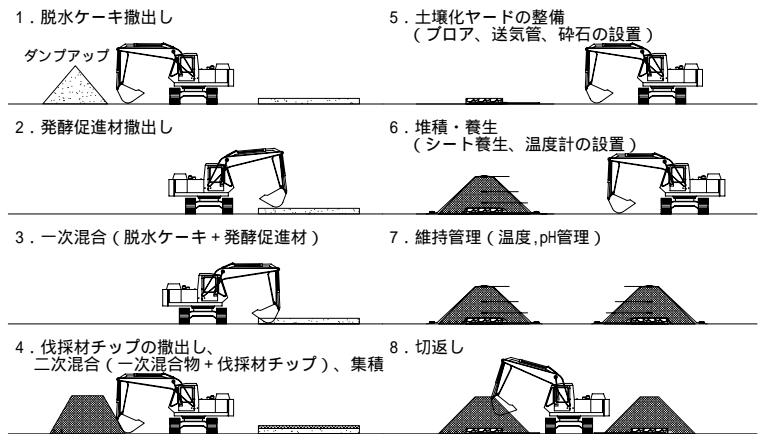


図 - 5 土壌化試験の施工手順

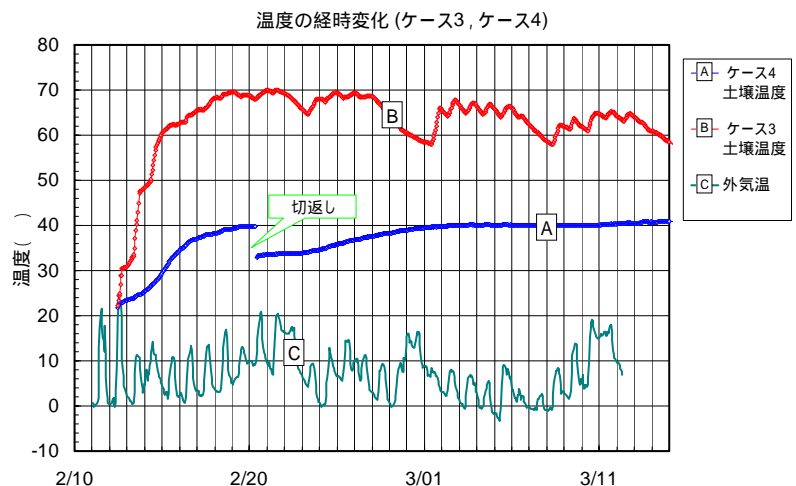


図 - 6 土壌内部の温度変化

なお、既往の緑化土壌の基準で、理想的な良質土の条件と比べると、pH が若干高く、窒素量が若干少なかった。しかし、これは緑化工事の際に添加する化成肥料で改良されるレベルであり、使用には支障がないと判断された。

現場土壌化試験と発酵シミュレーション試験の結果に加えて、既往の研究成果で得られている知見を踏まえ、以下のようなメカニズムで良質な緑化土壌が製造されたと推察される。発酵初期に温度上昇に伴って易分解性の有機物を分解する耐熱性菌が土壌内で増加した。その後、易分解性の有機物が少なくなると、温度が低下するとともに耐熱性菌は減少し、これに替わって、耐熱性菌が分解しなかったもの、および微生物遺体を分解できる放線菌が増加した。放線菌が活発に活動することで、増粘多糖類（粘着物質）が生成され、土壌に連続空隙を持つ団粒構造が形成された。その結果、有効水分量が増加するなど、土壌の物理性が著しく改善され、根毛の伸張により環境ができた。

また、全ケースについてコマツナを使った幼植物試験を実施した結果、ケース 1 およびケース 3 に生育障害がないが、エアレーションを行わなかったケース 2 およびケース 4 では生育障害が発生した。その原因は、可溶性アルミニウムおよび発酵未熟の影響による一般的な評価指標では把握できない生育障害物質によって生育障害が発生したと推測された。また、放線菌数がケース 2、4 では少ないことから、団粒化の発達が不十分であったこともその原因として示唆された。このことから、3 ヶ月の土壌化期間では、発酵時に好氣的条件が不足すると放線菌の増殖が阻害され未熟な緑化土壌となる可能性があるため、良質な緑化土壌を製造するためにはエアレーションによる好気条件が必要であると考えられた。

以上より、各土壌化ケースの条件で比較すると、現時点の方法ではケース 3 の土壌が最良の植生基盤材料（以下、緑化用土）であると判断された。

(3) 吹付け試験

完成した緑化用土は、脱水ケーキに由来する粘性と伐採材チップに由来する細長い木質繊維を有している。その影響で、吹付施工時には、ホースまたは吹付機が閉塞し、これを解除するために多大な時間と労力を要し、施工能率が著しく低下する、といったトラブルの発生が懸念された。そこで、吹付効率を高め、最適な施工方法を確立することを目的として吹付け試験を実施した。

試験では、現場土壌化試験で得られた 4 種類の緑化用土を用い、吹付け施工性の改善に加え、緑化用土の pH 調整のためにピートモスを添加した。ピートモス必要量の追求のため、段階的に添加量を変えて試験吹付けを繰り返した。施工性は、各ケースの材料に対して、施工システムに閉塞等のトラブルが無く、かつ安定した吐出量が確保できたか否かで評価した。

表 - 5 にピートモスの最小添加量（容積比）を示す。

表 4 緑化用土の評価結果

項目	脱水ケーキ	発酵処理後の性状評価				緑化用土の基準				
		ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	日本造園建設業協会		造園学会	当工法の評価	
						不適当あるいは不良	良質土	良質土「優」（マサ土）	緑化利用「適」	
土性	SiCL ○	CL ○	CL ○	CL ○	CL ○	HC(重粘土) S(砂土)	Lc,CL,LSL,SL,SCL	SCL,SL,LS,S	-	
礫含有率 (%)	0 ○	5 ○	7 ○	15 ○	10 ○	50 <	-	<20	≤20	
有効水分 (%)	15 ○	22 ○	21 ○	29 ○	32 ○	5未満	10 <	12 ≤	-	
pH (H ₂ O)	8.3 ○	8.3 ○	8.2 ○	8.2 ○	8.0 ○	<4.0 - 8.0 <	5.6 - 6.6	5.6 - 6.8 (4.5 - 8.0)	4.5 - 8.5	
電気伝導度 EC (dS/m)	0.02 x	0.26 ○	0.35 ○	0.23 ○	0.35 ○	<0.1 - 1.0 <	0.3 - 0.5	0.1 - 0.2	≤2.0	
陽イオン交換容量 CEC (meq/100g)	15 ○	20 ○	19 ○	24 ○	24 ○	<2	15 <	20 ≤	-	
交換性陽イオン (cmolc/kg)	Ca	17 ○	17 ○	13 ○	18 ○	18 ○	<4	6 ≤	5 <	-
	Mg	6 ○	11 ○	11 ○	10 ○	11 ○	<0.4	1.1 ≤	-	-
	K	0 x	3 ○	3 ○	3 ○	3 ○	<0.2	0.6 ≤	-	-
全窒素 (%)	0.0 x	0.2 ○	0.2 ○	0.3 ○	0.3 ○	<0.04	0.5 ≤	0.12 <	-	
全炭素 (有機炭素) (%)	0.2 x	2.6 ○	2.8 ○	6.4 ○	6.5 ○	-	-	-	-	
C/N	21 x	14 ○	14 ○	21 ○	22 ○	<9	10 - 15	-	-	
有機物含有量 (%)	0 x	5 ○	5 ○	11 ○	11 ○	<1	5 ≤	-	-	
リン酸吸収係数 (mg/100g)	720 ○	800 ○	780 ○	830 ○	860 ○	2000以上	700未満	-	-	
有効態リン酸 (トルオーグ) (mg/100g)	36 ○	75 ○	70 ○	73 ○	61 ○	<2	20 <	20 ≤	-	
フェノール (mM)	-	0.07 ○	0.07 ○	0.08 ○	0.10 ○	-	-	-	≤1	
可溶性アルミニウム (mg/100g)	98 x	37 ○	61 ○	23 ○	62 x	-	-	-	減少率 70%以上	
放線菌数	<10 ³ x	3 × 10 ⁷ ○	6 × 10 ⁹ ○	3 × 10 ⁷ ○	6 × 10 ⁹ ○	-	-	-	10 ⁶ <	
コマツナ生育度 (スコア)	1.0 x	4.4 ○	1.2 ○	4.3 ○	2.0 ○	-	-	-	4.0以上	

注) 各項目に対する評価は、下線の基準値を参考にして行った。

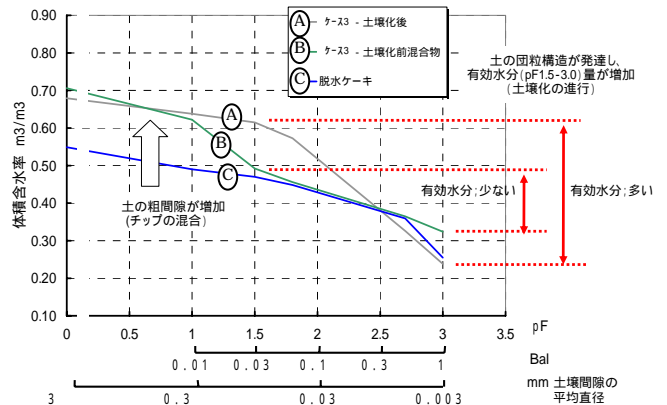


図 - 7 有効水分の変化



写真 2 幼植物試験の結果

表 - 5 ピートモスの最小添加量

試験試料	土壌化の過程		ピートモス 最小添加量 % (容積比)
	ケーキ:チップ	エアレーション	
ケース1	9:1	有	30
ケース2	9:1	無	50
ケース3	7:3	有	0
ケース4	7:3	無	30

(4) 植生試験

土壌化試験で完成した緑化用土が、斜面緑化用の資材として利用できることを確認するため、そして土壌化プロセスの違いによる適性を評価するために、植生試験を行った。試験区の施工条件を表-6に示す。試験は、吹付け試験で確認されたピートモスの最適配合量を基に、対照の在来工法（パーク堆肥主体の植生基材を使用する吹付け工法）を含めた6ケースの試料による試験区を設け、岩砕りの盛土斜面に吹付け施工（吹付け厚 5cm）を実施し、定期的な植生調査を1年間実施した。

施工後3ヶ月経過時の生育状態を写真-3に示す。全ケースで植物の発芽・生育を確認できた。ケース3 P30は、在来工法とほぼ同程度の成長を示し、他のケースに比べ優位であった。なお、ケース3-P30以外の試験区では、発芽直後の生育が悪かったために、緑化用土が洗掘される被害を受けた。

一般に、パーク堆肥を主体とする在来の植生基材には肥料成分（窒素・リン酸・カリ）が多く含まれる。しかしながら、ケース3-P30が在来工法と比べて遜色ない生育状態であったことは、当工法で製造された緑化用土が植生に適した土壌であったためであると考えられる。

表-6 各試験区の施工条件

試験区	土壌化の過程		ピートモス添加量 %(容積比)
	ケーキ:チップ	エアレーション	
ケース1 - P50	9:1	有	50
ケース2 - P50	9:1	無	50
ケース3	7:3	有	0
ケース3 - P30	7:3	有	30
ケース4 - P30	7:3	無	30
対照	(在来の植生基材)		0



ケース1 - P50



ケース2 - P50



ケース3



ケース3 - P30



ケース4 - P30



対照(在来工法)

写真 3 各試験区の植生状況(施工後3ヶ月)

4. 本工事への適用事例

本工事では、当工法で緑化用土を製造し、原石山切土のり面（岩盤斜面）を緑化した。

緑化用土の製造は、現場土壌化試験のケース3の条件を基に、脱水ケーキと伐採材チップの比率を7:3とし、エアレーション設備を備えたヤードで行った。緑化用土は、155m³の脱水ケーキと413m³の伐採材チップから約400m³製造できた。土壌化に要した期間は、3ヶ月であった。発酵を均質化するため、発酵開始1ヶ月後に、堆積物(高さ2m)を一度だけ切返した。完成した緑化用土は、原石山切土のり面に厚さ10cmで、約1,700m²に吹付けた。その際、緑化用土に加えて、ピートモスを30%添加した。2005年6月に施工が終了し、1ヶ月後の調査で植物が正常に発芽し、生育していることを確認した。

5. おわりに

中木庭ダム建設工事における現場土壌化試験および本工事を通じて、これまで産業廃棄物として処理してきた脱水ケーキと伐採材チップに発酵促進材を添加し、好氣的に発酵させることで土壌化処理が可能となり、かつ、化成肥料を多量に使わなくても良好な緑化用土としてリサイクルできることが確認された。当技術は脱水ケーキおよび伐採材チップの有効利用に大きな効果があると言える。

今後も当技術の改善・改良に努め、広く普及させることで循環型社会の構築に向けて微力ながら努力して行きたいと考えている。

<参考文献>

- *¹ 木村俊範編（椎葉著）：バイオマス資源のコンポスト化技術（土木建設発生材の腐熟化促進、発生材コンポストの機能性を利用した法面緑化基盤材）、シーエムシー出版(2003.10)
- *² Kiwamu SHIIBA, Noriko KOMINE, Ken KANZAKI, Toshinori KIMURA : Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery Vol.66, No.1(2004)