

## 砂利採取跡地緑化の効率化

## を目的とした脱水ケーキを利用する

土壌改良材の開発とその植栽試験による検証<sup>※)</sup>加藤 正 剛<sup>※)</sup>濱 中 晃 弘<sup>※※)</sup>島 田 英 樹<sup>※※※)</sup>笹 岡 孝 司<sup>※※※※)</sup>松 井 紀久男<sup>※※※※※)</sup>一ノ瀬 政 友<sup>※※※※※※)</sup>

## 1. はじめに

我が国の天然骨材資源は、国土の保全や社会基盤整備のための構造物の骨格を成すコンクリートの構成材料として開発・生産が行われてきた。骨材の大消費地である首都圏の需要に应运っている千葉県では、平成24年度実績で8,618千m<sup>3</sup>の天然骨材を生産している<sup>1)</sup>。同県で生産されている天然骨材資源は主に山砂・砂利であるが、この山砂・砂利資源の開発は、CO<sub>2</sub>吸収源とされる林野地を開発するため地球温暖化抑止の観点からも、また、大都市近傍に立地するという位置的条件もあり、採取跡地や近隣地の環境維持からも、採取跡地の緑化促進は喫緊の課題である。しかし、採掘跡地は植物生育には厳しい環境下にあり、山林への復元には相応な年月を要する<sup>2)</sup>。採取跡地において緑化用植栽物の生育を妨げる主因としては、採取跡地の透水性不良と貧栄養、重機の転圧による締め固めが指摘されている<sup>3)</sup>。また、骨材生産の洗浄・選別工程で発生する脱水ケーキは、有効な利用法も無いために通常採取跡地に埋立て処分され、これも透水性悪化の一因となっている。

そこで筆者らは、これら問題の解決のために、千葉県

の(株)デイ・シイ吉野事業所を研究対象地として、脱水ケーキを利用した土壌改良材を作製し、これを採取跡地に適用することで透水性や土壌硬度を改善して緑化用植栽物の育成を図り、採掘跡地緑化事業の促進を目指した。骨材の主要な産地である千葉県においてこの課題に取り組むことは、同様の課題をもつ全国砂利採取場においても緑化促進の一助となるものと考えている。

## 2. 研究対象地の概要及び既往の知見

## 2.1 (株)デイ・シイ吉野事業所の概要

千葉県では大小含め89の業者が砂利採取業を営んでおり<sup>1)</sup>、産出された砂利・山砂の大部分はコンクリート用細骨材として関東一円に出荷されている。

骨材資源として採取の対象となっているのは第四期前期更新世に形成された万田野層・市宿層・笠森層であり、主に万田野層・市宿層からは砂利、笠森層からは山砂が生産される。

吉野事業所周辺では万田野層を主な掘削対象とし、層序は上部より現地呼称で、表土層・山砂層・含軽石砂層・原砂層・岩盤層・原石層・下部原砂層である。これらの層で、本事業所での骨材資源採取対象層は原砂層・

※) 2012年9月12日、平成24年度資源・素材関係学会合同秋季大会及び2014年3月28日、平成26年度資源・素材学会春季大会において発表

※※) 国見山資源(株)、工学府地球資源システム工学専攻 九州大学大学院博士後期課程

※※※) 九州大学大学院博士後期課程 工学府地球資源システム工学専攻

※※※※) 九州大学大学院博士後期課程 工学府地球資源システム工学専攻

※※※※※) 工学研究院地球資源システム工学部門 博士(工学) 九州大学大学院助教

※※※※※※) 工学研究院地球資源システム工学部門 工博 九州大学大学院教授

※※※※※※※) 都市基盤・環境・資源センター 工博

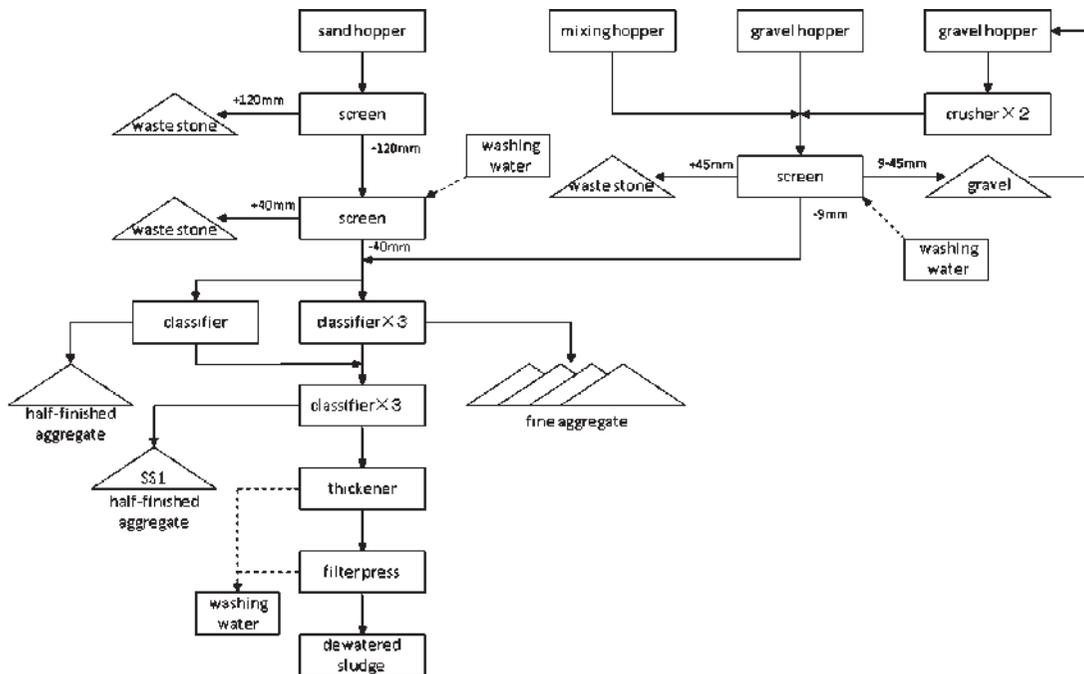


図1 骨材洗浄・選別プラントのフローの概略

原石層である。掘削は発破を必要とせず、ブルドーザーとパワーショベルによる山頂型ベンチカット方式での掘削が行われ、掘削された各層は種類別にダンプトラックで運搬される。製品対象種別は骨材洗浄・選別プラントのホッパーへ投入され、その他は埋立て地や堆積場に送られる。

図1に、吉野事業所の骨材洗浄・選別プラントのフローの概略を示す。プラントでは、ホッパーから投入された原料をベルトフィーダーで引き出し、ベルトコンベアで原石用ローヘッドスクリーンおよび原砂用ローヘッドスクリーンに運搬し、洗浄・篩分けをしている。篩下分は分級器に運搬し、製品となる粗目砂、中目砂、細目砂等を回収している。また、原石ローヘッドスクリーンから排出された9mm～45mmの砂利は破碎機で粉碎され、粒度調整用砕砂としてホッパーへ再投入される。原料洗浄時に発生した汚濁水は、高分子凝集剤を添加して懸濁粒子を凝集させた後、シックナーで分離・沈降させ、フィルタープレスで脱水処理される。発生した脱水ケーキは場内の埋戻しに使用され、処理後の洗浄水は原料の洗浄に再利用されている。

## 2.2 既往の知見

本研究対象事業所を含めた数カ所の操業において、採掘跡地の早期緑地化や山林への復元を図った対策に関して、堺義明は種々の課題を抽出して検討を加えている<sup>4)</sup>。その結果の要点をまとめると、以下のようである。特に⑤は、終掘後の跡地管理において留意すべき重要事項と考えられる。

- ①採掘跡地は貧栄養地で、一般的な森林土壌や造園等の植栽土壌基盤目標値を大きく下回っており、このままでは植栽土壌としては不適である。このような採掘跡地で森林への早期復元を図るためには、植栽する土壌の改良を行う必要がある。すなわち、透水性や土壌硬度の改善、更には土壌の肥沃性向上のための施肥が必要である。
- ②植栽種は、地権者や近隣住民の要望ではヒノキやスギであるが、採掘跡地におけるヒノキやスギは成長が非常に遅い。例えば、ヒノキの地際直径の成長は、約1.5年で1cm程度、植栽地に有機質コンポスト系改良材を施した土壌でも約1.5年で4～5cm程度である。

(26)

- ③現在主に植林されている50年～70年物のスギ、ヒノキの根茎発達状況調査による根茎の発達範囲は、概ね直径100cm、深度150cm、体積1.17m<sup>3</sup>程度であったことから、植栽土壌の改良・整備範囲はこの程度が目標となる。
- ④植栽種を自由に選べるとすれば、採掘跡地のような貧栄養地でもヤトロファ・クルカス（タイワンアブラギリ）は早期に成長する。また、ハンノキやヤシャブシはスギやヒノキに比べて成育に優れる。
- ⑤緑化事業は見栄えだけの緑を増やすことでは無い。苗木を単に植える安易な緑化工事を行うと、長期間人間の管理が必要な自立できない緑になる可能性が高いため、自然の自己回復力を引き出す工法を導きだすことが肝要である。

### 3. 脱水ケーキを用いた土壌改良材の開発

#### 3.1 脱水ケーキ

図1に示したように、骨材生産の洗浄・選別工程における砂洗浄においては、汚濁水を循環して洗浄水として再利用する。この過程で微粒汚泥分を処理するためにフィルタープレスが用いられ、脱水ケーキと呼ばれる残留物が生じる。この脱水ケーキは、吉野事業所では年間約36,000t（2009年度）が発生し、生産量の約6%を占める。この脱水ケーキは表1<sup>5)</sup>に示すように、主に粘土分とシ

ルト分から成る高含水比の泥状物で、特異な性状を示しており、これまで様々な用途への利用が検討されてきたが、未だ採取跡地に埋戻し廃棄をせざるを得ないのが実状である。この脱水ケーキが埋戻された採取跡地は、長期に渡り地盤が軟弱化し、また排水遮蔽のシール効果を有するため、埋戻し深度によっては緑化に重要な透水性を著しく阻害する要因のひとつとなっている。なお、この脱水ケーキは、汚泥沈降に使用している高分子凝集剤の影響も見られず、微量有害元素等の溶出は無く安全であることが判明している<sup>4)</sup>。

緑化事業において、このような脱水ケーキを「無用な廃棄物」から「付加価値を持つ物質」に転換利用できれば、鉱山経営コストに資するところが大きい。そこで、採掘跡地の土壌改良及び脱水ケーキの有効活用を目的として、脱水ケーキを利用した土壌改良材の開発を試行し、この土壌改良材を採掘跡地土壌に混入することによって土壌の改良を図った。

#### 3.2 造粒方法の選択

土壌改良材は、跡地土壌と均一に混合するためには粒体状が望ましい。造粒とは粉体や粉体を溶かした高含水比材を原料として、粒体を製造する操作である。造粒の目的は、粒体そのものを得るために行う造粒と粉体等の物理的特性である流動性、付着性等に対応するハンドリング性向上や粉末の飛散等の対環境性改善に大別される<sup>6)</sup>。現在ではあらゆる分野において造粒手法は開発さ

表1 脱水ケーキの性状

		Measured 1	Measured 2
Soil water content (%)		35.5	38.0
Density (g/cm <sup>3</sup> )		2.703	2.690
Consistency	Liquid limit (%)	56.0	75.0
	Plastic limit (%)	34.5	39.2
	Plasticity index (%)	21.5	38.5
Granularity characteristic	Sand (%)	14.2	18.0
	Silt (%)	51.3	42.0
	Clay (%)	34.5	40.0
pH		8.6	8.0
Loss on ignition (%)		3.3	5.7～6.1

れ、確かな技術として定着している。したがって、多種多様な既存技術の中から最適と思われる技術を抽出して適用化を図ることにし、原料の脱水ケーキの性状を考慮し、球状もしくは球状に近いものに安価に造粒できる方法や工程、諸設備を取捨選択した。

造粒の主工程<sup>6)</sup>は、①原料が均一になるよう混練する混練、②混練を終えた造粒物原料を造・整粒する成形、③成形した造粒物を乾燥させる乾燥、の3つの工程である。各工程を処理するプロセスとしては、①混練工程については、回転容器型、固定容器型、ロール型、逆流式高速混練があり、②成形工程については、転動造粒（パン型、ドラム型）、押し出し造粒（スクリュー方式、ロール方式）、圧縮造粒（タブレットティング方式、ブリケットティング方式）、流動層造粒、解砕型造粒、混合型造粒、噴霧乾燥造粒が挙げられる。③乾燥工程については、強制乾燥と自然乾燥がある。

これら各工程の具備すべき諸条件を比較検討し、また造粒機器の製造所の仕様書、使用実績、コスト等々を考慮して、多機能ミキサー装置を2種類選定した。この装置は、回転容器方式逆流式高速混練と解砕型造粒を同一設備で実施できる多機能型であり、装置名は「K社製・60L試験機（容量：60L、材料混合時回転数：330rpm、造粒時回転数：300rpm）」および「I社製・逆流式高速混練機（容量：75L、材料混合時回転数：1400rpm、造

粒時回転数：400rpm）」である。これらを採用して、後述の造粒試験に用いた。乾燥工程は、熱源を必要としない省エネルギー型乾燥工程手法を考慮して、敷地面積は要することになるが自然天日乾燥を採用した。

### 3.3 造粒試験

選定採用した造粒機での造粒の可否を確認するため、造粒試験を行い、造粒結果を目視により確認した。上述、造粒装置の検討・選択から、造粒の成否は材料に含まれる水分に強く依存することが想定されたため、水分調整他の効果が期待される添加材を数種類用意し、試行錯誤的に添加材の混合割合を変え、K社製で2回、I社製で1回の造粒試験を実施した。なお、添加材は入手容易で安価な材料を選んだ。

第1回での添加材は砂（SS1）、生石灰及びセメント、第2回は砂（軽石）、生石灰及びPS灰（paper sludge ash）、第3回はフライアッシュ及び洗PS灰である。ここで、洗PS灰はPS灰中の不純物を除くために水洗したものである。

表2に、これら3回の試験に供した時点の脱水ケーキや添加材の含水率を示す。脱水ケーキと添加材の混合割合は後述の試験結果にて示す。また、脱水ケーキのみでの造粒は不可能であった。

### 3.4 造粒試験結果及び考察

(1) 第1回造粒試験 表3に、脱水ケーキと添加材

表2 脱水ケーキや添加材の含水率

Test / mixer	Materials	Water content (%)
1st test K company mixer	Dewatered sludge	34.8
	Sand (SS1)	8.0
	Quicklime	≒ 0
	Cement	≒ 0
2nd test I company mixer	Dewatered sludge	33.4
	Sand (pumice)	17.0
	Quicklime	≒ 0
	Paper sludge ash	0.5
3rd test K company mixer	Dewatered sludge	31.0
	Fly ash	0.1
	Washed paper sludge ash	12.0

表3 脱水ケーキと添加材の混合割合及び試験結果

Test	Batch	Dewatered sludge	Additive	Results
1st test	1T-1	40 kg	Sand (SS1) 10 kg, Quicklime 1.2 kg	Possible
	1T-2	50 kg	Quicklime 2.0 kg, Cement 1.5 kg	Possible
	1T-3	50 kg	Quicklime 2.5 kg	Impossible
	1T-4	40 kg	Sand (SS1) 10 kg, Quicklime 2.5 kg	Possible
	1T-5	30 kg	Sand (SS1) 10 kg	Impossible
	1T-6	30 kg	Sand (SS1) 10 kg, Quicklime 0.4 kg	Possible
2nd test	2T-1	50 kg	Sand (pumice) 5.0 kg, Paper sludge ash 5.0 kg	Possible
	2T-2	50 kg	Sand (pumice) 5.0 kg, Quicklime 1.0 kg, Paper sludge ash 5.0 kg	Possible
	2T-3	50 kg	Quicklime 1.0 kg, paper Sludge ash 5.0 kg	Possible
	2T-4	50 kg	Paper sludge ash 7.5 kg	Possible
3rd test	3T-1	50 kg	Fly ash 15 kg	Impossible
	3T-2	40 kg	Washed paper sludge ash 10.0 kg	Possible
	3T-3	40 kg	Washed paper sludge ash 10.0 kg	Impossible
	3T-4	40 kg	Fly ash 6.0 kg, Washed paper sludge ash 4.5 kg	Possible

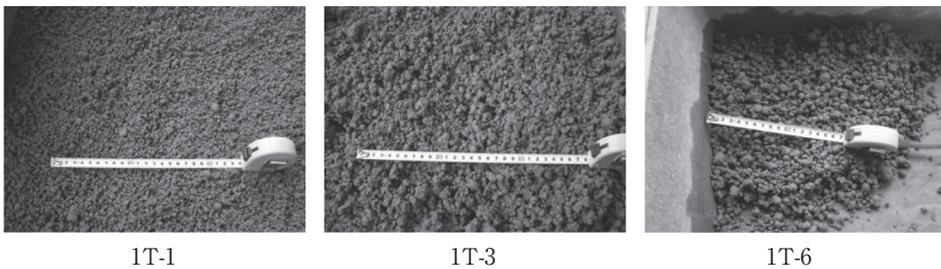


図2 試験後の造粒物

の混合割合及び試験結果を示す。ここで、造粒の可否の判定であるが、ふるい分け試験や強度試験等では、それぞれの粒子が独立して粒状になっているかを判断することが難しいため、目視や触手に依った。その結果、主観的で曖昧さの残る判定となっている。例えば、一部は原

材料のまま残る場合や、粒状化していても摘まむのみで崩れる場合もあり、確実な判定が難しい。図2に1T-1、1T-3、1T-6の例(写真)を示すが、1T-3は粉泥状の部分が残る、1T-6では粒状化はほぼ成っているが粒度の差異が大きい。

まず同表の1T-1、1T-2より添加材を加えることで脱水ケーキの造粒が可能であることが分かる。また、1T-3より生石灰のみでは造粒が不完全なことから、SS1は水分調整の作用のみならず、造粒物生成の核の作用があるのではないかと推定される。さらに、1T-5、1T-6よりSS1のみでは造粒が出来ないが、少量の生石灰を加えることで造粒が可能となっている。

以上から、造粒にはSS1と生石灰が添加材として必要であると判断される。ここで、SS1は骨材洗浄・選別プラントから出る商品価値の低い細砂であるが、他の添加材と比べて添加量が多いため、土壤改良材への脱水ケーキの使用量を相対的に減らさざるを得ない欠点も生じる。

(2) 第2回造粒試験 まずI社製にて事前試験を行い、造粒に必要な添加材の分量の目安をつけた後に本試験を行った。本試験結果を前掲表3に示す。事前試験では造粒がうまく出来ず、一方本試験では同表に見るように出来ている。この差異の一因として、事前試験では必要な添加材の分量の目安をつけるためにミキサ内の様子を観察しながら添加材を逐次投入し、本試験では試験開始時に一斉に投入したことに依るのではないかと推察している。また、I社に造粒材料を持ち込んだ際に、これらの含水率の変化が大きかったのではないかと考えている。

同表より、砂(軽石)の有無は造粒結果に影響していないことが判る。また、2T-4よりPS灰のみでも造粒が可能である。生石灰の使用を抑えることができれば材料コストの低減になるが、生石灰を使用しないことで造粒物の強度が低下し、再泥化し易くなることが懸念される。しかし、土壤改良材に肥料分を添加する場合を考慮すると、生石灰の不使用は肥料中に含まれる尿素との化学反応を避けられる等の利点がある。

(3) 第3回造粒試験 試験結果を前掲表3に示す。同表3T-1より、フライアッシュのみでは造粒が出来ない。2T-4でのPS灰投入量7.5kgの倍に当たる15kgを投入したが、材料が泥状になり、造粒は不可能と判断した。これは、フライアッシュの粒子はほぼ球形・微粒であり含水率も低いが、粒子内に水分を十分吸収するような間隙が少なく、脱水ケーキの水分を吸収出来ないのではないかと推察される。3T-2、3T-3は同じ洗PS灰の

みの結果であるが、洗PS灰を前者は試験開始時に一斉に投入、後者は洗PS灰の下限量を見るために、5kgずつ2回に分けて投入したものであり、同量の添加量でも前者のみで造粒が出来ている。この結果は、上述第2回試験と同様な状況であり、添加材の添加方法によっても造粒の成否が左右されることが解る。しかし、洗PS灰の添加のみでは、上述と同様に添加量が多いため、結果として脱水ケーキの使用量が少なくなる。

#### 4. 実験圃場の造成および土壤改良材効果の検証

##### 4.1 植栽実験圃場の目的

第1回から第3回造粒試験の結果より、多機能ミキサを用いた脱水ケーキの造粒が可能であることが確認され、有効な添加剤が選定できたことから、土壤改良材と跡地土壤の混合比率、添加剤の種類、植栽基盤形状が植物の育成に与える影響を確認するため、植栽実験圃場を造成した。

##### 4.2 土壤改良材の作製と実験圃場の造成

(1) 土壤改良材の作製 植栽実験圃場の造成に当たり、前章の造粒試験の結果を基に造粒性や経済性を考慮して、以下の2種類の土壤改良材を作製した。

①生石灰造粒物：脱水ケーキ50kgに対して生石灰3.1kg

②PS灰造粒物：脱水ケーキ50kgに対してPS灰6.8kg

両者とも造粒性は完全ではないと思われるが、脱水ケーキの使用量の増加を念頭に添加材とその量を選択した。なお、造粒装置はI社製・逆流式高速混練機である。前章の造粒試験では、I社製ミキサで生石灰を添加材とした実績はないが、K社製ミキサでの実績から添加量が推測できること、砂(SS1)より少量の添加量で造粒でき、セメントより安価に調達できることを重視し、添加材として選択した。

(2) 実験圃場の造成 土壤改良材を跡地緑化に用いる際の有効な植栽方法を検討するため、3種の植栽土壤形状、2種の土壤改良材と跡地土壤の混合比率を持つ植栽土壤を造成した10試験区を設けた。この他比較のため、土壤改良材を用いない跡地土壤のみの3試験区も造成した。なお、この跡地土壤は採掘時の表土層他製品対象とはならない採掘土砂類を採掘跡地に埋戻したものであり、

(30)

採掘終了時の底面地盤土壌ではない。

図3～図5 (Case 1～Case 3) に植栽土壌形状を、表4に各試験区の植栽土壌形状および土壌改良材と跡地土壌の混合比率を示す。図表に見るように、①Case 1は跡地土壌に厚さ3cmの土壌改良材を300×300cmに敷いたもの、②Case 2は跡地土壌を100×300cmの範囲で40cm掘下げ、ここに跡地土壌と土壌改良材を1:1及び2:1の割合で混合して埋戻し、その上に高さ30cmの畝を作ったもの、③Case 3は直径60cmの円柱状で中心深さ70cmまで掘下げ、ここに跡地土壌と土壌改良材を1:1及び2:1の割合で混合して埋戻し、その上に高さ30cm、直径60cmの円柱状の畝を作ったものである。なお、Case 2、Case 3の畝の勾配は1/1～3/2程度である。また、試験区11は跡地土壌その儘であり、試験区12、13は跡地土壌の上に跡地土壌を用いてCase 2、

Case 3と同じ畝を作ったものである。

#### 4. 3 植栽

植栽種には、地権者の希望及び千葉県砂利採取場での造林に用いられることが多いヒノキを選んだ。苗は種苗業者から一般に植林される3年苗を購入した。植付けは2011年11月に行い、この後一部において枯死が見られたので、これについては新たに2012年3月に補植した。植付けた苗木の根中心深度は約30cmである。なお、各試験区には5本または6本の苗を植えたが、本研究の対象苗はこの中の3本である。

図6に、植栽した試験区全体の写真を掲げる。

#### 4. 4 土壌改良材効果検証のための各種測定

土壌改良材の適用による土壌改善効果を検証するため、実験圃場各植栽試験区におけるヒノキの成長状況の観察・計測、また一部試験区における土壌透水性、土壌硬

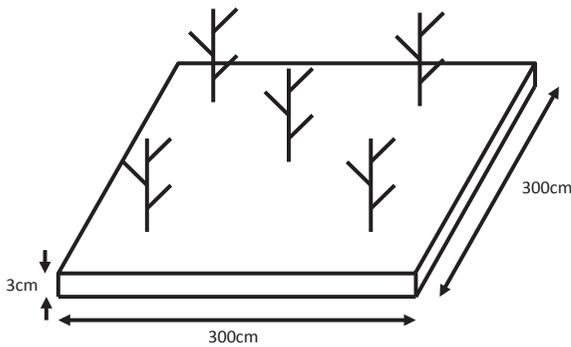


図3 Case1 (土壌改良材を地表面に敷く)

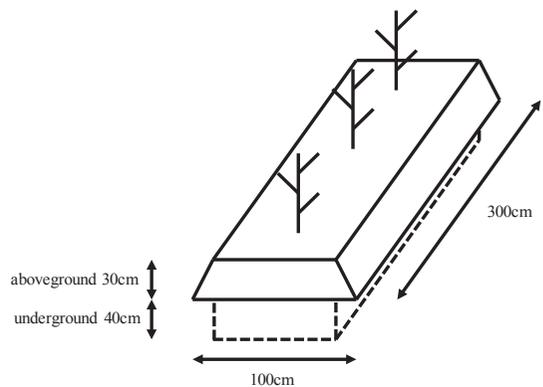


図4 Case2 (土壌改良材と跡地土壌を混合して畝を作る)

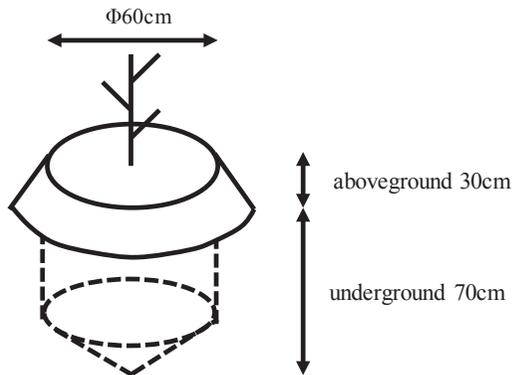


図5 Case3 (土壌改良材と跡地土壌を混合して円筒状に耕耘する)

表4 試験区の条件

Field No.	Soil form	Type of soil conditioner	Mixing ratio*)
1	Case1	Quicklime	—
2	Case1	Paper sludge ash	—
3	Case2	Quicklime	1 : 1
4	Case2	Paper sludge ash	1 : 1
5	Case2	Quicklime	2 : 1
6	Case2	Paper sludge ash	2 : 1
7	Case3	Paper sludge ash	1 : 1
8	Case3	Quicklime	1 : 1
9	Case3	Quicklime	2 : 1
10	Case3	Paper sludge ash	2 : 1
11	-	-	-
12	Same as case2	-	-
13	Same as case3	-	-

\*) Soil of mined land(kg) : Soil conditioner(kg)



図6 植栽した試験区の全景

度、土壌pH・EC及び土壌地温・水分の測定を行った。この他比較のため、事業所近隣の森林土壌、跡地土壌(試験区11に相当)の2箇所においても同様な測定を行った。

(1) ヒノキの成長状況 2011年11月に植付けたヒノキの状況を随時観察し、前述のように枯死が見られたものは2012年3月に補植した上で、2012年5月、2012年12月及び2013年10月に地際直径、全高を計測した。

(32)

(2) 透水性 植栽土壌の透水性の不良は、過剰水分を生じさせ、根茎への酸素供給が減少するだけでなく、嫌気性微生物の働きにより有害物質が生成される。また、植栽物の成長に伴い根が伸長するため、植栽土壌の深度と透水性の関係を把握する必要がある。そこで、土壌改良材混入による透水性の変化を見るため、試験区3及び4、森林土壌、跡地土壌の4箇所において、深度40cm、80cm地点の透水性を測定した。計測には植栽土壌の透水性調査に汎用されている長谷川式簡易現場透水試験器を用いた。

(3) 土壌硬度 植栽土壌の硬度は、根系の発達に強く影響を及ぼす。特に跡地に埋戻された土壌は、降雨や重機の転圧等による圧密の影響を大きく受け、これにより固く締まった土壌は透水不良とともに植物の枯死の主因となっている。そこで、土壌硬度の調査に一般的に用いられている山中式土壌硬度計を用い、試験区3及び4、森林土壌、跡地土壌の4箇所において、深度30cm、60cm地点の土壌硬度を測定した。

(4) 土壌pH及びEC 植栽された樹木の成長には化学

的条件も併せて考慮する必要があるため、試験区3及び4、森林土壌、跡地土壌の4箇所において、土壌pH及びECの測定を行った。

(5) 地温及び土壌水分 土壌改良材を混合した試験区が植物の生育に適した地温及び土壌水分を保っているかを確認するため、試験区3及び4に、温度ロガーと土壌水分センサーを組み合わせた地温・土壌水分モニタリング装置<sup>7)</sup>を深度30cm地点に埋設し、地温と土壌水分の連続測定を行った。測定期間は2013年5月30日から2013年10月23日である。

#### 4.5 検証結果および考察

(1) ヒノキの成長状況 植栽したヒノキの苗の地際直径と全高は多少異なるので、計測値の2012年5月分を基準とし、この値との比を成長率とした。表5にこの試験区毎の平均値を示す。ここで、造林・造園業者の経験から、全高は計測時の誤差が入り易く、地際直径の方がよりの確な成長状況を反映するとの教示を受けたので、以下地際直径の成長率をもとに考察する。

まず、生石灰造粒物を植栽土壌上面に敷いた試験区1

表5 ヒノキの成長状況

Field No.	Growth ratio (%)			
	May. 2012→Dec.2012		May. 2012→Oct.2013	
	Diameters near the ground	Height	Diameters near the ground	Height
1	152	139	218	142
2	119	128	152	132
3	131	110	172	107
4	129	115	164	113
5	132	110	160	105
6	129	120	158	116
7	118	106	131	96
8	121	106	151	108
9	124	128	158	133
10	121	114	144	120
11	102	110	139	104
12	122	113	139	113
13	137	122	174	127

の場合が最も優れている。これは、生石灰造粒物を敷くことで植栽土壌上面付近の水捌けが良くなったことに加えて、生石灰造粒物から苗木に対し窒素が供給されたことによるものと推察される。しかし、PS灰造粒物の試験区2ではその成長率が、同じくPS灰造粒物を用いた試験区4、6、10と比べて優れてはいないことから、植栽土壌上面に土壌改良材を敷く方法が工法として最適か否かは更なる検討を要する。また、土壌改良材混合比率と植栽土壌形状が同一ならば、PS灰造粒物よりも生石灰造粒物を用いたものの方が地際直径の成長率が大きい。これも、生石灰造粒物から苗木に対し窒素が供給されたことによるものと推察される。

土壌改良材の種類と混合比率が同一ならば、植栽土壌形状Case3よりもCase2の方が成長率が大きい。この要因として、Case3は円形の表面土壌の中央部が畝造成の不備（締固め）からか、降水により中央部がすり鉢状に沈下している状態が散見されたことから、Case2に比べて土壌硬度と透水性が悪化している可能性が考えられる。植栽土壌形状と土壌改良材を同一とした場合の土壌改良材混合比率による成長率の差異について見ると、植栽土壌形状がCase2ならば跡地土壌：土壌改良材 = 1：1とした方が、Case3ならば跡地土壌：土壌改良材 = 2：1とした方が成長率が大きい。この原因は、土壌改良材の混入率が大きい場合が土壌中の空隙量が増え

るため、時間の経過と共に上述中央部の沈下となり土壌の透水性や硬度が悪化したと考えている。

土壌改良材を用いなかった試験区11、12、13の中で試験区11、12の成長率が、土壌改良材を用いた各試験区より試験区7を除けば明らかに劣っており、土壌改良材の有効性が現れていると判断される。ここで、試験区13は高い成長率を示しているが、これは1本の苗の成長がかなり大きく、これが平均値を押し上げた結果であり、この苗木を除くと140%（2013年10月）となり試験区11、12との変わりは見られない。この苗木の特異的な要因によるものと考えている。

(2) 透水性 表6に計測結果を、表7に判定基準<sup>8)</sup>を示す。この判定基準によれば、何れにおいても植栽土壌として要求される透水性を満足（good or very good）している。しかし、試験区3、4と跡地土壌と比較して見ると、深度40cmでは透水性が改善されているものの、深度80cmでは跡地土壌と同等またはそれ以下である。これは土壌改良した深度が70cm迄であり、深度80cmは土壌改良の範囲外であるため、その地点の跡地土壌の透水性を示していると考えられる。前述のように、成長したヒノキの根茎の発達範囲は深度方向で約150cm、水平方向で約100cm程度とされているため<sup>4)</sup>、十分な根の発達を促すためには土壌改良材の埋戻し深度を再考する必要がある。

表6 透水性、土壌硬度、土壌pH及びEC調査結果

	Permeability (mm/h)		Hardness (mm)		pH	EC (mS/cm)
	40cm deep	80cm deep	30cm deep	60cm deep		
Forest soil	300	300	11.7	11.0	5.8	0.1
Field No.3	271	45	17.5	12.2	8.3	0.1
Field No.4	279	90	10.1	18.0	8.3	0.1
Soil of mined land	87	82	14.3	12.8	6.5	0.0

表7 透水性試験結果判定基準<sup>9)</sup>

Permeability (mm/h)	~ 10	10 ~ 30	30 ~ 100	100 ~
Grade	Bad	Slightly bad	Good	Very good

(34)

(3) 土壌硬度 前掲表6に計測結果を、表8に判定基準<sup>8)</sup>を示す。跡地土壌を含めてほぼ植栽土壌硬度の基準値 (very good) を満たしているが、試験区3の30cmや試験区4の60cmでは跡地土壌より若干高い値を示している。これは、前者では添加した生石灰の影響で土壌改良材が固結し易くなることも原因と考えられるため、添加物の種類に応じた土壌改良材の混合割合に留意する必要がある。後者については、土壌改良境界の近傍であるため、跡地土壌に含まれる土丹などの比較的固い部分を測定したことが原因ではないかと推察している。上述の透水性と同じく、土壌改良材の埋戻し深度を再考する必要がある。

(4) 土壌pH及びEC 前掲表6に、計測結果を示す。森林土壌及び跡地土壌のpHは弱酸性～中性を呈しているが、試験区3、4においては弱アルカリ性を示している。これは、土壌改良材がアルカリ性の脱水ケーキ (表1、pH=8.0～8.6) が主と成っているため、この影響によるものである。アルカリ性土壌では、鉄、銅、亜鉛等の微量元素の不溶化による吸収阻害が引き起こされることが懸念されるため<sup>8)</sup>、土壌改良材に中和作用のある酸添加材を付加する等により土壌pHを改善する必要がある。

植栽土壌のECの整備目標値は0.1～1.0 mS/cm<sup>8)</sup>とされている。試験区3、4の土壌ECはこれを満足しているものの下限値であり、跡地土壌は全く不適である。

土壌中の水溶性塩類の総量をあらわすECは、硝酸体チッ素含有量との間に正の関係にあり、チッ素が不足すると葉緑素が生成されず生育が止まり、葉の黄変や葉枯れを生じる<sup>8)</sup>。したがって、植栽土壌ECを考慮すると、土壌改良材にチッ素肥料分を添加する等の更なる改善が必要と思われる。

(5) 地温及び土壌水分 図7に測定期間中の日平均地温 (°C) を、図8に日平均土壌水分 (cbar) を、表9に土壌水分の管理指標値<sup>3)</sup>を示す。図7から、試験区3より試験区4の方が日平均地温の変動幅が多少大きい、ほぼ同様な傾向を示している。なお、試験区4の6月中旬の日平均地温の急上昇の原因は不明である。千葉県房総地方では、経験的に10月～11月以降になるとヒノキが根からの水の吸収を止め、成長が止まるとされていることから、ヒノキの成長が止まる地温条件は約20°C以下であると推定される。

土壌水分については、図8に示すように、両試験区ともに夏期の7月から8月にかけて減少しており、試験区4でより減少が大きい、この夏期以外の期間では凡そ45cbar程度となっている。管理指標値から判断すると、夏期では適度な土壌水分を保持しているとは言い難い。この測定値は地表下30cm地点のものであり、他の深度では土壌水分の状態が異なる可能性はあるが、少なくとも7月～8月にかけては水分補給、すなわち散水等が必要であると判断される。

表8 土壌硬度判断基準<sup>9)</sup>

Soil hardness (mm)	Expression of hardness	Evaluation as planting ground	Grade
27～	Very hard	Hard to develop rhizome for most species	Bad
24～27	Hard	Bad for rhizome develop	Slightly bad
20～24	Compacted	Hard to develop rhizome for some species	Good
11～20	Soft	Good for rhizome development	Very good
～11	Too loose	Good for rhizome development (low in bearing resistance, easy to dry up)	Possible

(6) まとめと今後の課題 約2.5年に過ぎない試験植栽ではあるが、得られた結果を纏めると以下のようである。

- ①全体的に見れば、土壤改良材を用いなかった試験区では成長率が劣るため、土壤改良材混入の有効性が表れていると判断される。
- ②土壤改良材は生石灰造粒物の方が優れている。

③植栽においては畝の造成が水捌けに有効である。

④土壤改良材の混入により透水性や硬度を改善することが出来るが、土壤改良材作製時の添加材によっては逆の結果を生む恐れもある。

⑤成育促進のために、土壤改良の深度は1～1.5m程度が望ましい。また、土壤改良を行わない場合でも植栽土壤の耕耘が必要であろう。

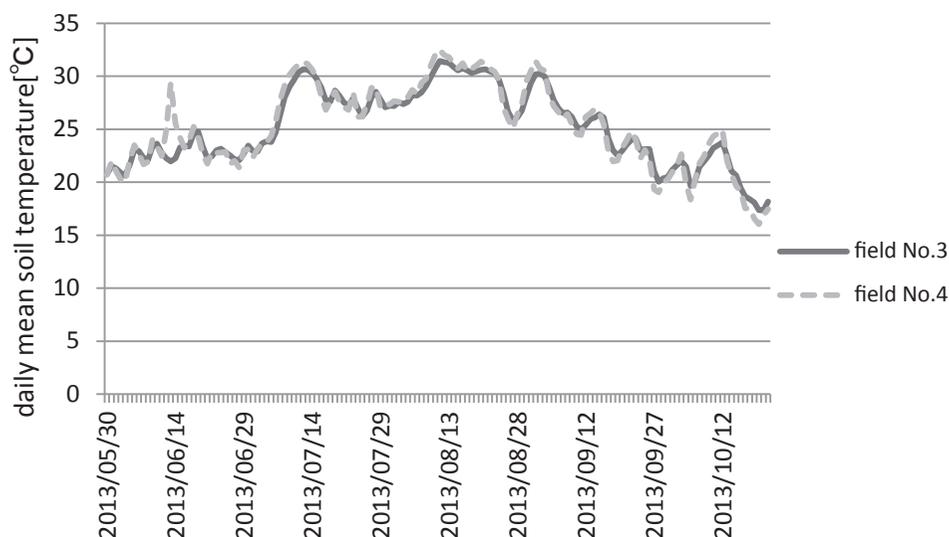


図7 日平均地温（試験区3、4）

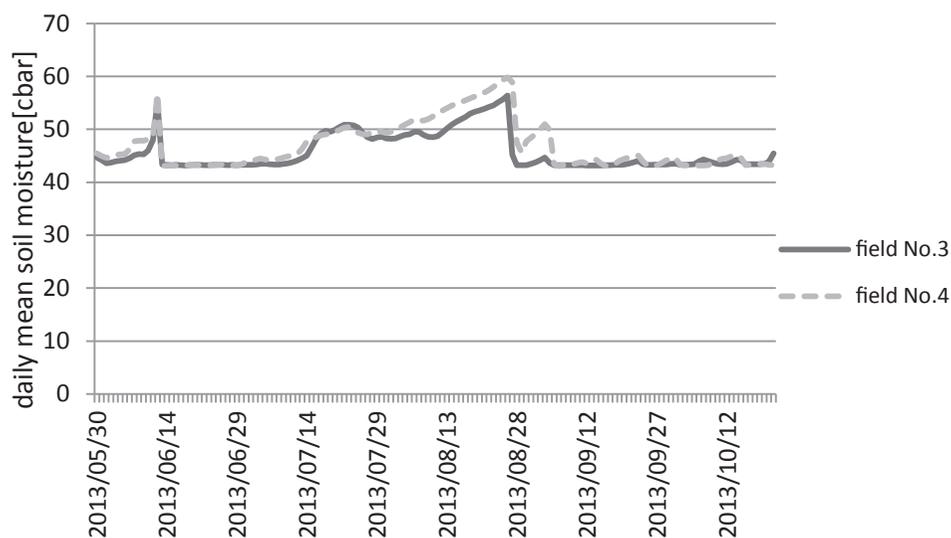


図8 日平均土壤水分（試験区3、4）

表9 土壤水分の管理指標値<sup>3)</sup>

Moisture (cbar)	Condition of soil moisture
0～10	Saturated with soil moisture
10～30	Moderate soil moisture
30～60	Irrigation point except for heavy clay soil
60～100	Irrigation point for heavy clay soil
100～200	Wilting point

- ⑥土壤改良材を混入した土壤pHは弱アルカリ性を示した。この改善を図るためには更なる添加材の付加が必要である。また、ECは植栽基盤整備目標値の下限值に近いため、育成促進には何らか形での肥料分の添加が必要である。
- ⑦土壤水分は7月から8月に減少するため、散水等の対策が必要である。

## 5. おわりに

本研究では、砂利採取跡地において緑化用植栽物の生育の妨げとなっている植栽土地盤の不良性を改善するため、(株) デイ・シイ吉野事業所を研究対象として、まず廃棄物である脱水ケーキを利用した土壤改良材を試作した。その結果、混練工程と成形工程の機能を併せ持つ多機能ミキサー装置を用いて生石灰やPS灰を添加することにより、造粒された土壤改良材を製造できることが判り、脱水ケーキの有効処分のひとつの目処が立った。

次に、この土壤改良材の効果を採取跡地に造成した数種の植栽土地盤を持つ実験圃場に植栽したヒノキで検証し、得られた結果について検討を加えた。その結果、土壤の透水性や硬度については土壤改良材の適用により改善され、植物生育に阻害がない範囲に収まることが判った。しかし、改良された土壤は弱アルカリ性を呈し、かつ採掘跡地と同様に貧栄養であることが確認されたため、これらへの対応策が今後の課題である。現在、土壤改良材作製の段階での新たな添加材の付加による対応策を進めているところである。また、実験圃場においては、植栽したヒノキの生育状態の観察をあと数年は続ける予定である。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり (株) デイ・シイの関係各位より多大なご協力を頂いた。ここに記して厚くお礼を申し上げます。

## 引用文献

- 1) 経産省製造産業局住宅産業窯業建材課：平成24年度砂利採取業務状況報告書集計表, 2014年
- 2) 福島成樹：採取跡地の緑化工事, 千葉県農林水産部森林研究所, 2011年
- 3) 山田有紀：山砂採取跡地における緑化方法の検討と環境影響, 千葉大学大学院園芸研究科, p.13-15, 2009年
- 4) Y. Sakai et al. : Journal of MMIJ, 128, p.225-231, Present Situation of Aggregate Resources in Japan and Engineering and Environmental Issues at an Aggregate Quarry ,2012年
- 5) (株) デイ・シイ：脱水ケーキ調査結果報告書, 1991年
- 6) (社) 日本粉体工業技術協会編：造粒ハンドブック, 1991年
- 7) 茨城県農業総合センター農業研究所土壤肥料研究室：安価な土壤水分モニタリング装置, 2004年
- 8) 社団法人日本造園建設業協会編：植栽基盤整備ハンドブック, p.85-92, 2010年