

土中有機物の劣化促進試験および分析方法の検討

－中間貯蔵土壌等の再利用方法に関する基礎的評価－

Examinations to Promote Decomposition and Analysis Methods

for Soil Containing Organic Matter

- Basic Evaluation of Reuse Method for Intermediate Storage Facility Soil -

今井亮介* 小西正郎** 清水祐也* 白石祐彰***

要旨

中間貯蔵施設に貯蔵される除染で発生した土壌や、近年多発する豪雨などで発生する災害土砂は、再生利用資材として活用が望まれている。しかし、これら土壌や土砂には一般的に用いられる埋戻し土よりも草木などが多く含まれていることが多い。また、中間貯蔵施設に貯蔵される土壌には、土質改質材に含まれる吸水性樹脂などが含まれる場合もある。有機物であるこれら草木や吸水性樹脂が長期的にどのように変化し、土壌の特性に影響を及ぼすかについては不明な点が多い。そこで本研究では、土壌中の有機物の分解などの長期的変化を「劣化」と位置づけ、劣化を短時間で再現する方法（劣化促進試験）とその変化を評価する方法（劣化指標）を具体化することを目的とし、複数の試験と分析を行った。その結果、高温高压処理により有機物の劣化を促進できる可能性があること、化学的酸素要求量測定やスペクトル分析により有機物の劣化を評価できる可能性があることを明らかにした。また、土壌に有機物が混在していると、一軸圧縮強度などが増加するものの、長期的にはその増加量が減少し、再生利用した初期の資材としての品質が低下する可能性があることなどの知見を得ることもできた。ここでは、これらの試験方法や分析評価結果について報告する。

キーワード：中間貯蔵施設、有機物、吸水性樹脂、促進試験、分析

1. まえがき

2011年3月11日の東日本大震災に伴う福島第一原発事故から8年が経過し、放射性物質汚染からの回復を目指した除染事業では、2018年3月で帰還困難区域を除く地域の面的除染が完了した。これら除染事業で発生した除去土壌はおよそ1,330万m³と推定されており、2017年より中間貯蔵施設への輸送が開始されている。中間貯蔵事業では、これら除去土壌を貯蔵施設に保管し30年以内に福島県外に最終処分する方針が、環境省により示されている。また、この最終処分量の減容化を進め、放射能濃度が低い土壌を有効に再生利用する検討が進められている¹⁾²⁾。

しかしながら、中間貯蔵施設に貯蔵される除染作業で発生した土壌（以下、中間貯蔵土壌）は、水田や畑等の農耕地を含む土地の表面を概ね5cm程度はぎ取った土壌であるため、草木や根、落葉などを多く含んでいる。貯蔵施設に埋め立てられる前にふるい機で異物を取り除いてはいるものの、細かい有機物が土壌中に残存する可

能性が高い。また、これら異物除去を行う過程で粘性土分の多い土壌は改質されるが、この改質には吸水性樹脂等の含水調整剤が用いられている¹⁾²⁾。

一方、近年、豪雨や地震に伴う土砂災害が多発している。2018年7月の西日本豪雨では、大量の廃棄物混入土砂が発生し、これら廃棄物混入土砂から草木等の異物を取り除き埋め立てる事業が進められている。これらの事業においても埋め立て前にふるい分けや手選別により、異物を取り除かれるものの、やはり細かい異物が残存する可能性が高い。遠藤らは、東日本大震災に伴う大津波で発生した混合廃棄物由来の災害土砂をふるい分けした分別土（20mmふるいを通過した処理物）の有機物量を示す強熱減量は9.7%であったと報告している³⁾。

しかし、これら有機物が長期的にどのように変化し、土壌の資材としての強度などの特性に影響を及ぼすかについては不明な点が多い。そこで、これらの有機物を含む土壌を効率よく利用するために、土中の有機物の長期的変化を把握することを目的とし、以下の3種の試験と分析を行った。本報では、これら試験の結果と得られた

* 土木本部 土木部 環境技術室 ** 技術研究所 *** 技術研究所 環境研究グループ

知見について報告する。

- ①有機物が土中で H₂O や CO₂ に分解される長期的変化（以下、劣化）を短時間で再現する方法（劣化促進試験）の検討
- ②汎用的な分析方法で劣化を評価する方法（劣化指標）の検討
- ③有機物を含む模擬土壌の土質試験

2. 試験概要と使用材料

2.1 試験概要

a. 劣化促進試験の検討

(a) 高温高压処理試験

土壌中の植物片などの有機物は、土壌中の分解者（土壌動物や微生物など）によって分解される。有機物を水分の存在する高温高压環境下におくことにより、分解が促進される可能性があると考えて、高温高压処理試験を行った。

(b) 紫外線照射試験

紫外線は水処理等の分野で有機物を分解処理する手段として用いられており、同様に分解が促進される可能性があると考え、紫外線照射試験を行った。

b. 有機物の変化を評価する試験の検討

劣化促進試験による有機物の変化を評価する指標として以下の項目について測定を行った。

- ①全有機炭素量（TOC）
- ②強熱減量
- ③生物化学的酸素要求量（BOD）
- ④化学的酸素要求量（COD）
- ⑤赤外分光分析（IR 法）
- ⑥ゲル浸透クロマトグラフィー分析（GPC）
- ⑦紫外可視分光分析（UV-Vis）

c. 有機物を含む模擬土壌の土質試験

農耕地から採取した土壌に、高温高压処理した供試体を混合して模擬土壌を作成し、以下の土質試験を行った。

- ①コーン貫入試験
- ②1 軸圧縮試験
- ③コンシステンシー試験

2.2 使用材料

有機物として、ひのき、広葉樹、稲わらおよび吸水性樹脂を対象として試験を行った。使用した有機物試料を写真-1 に、使用材料の諸元を表-1 に示す。

3. 有機物の分解などの長期的変化を短時間で再現する方法（劣化促進試験）の検討

3.1 高温高压処理試験

a. 試験方法

試験は、写真-2、表-2 に示す亜臨界水処理装置を

用いて実施した。有機物試料と精製水を 1：20 の重量比で混合し所定の温度（200 ℃）と圧力（1.0 MPa）を加えて処理を実施した。表-3 に処理試験の設定条件を示す。



写真-1 使用した有機物試料

表-1 使用材料の諸元

ひのきチップ	
製品目	ひのきのふかふかマット
製作会社	スドー株式会社
容量	10 L
広葉樹チップ	
製品目	広葉樹おがくず
製作会社	株式会社鈴友林業
容量	6 kg 前後
稲わら	
製品目	敷きわら
製作会社	洛陽
容量	20 L
吸水性樹脂	
製品目	サンフレッシュ ST-500D
製作会社	SDP グローバル株式会社
成分	アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物 97%
形状	粉末状
色	白色
臭い	ほとんど無臭
pH	6.1（製品の0.5%生理食塩水分散液）



写真-2 亜臨界水処理装置

表-2 亜臨界水処理装置の仕様

品名	亜臨界水処理装置
製作会社	株式会社協真エンジニアリング
加熱方式	加熱ヒータ+温度調節器
温度範囲	室温~MAX300℃
圧力範囲	外気圧~3.5 MPa
内筒	ステンレス製 φ115 mm×H155 mm

表-3 高温高圧処理の設定条件

供試体	設定温度	設定圧	加熱時間
有機物試料 20 g 精製水 400 g	200℃	1.0 MPa	160 分

b. 試験状況

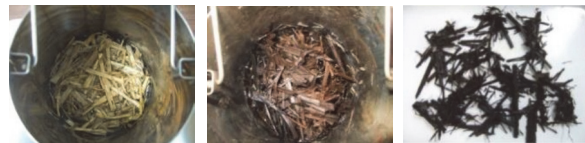
高温高圧処理を行うことにより、ひのきチップ、広葉樹チップ、および稲わらは茶褐色に変色し、より砕けやすくなるなどの性状の変化が確認された。

一方、吸水性樹脂は精製水を混合すると、膨潤して水分すべてを含み、容器を水平に倒してもほとんど変形しない程度のゼリー状になった。これを高温高圧処理すると、若干褐色を帯び、その粘性が低下するものの、常温まで温度が下がると処理前とほぼ同様の性状に戻った。さらに、乾燥炉（100℃）で乾燥すると固形化して表面が褐色になった。しかしながら、固形化した試料を粉砕して水分を加えると、再び水分を吸収して膨潤した。

4種の試料のうち、ひのきチップ、稲わら、および吸水性樹脂について、高温高圧処理を行った試料の状況（処理前、処理後、および処理後試料を100℃乾燥）を写真-3、写真-4、写真-5に示す。



処理前 処理後 乾燥後
写真-3 ひのきチップの高温高圧処理状況



処理前 処理後 乾燥後
写真-4 稲わらの高温高圧処理状況



処理前 処理後 乾燥後
写真-5 吸水性樹脂の高温高圧処理状況

3.2 紫外線照射試験

a. 試験方法

試験は促進耐候性試験機（ダイブラ・ウィンテス(株)製 SWM-04）を用いて実施した。有機物試料（ひのき、稲わら、広葉樹および吸水性樹脂）をステンレス製の容器に入れ、紫外線（照射照度 450 W/m²）を72時間照射した。これは、約6ヶ月分の紫外線照射量に相当する⁴⁾。また、自然環境下での影響を再現するため、100 mL/hrで散水するケースと散水しないケースの2通りの試験を行った。試験の条件を表-4に試験機を写真-6に、試験状況を写真-7に示す。

b. 試験状況

紫外線照射を行うことにより、ひのき、稲わら、広葉樹は色が濃くなり、散水ありのケースでより濃い色となった。なお、触感や形状に変化は認められなかった。吸水性樹脂に関しては、色の変化はないが、表面が硬質となった。特に散水ありのケースでより硬くなり、手で切断することが困難となった。

表-4 紫外線照射試験の設定条件

項目	条件
光源	メタルハライド
試験温度	20℃
照射照度	450 W/m ²
照射時間	3日間（72時間）
積算照射量	1.62 MJ/m ² /hr （合計 116.64 MJ/m ² 約6ヶ月相当）
散水	あり（100 mL/hr）・なしの2通りで実施



写真-6 促進耐候性試験 写真-7 試験状況

4. 汎用的な分析方法で劣化を評価する方法（劣化指標）の検討

4.1 分析方法

提案する2種の劣化促進試験を行い、試料の外観の変化が大きい高温高圧処理試験を行った4種類の有機物について、各種分析を行った。分析は、試料の有機物量を直接測定する全有機炭素（TOC）測定と強熱減量測定、水質の分析で用いられる有機物による汚れの尺度となる生物化学的酸素要求量（BOD）と化学的酸素要求量

(COD) の測定などの比較的汎用的に行われる分析方法 4 種を行った。また、赤外分光分析 (IR 法)、紫外可視分光分析 (UV-Vis)、および浸透クロマトグラフィー分析 (GPC) の 3 種のスペクトル分析を行った。

なお、紫外線照射試験を行った 4 種類の有機物については、赤外分光分析 (IR 法) のみを実施した。

実施した各種分析と対象試料を表-5 に示す。

表-5 各種分析と対象試料一覧

分析項目	試験方法他	対象試料*	
		高温高压処理	紫外線照射
全有機炭素 (TOC)	JIS K0102 21 22.1 燃焼酸化-赤外線式TOC分析法	○	
強熱減量	750°C強熱灰化法 試料の蒸発残留物を測定	○	
生物化学的酸素要求量 (BOD)※	JIS K0102 21 及び 32.3 ウインクラ-アジ化ナトリウム変法	○	
化学的酸素要求量 (COD)※	JIS K0102 20.1 2クロム酸カリウム (K ₂ Cr ₂ O ₇) を使用した測定 (COD _{Cr})	○	
赤外分光分析 (IR法)	固形分をFT-IR分光計で測定 測定器: IRAffinity-1S (株式会社 製作所)	○	○
紫外可視分光分析 (UV-Vis)	試料からの浸出水 (30°C、 80°C) を紫外可視分光計で測定 測定器: FP-6500 (日本分光株)	○	
ゲル浸透クロマトグラフィー分析 (GPC)	試料からの浸出水 (30°C、 80°C) をGPC測定器にて測定 測定器: Waters 2414 (Waters Corporation)	○	

※各分析は処理の前後の試料について実施した

4.2 分析結果

a. 全有機炭素 (TOC)

各試料の高温高压処理前後の全有機炭素 (TOC) 測定結果を図-1 に示す。処理後に各試料の TOC が増加する結果が得られた。特に吸水性樹脂は測定値が大きく増加する結果が得られた。

b. 強熱減量

各試料の高温高压処理前後の強熱減量試験 (750°C) の結果を図-2 に示す。ひのきは処理前後ともに 100%、広葉樹は処理前が 99%、処理後が 83%、稲わらは処理前後とも約 90% の減量結果が得られた。自然由来の有機物はそのほとんどが燃焼して分解されたと考えられる。一方、吸水性樹脂は処理前後ともに約 60% の減量 (40% 程度が残留) となる結果が得られた。

c. 生物化学的酸素要求量 (BOD)

BOD と後述する COD の測定は、固形試料を粉砕し、精製水と混合して測定を行い、固形試料単位重量当たりの換算値を示している。

各試料の高温高压処理前後の生物化学的酸素要求量 (BOD) 換算値の測定結果を図-3 に示す。自然由来の有機物 (ひのき、広葉樹、稲わら) は、測定値が増加するものと減少するものと様々な結果に分かれた。一方、吸水性樹脂は処理前後ともに測定値が検出限界以下であった。

d. 化学的酸素要求量 (COD)

各試料の高温高压処理前後の化学的酸素要求量 (COD) 換算値の測定結果を図-4 に示す。すべての試料で、処理後に測定値が増加する結果が得られた。

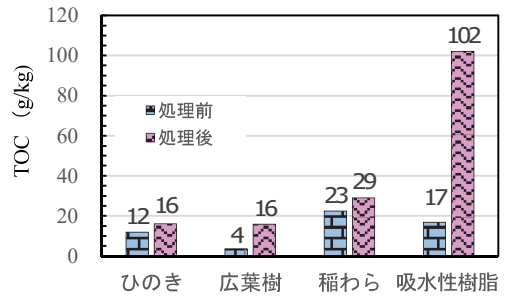


図-1 高温高压処理前後の TOC 測定結果

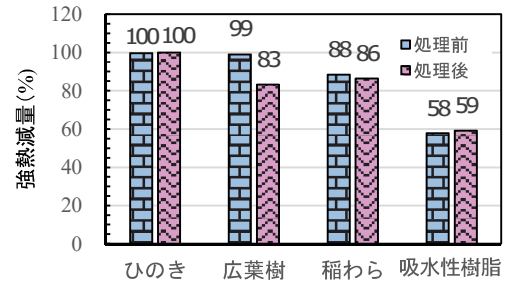


図-2 高温高压処理前後の強熱減量試験結果

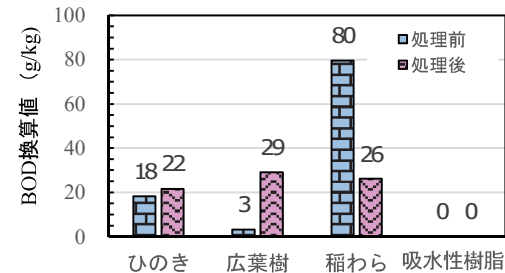


図-3 高温高压処理前後の BOD 測定結果

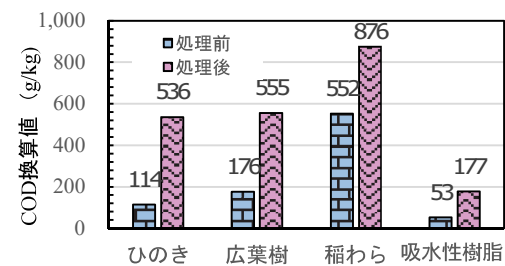


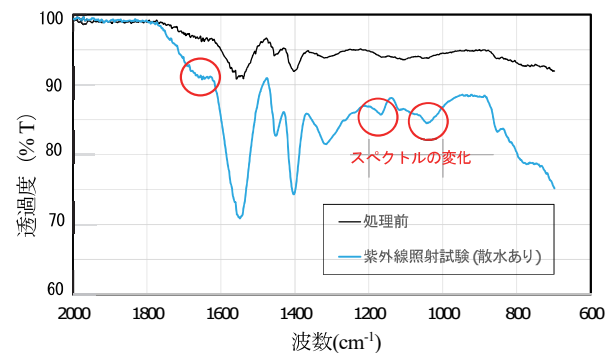
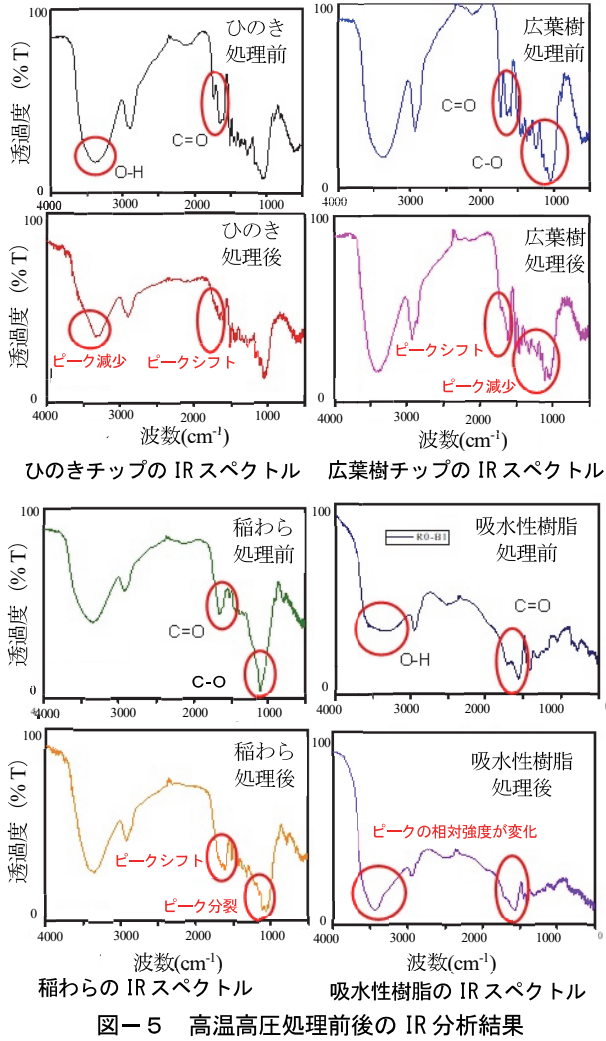
図-4 高温高压処理前後の COD 測定結果

e. 赤外分光分析 (IR 法)

赤外分光法は、物質に赤外光を照射し、透過または反射した光を測定することで、試料の構造解析や定量を行う分析手法である。分析により水酸基などの官能基のピークが一定の波数域に検出されるため、そのピークを解析することで、化合物の部分的な構造を推定することができる。各試料の高温高压処理前後の赤外分光分析 (IR 法、縦軸は透過度 %T) の測定結果を図-5 に示す。自然由来の有機物であるひのき、広葉樹、稲わらでは、O-H (水酸基)、C=O (カルボニル基)、C-O の変化を示唆する IR スペクトルの変化が確認された。一方、吸水

性樹脂では、O-H（水酸基）とC=O（カルボニル基）の相対強度が変化したことを示す結果が得られた。

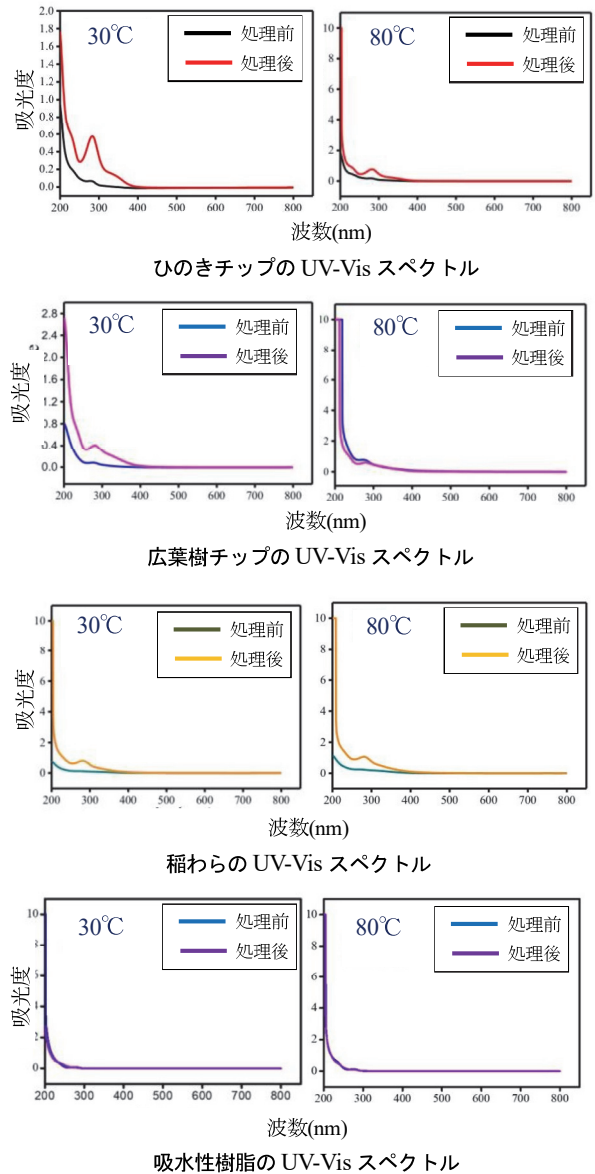
紫外線照射した各試料のIR分析では、自然由来の有機物であるひのき、広葉樹、稲わら試料について、明確なIRスペクトル変化は認められなかった。しかし、吸水性樹脂については、その変化が認められた。図-6に吸水性樹脂の紫外線照射処理前後のIR分析結果を示す。処理後試料のIRスペクトルに、3か所の変化が見られた。



f. 紫外可視分光分析 (UV-Vis)

UV-Vis は、波長ごとに分けた光を測定試料に照射し、試料を透過した光の強度を測定する方法で、浸出してきたフェノール性分子や色素成分を定量化できる。

高温高压処理前後の試料 10 mg と水 20 mL を混合し、30°C と 80°C で 5 時間保温した後に、ろ過した浸出水試料を分析した。UV-Vis の分析結果を図-7に示す。自然由来の有機物であるひのき、広葉樹、稲わらの処理後試料では、スペクトルの波長 280 nm 付近にピークが出現し、フェノール性分子が浸出していると推定される。この分子は 30°C の浸出液に比べて 80°C の浸出液のほうが多く浸出している傾向にあるが、その増加量は試料によって異なる結果であった。一方、吸水性樹脂では、処理前後の試料ともにスペクトルにピークが見られなかった。



g. ゲル浸透クロマトグラフィー分析 (GPC)

ゲル浸透クロマトグラフィー分析 (GPC) は、ポリマーの分子量測定法として最も広く用いられている方法である。分子サイズの差で分離を行う液体クロマトグラフィーの一種であり、液中の分子量の分布などを測定することができる。本試験では UV-Vis 分析と同様に、高温高压処理前後の試料を水と混合し 30℃と 80℃で保温した浸出液の分子量が 100 から 20 万までの物資の測定を行った。今回の分析では、ひのきチップの高温高压処理後の試料の 80℃浸出液からは 100 および 1000 程度の分子量の分子が、稲わらの高温高压処理後の試料の 80℃浸出液からは 1000 および 20 万程度の分子量の分子が浸出していることを確認した。

5. 有機物を含む模擬土壌の土質試験

5.1 試験概要

前述の劣化促進試験と各種分析より、高温高压処理した自然由来の有機物が分解されている可能性が高いと考え、処理前後の有機物試料 (広葉樹チップ、稲わら) を土壌と混合し、各種土質試験を行った。

5.2 試験供試体

放射性物質の除染では、広い範囲の農耕地が対象となっていることから、休耕水田から採取した土壌を乾燥後に、2 mm 以下にふるい分けし、粘性土が 60%程度含まれる土壌を試料に用いた。使用した土壌試料の粒径加積曲線を図-8 に示す。

土壌試料に高温高压処理前後の有機物 (広葉樹チップ、稲わらを各 1wt%、2wt%) を加えて、また、それらに含水比が 20%になるよう水道水を加え、モルタルミキサーで混合した。作成した試験供試体を表-6 に示す。また、有機物を混合した供試体作成状況を写真-8 に、稲わら (2wt%) を混合した供試体を写真-9 に示す。

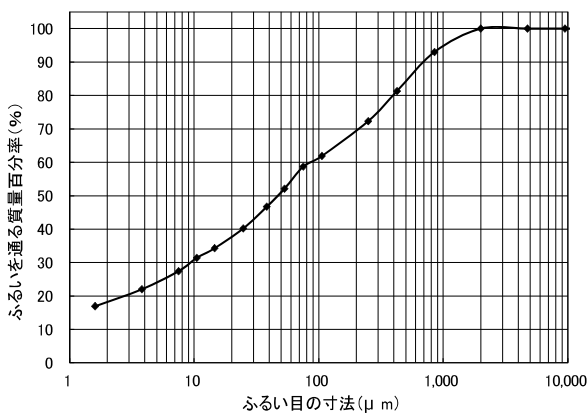


図-8 土壌試料の粒径加積曲線

表-6 試験供試体一覧

No.	混合物	含水比 (%)
1	なし (土壌のみ)	20.4
2	高温高压 処理前	広葉樹 1 wt%
3		広葉樹 2 wt%
4		稲わら 1 wt%
5		稲わら 2 wt%
6	高温高压 処理後	広葉樹 1 wt%
7		広葉樹 2 wt%
8		稲わら 1 wt%
9		稲わら 2 wt%



写真-8 供試体作成状況



写真-9 供試体 (稲わら 2wt%)

5.3 試験結果

a. コーン貫入試験、一軸圧縮強度試験

土壌のトラフィカビリティを示すコーン貫入試験の結果を図-9 に、強度を示す一軸圧縮強度試験の結果を図-10 に示す。グラフより、有機物 (特に稲わら) を加えるほど強度などが増加する結果が得られた。これは、稲わらの繊維質などが強度の増加に寄与しているためと考えられる。しかし、稲わら 2wt%を混合したケースで有機物の処理後に一軸圧縮強度が低下する結果が得られた。図-11 に稲わら 2wt%を混合したケースの応力ひずみ曲線を示す。処理前のケースでは強度が単調増加しているのに対して、処理後では、あるひずみ以降強度の低下が見られた。

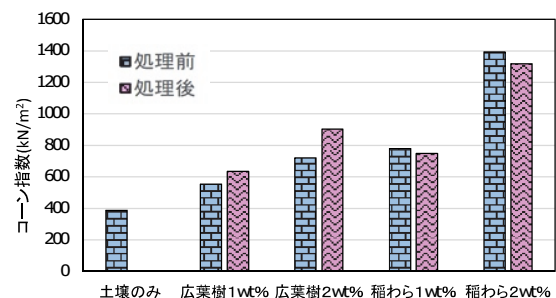


図-9 コーン貫入試験の結果

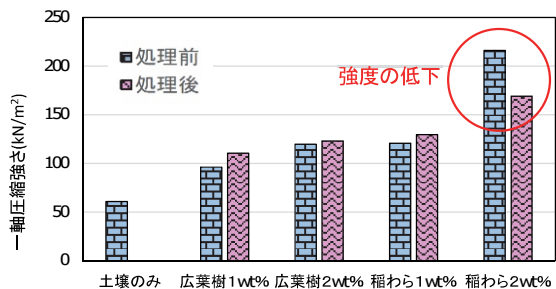


図-10 一軸圧縮強度試験の結果

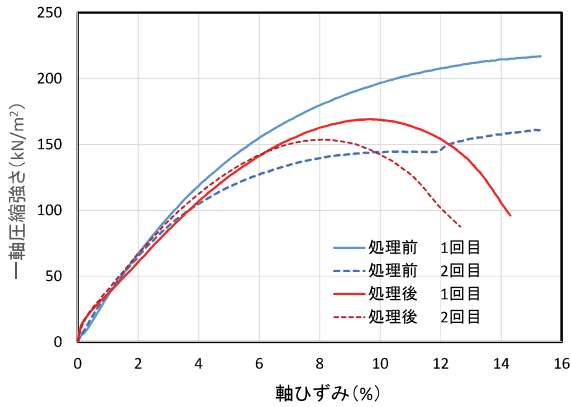


図-11 一軸圧縮強度試験応力ひずみ曲線
(稲わら 2wt%混合供試体)

b. コンシステンシー試験

土壌の含水量による状態の変化を示すコンシステンシーについて、液性限界の測定結果を図-12に、塑性限界の測定結果を図-13に示す。液性限界、塑性限界ともに、処理の前後で大きな差は認められなかったことから、有機物の高温高压処理による性状の変化は土壌のコンシステンシーに大きな影響を与えないと考えられる。

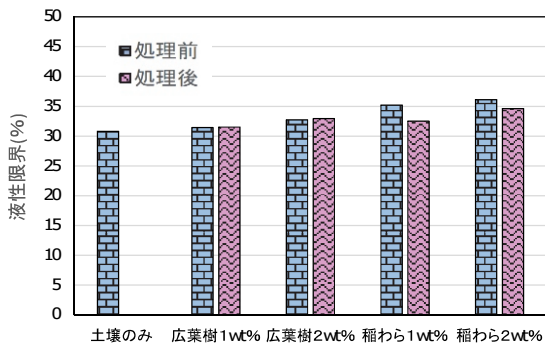


図-12 液性限界の測定結果

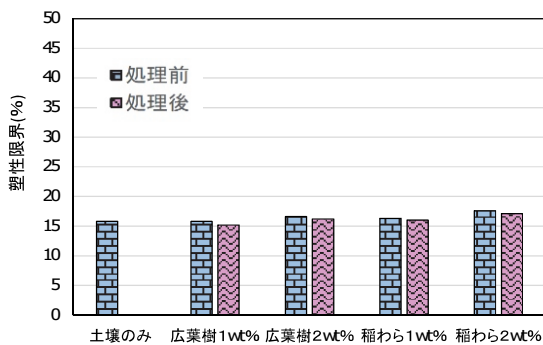


図-13 塑性限界の測定結果

6. 試験、分析方法の適用性の評価等

6.1 劣化促進試験

a. 高温高压処理試験

有機物に熱や圧力、および水分を加えることで、有機物の分解を促進できると考えて試験を行い、処理前後の試料の各種分析を行った。その結果、多くの分析で変化

が確認できた。このことから、高温高压処理は、劣化促進試験として利用できると考えられる。

b. 紫外線照射試験

紫外線は水処理等の分野で有機物を分解処理する手段として用いられており、有機物の劣化を再現できる可能性があると考えて処理試験を行った。その結果、IR分析で吸水性樹脂の処理前後の変化を確認できたが、自然由来の有機物の処理前後の変化を捉えることができなかった。このことから、劣化促進試験として利用できる対象物質は限定されると考えられる。

6.2 各種分析方法 (劣化指標)

汎用的な分析方法で劣化を評価する方法 (劣化指標) の確立を目指した研究の過程として、提案する劣化促進試験の供試体の変化を捕捉する分析方法を数種類選定することができた。表-7に今回の各種分析の劣化指標としての可能性の評価を示す。化学的酸素要求量 (COD) や赤外分光分析 (IR法) などの吸収スペクトルから分子構造の特徴を解析する分析方法が指標として活用できる可能性が高いと考えられる。

表-7 各種分析の劣化指標としての可能性評価

分析項目	指標としての可能性評価	評価理由
全有機炭素 (TOC)	△	高温高压処理後に測定値が増加した。有機物中の水素や炭素の割合が減少し、相対的に炭素の割合が増加した可能性も考えられるが、詳細は不明であるため。
強熱減量	×	劣化の有無にかかわらず、そのほとんどが燃焼して分解されたと考えられるため。
生物化学的酸素要求量 (BOD)	△	自然由来有機物3種の試料で異なる結果が得られたが、その理由が不明のため。
化学的酸素要求量 (COD)	○	高温高压処理前後のすべての試料で処理後に測定値が増加する結果が得られたため。
赤外分光分析 (IR法)	○	高温高压処理と紫外線照射処理の前後で水酸基やカルボニル基などの変化を捕捉することができたため。
紫外可視分光分析 (UV-Vis)	○	高温高压処理前後の試料からのフェノール性分子の浸出とその変化を捕捉することができたため。
ゲル浸透クロマトグラフィー分析 (GPC)	△	一部の試料で浸出する分子が確認されているが、詳細が不明のため。

6.3 有機物を含む模擬土壌の土質試験

劣化促進試験と各種分析より、高温高压処理した自然由来の有機物が土壌中での劣化を再現している可能性があると考え、処理前後の有機物試料を土壌と混合し、各種土質試験を行った。その結果、有機物を混合した土壌は混合しない土壌よりもコーン指数や一軸圧縮強度が増加する結果が得られた。このことから、有機物の繊維質が一種の補強材としての機能を果たしていると考えられる。しかしながら、有機物が劣化することにより、その機能が低下する結果も得られた。このことから、有機物が混入した土壌は強度が増加するが、劣化とともにその強度の増加量が減少していく可能性があると考えられる。

6.4 試料とした有機物の考察

自然由来の有機物（ひのき、広葉樹、稲わら）は、高温高压処理の前後の各種分析で測定値の変化が確認できた。このことより、土壌中での分解により、構造変化が起こり土壌の特性に影響を与える可能性が高いと考えられる。一方、吸水性樹脂は、100℃での加熱後もその吸水性能力が残ることや生物化学的酸素要求量（BOD）の測定値が検出限界以下であったことより、土中での微生物分解による長期的特性の変化は少ない物質であると考えられる。

7. まとめ

有機物を含む土壌を効率よく利用するために、土中の有機物の長期的変化を把握することを目的とし、劣化を短時間で再現する方法（劣化促進試験）の検討と各種分析、および有機分を含む模擬土壌の土質試験を行った。その結果、高温高压処理により有機物の劣化を促進できる可能性があること、COD やスペクトル分析により有機物の劣化を評価できる可能性があること、有機物が混入した土壌は、一軸圧縮強度などの測定値が増加するが、長期的劣化により、その増加量が減少する可能性があることなどの知見を得ることができた。

しかしながら、今回の検討は有機物そのものを対象に行ったものであり、土中でのその変化を再現し、分析・評価できていない可能性がある。今後は盛土試験などにより、実際に土中で変化する自然由来有機物の観察を行い、今回の検討の妥当性を評価していきたい。

【謝辞】

本研究では、佐賀大学の太田教授に御指導を、また、同大学理工学部機能物質化学科で赤外分光分析他各種スペクトル分析を行って頂いた。また、東亜道路株式会社技術本部技術研究所で同社の永原主任研究員に紫外線照射試験を実施して頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 環境省除染情報サイト、<http://josen.env.go.jp/>
2019.3.31
- 2) 中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略検討会（第10回）資料2、「中間貯蔵除去土壌等の減容・再生利用技術開発戦略進捗状況について」、
2019.3.19
- 3) 遠藤和人、「災害廃棄物由来の分別土試験盛土の観察結果」、地盤工学会誌、2017.1.17
- 4) 永原 篤、村山雅人、「気象劣化に基づいたアスファルトおよびアスファルト混合物の性状評価と室内再現試験」、土木学会第64回年次学術講演会、pp.63-64、
2009.9