

仮置場資材の長期耐久性試験

1. 背景・目的

福島県内の除染活動で発生した除去土壌等は、仮置場や現場保管場所（以下「仮置場等」という。）で除去土壌等保管容器等に収納して保管されている（図1）。除去土壌等保管容器にはフレキシブルコンテナと耐候性大型土のうの2種類が主に使われている^{1,2)}。一般的に前者はポリエチレン又はポリエステル織布、後者はポリプロピレン織布で構成されており、光安定剤や酸化防止剤によって耐候性が高められている。また、除染活動で使用される除去土壌等保管容器の性能はJIS Z 1651³⁾又は耐候性大型土のうのマニュアル⁴⁾によって規定されており、一般的な土のう袋よりも耐久性・耐候性が優れている。また、これら保管容器は原則的に上部遮水工（通気性防水シートや遮水シート等）に覆われ、直射日光や雨風を防いだ状態で保管されている。

現在、仮置場等から中間貯蔵施設への除去土壌等の輸送は本格化しているものの、当初は中間貯蔵施設の用地取得が思うように進まなかったこと等から、除去土壌等の発生量が全体で約1,400万m³と推計されているのに対して、2019年3月末時点で中間貯蔵施設への輸送が完了したのは約260万m³にとどまっている⁵⁾。その結果、仮置場等での除去土壌等の保管期間が当初想定の3年を超過した場所が未だに数多く残っており、現地資材の破損等の懸念が示されている^{6,7)}。

そこで福島県環境創造センターでは、除去土壌や仮置場等の適切な管理に資する知見の収集のため、除去土壌等保管容器として使用されているフレキシブルコンテナや耐候性大型土のう等といった仮置場資材の長期耐久性を調査している。保管容器の吊上げ時の安全性や積み重ね時の安全性についての調査結果は、前章に記載した通りである。これは、過去に報告している⁸⁾。本章では、保管容器の生地または吊ベルトの試験片や遮水シート類を用いた物性評価及び形態観察を実施した。

2. 実施内容及び方法

2. 1. 試験準備（仮置場資材の回収）

2. 1. 1. 保管容器（仮置場現地品）



図1 仮置場と保管容器

福島県内の市町村によって管理された仮置場等で使用されているフレキシブルコンテナ及び耐候性大型土のうについて、仮置場現地にて約2～6年経過した容器を回収し、その容器生地及び吊ベルトから試験片を作製した。各々の仮置場で使用される保管容器は異なる（図2）ため、本研究では遮光保管された耐候性大型土のう及びフレキシブルコンテナと、日光曝露された状態で保管された耐候性大型土のうを回収した。保管容器の種類については、耐候性大型土のう7メーカー（ここではA, B, C, D, E, F, Gと呼称する）と、フレキシブルコンテナ5メーカー（同じくS, T, U, V, Wと呼称する）の保管容器を回収した。

2. 1. 2. 保管容器及び遮水シート類（耐候性試験）

2. 1. 1で回収した保管容器と同規格・同メーカーの未使用品と、仮置場で保管容器の上部遮水工に使用されているシート類（遮水シート、通気性防水シート）の未使用品に対して、カーボンアーク灯式耐候性試験機⁹⁾を使用した紫外線促進曝露を行った（図3）。曝露条件はJIS Z 1651の耐候性試験B法に準拠する³⁾。この時、促進曝露300時間は屋外使用1年に相当するとされる⁴⁾。本研究では3種類の曝露時間（900、1,500、3,000時間）で処理した。また、試験対象は耐候性大型土のう2メーカー（A, B）、フレキシブルコンテナ3メーカー（S, V, W）、通気性防水シート2メーカー（L, M）遮水シート1メーカー（N）とした。

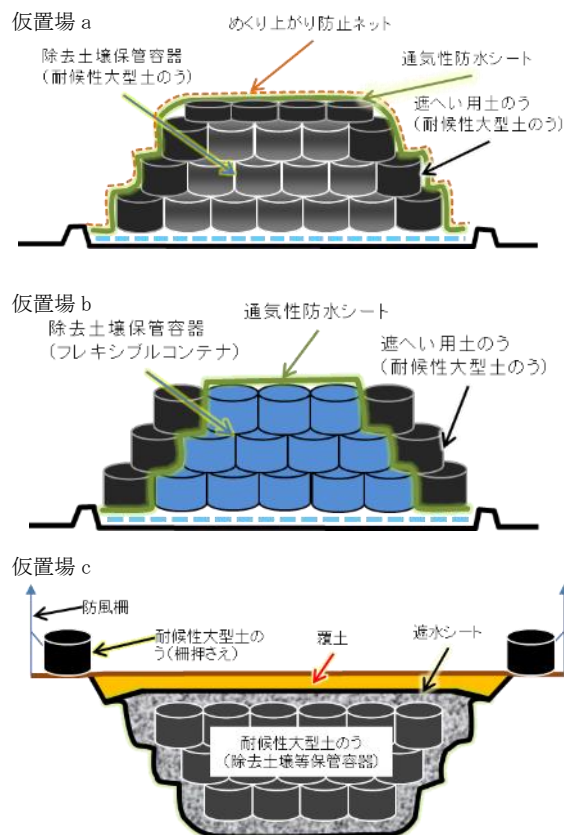


図2 仮置場のイメージ図

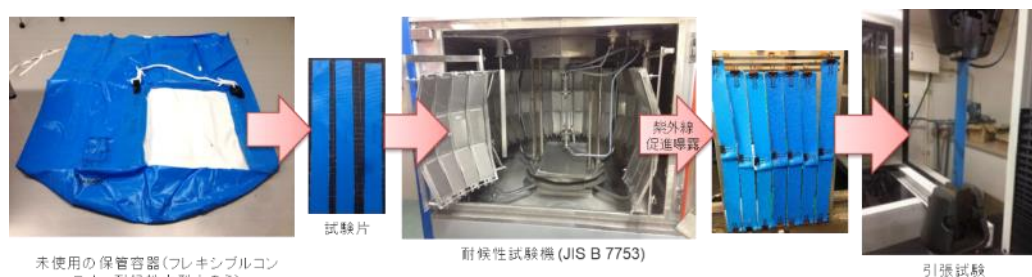


図3 耐候性試験の手順

以下、A社の耐候性大型土のうを「土のう(A)」、S社のフレキシブルコンテナを「フレコン(S)」、L社の通気性防水シートを「通気性防水シート(L)」と表記する。尚、遮光保管されていた土のう(A)のベルト部分は、促進曝露や日光曝露された土のう(A)とは規格が異なるため、区別して土のう(A')と表記する。

2. 2. 試験内容

2. 2. 1. 引張試験（保管容器生地）

2. 1で準備した保管容器生地に対して、万能試験機（島津、AGS-10kNG）による引張試験を実施し、たて糸方向及びよこ糸方向の引張強さを求めた（図4）。試験片の作製条件及び試験条件はフレキシブルコンテナ³⁾又は耐候性大型土のう⁴⁾の規格に準拠した。繰り返し数は3とした。

2. 2. 2. 引張試験（吊ベルト）

2. 1で準備した保管容器吊ベルトに対して、100kN材料試験機（Instron、5582型）による引張試験を実施し、引張強さを求めた（図4）。試験片の作製条件及び試験条件は耐候性大型土のう⁴⁾の規格に準拠した。繰り返し数は3とした。



図4 引張試験の手順（保管容器生地または吊ベルト）

2. 2. 3. 引張試験（遮水シート類）

2. 1で準備した通気性防水シート及び遮水シートに対して、万能試験機（島津、AGS-10kNG）による引張試験を実施し、原反よこ方向及び接合部よこ方向の引張強さを求めた。試験片の作製条件及び試験条件は日本遮水工協会の自主基準¹⁰⁾に記載されて

いる、通気性防水シート及び遮水シートの規格（JIS K 6251, JIS L 1908 等）に準拠した。繰り返し数は3とした。また、通気性防水シートについては、防水機能を有する多孔質シート部分が破断した時点の応力を引張強さとした。

2. 2. 4. 形態観察

2. 1で準備した保管容器（耐候性大型土のう）の生地及び吊ベルトに対して、走査電子顕微鏡（日本電子、JSM-6010LA）（以下「SEM」という。）を用いて試験片の表面及び断面の微細構造観察、さらにエネルギー分散型X線分析（以下「EDS」という。）による元素分析を実施した。観察試料は前処理として白金蒸着を行った。

断面SEM観察においては試験片をエポキシ樹脂の内部に埋め込み、自動研磨装置（Buehler、Automet 300）によって削り出した試料断面（polished surface）を観察した。

なお、本章の観察対象は、顕著な強度低下が確認された耐候性大型土のうに限定しており、フレキシブルコンテナ及び遮水シート類は観察対象に含まれない。

3. 試験結果及び考察

3. 1. 引張試験（保管容器生地）

保管容器の生地の引張試験の結果を図5にまとめる。土のう(A)の生地は、たて糸で最大約11%、よこ糸で最大約19%の強度低下が見られた。また、フレコン(V)については、たて糸で最大約12%、よこ糸で最大8%の強度低下が見られた。経年による強度低下は見られたものの、仮置場で遮光保管されていた全ての保管容器について、耐候性大型土のうマニュアル基準値（240 [N/cm]）を満たしていることが確認された。製品ごとの劣化速度に明確な差は見られなかった。

一方で、仮置場で日光曝露された保管容器については、同マニュアル基準値を下回る試料が見受けられ、特に強度低下が大きいケースでは、3.4年日光曝露した土のう(C)のよこ糸の引張強さは139 [N/cm]で、未使用品に対して約61%低下していた。

紫外線促進曝露による耐候性試験の結果では、保管容器の種類によって劣化状況に差が見られた。3,000時間曝露時の強度に着目すると、耐候性大型土のうの場合、3,000時間曝露による強度低下は最大で約40%だった（土のう(B)、よこ糸）のに対して、フレキシブルコンテナの強度低下は最大約85%だった（フレコン(V)、よこ糸）。促進曝露3,000時間は屋外使用10年に相当すると言われているが、仮置場で日光曝露された土のう(B)は約2.7年で約38%の強度低下が確認されている。これは、耐候性試験の結果から推測される劣化速度の約4倍であり、紫外線促進曝露では再現されない要因（クリープ、熱履歴など）により劣化が促進されていると推測される。

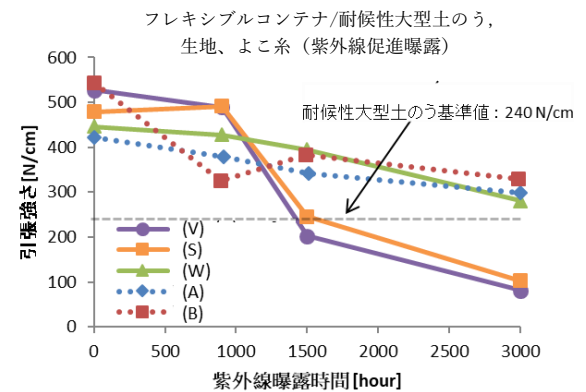
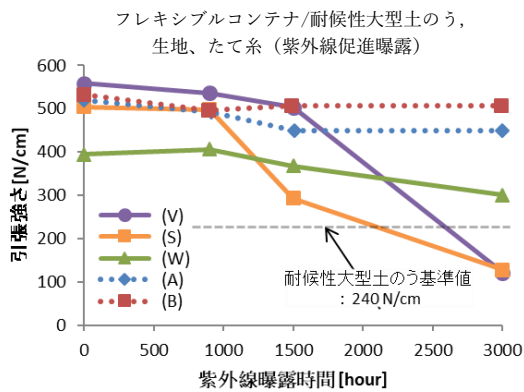
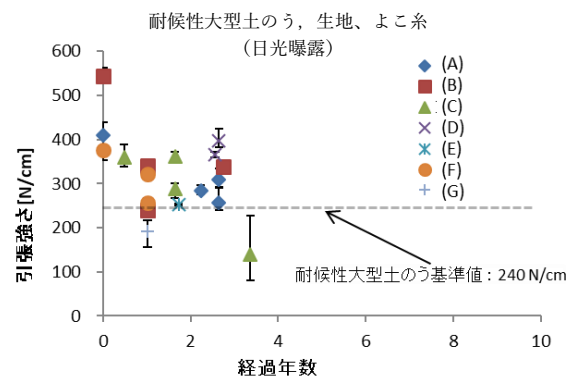
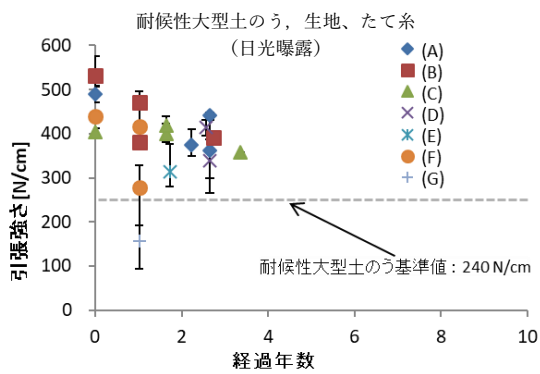
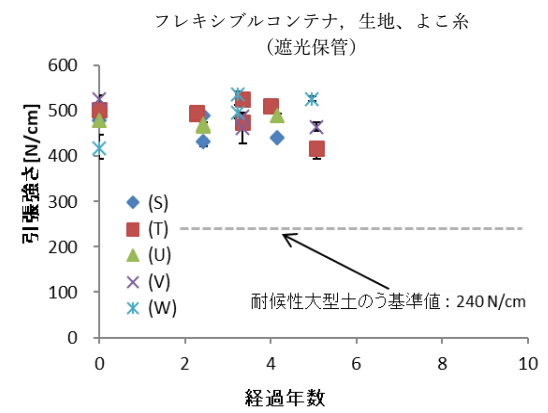
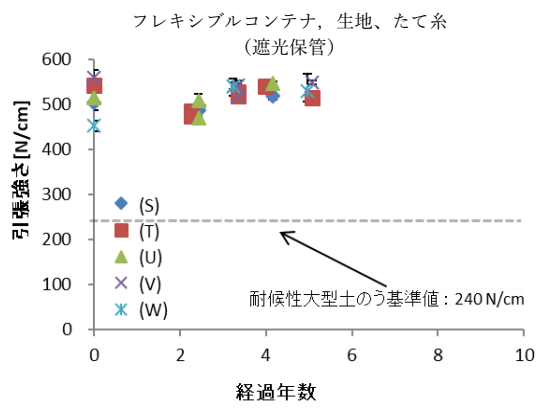
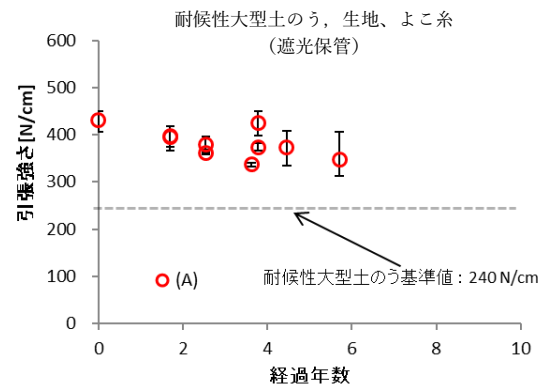
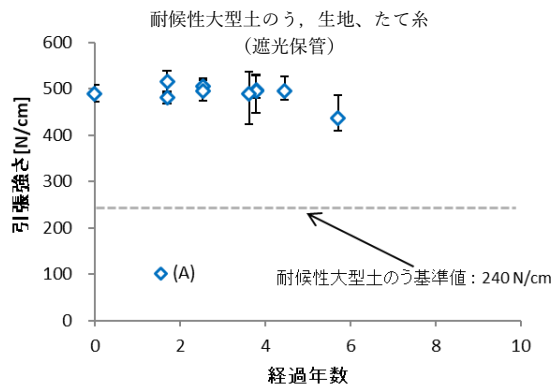


図5 保管容器生地の引張試験 (仮置場保管品、耐候性試験)

3. 2. 引張試験（保管容器吊ベルト）

吊ベルトの引張試験の結果を図6にまとめる。紫外線促進曝露処理を最大3,000時間（屋外使用10年相当）施した場合であっても、全試料が耐候性大型土のう基準値（30 [kN]）又はフレキシブルコンテナのマニュアル基準値（20 [kN]）と同程度の強度を保持していることが確認された。

一方で、3.1と同様に、仮置場で日光曝露された吊ベルトについて同基準値を下回るケースが見受けられた。例えば、2.7年日光曝露された土のう(B)の吊ベルトの引張強度は15.6 [kN]と基準値の約半分であった。これは、耐候性試験の結果から推測される劣化速度の約9倍である。一方で、遮光保管された土のう(A')の吊ベルトは約6年経過した後でも十分な強度を保持していた。また土のう(C)の吊ベルトのように、長期間の日光曝露の後でも強度を保持しているケースも見られた。

3.1及び3.2の結果から、日光曝露された保管容器の劣化速度は耐候性試験による推定よりも速く、特に吊ベルトについては日光曝露によって顕著に強度が低下していることが明らかになった。

実際に、これらの日光曝露された保管容器を仮置場で回収する際、一部の保管容器は、吊上げ時にベルトが破断して吊上げ不可能になるケースが見受けられ、取扱に注意を要することが確認された。

3. 3. 引張試験（遮水シート類）

遮水シート類の引張試験の結果を図7にまとめる。最大3,000時間の紫外線促進曝露による耐候性試験において、遮水シート(N)については引張強さの低下が見られなかった。一方で通気性防水シート(L)と(M)では有意な強度低下が見られ、特に通気性防水シート(L)の接合部では、3,000時間の紫外線促進曝露により未使用品の161 [N/cm]から約80%の強度低下が見られた(32.8 [N/cm])。実際の仮置場でも、通気性防水シート(L)と同規格の資材に関して、施工から数年以内にシート接合部から破損する事例

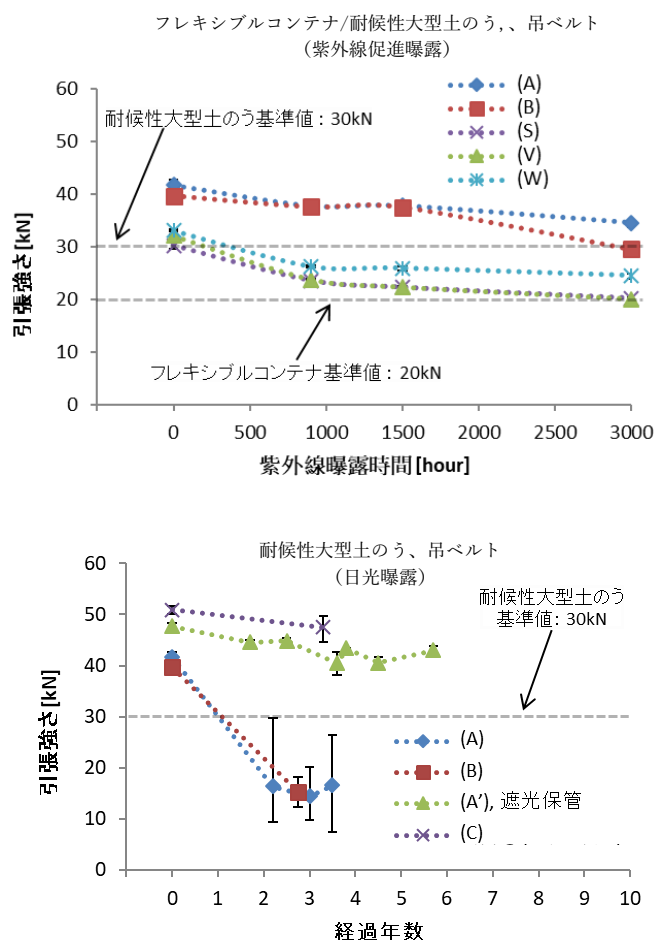


図6 保管容器吊ベルトの引張試験
(仮置場保管品、耐候性試験)

が見受けられる（図8）。これらの試験結果は実際の仮置場の資材破損事例の傾向とも一致していると思われる。ただし、当初想定されていた3年よりも短い期間（2年以内）で上部シートが破損するケースも報告されており、3.1や3.2と同様、シート類の強度低下が想定以上に促進されている可能性がある。

今後は、仮置場で回収したシート類の耐久性試験にも着手しつつ、遮水シート類の劣化状態と劣化要因について引き続き調査を進める。

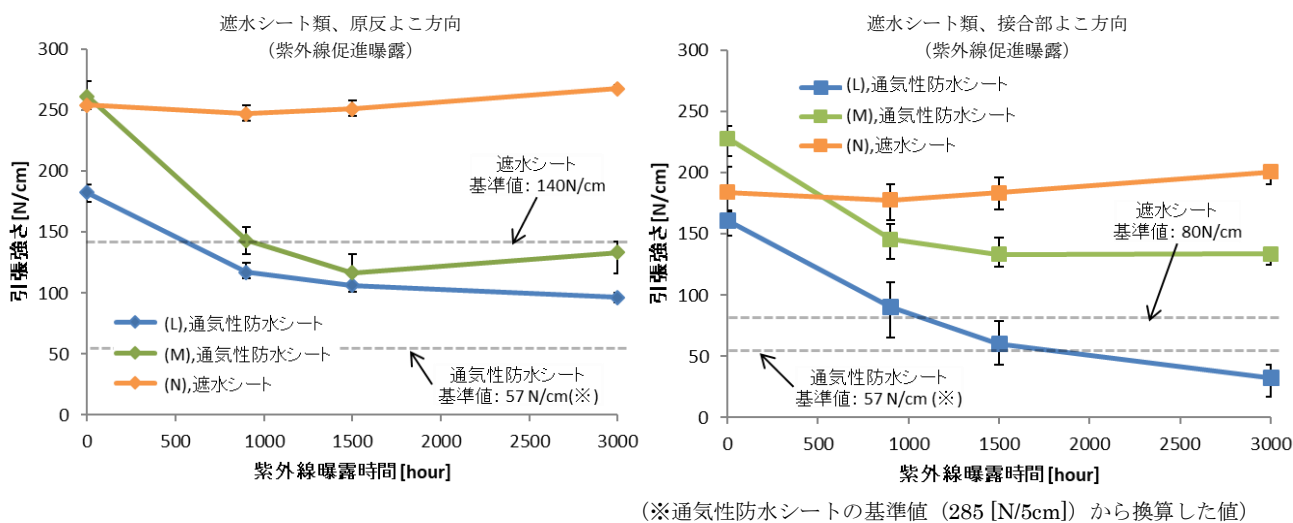


図7 遮水シート類の引張試験
（仮置場保管品、耐候性試験）



図8 通気性防水シートの破損例

3. 4. 形態観察（耐候性大型土のう）

土のう(B)の生地の断面観察及びEDSによる元素分析の結果を図9に示す。耐候性大型土のうの生地やベルトの主成分はポリプロピレンであり構成元素の大半は炭素であるが、生地や吊ベルトに混入している直径0.1~10 μm の粒子にはCa及びOが含まれていることが確認された。これは、増量剤として使用されている炭酸カルシウムの粒子と思われる。また、日光曝露により劣化した土のう試料では、粒子が脱離して出来た穴の周辺にクラックが発達するケースが見受けられた。このことから、炭酸カルシウム粒子の脱離が土のうの構造欠陥、ひいては強度低下に影響している可能性が考えられる。

土のう(A)の吊ベルト及び生地のSEM観察写真を図10に示す。紫外線促進曝露3,000時間の試料が比較的平滑な表面であるのに対して、仮置場で日光曝露された資材については幅0.1~1 μm 程度のクラックが無数に発生していることが確認された。土のう製品はポリプロピレンのフラットヤーンで構成されており、新品の土のう生地や吊ベルトであっても繊維方向に平行なクラックは若干量存在する。しかし、日光曝露された保管容器ではクラックのサイズと量が大きく増大しており、繊維方向に垂直なクラックの発生も確認されている。

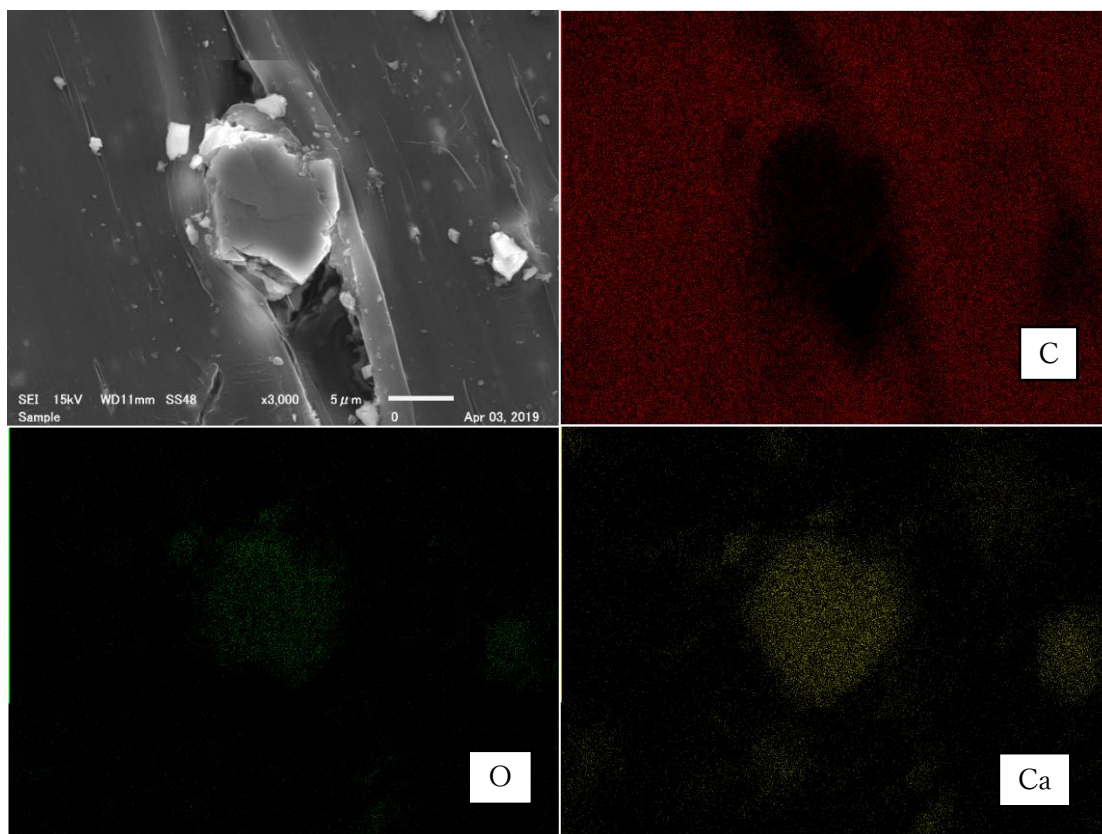
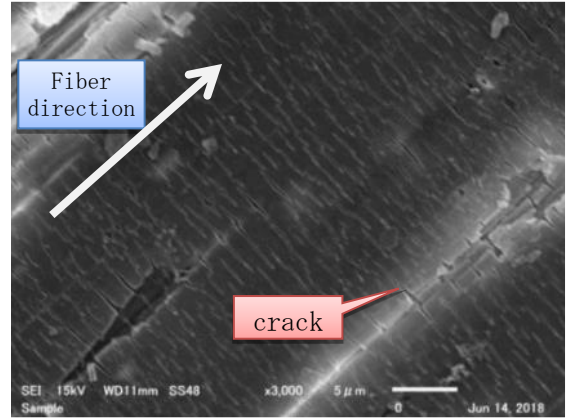
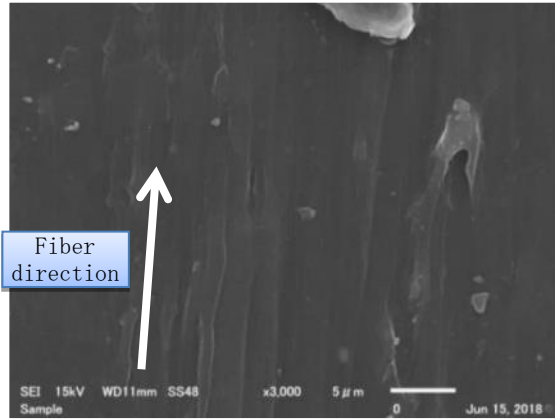


図9 土のう(A) ベルト（未使用品）の表面SEM写真及びEDS元素分布

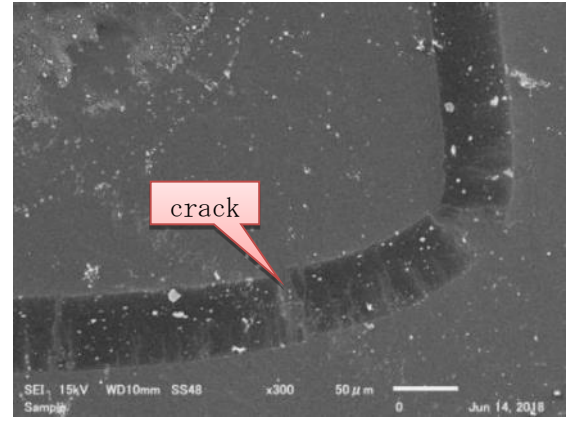
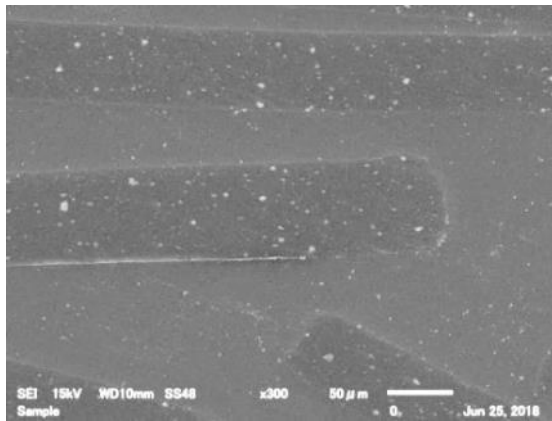
UV3, 000hr (紫外線促進曝露)

日光曝露、2年

土のう(A), 吊ベルト
表面観察



土のう(A), 吊ベルト
断面観察



UV3, 000hr (紫外線促進曝露)

日光曝露、2年

土のう(A), 生地
表面観察

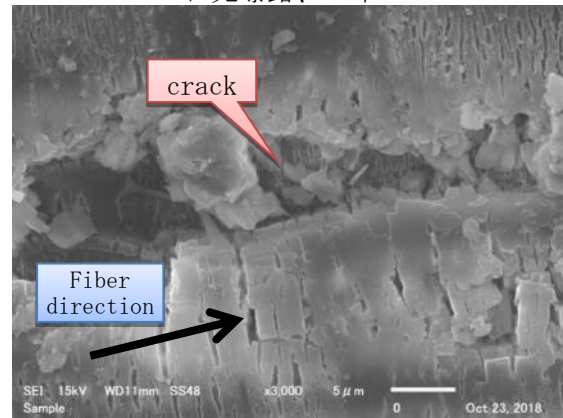
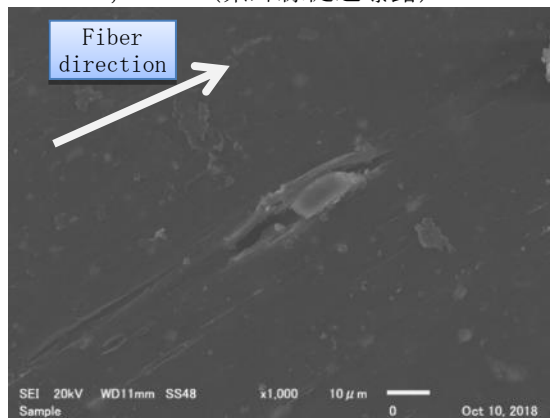


図 10 土のう(A)の表面/断面 SEM 写真

日光曝露された土のう (B) 及び (C) の SEM 写真を図 11 に示す。土のう (C) の吊ベルトはフラットヤーンではなく PP モノフィラメントで構成されており、SEM 写真の様子が他の試料とは異なる。日光曝露された土のう (B) については (A) と同様にクラックが発達している一方で、土のう (C) の吊ベルトではクラックの発達を確認されなかった。この日光曝露された土のう (C) の吊ベルトの引張強度は 47 [kN] と十分な強度を保持している一方で、クラックの発達した土のう (A) 及び (B) の吊ベルトは明確な強度低下を示している (図 6)。

以上の観察結果から、耐候性大型土のうのクラック発達状態とその力学的強度には一定の相関関係があると推測される。

今後は、資材劣化が促進されている要因 (熱履歴やクリープ負荷等) の特定と、資材の劣化状態を簡易的に評価する手法の開発を目指し、引き続き調査を進める予定である。

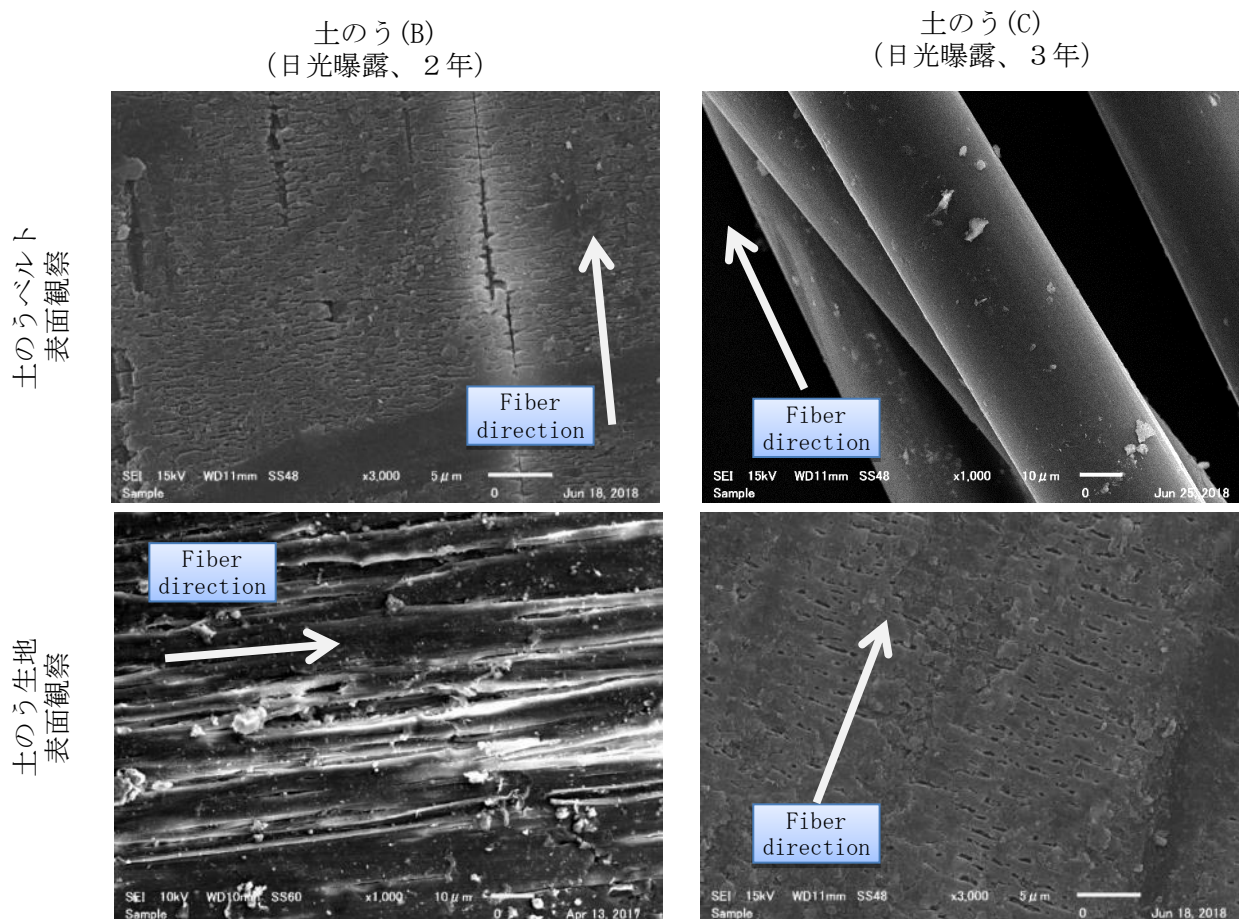


図 11 土のう (B) 及び土のう (C) の表面 SEM 写真

4. まとめ

福島県内の除去土壌等仮置場で最大約6年経過した保管容器（耐候性大型土のう及びフレキシブルコンテナ）及び上部遮水工に使用されている遮水シート類について、引張試験・耐候性試験により長期耐久性を評価した。その結果、6年遮光保管された容器が実使用に十分な強度を保持していることが確認された。一方で、1～3.5年日光曝露された保管容器は引張強さの低下が比較的早く、一部では保管容器の吊上げが困難なほどの強度低下が見受けられた。日光曝露による強度低下は耐候性試験の結果に基づく想定よりも早く進行しており、3年以内にマニュアル基準値を下回るケースが見受けられた。

謝辞

本研究の一部は、（地独）大阪産業技術研究所及び福島県ハイテクプラザとの共同研究により実施された。また、本研究の一部は、JSPS 科研費（JP18009391）の助成を受けて実施された。

本研究に使用した保管容器等の試料を入手するにあたり仮置場を管理する市町村の皆様大変お世話になりました。末筆ながら、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)環境省：除染関係ガイドライン（平成25年5月 第2版（平成30年3月追補））、2018、
http://josen.env.go.jp/material/pdf/josen-gl-full_ver2_supplement_1803.pdf
（令和2年3月5日最終閲覧）。
- 2)福島県：仮置場等技術指針（第5版）、2017、
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/kariokiba-gijutsushishin.html>
（令和2年3月5日最終閲覧）。
- 3)JIS Z 1651:2008「非危険物用フレキシブルコンテナ」ほか
- 4)財団法人土木研究センター「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアル、2012.
- 5)環境省：中間貯蔵施設情報サイト、除去土壌等の輸送について、
<http://josen.env.go.jp/chukanchozou/transportation/>（令和2年3月5日最終閲覧）。
- 6)環境省：仮置場の管理について（環境回復検討会（第15回））、2015、
<http://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/15/mat02-1.pdf>（令和2年3月5日最終閲覧）。
- 7)環境省：第17回環境回復検討会議事録、p.30、2016、

- 8) 高橋、ほか：福島県内の除去土壌等仮置場における保管容器の長期耐久性の調査、ジオシンセティックス技術情報、Vol. 34、No. 2、2018.
- 9) 日本工業標準調査会：JIS B 7753「サンシャインカーボンアーク灯式の耐光性試験機及び耐候性試験機」，2007.
- 10) 日本遮水工協会：現場保管場所・仮置場の上部シート（通気性防水シート・遮水シート）および 下部シート等の自主基準（第3版），2014、
http://www.nisshakyo.gr.jp/kiyun_rev3.pdf（令和2年3月5日最終閲覧）.