

# テーマ「除去土壌等の保管等に係る適正管理手法の確立」

## 仮置場資材の長期耐久性評価

### 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きた(図1)。除去土壌等保管容器（以下、「保管容器」という。）にはフレキシブルコンテナと耐候性大型土のうの2種類が主に使われる<sup>1,2)</sup>。一般的に前者はポリエステル織布をポリエチレンやEVA樹脂でコーティングした構造、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(図2)。除染活動で使用される保管容器の性能はJIS Z 1651<sup>3)</sup>又は耐候性大型土のうのマニュアル<sup>4)</sup>によって規定されており、一般的な土のう袋に比べ耐久性・耐候性が優れている。これら保管容器は原則的に遮へい土のうで周囲を覆われ、さらに上部遮水工（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。（遮へい土のうについては上部遮水シートの外側に設置されているケースがある。）

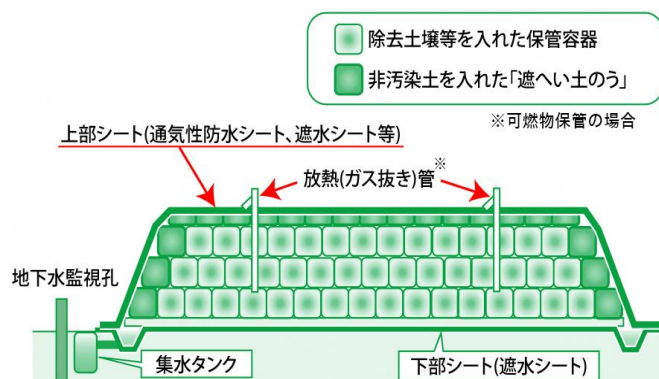


図1 仮置場の基本構造（環境省除染情報サイトより）



図2 保管容器の詳細

仮置場等から中間貯蔵施設への除去土壌等の輸送は当初の想定から遅れが発生し、仮置場での除去土壌等の保管が当初想定の3年を超過した場所が残り、現地資材の破損等の懸念が示された<sup>5,6)</sup>。なお、現時点では除去土壌等の輸送は概ね完了している。

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、仮置場資材の耐久性について継続的に評価を実施し、保管容器（フレキシブルコンテナ、耐候性大型土のう）を中心に、保管容器の保護用資材である上部遮水シート等についても耐久性を評価、また関係する文献調査も実施してきた。

フェーズ1では、実際の仮置場において最大6年間遮光保管下で使用された保管容器を含む袋体の吊上げ・吊下ろし試験や落下試験等を保守的な条件下で実施し、保管容器が十分な強度を保持していることを確認した。また、遮へい土のうとして日光曝露下で使用された耐候性大型土のうに関しては、促進曝露試験結果からの予測に比べ、強度低下が速いことが確認された<sup>7)</sup>。さらに、高分子材料の化学的劣化という観点から捕らえることも必要と考え種々化学分析を実施してきた<sup>7,8)</sup>。

フェーズ2では、フェーズ1に引き続き仮置場資材の長期耐久性を評価すべく、7年以上継続的に使用された保管容器も含め袋体より試料を切り出し引張試験を実施した。上部遮水シートや通気防水シートについても最大5年程度継続的に使用されたものについて引張試験、耐水度試験を実施した<sup>8)</sup>。また、高分子材料の定性的な劣化評価に実績のある赤外分光分析（FT-IR）を中心に熱分析、高次構造（結晶構造）の解析も実施した。最後に、フェーズ1で確認された日光曝露下での遮へい土のうの、促進曝露試験での予測を上回る速さの強度低下原因について遮へい土のう表面温度に着目し、実際の仮置場にて現場実験を実施した。

## 2. 除去土壌等保管容器の長期耐久性

### 2. 1. 概要

フェーズ1から新たに最大約7.3年間遮光保管された除去土壌等保管容器（フレキシブルコンテナ）を対象として製品を解剖し本体生地の引張試験を実施し強度を測定した。さらにフェーズ1での評価データとあわせ経年変化の傾向を整理確認し寿命推定を試みた。

### 2. 2. 試験方法と試料

#### （試験方法）

万能試験機を用いて引張試験を実施し、引張強さを測定した。

引張試験の様子を図3に示す。

#### （試料の概要）

- ・フレキシブルコンテナ（除去土壌等保管容器）、0～7.3年遮光保管、メーカー5社
- ・耐候性大型土のう（除去土壌等保管容器）、0～5.7年遮光保管、メーカー1社
- ・耐候性大型土のう（遮へい土のう）、0～5.0年日光曝露、メーカー8社

- ・促進曝露試料：フレキシブルコンテナバック、未使用品、メーカー3社  
耐候性大型土のう、未使用品、メーカー1社

<促進曝露条件>

ブラックパネル温度×促進曝露時間×水噴霧

(63°C×900/1500/3000 時間×120 分曝露中 18 分噴霧)

既往の文献<sup>4)</sup>では63°C×促進曝露時間300時間×水噴霧が屋外使用1年に相当するとされていることから、900/1500/3000時間がそれぞれ屋外使用3/5/10年相当とした。



図3 容器生地の引張試験の様子

フレキシブルコンテナを対象とする場合は、JIS L 1908 に準じて試験を実施した。耐候性大型土のうを対象とする場合は、JIS Z 1651 に準じて試験を実施した<sup>3)</sup>。保管容器の引張方向は本体生地のたて方向、よこ方向を評価しその平均値をグラフ化して保管期間と強度の関係を整理した。促進曝露試験は JIS B 7753 に準拠して実施した<sup>12)</sup>。

### 2. 3. 試験結果と考察

遮光保管した保管容器の経時的変化を確認するため、フレキシブルコンテナについては図4に、耐候性大型土のうについては図5に保管期間と生地強度の関係を示す。図4より遮光保管されたフレキシブルコンテナの引張強度は、6年までは僅かな変化で7.3年経過品には強度低下の傾向が見えるが、引張強度の基準値を十分満たしており適切に遮光保管を継続することで長期耐久性（10年程度）が十分期待される。図5より遮光保管された耐候性大型土のうの引張強度は時間とともに僅かずつ低下していくがこちらも基準強度を十分満足しておりフレキシブルコンテナと同様に長期耐久性（10年程度）が確保できるものと考えられる。

以上より、適切に遮光保管を継続することで保管容器の中間貯蔵施設への輸送終了まで安全性は確保されるものと考えられる。

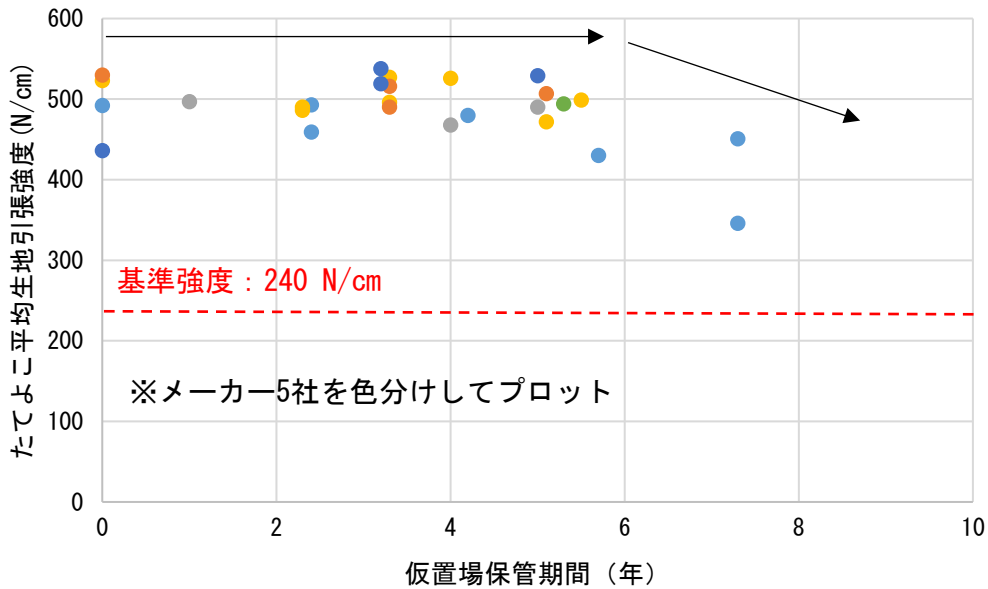


図4 フレキシブルコンテナの生地強度と保管期間の関係 (遮光保管)

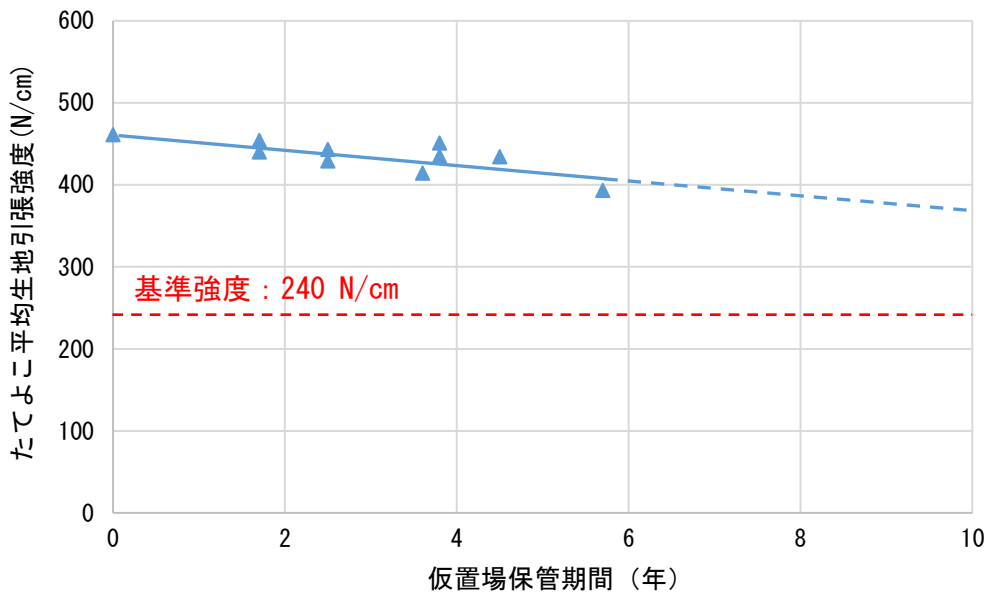


図5 耐候性大型土のうの生地強度と保管期間の関係 (遮光保管)

次に、日光曝露下で遮へい土のうとして使用した耐候性大型土のうの経時的変化を確認するため、保管期間と生地強度の関係を図6に示す。

評価した日光曝露下で使用された遮へい土のうの保管期間は0~5年であるが、僅か1年で基準強度を大きく割り込む試料や、1.7年、3.4年、5年使用品でも基準強度に近いものがあり遮光保管に比べ強度が低い傾向がある。

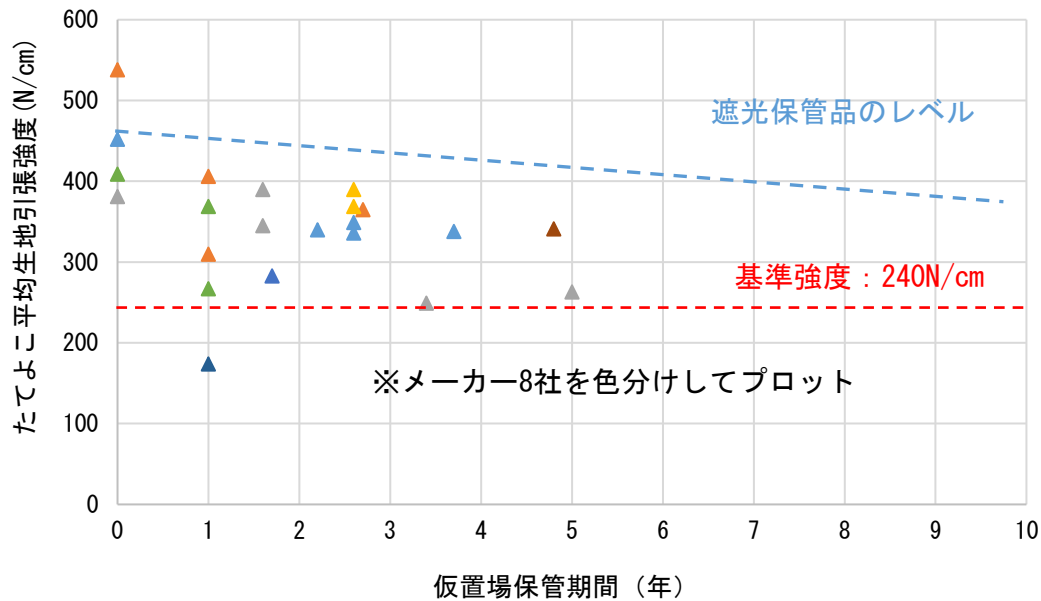


図6 耐候性大型土のうの生地強度と保管期間の関係(日光暴露)

図6より、日光曝露下で遮へい土のうとして使用された耐候性大型土のうの生地引張強度は、遮光保管した場合に比べ大幅に低く、ばらつきも大きく、低下速度も速い傾向があり、実際の使用条件が厳しいものと考えられる。比較考察のため、図7に促進曝露試験結果を示す。

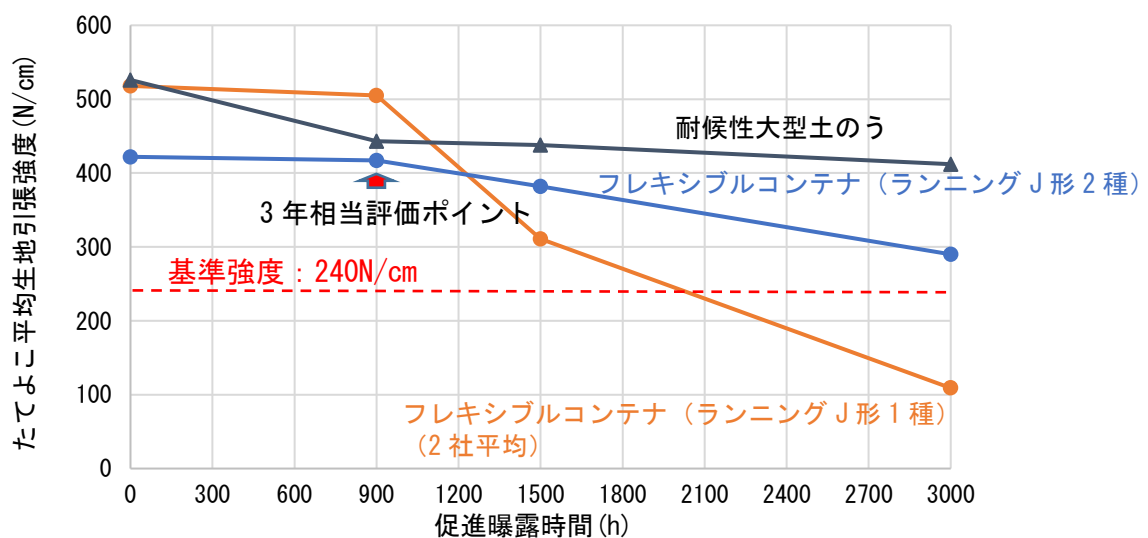


図7 品種別保管容器の生地強度と促進曝露時間の関係

保管容器の促進曝露試験はブラックパネル温度 63℃で 300 時間を 1 年相当として実施されている。図7の促進曝露試験結果からの推測では日光曝露下でも3年程度では強

度低下は小さいはずである。しかし、実際には1年で基準強度を割り込むケースがあり、短期間で強度低下する傾向を説明できず、実際の使用条件をシミュレートできていないと考える。紫外線照射下では温度条件を変えることで促進倍率が大きく変わることが確認されており<sup>11)</sup>、今回のケースもブラックパネル温度を上げることである程度シミュレート可能になると考えられる。いずれにせよ、適切に遮光保管すれば耐久性に係る問題は解決されるため、仮置場の基本構造に示されるよう遮へい土のうも適切に遮光下で使用すべきである。

### 3. 上部カバーシート類の耐久性試験

#### 3. 1. 概要

上部カバーシート類は除去土壌等保管容器を長期に渡り安全に保護することを目的として使用されるため長期間の遮光性、遮水性が要求される。(場合によっては適切に交換することも必要)

PVC 遮水シート及び通気性防水シートを対象として県内の仮置場より回収したシートの引張試験及び耐水度試験を実施して耐久性を確認した<sup>13)</sup>。

#### 3. 2. 試験方法と試料

(試験方法)

##### ・引張試験

PVC 遮水シートを対象とする場合は、JIS K 6251 に準じて試験を実施した。試験片の形状は、ダンベル状5号形試験片とし、引張方向は本体生地のよこ方向のみとした。通気性防水シートを対象とする場合は、JIS L 1908 に準じて試験を実施し、本体生地のよこ方向及び接合部を対象とした。試験の様子を図8に示す。

##### ・耐水度試験

JIS L 1092 に規定するB法(高水圧法)に準じて耐水度試験を実施した。試験の様子を図8に示す。

(試料の概要)

- ・PVC 遮水シート、最大5年程度使用
- ・通気性防水シート、最大5年程度年使用

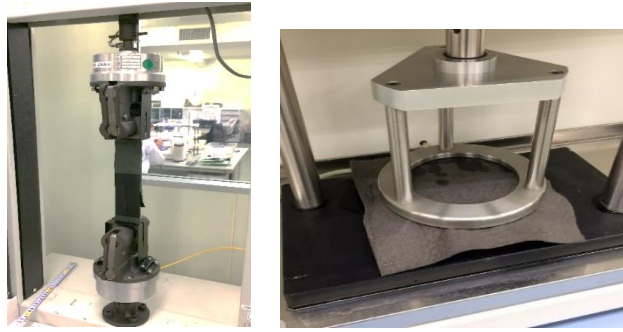


図8 シート類の引張試験（左）及び耐水度試験（右）の様子

### 3. 3. 結果と考察

引張試験の結果を図9に、耐水度試験の結果を図10に示す。図9よりPVC遮水シート、通気防水シートともに本体、接合部ともに引張強度の基準値を十分上回っており、現時点で耐久性に問題はないと考えられる。なお、滞水（水たまり）部分は水の重さにより負荷がかかるため、劣化が進むと思われたが違いはみられなかった。また、PVC遮水シートは、10年間の日光曝露試験においても強度低下がほとんどないことが確認されており<sup>9)</sup>長期耐久性も問題はないと考えられる。

一方、図10よりPVC遮水シートの耐水度に問題はないが、通気防水シートの耐水度は極めて低くなっていた。このことから日光曝露された通気性防水シートは短期間で耐水性が大幅に低下し仮置場で漏水する可能性があるため、シート下の保管容器の防水性に十分注意する必要がある。なお、通気性防水シートの滞水部分で基準を上回る場合が見られたが、これは水で日光が遮られ劣化が軽減されたためと考えられる。

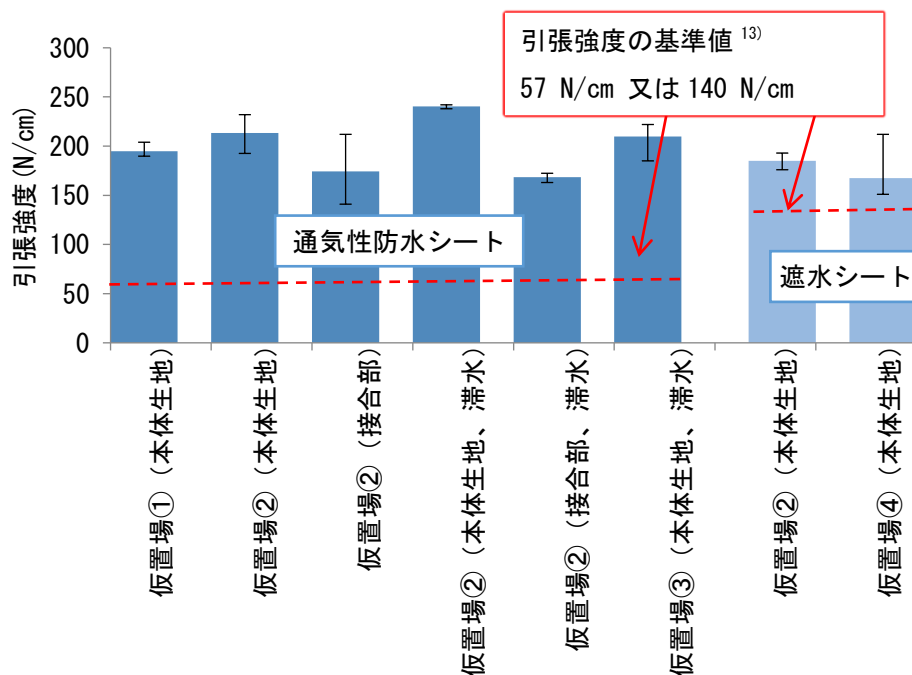


図9 引張試験結果

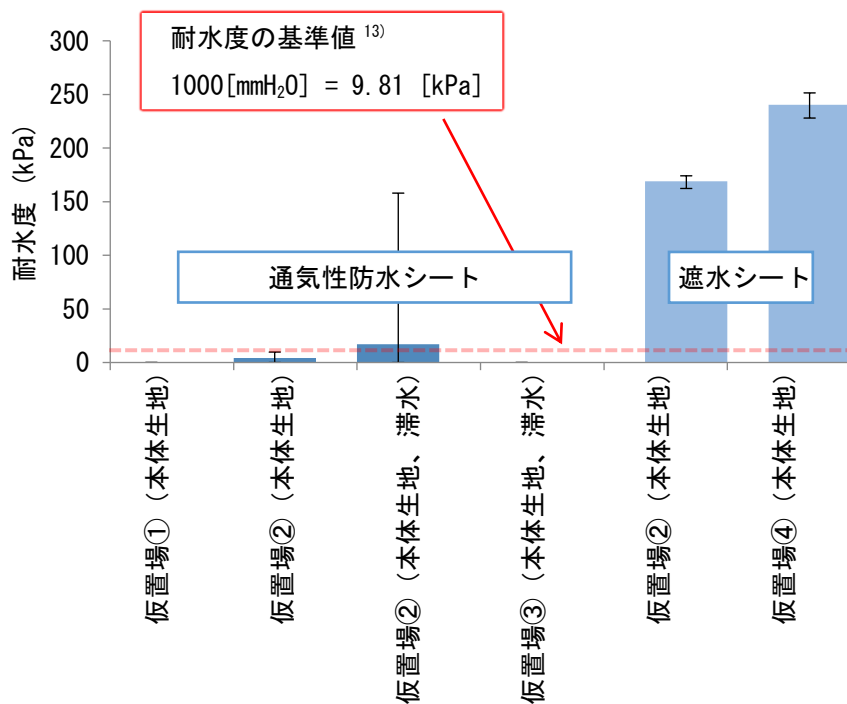


図 10 耐水度試験結果

#### 4. 除去土壌等保管容器の劣化の評価に係る化学分析

##### 4. 1. 概要

保管容器に関しては、適切に遮光保管することで 10 年程度の長期耐久性が確保されることが上述のとおり確認されている。一方、日光曝露下で使用された一部の遮へい土のう（耐候性大型土のう）については劣化速度が促進曝露試験結果からの推測に比べ速いことが確認されており、劣化促進の要因を特定し劣化状況を判定する手法を開発すべく化学分析を継続して実施した。

フェーズ 1、フェーズ 2 で実施した評価について、表 1 に概要をまとめる。本報では表 1 中に示した実施項目から、フェーズ 2 で実施したゲル浸透クロマトグラフィー(GPC)、及びフェーズ 1 で、耐候性大型土のうの劣化状況評価に一定の有効性が認められた赤外分光分析(FT-IR)を、新たにフレキシブルコンテナ(EVA 製)へ適用した結果を中心に報告する。



表 1 保管容器材料の劣化評価手法と結果の概要

項目	実施時期	手法	特徴	検討結果 (適用可否)
引張試験	フェーズ 1 フェーズ 2	引張破断強さを測定、 保持率で耐久性評価	破壊試験、結果 信頼性大	◎
比色計	フェーズ 1	酸化時の変色や光沢の 変化を評価	非破壊試験、黒 色品困難	×
熱分析 (TG-DTA, DSC)	フェーズ 1	酸化開始温度の変化か ら酸化状態を評価	微小試料	△
赤外分光分析 (FT-IR)	フェーズ 1 フェーズ 2	酸化状態の指標である カルボニル基由来のピ ーク変化で評価	微小試料、簡易 性有	○ (定量評価へ の可能性有)
ゲル浸透クロマトグ ラフィー (GPC)	フェーズ 2	分子量分布の変化から 劣化状態を評価	微小試料	△
高次構造解析 (X線回折)	フェーズ 2	結晶化度から劣化状態 を評価	微小試料	△
表面粗さ測定	フェーズ 2	表面の微細なクラック の量、深さを計測	微小試料、薄い 試料で平滑性 要	△

#### 4. 2. 結果と考察

はじめに、耐候性大型土のうのゲル透過クロマトグラフィー (GPC) 分析結果を示す。図 11 に耐候性大型土のうのベルトの分子量分布曲線、図 12 に生地の重量平均分子量と引張強度の関係を示す。分子量分布の変化は小さく、重量平均分子量と引張強度に相関性はみられない。劣化反応は分子切断だけでなく架橋も含まれており、分子量の僅かな低下から強度低下を予測することは困難と思われる。

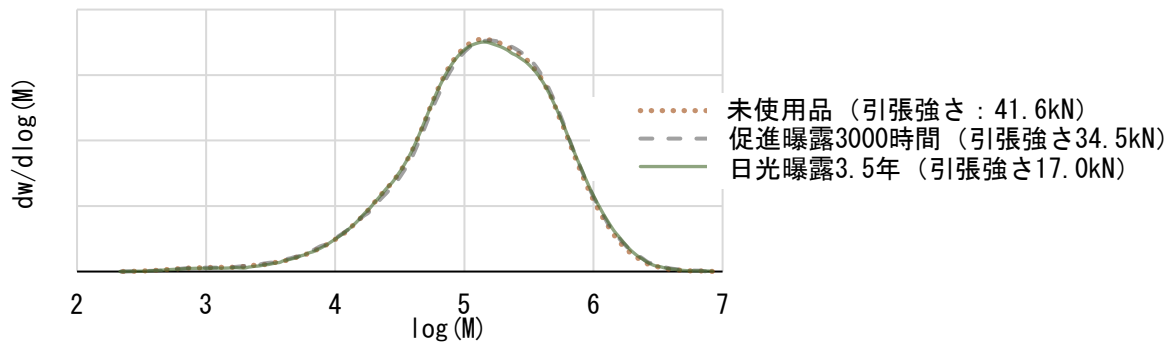


図 11 分子量分布曲線（耐候性大型土のうのベルト）

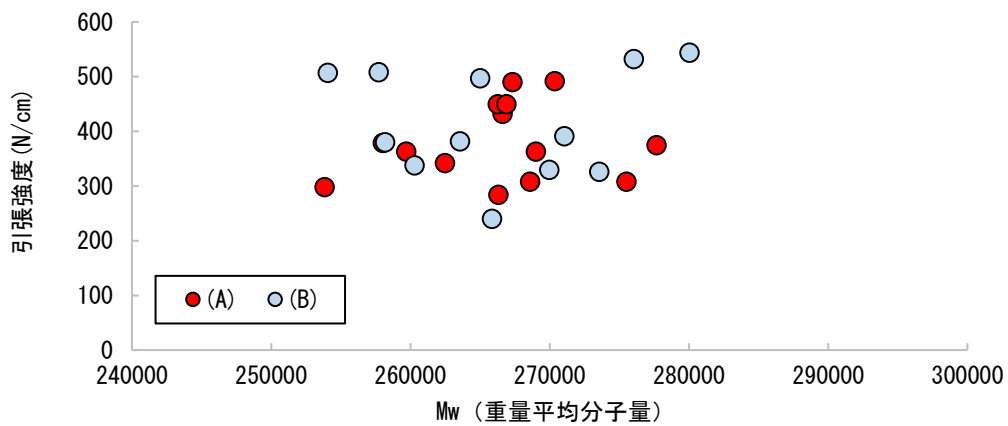


図 12 重量平均分子量と引張強さ（生地）の関係

次に微小試料で簡単に劣化状態を分析可能な方法として着目してきた赤外分光分析 (FT-IR) について、新たにフレキシブルコンテナに適用した。

未使用品、促進曝露試料 (900h, 1500h, 3000h)、仮置場長期保管品 (6 年、7.3 年) の表面状態を全反射 (ATR 法) で評価した結果を重ねて図 13 に示す。

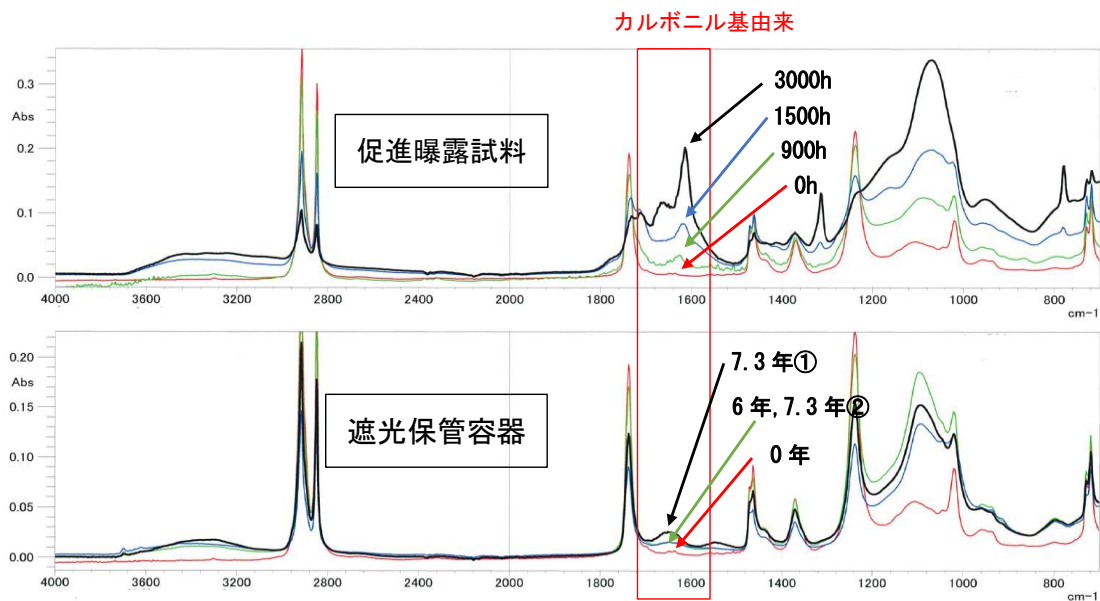


図 13 フレキシブルコンテナ生地表面の FT-IR 分析結果

図 13 より、促進曝露試料については曝露時間とともにカルボニル基由来のピークが成長する様子が観察された。長期遮光保管された容器については、保管期間 6 年までは僅かな変化であるが 7.3 年保管されたものの一つは明瞭なピークを示した。引張強度の低下とも対応しており表面劣化の評価メジャーになり得るものと考えられる。

その他、熱分析では劣化とともに酸化開始温度の低下が観測されること、高次構造（結晶構造）の解析においても劣化とともに結晶化度が変化すること、表面粗さ測定において耐候性大型土のうの生地の引張強さと表面粗さに一定の相関が見られたことから、これらの手法が劣化解析に有効であることを確認した。

今回、様々な化学分析手法を用い劣化解析を実施、化学的な劣化を多面的にとらえることができたが、定量的な劣化予測には至らなかった。今後、赤外分光分析 (FT-IR) や熱分析等の進化成熟が期待される。

## 5. 遮へい土のうの表面温度の計測試験

### 5. 1. 概要

保管容器の最大の劣化要因として考えられるのが紫外線と熱の複合であることから、日光曝露下で使用される遮へい土のう（耐候性大型土のう）の表面温度を実際の仮置場にて計測した。

### 5. 2. 方法

実際の仮置場において、日光曝露下で設置されている遮へい土のう（耐候性大型土のう）の表面に温度計（熱電対）を接触させ、2021 年 7 月 16 日～10 月 1 日に 10 分間隔で表面温度を測定した。また、遮へい土のうの近傍に 1 m 高さの杭を設置し、杭の先端

に温度計を取り付け、気温も同時測定した。温度計の設置状況を図 14 に示す。



センサー貼り付け位置 (2 か所)



近傍気温測定位置



フィールド全景  
計測頻度：1 回/10 分

図 14 温度計の設置状況

### 5. 3. 結果と考察

遮へい土のうの表面温度と、近傍の気温の時間変化を図 15 に、相関関係を図 16 に示す。図 15、16 より、遮へい土のうの表面温度は最大で 70°C を超え、気温の上昇に伴い表面温度と気温の差は大きくなり、最大 40~45°C の差が生じることが確認された。表面温度と気温の差にばらつきがみられるのは、日照時間や風雨によるものと考えられる。観測された最高温度は既往の試験結果<sup>10)</sup>と比べると低いものであったが、日射による熱履歴は表面劣化への影響が大きいと考えられる。温度変化が大きいことによる伸縮疲労も考えられる。

促進曝露試験条件ではブラックパネル温度 63°C × 照射時間 300 時間 × 水噴霧を 1 年相当として設定されているが<sup>4)</sup>、紫外線照射条件下でブラックパネル温度を 20°C 上昇させると劣化速度が大幅にアップするとの実験結果もあり<sup>11)</sup>、日光曝露と高温履歴を同時に与えることが強度低下促進の主要因と考えられ、予測精度を上げるには使用現場の条件に合わせた促進曝露試験条件の見直しも必要かと思われる。

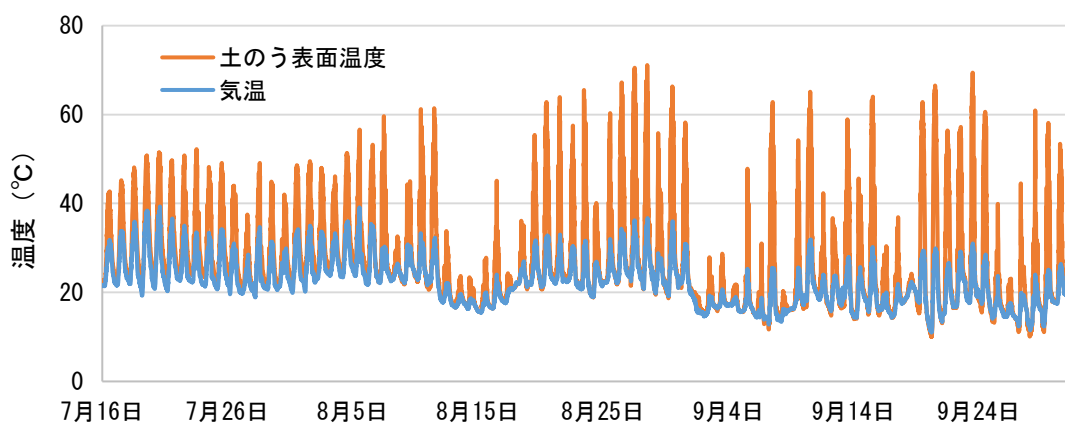


図 15 遮へい土のうの表面温度及び近傍気温の変化

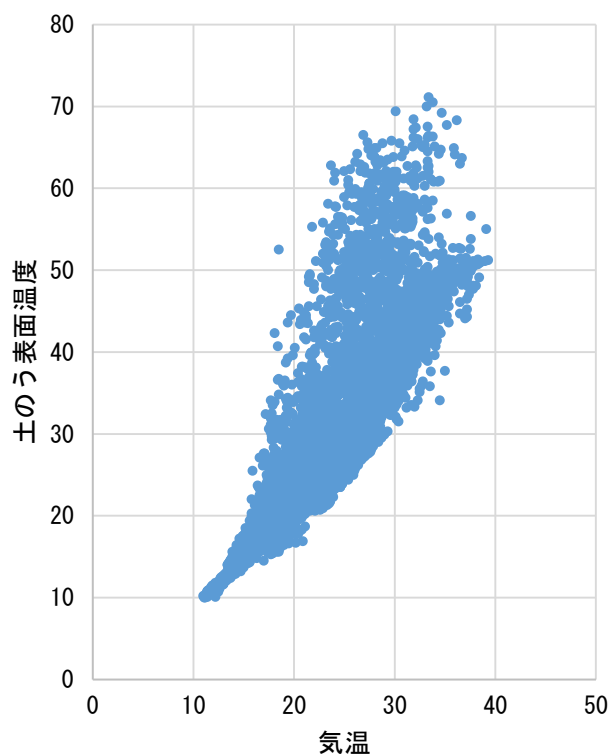


図 16 気温と遮へい土のう表面温度の関係

## 6. まとめ

遮光保管下で 7 年以上継続的に使用された保管容器から試料を切り出し引張試験を実施した結果、十分な強度を保持していることを確認した。また、フェーズ 1 の評価結果と合わせ、経年変化の傾向を確認し適切に遮光保管することで 10 年程度の長期耐久性が保持されると考えられる<sup>8)</sup>。

上部遮水シートについても長期耐久性に係る調査を行い、遮水シートは日光曝露下に

においても最大5年以上の耐久性があることを確認した。また文献調査から10年以上の実績があることも確認した<sup>9)</sup>。

通気防水シートに関しては日光曝露下では耐水性が短期間で低下するため、使用に際しては覆土施工して遮光することにより劣化を防ぐか保管容器の防水性を十分確保しておく必要があることが改めて確認された<sup>8)</sup>。

化学分析結果からは、赤外分光分析 (FT-IR) でのカルボニル基由来のピーク生成の追跡が、フレキシブルコンテナの強度低下の解析に有効であることを確認した<sup>8)</sup>。また、熱分析では劣化とともに酸化開始温度の低下が観測されること、高次構造 (結晶構造) の解析においても劣化とともに結晶化度が変化すること、表面粗さ測定において耐候性大型土のうの生地の引張強さと表面粗さに一定の相関が見られたことから、これらの手法が劣化解析に有効であることを確認した。

最後に、フェーズ1で確認された日光曝露下での遮へい土のうの、促進曝露試験での予測を上回る速さの強度低下原因について、遮へい土のうの表面温度に着目し計測実験を行った結果、遮へい土のうの表面温度は夏場には70℃以上 (気温プラス45℃程度) まで上昇することを確認した。日内温度変化も大きく繰り返し伸縮することによる疲労も低下の一要因と考えられる。

## 謝辞

末筆ながら、お忙しい中調査に御協力いただいた自治体の御担当者の方々に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 環境省 (2018) 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)) . <http://josen.env.go.jp/material/>  
(2024年1月26日最終閲覧)
- 2) 福島県 (2019) 仮置場等技術指針 (第6版) .  
<https://www.pref.fukushima.lg.jp/site/portal/kariokiba-gijutsushishin.html>  
(2024年1月26日最終閲覧)
- 3) JIS Z 1651:2017 「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 (2012) 「耐候性大型土のう積層工法」設計・施工マニュアル.
- 5) 環境省 (2015) 仮置場の管理について (環境回復検討会 (第15回)) .  
<https://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/15.html> (2024年1月26日最終閲覧)
- 6) 環境省 (2016) 第17回環境回復検討会議事録, pp. 30.  
<http://josen.env.go.jp/material/session/> (2024年1月26日最終閲覧)
- 7) 福島県環境創造センター (2020) 環境創造センターにおいて福島県が取り組む除染に関する調査研究成果報告書 フェーズ1 (平成27年度～平成30年度) ,

pp. 80～112. <https://www.fukushima-kankyosozou.jp/research.html> (2024年1月26日最終閲覧)

- 8) 原田高志, 日下部一晃, 高橋勇介 (2021) 除去土壌等保管容器を中心とした仮置場資材の耐久性に関する調査研究, 福島県環境創造センター 令和3年度成果報告会ポスター, 除染廃棄物部門.  
<https://www.fukushima-kankyosozou.jp/2021seikahoukoku/johai.html> (2024年1月26日最終閲覧)
- 9) 原田高志, 今泉繁良, 西崎到 (2006) 室内促進暴露実験と10年間実暴露実験による遮水シートの耐久性評価と遮光性保護による延命効果の確認, 廃棄物学会論文誌, Vol.17, No.2, pp.142-152.
- 10) 国際ジオシンセティックス学会日本支部ジオメンブレン技術委員会編: 廃棄物処分場における遮水シートの耐久性評価ハンドブック, 第3章, pp.59-62. 2009.
- 11) 大武義人 (2018) 特論講座 ものづくりにおける安全の追及 第5回 地球環境悪化とゴム・プラスチックへの影響 (その1 光・熱・水がポリマー劣化に与える影響), 日本ゴム協会誌, 91巻第4号, pp.123-128.
- 12) 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.
- 13) 日本遮水工協会 (2014) 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) .  
[http://www.nisshakyo.gr.jp/kijyun\\_rev3.pdf](http://www.nisshakyo.gr.jp/kijyun_rev3.pdf) (2024年1月26日最終閲覧)