

展 望

廃棄物埋立地等の施工、維持・管理における

リモートセンシング技術の展開

九州大学大学院工学研究院環境社会部門 島岡 隆行

1. はじめに

科学技術の発達に伴い、様々な計測技術が開発されてきており、その速度は目を見張るものがある。中でもリモートセンシング技術は、波長が異なる電磁波が有する固有の特性を活用し、対象物の形状、材質、温度等を非接触で把握することが可能な技術である。センサーを人工衛星や航空機等のプラットフォームに搭載することにより、地表や対象物の環境情報を広域的かつ定期的に取得することが可能であり、人が踏み入れることが困難な場所の状況も把握することができる。また、環境情報を記録し、保存しておけることも大きな特徴である。さらに、リモートセンシングは、対象物から反射または放射された電磁波を分析するため、対象物の非破壊検査法としての適用も可能である。これらの特性を利用して、廃棄物分野においてもリモートセンシング技術の応用開発が行われている¹⁾。

最終処分分野の遮水工において技術的取り組みがなされているのは、確実な施工技術の構築と維持管理技術である。後者は、循環型社会の構築が進むに連れて、埋立処分量が減少し、供用期間が建設時に計画されていたよりも大幅に伸びていることから重要視されている。また、除染廃棄物の仮置きに関しても当初計画の期間よりも相当に長くなっており、キャンピング材として用いられているジオメンブレン（通気性防水性シート）の適切な管理・補修が課題となっている。本報では「最近の遮水技術」として、リモートセンシング技術を応用した廃棄物埋立地および除染廃棄物の仮置場における遮水工の施工、維持・管理における最新の情報を紹介する。

2. 廃棄物分野におけるリモートセンシング技術の適用

(1) リモートセンシング技術による遮水シートの接合検査

廃棄物埋立地に敷設される遮水シートは、浸出水の周辺環境への漏洩を防止することで、地下水汚染や土壌汚染等を防ぐ重要な役割を果たしている。遮水シートの接合部に不良箇所が存在する場合、遮水機能およびこれを保持するための耐久性を満足することができなくなる。そのため、接合部の不良箇所は施工時に発見し、供用を開始する前に、適切に対処する必要がある。

遮水シートの接合には、熱融着接合が一般的に用いられる。熱融着接合とは、熱融着機の熱板に2枚の遮水シートを接触させ、融解、圧着する接合方法である。遮水シート接合に際し、融着面に十分な熱が供給されていないと接合不良となる。接合部の表面温度は、遮水シート接合部の合否判定のための指標として用いることができる。これまで、著者らは熱赤外リモートセンシングを利用した熱画像検査の手法の開発に取り組んできた。この手法では、遮水シート接合時の接合部表面温度と合否判定の基準となる閾値温度を比較し、接合部の表面温度が閾値温度よりも高ければ、遮水シートは十分に融着しており、接合部は所定の強度を有すると判定し、閾値温度よ

りも低ければ接合不良と判定する。閾値温度の推定のためには、各種の遮水シートの材質について、異なる気温や接合速度等の条件下で多数の実験を行い、接合部表面温度と剥離強度の関係を表す経験式を導出する。

a) 熱赤外線リモートセンシング検査の原理²⁾

図-1は、熱赤外線画像装置(サーモカメラ)を搭載した自走式熱融着機である。熱画像検査は、自走式熱融着機により遮水シートを接合すると同時に、サーモカメラで接合部の表面温度を計測し、接合不良部の検出を行う検査方法である。各接合速度における合否判定のための接合部表面温度(閾値温度)は引張強度が基準強度を満足する最低の温度としている。図-2は、LLDPEシート接合部の引張強度とサーモカメラにより取得した接合部表面温度の関係である。十分な融着熱が供給されて接合された接合部の引張強度は400N/25mm程度の強度となるが、接合時に十分に熱が供給されず、温度が低下すると引張強度が急激に低下する。本検査手法では、引張強度が日本遮水工協会による基準強度(LLDPEの場合200N/25mm)以下となる接合部表面温度は接合不良であると判断している。

図-3に遮水シート接合部熱画像検査における合否判定フローを示す。サーモカメラからPCへ送られてきたデータを元に、PC上に熱画像を表示する。撮影時刻、接合部の表面温度、非接合部の表面温度は数値データとしてCSVファイル形式で1秒ごとに保存される。閾値温度は、正常な接合部の表面温度と接合不良となる場合の接合部の表面温度の境界温度であり、変換式に遮水シートの初期表面温度を入力することにより求められる。接合部表面温度と閾値温度を比較して合否判定を行い、接合部表面温度が閾値温度以下を示した場合にはPC上で警告メッセージを表示し、アラームを鳴らすとともに静止画像が保存される。

図-4はLLDPEシートについての閾値温度と初期表面温度の関係を表している。両者の間には線形的相关関係が認められ、接合速度が速くなるほど閾値温度は低くなる事が分かる。接合速度別に、閾値温度と初期表面温度の関係式を直線回帰により導出すると表-1の結果が得られ、決定係数が0.79であった。ここで、 T_s は融着機の設定温度(°C)、 T_m は計測温度(°C)、 T_a はシート

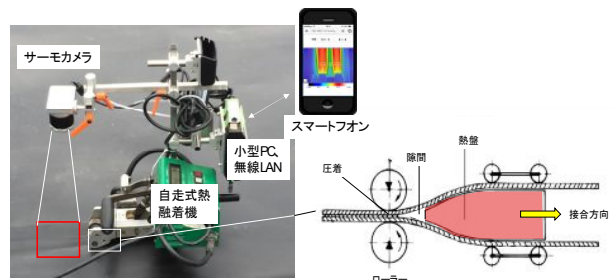


図-1 サーモカメラを搭載した自走式熱融着機(左)と融着機機構の模式図(右)

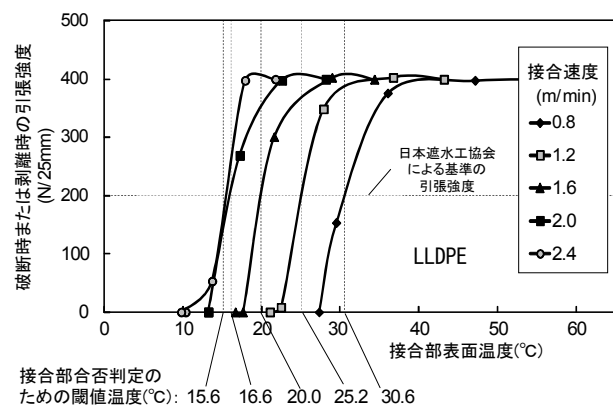


図-2 シート接合部の引張強度と接合部表面温の関係

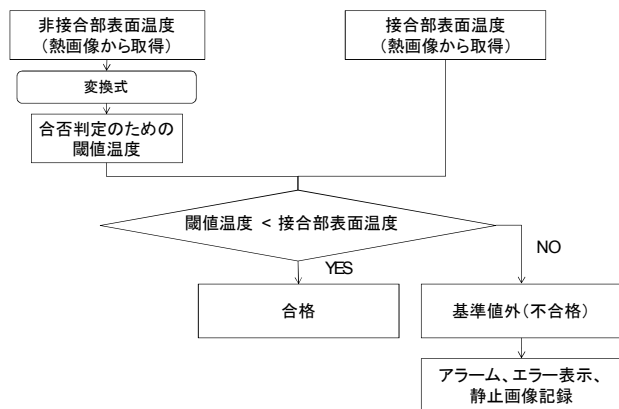


図-3 熱画像検査における合否判定フロー

初期表面温度(°C)、 v は接合速度(m/min)である。次項で述べる伝熱モデルでは、この重回帰式を用いて境界条件を与え、融着面温度を算出した。

b) 伝熱モデルによる閾値温度の算定³⁾

閾値温度の推定のためには、異なる気温や接合速度等の条件下で多数の実験を行い、接合部表面温度と剥離強度の関係を表す経験式を導出する必要があり、遮水シートの材質や配合設計が変更されるとその度に実験が必要となり、多大な時間と労力を要することが問題であった。接合時の遮水シートの伝熱挙動をモデル化し、計算によって合否判定のための閾値温度を導出することができれば、実験を省略できるため、遮水シート接合検査への本手法の適用性がより高まると考えられる。そこで、熱融着接合における接合部断面の伝熱現象をモデル化し、接合部合否判定のための閾値温度を計算により求めることができるようにした。

図-5 は、接合部合否判定のフロー図を示す。これまで閾値温度は実験によって求めていたが、伝熱モデルを構築してシートの物性値(密度、比熱、熱伝導率等)を入力して計算により閾値温度を求めることができれば、実験の省力化により本手法の適用性がより高まると考えられる。

c) 伝熱モデルによる数値シミュレーション

図-6 は、遮水シート接合時における熱融着機の移動および熱画像の撮影位置を示した模式図である。遮水シート厚さは 1.5mm、融着機の熱板の長さは 30mm、熱板端部からローラーまでの長さは 15mm、ローラーから熱画像検査装置による熱画像の撮影位置までの距離は 40mm とした。熱板に接触中の融着面温度は、前述した関係式を用いて算出した値を用いた。遮水シートが正常に接合されたかどうかの一つの方法として、遮水シートがローラーで圧着される時点の融着面温度が遮水シート材質の融点に達しているかどうかを基準とした。融着面温度が遮水シートの融点と等しいとき、接合部の状態は正常な接合と接合不良の境界の状態となる。この状態の熱画像検査装置により測定された接合部の表面温度を合否判定のための閾値温度とした。

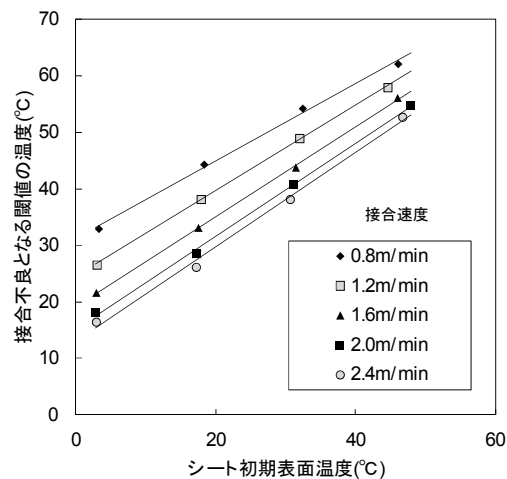


図-4 接合不良となる閾値温度とシート初期表面温度の関係 (LLDPE)

表-1 融着境界温度を求める重回帰式

重回帰式 ※()内はt値。※:5%。※※:1%	関連要因	決定係数R ² F値 データ数N
$(T_s - T_m) / T_s = 0.0703 \times v - 0.0023 \times T_a + 0.1984$ (9.6**) (-4.1**) (1.1)	v T_a	R ² = 0.79 F = 75.7 N = 41

図-5 は、接合部合否判定のフロー図を示す。これまで閾値温度は実験によって求めていたが、伝熱モデルを構築してシートの物性値(密度、比熱、熱伝導率等)を入力して計算により閾値温度を求めることができれば、実験の省力化により本手法の適用性がより高まると考えられる。

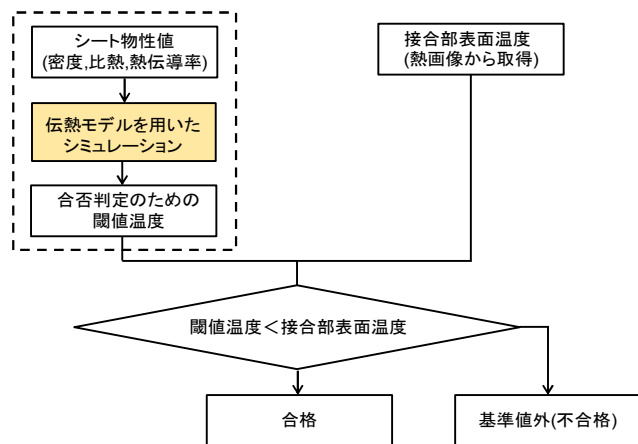


図-5 接合部合否判定のフロー図
(破線枠内が検討範囲)

接合部の表面温度、融着面の温度を計算するため、一次元伝熱モデルを構築し、数値シミュレーションと測定温度を比較することでモデルの妥当性を確認した。図-7にモデルで考慮した伝熱現象を模式的に示す。接合時の伝熱現象は、融着面に定温熱源(融着機の熱板)が存在するとし、遮水シート内部については鉛直方向の熱伝導を考慮した。遮水シート表面と大気との境界面では、日射等(日射・大気放射)およびシートからの放射を考慮した。定温熱源が融着面を通過し、融着が完了した後の伝熱現象は図-7右側(融着後)のように設定した。遮水シート接合部の伝熱に関する支配方程式は、

$$\rho \frac{\partial(cT)}{\partial t} = -\frac{\partial J_z}{\partial z} \dots (1)$$

と設定した。ただし、比熱 c (J/kg/K)、密度 ρ (kg/m³)、温度 T (K)、鉛直方向熱フラックス J_z (W/m²)、時間 t (s)、距離 z (m) である。ここで、鉛直方向熱フラックス J_z は、鉛直方向の位置、融着中、融着後で異なるため、表-2のように設定した。ここで、 ε : 放射率 (-)、 σ : ステファン=ボルツマン定数 (W/m²/K⁴)、 α : 熱伝達率 (W/m²/K)、 T_{air} : 気温 (K)、 k : 熱伝導率 (W/m/K) である。日射等フラックス J_{sun} は、初期条件におけるシート表面の熱収支により、

$$J_{sun} = \varepsilon\sigma T_0^4 + \alpha(T_0 - T_{air}) \dots (2)$$

と設定した。ここで、 T_0 : シート初期表面温度(K)である。また、(1)式および(2)式で用いたパラメーター値を表-3に示す。

図-8は熱電対による実験値とシミュレーションによる計算値の温度変化を示

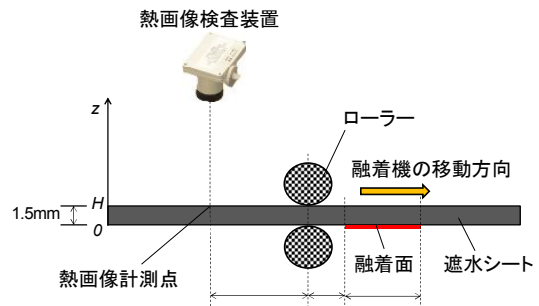


図-6 接合作業における融着機の移動および撮影位置に関する模式図

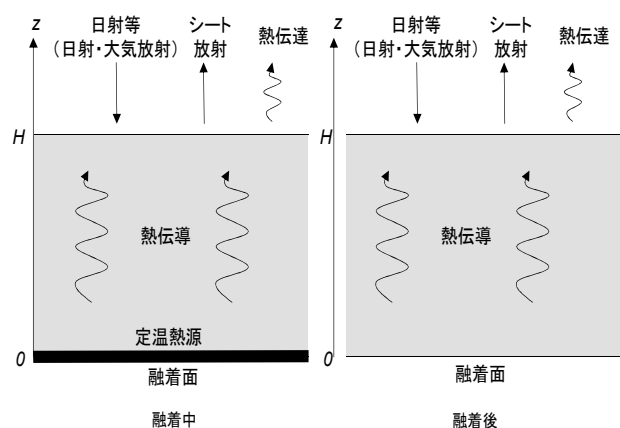


図-7 モデルで考慮した伝熱現象

表-2 熱フラックス J_z の設定条件

座標	融着中	融着後
$z = H$	$-J_{sun} + \varepsilon\sigma T^4 + \alpha(T - T_{air})$	
$0 < z < H$	$-k \frac{\partial T}{\partial z}$	
$z = 0$	$-k \frac{\partial T}{\partial z}$	0

表-3 モデルで用いた文献値と本モデルでの採用

分類	物性値	記号	単位	文献値	採用値	備考
実験条件	気温	T_{air}	°C	-	8~25	実測値
	シート温度	T_0	°C	-	8~25	気温に等しい
伝熱モデル	密度	ρ	kg/m ³	910~930	931	
	比熱	c	J/kg/K	1970	1970	
	融点	T_m	°C	110, 122	122	
	熱伝導率	k	W/m/K	0.321	0.321	カーファイティングにより設定
	熱伝達率	α	W/m ² /K	4.6~290	400	カーファイティングにより設定
	放射率	ε	-	1.0	1.0	黒体と仮定
差分法	ステップ=ボルツマン定数	σ	W/m ² /K ⁴	5.67×10^{-8}	5.67×10^{-8}	物理定数
	時間分割幅	Δt	s	-	0.005	
	鉛直方向分割幅	Δz	mm	-	0.1	

している。実験条件は、気温 23.6℃、接合速度 1.6m/min、融着設定温度 320℃であり、この条件では遮水シートに十分な熱が供給され正常に接合される。この条件下では、熱板接触時における融着面温度は 221℃と計算された。熱板接触開始 1 秒後の融着面温度を見ると、実験値は 205℃であり、計算値は、207℃である。ローラーによる圧着時の 2 秒後付近では、実験値は 129℃、計算値は 129.8℃であった。熱画像検査装置での撮影時である 3 秒後付近における接合部表面温度は、実験値は 32.0℃、計算値は 33.3℃であった。以上のように、伝熱モデルにより実験値をほぼ再現させることができた。図-9 は、シート初期表面温度が 10℃、17℃、29℃のときの、計算値と実験値の閾値温度の比較であり、計算値と実験値がよく一致していることが分かる。

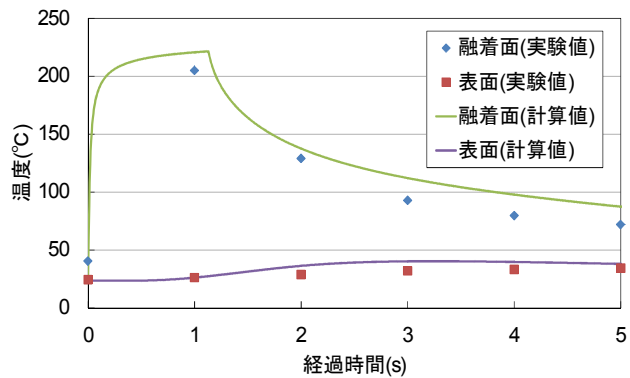


図-8 実験値と計算値の温度変化

(気温 23.6 度、速度 1.6m/min、設定温度 320 度)

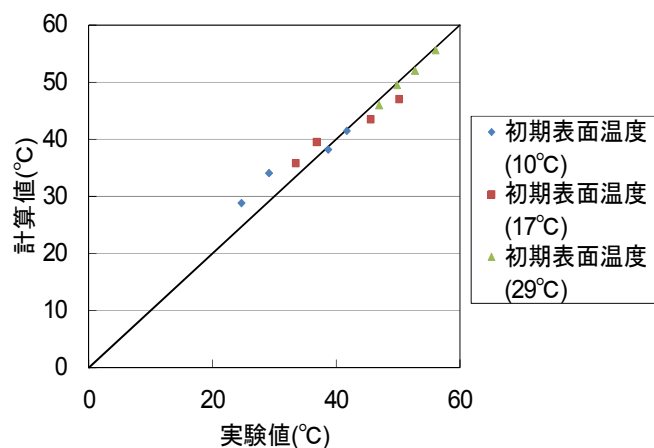


図-9 閾値温度に関する計算値と実験値の比較

(2) 除染廃棄物仮置場におけるキャッピングの破損検査

a) キャッピングの破損の現状⁴⁾

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質が広範囲に拡散し、除染作業が実施された。除染廃棄物仮置場では、フレコンパックに収納された除染廃棄物の上から通気性防水シート等でキャッピングされているが、事故後6年以上が経過した現在ではキャッピングの破損が多数報告されており、キャッピング内部への雨水侵入に起因する周辺環境の汚染が懸念されている。キャッピング破損の主要な原因として、キャッピング上部に生成する大きな雨水溜まりがある。雨水溜まりによる引張力でキャッピング材が裂けたり、接合部が剥がれる等の破損が報告されている。これまでに施工された仮置場は1000箇所以上、設置された堆積山は10万以上あり、キャッピング上部の雨水溜まりの監視およびそれに起因する破損状況に関する点検作業が必要とされている。現状では仮置場の点検は月1回程度を目安に目視により実施されているが、仮置場の設置数は膨大であり、さらに劣化したキャッピングに登って点検作業を実施することは危険で、作業安全上のリスクが伴う。そこで筆者らは、雨水溜まり等により発生する通気性防水シートの歪を実測するとともに、ドローンを用いて仮置場の撮影および解析を行い、キャッピングにおける破損の可能性が高い箇所（以下、破損危険部と呼ぶ）を特定するためのモニタリング手法を検討した。

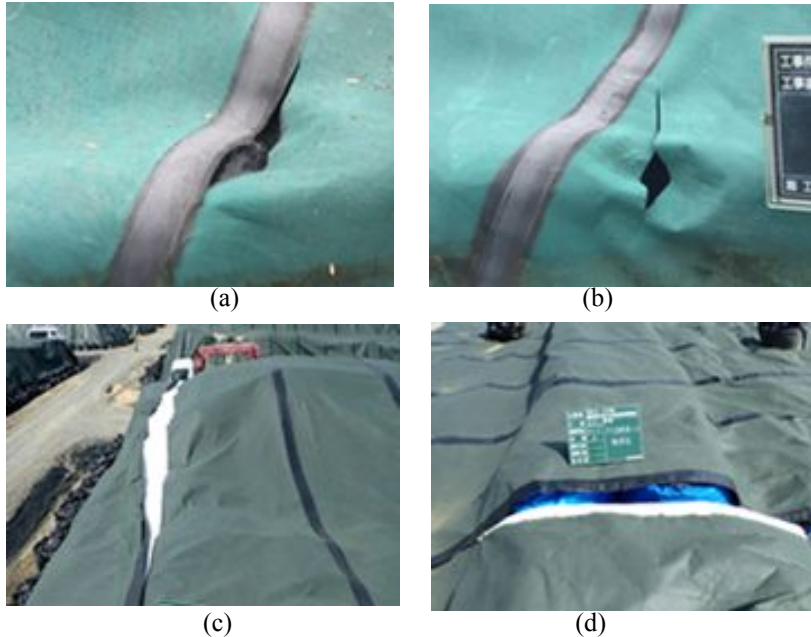
キャッピングは当初3年間の仮置き期間を想定して設計されたため、事故後6年以上が経過し

た現在ではキャッピングに破損が生じており、雨水がキャッピング内部に侵入して除染廃棄物と接触し、周辺に汚染が拡大することが懸念される。

可燃物を収納したフレコンパックのキャッピングには通気性防水シートが用いられ、不燃物を収納したフレコンパックのキャッピングには遮水シートが用いられている。このうち、破損の事例が多いのは可燃物のキャッピングに用いられる通気性防水シートであり、宮原らによるキャッピングの破損原因や破損状況に関するアンケート調査⁵⁾によると、フレコンパックに収納された草木等の有機物の乾燥や分解によって体積が減少し、キャッピングが沈下した部分に形成された大きな雨水溜りが原因でシートに強い引張力が生じ、キャッピングが引裂



図-10 キャッピング上部に生成した雨水溜まりの様子



(a)、(b) キャッピング材に発生した引裂け

(c)、(d) キャッピング接合部の剥離

図-11 キャッピングの破損事例

けたり、接合部が剥離する事例や風力によりキャッピングに発生する揚力に起因する破損について報告されている。図-10 に仮置場のキャッピング上部に形成された雨水だまりの様子を示し、図-11 にはキャッピングの破損事例の写真を示す。

b) ドローン撮影画像を用いた 3D モデルによるキャッピングの破損危険部の検出

実際の仮置場を模した模擬仮置場を設置し、歪ゲージを用いてキャッピングに生じる歪みを実測した。次に、ドローンを用いて仮置場を撮影し、SfM (Structure from Motion) 解析により仮置場の 3D モデルを作成した。3D モデルにより得られたキャッピングの変形状況に関するデータを用い、有限要素法によりキャッピングに発生する応力、歪分布を計算し、実測値と計算値を比較した。また、日本遮水工協会の自主基準と比較し、破損危険部について評価した。

福島県内の仮置場において、実際の仮置場でどれほどの歪みや応力が発生しているのか検証した。ドローンを用いて撮影を行い、高度 25m、オーバーラップ率 80%以上を確保し、209 枚の画像を撮影した。図-12～図-14 に仮置場の 3D モデルを示す。図-15 に解析に用いた変位分布、図-16、図-17 に FEM 解析により計算した応力分布、歪分布を示す。

仮置場の端部の雨水溜まりにおいて、法肩付近に歪み、応力の集中が確認され、歪みは最大 4%、応力は最大 1.8MPa の値を取った。この値は、日本遮水工協会の自主基準である引張強度 1.75MPa を若干ではるが上回っている。また、仮置場では入隅が存在し、最大値も入隅部付近で現れていた。3D モデルを見ても分かるように、他の雨水溜りに比べて引張力に伴う皺が顕著に発生していることも確認され、応力が集中していることが分かる。仮置場中央付近にも雨水溜まりが発生しているが、歪み、応力ともに法肩付近の値よりは小さかった。全体として、雨水溜りは仮置場の法肩部に沿って発生している傾向が見られ、歪みも同様に法肩部で大きな値を取っていた。

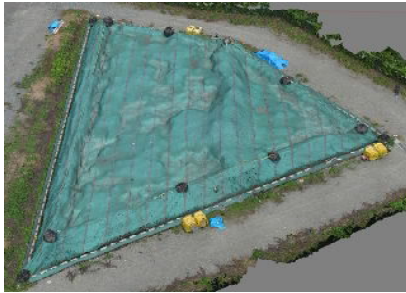


図-12 仮置場の 3Dモデル (その 1)

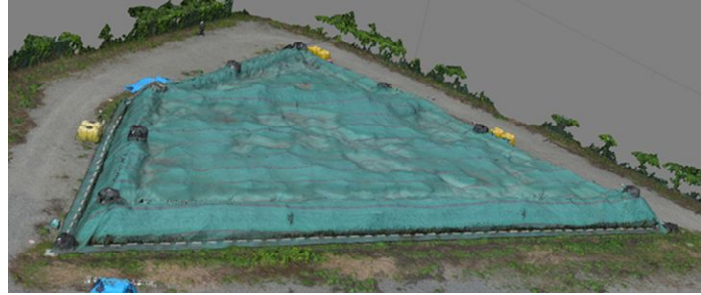


図-13 仮置場の 3Dモデル (その 2)

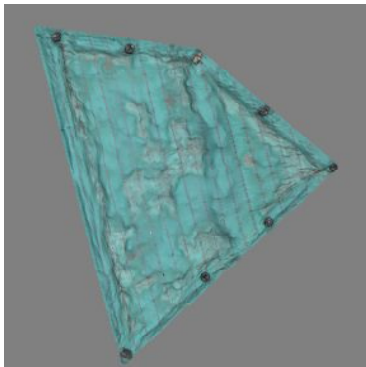


図-14 仮置場の 3Dモデル (その 3)

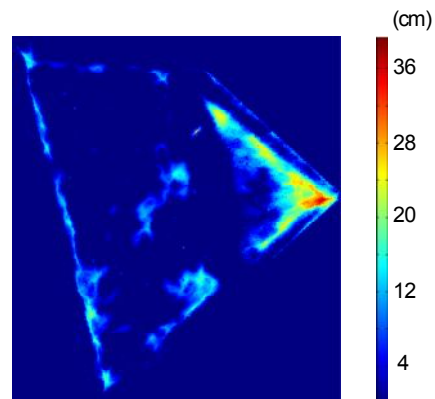


図-15 キャッピングの変位分布

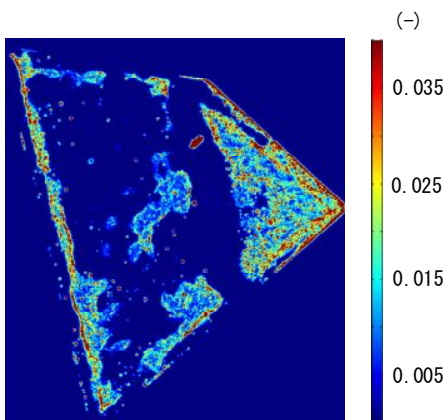


図-16 キャッピングの歪分布

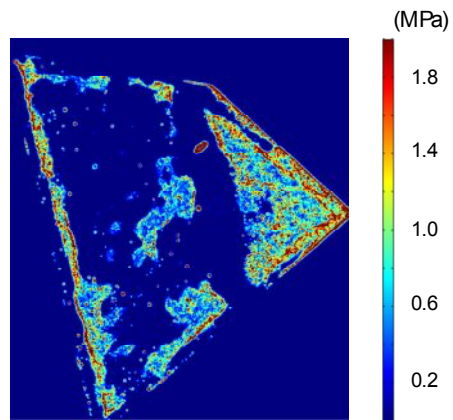


図-17 キャッピングの応力分布

3. おわりに

廃棄物埋立地および除染廃棄物仮置場の遮水工の施工、維持・管理におけるリモートセンシング技術の適応事例について紹介させていただいた。今後、これらの技術の向上と普及が望まれる。技術者の不足や高齢化、行政の財政的問題、社会資本の長寿命化等の社会的背景を受け、リモートセンシング技術は、遮水工の確実な施工、迅速かつ経済的な維持管理上、有効である。

計測技術、インターネット、AIの発達は著しく、またドローンの活用は様々な分野に急速に広まりつつある。被災地等、危険な地帯における重機の遠隔からの無人化施工も実用化されている。遮水工の分野では、遮水シート接合の自動施工の導入が期待される。また、センサー類の軽薄短小化が進む中においては、施工後の遮水材料の状態を遮水材料から情報を発信して来る様な技術の開発も、現代においては可能であろうと考えている。日進月歩の技術発展を注視し、遅れることなく、積極的にジオシンセティックスの分野に取り込んで行くとともに、新たな提案がなされることが望まれる。

参考文献

- 1)島岡隆行、中山裕文：廃棄物分野におけるジオメンブレンの研究の現状と展望、ジオシンセティック論文集、第29巻、pp.1-10、2014
- 2)中山裕文、島岡隆行、作佐部広紀、上田滋夫、青山克巳、坂口伸也、吉田宏三郎：最終処分場遮水シート接合における熱画像検査法の開発と実証試験、ジオシンセティック論文集、第28巻、pp.127-134、2013
- 3)中山裕文、作佐部公紀、小宮哲平、島岡隆行：遮水シート熱画像検査法における閾値温度推定のための伝熱モデルに関する研究、ジオシンセティック論文集、第30巻、pp.141-146、2015
- 4)中山裕文、木村恭之、島岡隆行、古田竜一、日浦一朗宮原哲也：ドローン撮影画像のSfM解析による除染仮置場キャッピングの歪の推定に関する研究、第12回環境地盤工学シンポジウム、2017（投稿中）
- 5)宮原哲也、中山裕文、島岡隆行、古田竜一、日浦一朗：除染廃棄物等仮置場キャッピングの維持管理手法に関する研究、ジオシンセティック論文集、第31巻、pp.105-112、2016