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

中山裕文¹・島岡隆行²・作左部公紀³，上田滋夫⁴，青山克巳⁵，坂口伸也⁶，吉田宏三郎⁷

本研究は、遮水シート表面の温度分布を利用して接合部の合否判定を行う熱画像検査法について検討したものである。接合部表面温度から接合不良を判定するための基準となる閾値温度は、接合条件や施工時の天候によって異なる値をとる。実験により閾値温度を算定するための関係式を導出し、それを組み込んだ遮水シート接合部の合否判定システムを構築した。このシステムを宮崎県延岡市の延岡市新最終処分場本体造成工事の遮水シート接合工事において実証試験を行い、本手法の有効性と課題を明らかにすることを試みた。その結果、実際の現場においても、遮水シートの熱融着接合作業を実施しながら熱画像検査を実施することは可能であり、PC上にリアルタイムで検査結果が表示され、保存されることを確認した。現場での実証試験において明らかとなった課題として、熱画像撮影範囲のずれ、無線接続の切断、PCのフリーズ、遮水シート初期温度が60℃後半～70℃を超えたときの合否判定の難しさ等が見つかったが、いずれも対処が可能であることを確認した。

キーワード：遮水シート，接合部，合否判定，熱画像リモートセンシング，閾値，実証試験

1. はじめに

廃棄物最終処分場の遮水工として敷設された遮水シートは、浸出水の漏水防止という求められる機能を果たすことができなくなったとき、すなわち機能損傷が生じたとき、劣化したあるいは損傷を受けたと判断される¹⁾。機能損傷に至る要因のうち、設計、施工に起因する損傷が全体の約2割を占めており、固定工の問題、余裕代の問題、地盤沈下や陥没等とともに、接合不良、接合部のはがれ等が主な原因として挙げられている²⁾。また、漏水検知システムにより発見された遮水シートの損傷事例のうち、施工中の破損が67%と多くそのうち半数が溶着不良であったとする調査結果がある³⁾。そのため、接合部の検査を確実にする検査方法の開発が求められている。

遮水シートの接合には熱融着と接着があり¹⁾、多く用いられているのは熱融着である⁴⁾。熱融着接合は、300～420℃に加熱された融着機の熱コテに2枚の遮水シートを接触させ、融解、圧着する方法である。この過程で遮水シート接合面は高温となり、接合面からの伝熱により直上部の表面温度も周囲より高くなる。ここで、遮水シートの間に異物が付着していたり、融着機の故障等により接合に必要な熱が供給されないと接合不良となる恐れがある。このときの接合部表面温度は、正常に接合された場合と比較して低温になるため、遮水シート表面の熱画像を熱赤外線画像装置により撮影することで、不良

箇所を簡便かつ迅速に検出することが可能となる。

これまで著者らは、上記手法により熱融着接合時の遮水シート接合部の表面温度を観察し、接合不良が発生するときの接合部表面温度の挙動について、異なるシート種、異なる接合条件で調査を実施してきた^{5),6),7)}。本研究では、本手法の実用化を想定し、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（以下、閾値温度と呼ぶ）を把握するため、異なるシート種（直鎖状低密度ポリエチレン(LLDPE)シート、高密度ポリエチレン(HDPE)シート、フレキシブルポリマーアロイ(FPA)シートおよびポリ塩化ビニル(PVC)シート）、異なる接合条件（遮水シート初期温度、融着機設定温度、接合速度）で実験を行った。さらに、得られた実験結果に基づき作成した接合部合否判定システムを用い、宮崎県延岡市の延岡市新最終処分場本体造成工事の遮水シート接合工事において実証試験を行い、本手法の有効性と課題を明らかにすることを試みた。

2. 遮水シート熱画像検査法の概要

図-1に本研究で用いた自走式熱融着機の写真と、熱融着接合の模式図を示す。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際、同時に熱赤外線画像装置（サーモカメラ）で熱画像を撮影し接合不良の有無

¹ 国際会員 九州大学大学院工学研究院環境社会部門，准教授（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

² 国際会員 九州大学大学院工学研究院環境社会部門，教授（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

³ 非会員 九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻，修士課程（〒819-0395 福岡市西区元岡744）

⁴ 特別会員 東洋紡株式会社（〒141-8633東京都品川区東五反田2丁目10番2号東五反田スクエア）

⁵ 特別会員 太陽工業(株)国土環境エンジニアリングカンパニー（〒980-0022 仙台市青葉区五橋2-11-1）

⁶ 非会員 前田建設工業(株)九州支店（〒812-0013福岡県福岡市博多区博多駅東2-14-1 MKD7スフィックスセンタービル5F）

⁷ 非会員 前田建設工業(株)延岡市新最終処分場本体造成工事 前田・山崎・富高特定建設工事共同企業体

を検査する手法である。本研究における熱画像撮影には、薄型デジタル USB サーマカメラ AIR32 を用いた。大きさは $53 \times 81 \times 13 \text{ mm}$ (レンズ除く)、重量は 115 g と小型軽量であり、自走式熱融着機に登載しても融着作業に支障はない。センサは非冷却 VOx マイクロボロメーター FPA であり、波長 $8 \sim 14 \mu \text{ m}$ における赤外エネルギーを用いて温度分布の画像を作成する。撮影画像の画素数は $76,800$ (320×240 、サーマカメラから対象物までの距離を 46 cm としたとき、1 画素のサイズは $0.47 \text{ mm} \times 0.47 \text{ mm}$) である。撮影された熱画像から、接合部の温度 (図-2 の白線の枠内)、非接合部の温度 (図-2 の青線の枠内) の平均温度を計算し、数値データとして記録する。サーマカメラは無線 USB デバイスサーバと接続されており、データは無線で PC へ送られる (図-3)。

図-4 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。サーマカメラから PC へ送られてきたデータを元に、PC 上で熱画像を表示する。このとき、撮影時刻、接合部の表面温度、非接合部の表面温度、さらに合否判定のための閾値温度が数値データとして 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、3 章において後述する変換式に非接合部表面温度を入力することにより求められる (値の決定方法等は 3 章で詳しく示す)。接合部表面温度と閾値温度を比較して合否判定を行い、基準値外となった場合には PC 上で警告メッセージを表示、アラームを鳴らすとともに静止画像が保存される。

以上の遮水シート接合部の熱画像検査は、従来の加圧、負圧検査のように合格、不合格の結果のみを記録する手法とは異なり、遮水シート表面の熱画像、あるいは接合部表面温度に関する定量的なデータを記録に残すことができるという利点がある。また、熱画像検査は、加圧検査のための検査孔を必要としないため、現場で用いられるダブルシーム接合だけでなく、工場での広幅加工に用いられるシングルシーム接合にも適用できる。

本手法は自走式融着機の直線走行部分には適用に可能であるが、3 点交差部 (シートが 3 重に接合されている部分)、押し出し溶接部のように接合面がフラットでなく、接合面からシート表面への伝熱が不均一となる部分については評価できないため、負圧検査等の従来法を用いる必要がある。

図-1 サーマカメラを搭載した自走式熱融着機 (左) と熱融着の模式図 (右)

図-2 熱融着接合時における接合部付近の熱画像

図-3 無線によるサーマカメラから PC へのデータ転送

図-4 熱画像検査における合否判定フロー

3. 接合部合否判定のための閾値温度の導出実験

3-1 実験概要

熱画像によって得られる表面温度から接合の合否を判定する場合、接合部の表面温度と閾値温度を比較し、接合部の表面温度が閾値温度以上であれば合格、閾値温度以下であれば基準値外 (不合格) と判定することができる。遮水シートの材質、融着機設定温度、融着速度、シート初期温度等の接合条件の違いによって、閾値温度がどのように変化するかを把握するため、各種条件下で自走式融着機による遮水シート接合作業と同時に熱画像撮影を実施した。

実験試料として、厚さ約 1.5 mm の LLDPE シート、HDPE シート、FPA シートおよび PVC シートを用いた。長さ約 7 m 、幅約 50 cm の 2 枚のシートを準備し、自走式融着機を用いて接合しながら遮水シートの接合部表面温度の熱画像撮影を実施した。この実験では、遮水シート

が正常に接合された場合とそうでない場合の境界付近のデータが必要となるため、融着機の設定温度を表-1のように150～200℃という低い温度から、通常の接合で用いられる温度（300～420℃）の間で幅広く設定した。融着機の接合速度は、0.8 m/min, 1.2 m/min, 1.6 m/min, 2.0 m/min, 2.4 m/minの5通りの条件に設定した。以上の一連の実験について、シート初期表面温度が5℃, 10-15℃, 25-30℃, および40-45℃の計4通りの温度条件下で行った。接合後、幅25 mm×長さ125 mmの試験片を切り出し、接合部の引張試験を行った。引張速度は50 mm/minとした。

表-1 実験における融着機の設定温度

		融着機設定温度(℃)				
材質	No.	1	2	3	4	5
LLDPE		150	170	200	300	420
FPA		150	170	200	300	420
HDPE		200	240	280	320	420
PVC		200	250	300	350	420

3-2 実験結果

図-5は、冬季に遮水シートの初期表面温度が5℃のとき、LLDPEシートを用いて実施した実験の結果であり、破断時または剥離時の引張強度と接合部表面温度の関係を示している。例えば◆のプロットは接合速度を0.8m/minとし融着機の設定温度をT=150, 170, 200, 300, 420℃として接合したときに得られた接合部の試験片について引張試験を実施し、試験片が破断または剥離した時の引張強度を縦軸にとり、接合部表面温度を横軸にとったものである。なお引張試験のサンプル数はn=3とした。接合速度が0.8m/minのデータを見ると、融着機の設定温度が300℃, 400℃のときは引張強度が400N/25mm付近で一定しているが、融着機の設定温度200℃付近から引張強度が急激に低下しているのが分かる。引張試験において、設定温度が高いときには試験片の破壊形態は、せん断破壊（接合面ではなく試験片自体が破断したもの）、凝集破壊（十分に熱融着された接合面が破壊したもの）であったが、設定温度が低下するにつれ接合部は界面剥離（融着が十分でなく2枚の遮水シートの界面で剥離したもの）し、引張強度が低下した。他の接合速度でも同様であり、融着機の設定がある温度以下になると引張強度が急激に低下する。本研究では、引張強度が日本遮水工協会による自主基準値⁹⁾（LLDPEの場合200N/25mm）以下になるとき、これを基準値外（不合格）と判定することとし、このときの接合部の表面温度を合否判定の閾値温度とした。閾値温度を図-6から読みとると、接合速度が0.8m/minのとき30.6℃である。同様に、接合速度が1.2m/min, 1.6m/min, 2.0m/min, 2.4m/minのときの閾値温度は、それぞれ25.2℃, 20.0℃, 16.6℃, 15.6℃であった。接合速度が速くなるほど、閾値温度は低くなった。この理由は、熱画像で得られる温度は熱コテによって熱せられた接合面の温度ではなく、

接合面からシートの厚み1.5mm分だけ離れたシート表面の温度であることに起因する。熱せられた接合面からシート表面まで熱が移動するのに一定の時間がかかるが、接合速度が速いときは、接合されてから熱画像を撮影されるまでの時間が短くなるため、接合速度が遅いときと比較して温度が低くなる。

図-7, 図-8, 図-9はそれぞれHDPE, FPA, PVCについて同様の実験を行った結果である。HDPE, FPAについてはLLDPEと同様に、表面温度がある値以下となったときに引張強度が急激に低下した。一方、PVCについては引張強度と表面温度の関係は線形に近かった。

図-10はLLDPEについてそれぞれ初期表面温度が5℃, 15℃, 25-30℃, 40-45℃での破断時または剥離時の引張強度と接合部表面温度との関係である。図から、初期表面温度が高くなると、閾値温度も高くなることがわかる。つまり、熱画像検査を行う場合には、そのときの天候や気温によって変化するシートの初期表面温度に応じて合否判定のための閾値温度を変化させる必要がある。

図-11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。図から、両者の間には線形の相関関係があること、接合速度が速くなるほど閾値温度は低くなることが分かる。そこで、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-2のような結果が得られ、いずれの式も決定係数が0.99以上であった。

以上の結果により、遮水シートの初期表面温度が得られれば、表-2の関係式から合否判定のための閾値温度を算定することができ、その結果と接合部の温度を比較することで接合部の合否判定が可能となることを示した。

図-5 破断時または剥離時の引張強度と接合部表面温度の関係 (LLDPE, シート初期表面温度5℃)

図-6 接合不良の判定基準を200N/25mmとしたときの閾値温度 (LLDPE, シート初期表面温度5℃)

図-7 破断時または剥離時の引張強度と接合部表面温度の関係
(HDPE, シート初期表面温度 20~25°C)

図-8 破断時または剥離時の引張強度と接合部表面温度の関係
(FPA, シート初期表面温度 20~25°C)

図-9 破断時または剥離時の引張強度と接合部表面温度の関係
(PVC, シート初期表面温度 20~25°C)

図-10 異なる初期温度での破断時または剥離時の引張強度と接合部表面温度の関係 (LLDPE)

図-11 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-2 接合速度別の閾値温度とシート初期表面温度の関係式

接合速度(m/min)	式	R ²
0.8	$y = 0.6741x + 29.407$	0.9913
1.2	$y = 0.7422x + 23.462$	0.9966
1.6	$y = 0.7803x + 18.078$	0.9985
2.0	$y = 0.8035x + 14.435$	0.9977
2.4	$y = 0.8108x + 12.72$	0.9978

y: 閾値温度 (°C), x: シート初期表面温度 (°C)

4. 延岡市新最終処分場における実証試験

以上の実験により得られた結果に基づき、接合部合格判定のためのシステム（遮水シート接合部熱画像検査合格判定システム）を作成し、これを宮崎県延岡市の延岡市新最終処分場本体造成工事の遮水シート接合工事に適用し、実証試験を行った。これにより本手法の有効性と課題を明らかにすることを試みた。図-12は、延岡市新最終処分場の平面図である。実証試験は平成25年3月25日、4月23日、5月22日、6月19日、7月18日に実施した。本論文では、3月、4月、5月、6月の4回の検査について分析した結果を報告する。

4.1 実証試験結果

接合部の熱画像検査は、3月25日に8ライン、4月23日に11ライン、5月22日に10ライン、6月19日に6ラインの合計40ラインについて実施した。これらの接合部検査では、通常実施する加圧検査も行われ、すべて合格と判定された。なお、ここでのラインとは例えば図-13に示すC工区付近の遮水シートの割付図において、割付けられた遮水シート間の接合ラインのことである。

図-14に示すように、遮水シートの熱融着接合作業を実施しながら、熱画像検査を実施した。撮影された熱画像は無線でPCに転送され、PC上でリアルタイムで接合部表面温度と閾値温度が比較され、検査結果をPC上に表示、保存することができることを確認した。

図-15は、C工区のC1-5、C1-6間（図-13参照）の接合部

における検査結果の一例である。図中で、黒い実線は接合部の表面温度、破線は閾値温度、灰色の実線は非接合部の表面温度である。図から、接合部の表面温度はすべての領域において閾値温度より高い値を示し、この結果から熱画像検査において合格と判定された。なお、図-15中で接合部表面温度、閾値温度、非接合部表面温度が変動して低下している部分がある。これは、日陰となっていた固定工部分の接合時に温度が低下したことが原因である。熱画像検査では、非接合部の表面温度を常に取りながら閾値温度を計算し、接合部表面温度と比較しているため、日陰等により温度が低下しても熱画像検査に支障はない。

図-12 延岡市新最終処分場の平面図

図-13 C工区付近の遮水シート割付図

図-14 延岡市新最終処分場における遮水シート接合部の熱画像検査の様子（平成25年3月25日）

図-15 C1-5、C1-6間の接合ラインにおける接合部表面温度、閾値温度、非接合部（初期）温度の推移

図-16 D1-4、D1-5間の接合ラインにおける接合部表面温度、閾値温度、非接合部（初期）温度の推移

4.2 実証試験の過程で明らかになった課題とその解決策

表-3は、3月～6月にかけて実施した4回の検査結果の一覧表である。40ラインのうち、3月、4月に実施した6つのライン（C1-4C1-5、D1-3D1-4、D4D1-5、D1-51-6、D1-6D1-7、D1-8D1-9）の検査において、サーモカメラ取り付け治具が融着機に確実に固定されていなかったため、固定工部分を接合する際、シートの皺等により融着機が横揺れし、サーモカメラによる接合部表面温度（図-2の白枠）の撮影位置がずれてしまったため適切に温度データを取得することができなかった。そのため、例として図-16に示すように接合部表面温度が一時的に急減して閾値温度以下となり、正常な接合部を接合不良と判定する誤検出が発生した。治具を改良して融着機にしっかりと固定し、また接合部温度取得のための白枠の位置を調整することで解決し、5月の検査以降はこの問題は発生していない。

3月25日のC1-2、C1-3のラインにおいて無線切断のためデータ取得に失敗した。無線によるデータ転送は、障害物がなければ25～30mまでの距離であれば可能であることを確認したが、電波の死角に入ると一時的に無線接続が解除されることがあったため、PC操作担当者は障害物の無い場所に立って操作することとした。PC操作担当者が無線の死角に入らないように対処することで無線切断は回避できた。この問題は無線の中継アンテナを設置することにより解消可能であり、その場合にはPC操作担当者はテント等の中で検査結果を確認することも可能と考えられる。

5月22日の検査ではF2-3、F2-4間の接合時にPC本体がフリーズし、データ取得に失敗した。屋外での検査であるため、PC本体の温度が上昇したが排熱ファンが無くPC

が熱暴走したものと考えられる。旧式のPCを最新型のPCに置き換えることで、その後フリーズは起きていないが、さらに屋外専用のPC等を用いることにより、この問題は対処可能と考えられる。

その他では、4月23日の3点交差部において閾値温度以下となった部分を検出したが、これについては2節ですでに述べている通り3点交差部は熱画像検査では検査できない。6月19日の検査では接合作業の際に融着機に接続されたキャプタイヤが熱画像の撮影範囲に重なってしまう問題が発生したが、これは作業担当者が注意することによって回避できると考えられる。

表-3 検査結果の一覧表

検査実施日	接合ライン名	非接合部平均表面温度(°C)	閾値平均温度(°C)	接合部平均表面温度(°C)	閾値温度以下の検出	原因
3月25日	C1-1, C1-2	51.0	55.4	59.0		
	C1-2, C1-3	N/A	N/A	N/A		無縁接合の切断
	C1-3, C1-4	50.8	55.3	60.4		
	C1-4, C1-5	49.8	54.4	60.1	有り	撮影位置のずれ
	C1-5, C1-6	50.1	54.7	60.6		
	C1-6, C1-7	34.5	42.2	48.2		
	C1-7, C1-8	35.7	43.1	48.0		
	C1-8, C1-9	33.9	41.7	47.1		
4月23日	D1-1, C1-21, C1-21-2	35.9	43.3	50.7	有り	3点交差部
	D1-1, D1-2	35.0	42.5	49.7		撮影位置のずれ
	D1-2, D1-3	33.8	41.6	48.0		
	D1-3, D1-4	29.1	37.8	43.4	有り	撮影位置のずれ
	D1-4, D1-5	30.7	39.1	45.4	有り	撮影位置のずれ
	D1-5, D1-6	35.7	43.1	47.7	有り	撮影位置のずれ
	D1-6, D1-7	26.3	35.5	40.8	有り	撮影位置のずれ
	D1-7, D1-8	24.5	34.1	39.2		
	D1-8, D1-9	25.4	34.9	39.8	有り	撮影位置のずれ
	D1-9, D1-10	26.9	36.1	40.6		
	D1-10, D1-11	24.4	34.1	38.9		
5月22日	F2-1, F2-2	40.2	46.7	51.4		
	F2-2, F2-3	44.6	50.3	54.6		
	F2-3, F2-4	N/A	N/A	N/A		PCのフリーズ
	F2-4, F2-5	47.5	52.6	57.1		
	F2-5, F2-6	49.2	54.0	58.5		
	F2-6, F2-7	49.3	54.1	57.5		
	F2-7, F2-8	48.1	53.1	56.8		
	F2-8, F2-9	53.4	57.4	61.2		
	F2-9, F2-10	52.2	56.3	60.2		
	F2-10, F2-11	55.1	58.7	62.5		
6月19日	H2-2, H2-3	63.4	65.4	70.0		
	H2-3, H2-4	61.5	63.9	65.4	有り	コードの映り込み
	H2-4, H2-5	66.0	67.5	69.9		
	H2-5, H2-6	58.3	61.3	63.3		
	H2-6, H2-7	52.2	56.4	58.4		
	H2-8, H2-9	71.1	71.5	73.9

図-17 接合部表面温度と閾値温度の差と初期表面温度の関係

図-18 保護マットによる接合ラインへの日射の遮断（左図）と接合直前における保護マット捲りの様子（右図）

図-17に接合部表面温度と閾値温度の差と、初期表面温度の関係を示す。接合部表面温度と閾値温度の差は、初期表面温度が高いほど小さくなった。図-17において、6月19日の検査では、シート表面温度が60℃後半から70℃を超えることがあり、このときの接合部の温度と閾値の温度との差は1~2℃しかなく、温度のばらつきが大きいと接合不良と判定される恐れがある。そのため、夏季の暑い時期の検査では、図-18のように接合部に日射を遮断することができる遮光性保護マットを被せて日射を遮断してシートの温度上昇を防ぎ、接合直前に保護マットを捲りながら接合する手法が有効であった。この方法によりシート温度は70℃から55℃前後まで低下した。保護マットによる温度低下は熱画像検査のためだけでなく、LLDPEシートのように弾性の大きいシートを夏季の暑い時期の日中に接合する際、接合失敗を防ぐ手法としても有効と考えられる。日射によるシートの温度の上昇防止に保護マットがどの程度効果があるのか、保護マットの仕様、材料特性等を考慮して評価する必要があるがその点については今後の課題である。

5. 結論

本研究において得られた結論を以下に示す。

- (1) 接合部に十分な熱が供給されないと接合不良となり、引張試験において剥離時の引張強度が低下する。引張強度に基準を設けることで、正常な接合部の表面温度と、接合不良となった場合の表面温度の境界の閾値温度を設定することができる。閾値温度は、遮水のシート種類、接合時の初期温度、融着機の接合速度によって変化する。
- (2) LLDPE を用いた引張試験の結果から融着機の接合速度別に閾値温度と初期温度の関係式を求める手順を示した。関係式に接合速度と初期温度を入力することで、閾値温度を算出することができる。
- (3) 遮水シート接合部合否判定システムを構築した。このシステムは、接合速度とサーモカメラにより連続的に計測される非接合部表面温度（初期温度）を入力することで合否判定のための閾値温度が算出され、この温度と別途計測される接合部表面温度と比較することで合否判定を行うものである。
- (4) 遮水シート接合部合否判定システムを延岡市新最終

処分場に適用し、実証試験を行った。実際の現場においても、遮水シートの熱融着接合作業を実施しながら熱画像検査を実施することは可能であった。撮影された熱画像が無線で PC に転送され、PC 上でリアルタイムで接合部表面温度と閾値温度が比較され、検査結果が PC 上に表示、保存されることを確認した。

- (5) 現場での実証試験において明らかとなった課題として、熱画像撮影範囲のずれ、無線接続の切断、PC のフリーズ、遮水シート初期温度が 60℃後半～70℃を超えたときの合否判定の難しさ等がある。いずれの問題についても対処が可能であることを確認した。

謝辞

本研究の実施にあたり、遮水シート熱画像検査の実施を許可して下さった延岡市役所の担当者の皆さま、現場に何度も足を運び、検査に協力してくださった環境・遮水管理リモートセンシング研究会の皆さまに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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，技報堂出版，2009
- 2) 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：ごみ埋立地の設計施工ハンドブッカーしゃ水工技術一，オーム社，2000
- 3) 熊谷 浩二ジオシンセティックスを用いた遮水構造の建設技術と課題，ジオシンセティックス論文集，Vol. 17，pp.1-42，2002
- 4) 村上 清高，大野 文良，瀬戸 卓也：ジオシンセティックスを用いた最終処分場しゃ水工の現状調査と課題，ジオシンセティックス論文集，Vol. 14 pp.380-388，1999
- 5) 中山裕文，島岡隆行，井上幸一，小宮哲平：最終処分場における遮水シート接合部の不良箇所検出手法の開発，第25回全国都市清掃研究・事例発表会，pp.324-326，2004
- 6) 中山裕文，島岡隆行，上田滋夫：熱画像検査法による遮水シート接合部検査について（その2），第28回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，pp.239-241，2007
- 7) 中山裕文，島岡隆行，上田滋夫，青山克巳：熱画像検査法による遮水シート接合部検査について（その3），第31回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集，pp.253-255，2010
- 8) 中山裕文，小宮哲平，島岡隆行，青山克巳，上田滋夫，熱画像検査による遮水シート接合部合否判定のための伝熱シミュレーション，ジオシンセティックス論文集，Vol26，pp.145-150，2011
- 9) 日本遮水工協会：遮水シート日本遮水工協会自主基準，<http://www.nisshakyo.gr.jp/standard.html>，2007

DEVELOPMENT AND PROVING TESTS OF THERMO-GRAPH INSPECTION FOR GEOMEMBRANE SEAM EVALUATION

Hirofumi NAKAYAMA, Takayuki SHIMAOKA, Kiminori SAKUSABE, Shigeo UEDA, Katsumi AOYAMA, Shinya SAKAGUCHI and Kouzaburou YOSHIDA

This paper attempted to develop a thermo-graph inspection method for the evaluation of heat-welded seam of geomembrane. Then the proving tests using this inspection method were conducted at heat-welding construction works in Nobeoka new landfill. On the proving tests, heat-welding works and the thermo-graph inspection could be carried out in parallel, the results of inspection were displayed on the computer correctly. Those results indicated that this method can be applied practically at construction site of the geomembrane on landfills.