

# 廃棄物マネジメント DX の構築に向けて

～最終処分へのリモートセンシング技術の適用と取組み～

九州大学大学院工学研究院 教授（九州環境管理協会 副理事長） 島岡 隆行

## 要 旨

廃棄物マネジメントを製品の製造、消費、廃棄物の排出・収集、再資源化、中間処理、最終処分の一連の物質フローの管理と捉え、情報を一元管理、活用し、資源循環・廃棄物処理マネジメントを最適化するための廃棄物インフラ DX プラットホームの構築が望まれている。本報では、リモートセンシング技術、デジタル技術を用いた最終処分に係わる維持管理に関する研究を紹介している。浸出水漏水による環境汚染を防止するための確実な遮水シート接合を監視するための熱赤外線画像を用いた接合部の検査手法、人工衛星データを利用した埋立廃棄物の安定化のモニタリング方法、ドローン画像を利用した迅速な災害廃棄物仮置場の管理方法、さらには廃棄物埋立地の3次元情報とIoT技術による高度な管理の取組みについて述べている。

## 1. はじめに

最終処分場のリモートセンシング技術に関する研究を始めるきっかけとなったのは、1993年に訪問したイーレンベルグ処分場（旧東ドイツ）である。その処分場では、人工衛星データを利用して埋立地表面の温度モニタリングを行い、表面温度が一定以上の高温となっている箇所を検知すると所有している消防車を出動させ、火災を未然に防止していた。最終処分場の管理にリモートセンシング技術を活用していることに感銘を受けた。

その後、2001年、リモートセンシングの技術開発に着手できる研究環境を得たことから廃棄物管理への適用の可能性について検討を開始した。今までの取組みについて紹介する。

遮水シート接合部の品質管理は、浸出水の漏水による土壌、地下水汚染を防ぐために重要である。新たな接合部の検査手法として、全数の接合ラインの検査を接合作業と同時に可能とし、検査結果を記録保存できる熱赤外リモートセンシングを適用した熱画像検査法を開発した<sup>1)</sup>。

樹脂系遮水シートの接合は、熱融着が一般的である。熱融着接合は、融着機の高温加熱されたコテで遮水シートの接合部表面を融解させた後、2枚の遮水シートを圧着し接合する方法である。この過程で高温となった遮水シート接合面からの熱伝導により遮水シート表面温度は周囲より高くなる。ここで、遮水シート融着機の設定ミスや故障等による接合部への熱供給不足等が発生すると接合不良が発生する。このときの接合部表面温度

## 2. 廃棄物管理のためのリモートセンシング技術への取組み

### 2.1 遮水シート接合部の熱画像検査

まず初めに、最終処分場の施工管理へのリモートセンシング技術の適用を紹介する。埋立地には二重の遮水が義務付けられ、土壌、地下水の環境を保全するための重要な施設である。最も多いケースが遮水シートを二重に用いる遮水である。何十枚もの遮水シートが接合され、埋立地基礎底盤の全面に敷設される(写真1)。



写真1 埋立地における遮水シートの敷設作業  
(遮水シートは不織布の上面に敷設される)

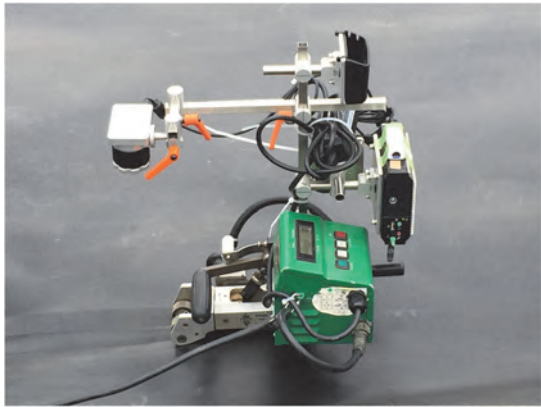


写真2 融着機に装着された熱画像検機器

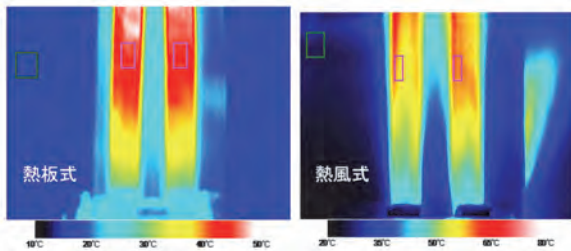


図1 遮水シート接合部の熱画像の一例

は、正常に接合された場合と比較して低温になる。また、接合部の遮水シートの隙間に、粉塵、土砂、枝葉等の異物が付着、混入した場合は接合部の温度分布の不均一性を熱画像から検知できるため、遮水シート接合部の温度分布を熱画像リモートセンシングによりモニターすることで、接合不良箇所を簡便かつ迅速に検出することが可能となる。以上が本技術による接合部検査の原理である。写真2は自走式融着機に熱赤外線カメラ、無線発信機等を装着した様子である。図1はダブルシーム接合部表面の熱画像で、観測点の温度と全体の温度分布をモニターしている様子である。

本検査法を用いることで、廃棄物最終処分場の遮水シートの全ての接合ラインについて、温度(数値)と熱画像の検査結果を客観的なデータとして記録することが可能となり、遮水シート施工の信頼性の向上につながる。また、遮水シート接合作業と検査を同時に実施できることから、工期の短縮、コストの削減も図れる、また、本検査法のシステムはスマートフォン等による遠隔操作、データ取得が可能であり、ICT、IoTにも対応している。2020年度末で、8カ所の最終処分場において、総延長約12,000mの検査に本技術が利用された。

## 2.2 人工衛星データを用いた埋立地の維持管理

埋立地の主要な維持管理として、(1)搬入管理、埋立高管理による廃棄物の質と量の管理、(2)埋立地盤の地温、埋立ガス組成、地盤沈下、浸出水水質の調査による廃棄物の安定化の管理、(3)埋立地上下流の地下水調査による遮水工の健全性の管理が挙げられる。これらの管理には多くの労力が必要とされ、大規模な埋立地においては、埋立廃棄物の状況を迅速かつ的確に把握するのは困難である。そのような中、リモートセンシング技術を用いることにより、遠隔から広範囲の情報を得ることができる。人工衛星データであれば、過去何十年にも遡って情報を入手することも可能である。急速に普及し、進化を続けているドローン技術によって、短時間かつ容易に画像、地盤高、温度分布等の情報を入手することが可能である。その一例として、上海市の中国最大規模の老港埋立地(320万㎡、矩形、800m×4,000m)で行ったリモートセンシング技術の活用事例を紹介する<sup>2)</sup>。

地球観測衛星 Terra の複数時期の衛星情報(可視近赤外域、短波長赤外域、熱赤外域)を入手し、埋立地の地表被覆分類、地表温度分布、正規化植生指標(NDVI)を求めた。3年半の衛星データより埋立ての進捗状況、廃棄物が処分された埋立区画の表面温度の変化、埋立てが完了した埋立区画に雑草が繁茂する状態を捉えることができた。その後、現地へ赴き、現地調査を行った。写真3に示すように同区画であっても雑草

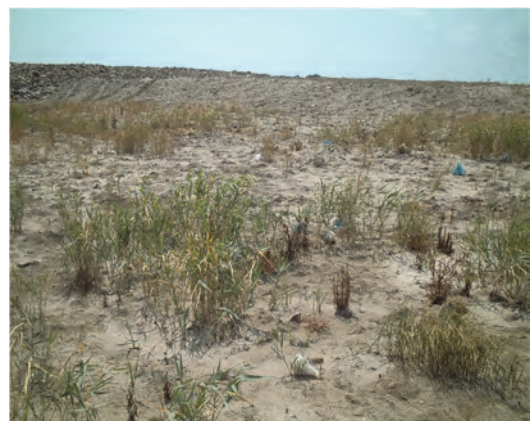


写真3 埋立地表面に不均一に繁茂する雑草

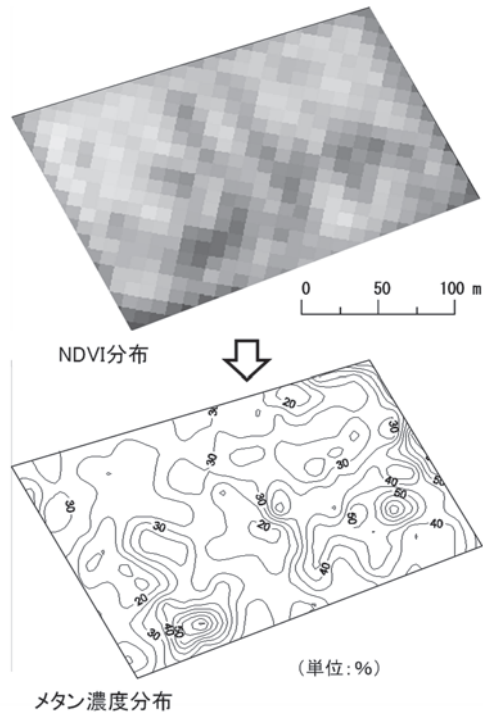


図2 NDVI分布からメタン濃度分布の推定

は不均一にまばらに繁茂し、場所によって種類も異なっている様子が確認された。また、現地調査によって、埋立地表層内のメタンガス濃度や散逸される flux によって、雑草の種類や活性 (NDVI) が異なることが明らかとなった。NDVI と埋立地表層内のメタンガス濃度分布には相関が認められ、図2に示すように人工衛星データを利用して算出される NDVI からメタンガス濃度分布を推定することができる。つまり、NDVI といった埋立地表面の情報から埋立地内部の埋立廃棄物の安定化を推し量ることができることを意味している。

### 2.3 災害廃棄物仮置場の管理

災害廃棄物仮置場の管理にドローンを用いた事例を紹介する<sup>3)</sup>。28 時間の間に 2 度の震度 7 を記録した 2016 年熊本地震では、311 万トンの災害廃棄物が発生した。熊本県西原村を始め、自治体によっては平時の何十年分にも及ぶ膨大な災害廃棄物量となっている。発災と同時に、災害廃棄物の対応に困窮されていた西原村を支援するためドローンを抱え、現地に通った。西原村は村営野球場・グラウンドの運動施設を仮置場として選定された。そこでは、日々、災害廃棄物が積み上

がり、特に、搬出先が見つからなかった木くずの堆積面積は広がり、相当な高さに至り、崩落や火災が懸念された(写真4)。ドローン(DJI ファントム 4)で撮影した画像を SfM 解析することによって求めた仮置きされている木くずの体積、地上高、また赤外線カメラを搭載したドローン(DJI マトリクス 600)を用いて積まれている木くずの表面温度を計測し、逐次、西原村役場にお伝えし、仮置場の管理に役立てていただいた。

図3は発災直後の2016年4月から翌年6月までに仮置きされていた木くず体積の推移である。11月のピーク時には4万m<sup>3</sup>を超え、西原村における木くず総発生量の約40%が仮置場に集積されていた。図4は、最高地上高を示す。火災予防のために望ましいとされている5mを超え、11月には7m以上となっていた。なお、ドローンで得られた体積や地上高は、水準測量及び平板測量の実測で得られた値と比べて誤差1~2%であり、実用に資するデータであった。



写真4 積み上がる木くず(2016年10月2日)

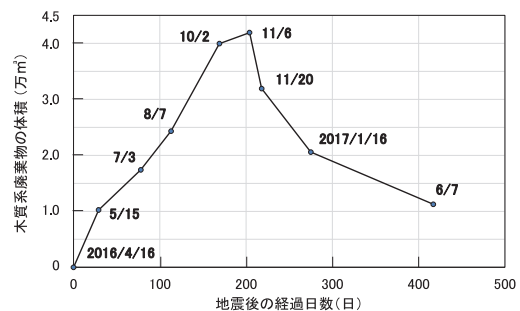


図3 SfMにより推計した木くず体積の推移



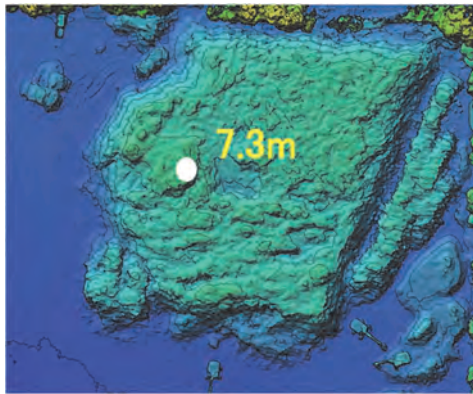


図4 木くずの最高地上高(2016年10月2日)

### 3. 廃棄物埋立地の3次元情報とIoT技術による高度な管理に向けて

人工衛星データ、ドローン画像を利用した廃棄物の管理の一端をご紹介させていただいた。共通していることは、埋立地や仮置場の廃棄物表面の情報であり、埋立地の内部、つまり埋立廃棄物の情報を得るに至っていないことである。

埋立廃棄物地盤の情報を得る手法として、物理探査(電気探査、弾性波探査、表面波探査等)が用いられる。埋立地断面の地盤の密度、地下水の有無等の情報を得ることができる。複数の測線について物理探査を行えば、3次元的情報の把握も可能となる。しかし、経年変化を得るには多大な労力と費用が必要である。また、化学・生物学的情報を得ることは難しく、得られる情報は物理的情報で限定的であると言える。

そのような中、2010年代後半、人工知能(AI)の第三次ブームが訪れ、様々な分野にAIが導入されようとしている。また、インターネットの普及に伴い、世の中に存在する様々な物体に通信機能を持たせ、インターネットを介して相互に通信させるIoTも急速に普及している。これらの技術的動向を受け、図5に示すように各種センサー、通信デバイスを設置することで、ブラックボックスとなっている埋立地内部(埋立廃棄物層)や自然地盤の境界に位置する遮水工に関する面的、3次元物理・化学的情報を取得し、IoTの活用によって、高度な埋立地の管理を実現することが期待される。

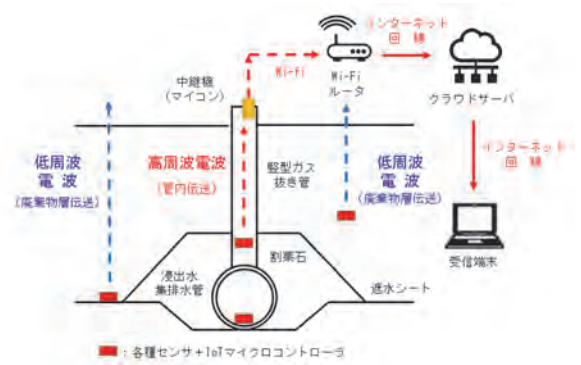


図5 埋立地内部の3次元的情報の取得

廃棄物の埋立処分とともに埋立廃棄物の管理に重要なCO<sub>2</sub>、温度、pH、EC、TDS等の各種センサーを廃棄物の埋立てとともに3次元的に埋設し、また堅型ガス抜き管渠や浸出水集水管内にセンサーを設置することによって埋立地内部から情報を得ることの検討を行っている<sup>4)</sup>。さらに、埋立地底盤部の遮水シートの温度や作用する歪みの情報を取得することによって、遮水シートの健全性モニタリング、埋立地の廃止の判断に役立てることができる。センサーとして光ファイバを用いた遮水シートの温度計測に関する基礎実験を行った(写真5)。遮水シートの2次元温度分布を迅速に、精度高く計測できることが示唆される結果が得られている。

実現には、埋立地の過酷な環境に耐えるセンサーの選択、センサーの設置方法、エネルギーハーベスティングによる長期に亘る電源<sup>5)</sup>の確保、埋立廃棄物層内での無線通信技術の確立が不可欠である。

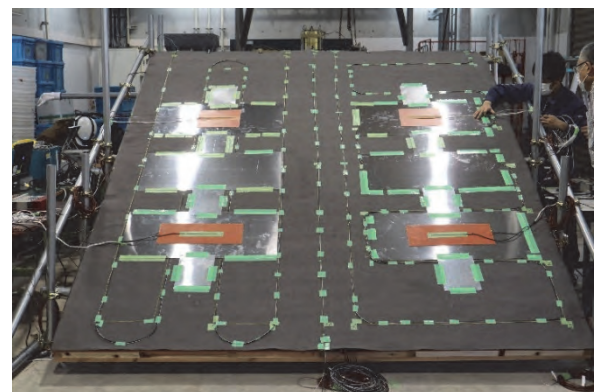


写真5 光ファイバによる遮水シートの温度計測実験の様子

#### 4. おわりに

最終処分に係わるリモートセンシング技術、デジタル技術を用いた維持管理の取組みについてご紹介させていただきました。

今後は、世界に目を向けると廃棄物の埋立処分は地球温暖化や気候変動の大きな要因となっており、個別特定の埋立地の管理の枠を超えて、温室効果ガス測定の人衛衛星データや著しい発展を見せているデジタル技術を活用した地球規模の埋立地の維持管理や監視により、地球環境問題に貢献すべきと考える。

さらに、廃棄物マネジメントは、製品の製造、消費、廃棄物の排出・収集、中間処理、再資源化、最終処分に至る循環経済における一連の物質フローの管理と捉えられる。デジタル技術を活用することにより、各マネジメントの情報を統合し、廃棄物マネジメントの全体を最適な状態へと変革させるための廃棄物マネジメントDXの構築が必要である。

#### 参考文献

1) 中山裕文, 島岡隆行, 作左部公紀, 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ス論文集, Vol.28, pp.127-134(2013).

- 2) 石崎俊夫, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 真鍋和俊 : 衛星リモートセンシングによる大規模廃棄物処分場管理手法に関する研究, 環境システム研究論文集, Vol.32, pp.311-318(2004).
- 3) 花嶋孝生, 山口健太郎, 真鍋和俊, 中山裕文, 島岡隆行 : UAV を利用した仮置場における災害廃棄物量の把握, 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, pp.155-156(2016).
- 4) 田添智也, 島岡隆行, 中山裕文, 金谷晴一: 廃棄物埋立地における環境モニタリングのための低周波電磁波による無線通信に関する基礎的研究, 令和 2 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.745-746(2021).
- 5) 村上凜太郎, 中山裕文, 島岡隆行, 金谷晴一: 埋立廃棄物処分場におけるエネルギーハーベスティング技術に関する基礎的研究, 第 32 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集, pp.325-326(2021).