

【研究報告】

リモートセンシングによる廃棄物処分場の情報取得に関する研究
Study on the data of the ground surface of the waste disposal site
by the low altitude remote sensing

宮原 哲也*、八村 智明*、永岡 修一*、島岡 隆行**、中山 裕文**

Tetsuya MIYAHARA*, Tomoaki HACHIMURA*, Shuichi NAGAOKA*, Takayuki SHIMAOKA**,
Hirofumi NAKAYAMA

【要約】

地上観測が難しい広範囲の面的モニタリングを効率的に実施する手法として熱赤外線サーモグラフィー（以下、サーモカメラとする）とデジタルカメラを搭載できる空中からのリモートセンシング観測が可能な気球空撮システムを開発し、その適用性の評価と得られたデータに関する精度の把握を行った。その結果、小型気球から撮影された熱分布画像から、覆土表面の温度を一定の精度で測定することができた。また、小型気球から撮影された可視画像とスペクトルパターン分析から導かれた回帰式を用いて覆土表層の含水率を一定の精度で推計することができた。これらの結果から、小型気球をプラットフォームとしたリモートセンシングシステムは最終処分場モニタリングのための有効な手法であることが確認できた。

キーワード：熱赤外線サーモグラフィー、リモートセンシング、最終処分場、モニタリング、安定化

1. 研究の目的

廃棄物分野におけるリモートセンシング技術の適用は、最終処分場の廃棄物安定度評価、災害廃棄物仮置場等における火災発生危険度の評価、不法投棄現場の環境モニタリング等、ニーズの高い分野であると考えられる^{1) 2)}。特に、最終処分場においては、地上観測が難しい広域の面的情報取得など、モニタリングを効率的に実施する手段として、上空からのリモートセンシング技術の適用が期待されている^{3) 4)}。本研究は、廃棄物最終処分場のモニタリング手法として、小型気球をプラットフォームとしたリモートセンシングの適用可能性を検討し、地上観測が難しい広範囲の面的モ

ニタリングを効率的に実施する手法を開発することを主たる目的として実施した。

2. 研究の方法

2.1 小型気球による低高度リモートセンシング

近年、気球を利用した空撮技術が目覚ましく進歩しており、上空から写真を撮影し、建設現場の記録、植生調査、災害調査などに利用されている⁵⁾。リモートセンシング機器を搭載し、空中からのリモートセンシング観測が可能な気球空撮システムの開発と、得られたデータに関する精度の把握を行った。今回使用する気球は、空撮用に開発されたシステム（図1）をベースとし、これにリモートセンシング機器を搭載し、遠隔操作のサーボモータ、遠隔ビデオ信号発信機を取り付けたバルーンシステムを開発し、「温度分解能の評価」等を行った。

* 一般財団法人 日本環境衛生センター 西日本支局 環境科学部
Dept. of Environmental Science, West Branch,
JESC

** 九州大学大学院工学研究院環境社会部門
Department of Urban & Environmental
Engineering Kyushu University

気球搭載の機器は、温度分布画像を撮影するための小型のサーモカメラと、通常のデジタルカメラの2種である。

供用中の一般廃棄物最終処分場を計測対象とし、気球搭載機器によって得られたリモートセンシングを用いたモニタリングデータと、地上における現地調査結果とを比較し、リモートセンシング機器の適用性について検討した。

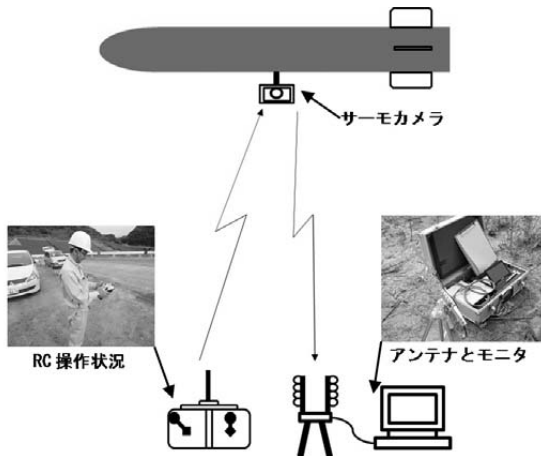


図1 計測システムの概要

2.2 覆土サンプリングと通気係数、含水率、分光反射スペクトルの測定

小型気球によりリモートセンシングデータを取得した同日(2013年7月8日)に、現地最終処分場において表層覆土のサンプリングを実施した。スコップにて採取した攪乱サンプルは埋立地内の22地点、地盤内での状態をそのまま維持した不攪乱サンプルは土壌サンプラーを用いて3地点で採取した。

覆土を採取後、実験室に持ち帰り、不攪乱サンプルについて通気係数、含水率、電磁波の波長ごとの反射率である分光反射スペクトルを測定し、攪乱サンプルについては分光反射スペクトルと含水率を測定した。

3. 研究結果

計測を行った最終処分場は、焼却残渣および不燃残渣を中心とした廃棄物が埋立処分されており、

処分後に即日覆土(層厚約20cm)が施されているため、廃棄物が地表面に露出している状況は認められなかった。また、未埋立区および処分完了後に最終覆土を施したエリアには草本類が繁茂していた(写真1参照)。

3.1 上空からの地表面温度分布計測結果

最終処分場全域について上空から地表面温度分布を計測した結果は、図2のとおりである。なお、計測の時間帯は、日射による影響を極力避けるため、早朝(午前5時~午前7時)に計測を行った。

計測結果は、地表面裸地部は、22~23℃であり、植生が確認できる箇所は、25℃程度と裸地部よりやや温度が高かった。また、埋立地最終処分場中央部(図2中の一点鎖線部)には、裸地にもかかわらず25~27℃程度と他地点と比較すると3℃程度温度が高い箇所が認められた。このエリアは、有機物を含む汚泥が中心に埋め立てられており、汚泥に含まれる有機物の生物分解の反応熱により地表温度が上昇したものと推察された。

このように、裸地や植生の違いや埋立物の安定化の状況の差等、埋立地表面に現れた情報を温度の差として明瞭に捉えることができた。なお、埋立地全域を計測するために要した時間は約1時間10分であった。

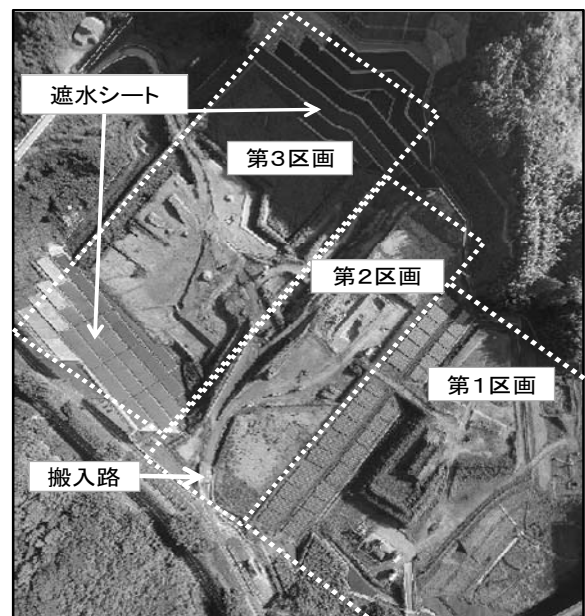


写真1 最終処分場全景
(2013年7月8日撮影)

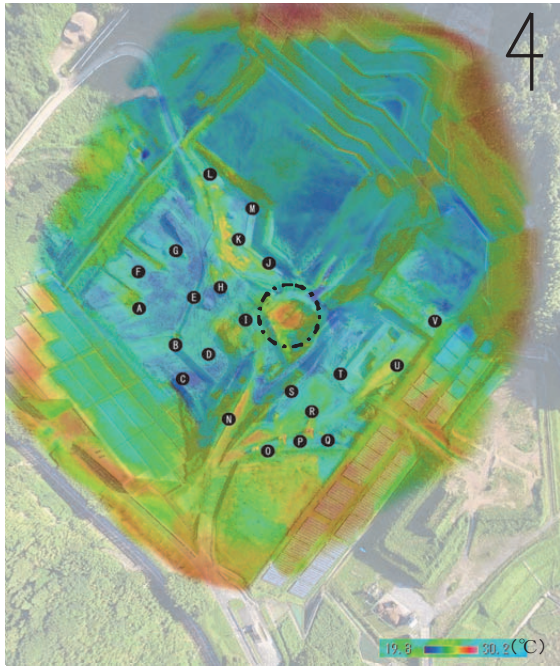


図2 サーモカメラによる地表面温度分布計測結果

3.2 地上計測温度との比較

上空からの熱分布計測を行った時間帯にあわせて計測範囲の22地点で温度計測を行った。各計測地点の表面は全て覆土で覆われており、最終覆土済み（V地点）、20cm程度の即日覆土済み（E、F、H、P、S地点）、ガス抜き管の周辺（他全点）である。上空からの計測値と地上での計測値をまとめると図3のようになった。同一地点での計測値の差は0.2～3.2℃であり、計測地点の半数にあたる11地点において計測値の差は±1℃以内であった。

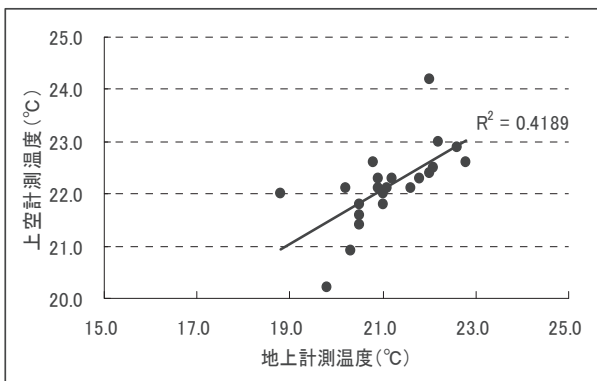


図3 上空計測温度と地上計測温度の計測結果

3.3 可視画像からの含水率分布の推定

3.3.1 スペクトルパターン分析による含水率の推定

採取した覆土について含水率を0%～10%まで2%刻みで変化させ、各サンプルの分光反射スペクトルを測定した（図4）。

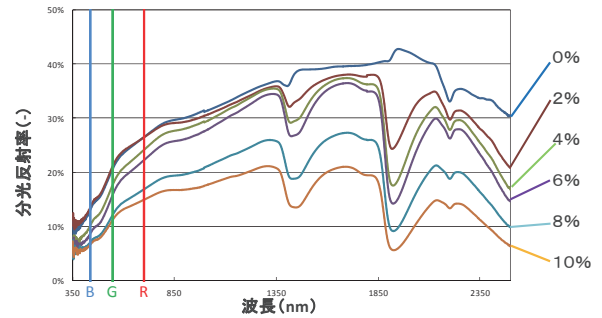


図4 含水率別にみた覆土の分光反射スペクトル

次に、得られた分光反射率を用いてスペクトルパターン分析を行い、含水率や通気係数の変化をより反映するバンドの組み合わせを計算した。スペクトルパターン分析で用いた波長は、可視画像のRGB（R：700nm、G：546nm、B：436nm）に対応する波長とした。採取サンプルの最低含水率（0%）における分光反射スペクトルから抽出した分光反射ベクトルを基準ベクトルとし、それに対して採取サンプルの分光反射ベクトルとのなす角 θ を式(1)により求めた。

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{|\bar{a}| \cdot |\bar{b}|} \right] \dots (1)$$

ここでベクトルaは基準ベクトルであり、ベクトルbは対象とするサンプルの分光反射ベクトルである。3つのバンドの中から2つ以上のバンドを抽出してこの計算を行い θ が最大となるバンドの組み合わせを探索した結果、その結果含水率の変化に最も敏感なバンドの組み合わせはRとBであった。次に、各調査地点において採取した不攪乱サンプルの分光反射スペクトルから得られたR、Bの反射率を元に計算した θ と、同サンプルの含水率（x）

との関係を図5に示す。 θ と含水率の関係を求めた結果、 R^2 は0.7221となり、次式 (2) を得た。

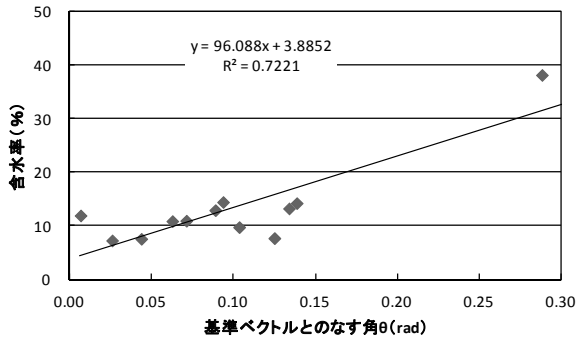


図5 基準ベクトルとのなす角 θ と含水率

$$y = 96088 x + 3.8852 \quad \dots (2)$$

次に図6に基準ベクトルとのなす角 θ と通気係数および図7含水率と通気係数の関係を示す。基準ベクトルとのなす角 θ が大きくなるほど、通気係数は低下する関係にあったが、直線回帰では、両者の相関は高くなかった。また、覆土の含水率と通気係数との関係を確認した結果、含水率が高いほど通気係数は低下したが、高い相関は得られていない。含水率は覆土の通気性に影響を及ぼすが、その他にも土壌の粒径等が関係するため、覆土の含水率からただちに通気係数を推計することは難しいという結果が得られた。

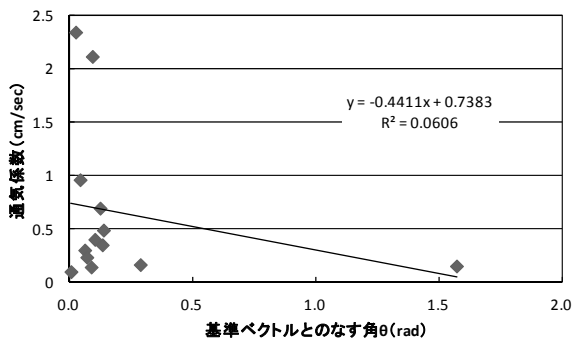


図6 基準ベクトルとのなす角 θ と通気係数

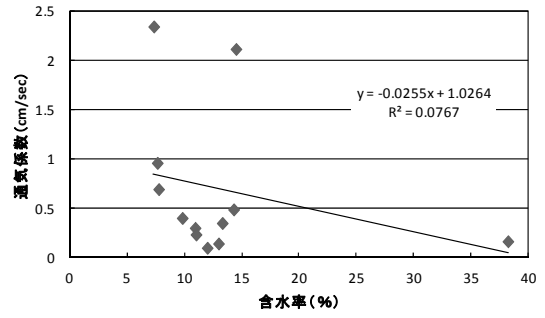


図7 含水率と通気係数

3.3.2 含水率分布

本最終処分場を撮影した可視画像のR(赤)、B(青)のデータから計算した θ を式(1)に代入することにより、含水率を算出した。この値を用いて、覆土表面の含水率分布図を作成すると図8のようになる。なお、基準となるベクトルには最低含水率の地点のスペクトルを用いた。この含水率図で推計された含水率と現地から持ち帰った実際に測定した含水率とその差を表1に、その関係を図9に示す。 R^2 は0.8482となり、図9から、小型気球から撮影された可視画像とスペクトルパターン分析から導出された回帰式を用いればある程度の精度で含水率を推計することが出来ることが示された。

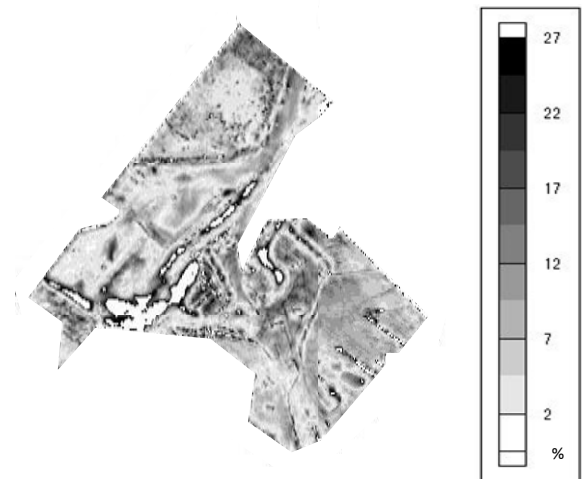


図8 覆土表面の含水率分布の推計結果

表1 覆土の含水率に関する実測値と推計値

地点名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
実測値①	11.1	14.9	54.4	21.1	16.5	10.0	12.8	10.2	12.1	7.7	8.0
推計値②	12.1	14.8	59.0	18.0	16.9	10.2	10.9	9.8	11.1	7.8	5.7
差(①-②)	-1.0	0.1	-4.6	3.1	-0.4	-0.2	1.9	0.4	1.0	-0.1	2.3
地点名	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
実測値①	7.6	4.6	6	4.2	10.3	40.8	4.3	7.7	4.4	2.1	5.7
推計値②	7.3	5.8	6	13.8	10.9	22.2	5.7	7.7	5.4	4.5	5.7
差(①-②)	0.3	-1.2	0.0	-9.6	-0.6	18.6	-1.4	0.0	-1.0	-2.4	0.0

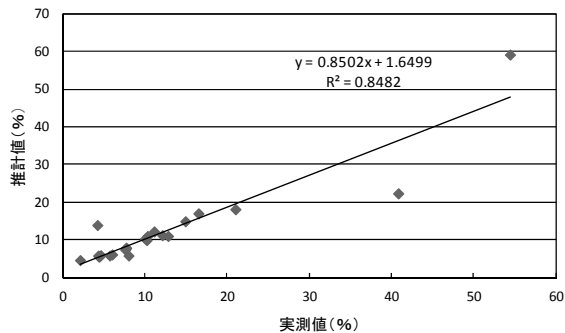


図9 覆土の含水率に関する実測値と推計値の比較

4. まとめ

本研究では、小型気球に通常の可視画像を撮影するカメラと、熱赤外線画像を撮影するサーモカメラを搭載することで、低高度熱赤外リモートセンシングのプラットフォームとして利用することを試みた。得られた結果をまとめると、以下のようになる。

- ・サーモカメラを搭載して上空から最終処分場を撮影し、可視画像、熱分布画像を取得できた。
- ・小型気球から撮影された熱分布画像から、覆土表面の温度を一定の精度で測定することができた。
- ・太陽光の影響が少ない早朝に撮影した埋立地の温度分布から、有機物の分解等により発熱していると考えられる場所を把握することができた。
- ・小型気球から撮影された可視画像とスペクトルパターン分析から導かれた回帰式を用いて覆土表層の含水率を一定の精度で推計することができた。
- ・小型気球はリモートセンシングによる最終処

分場モニタリングのために有効なプラットフォームであることを確認できた。

5. 今後の課題

本研究によって、小型気球をプラットフォームとしたサーモグラフィーを用いた低高度リモートセンシングの有用性を明らかにすることができた。

今後は、他の計測対象における適用性の確認を行い計測システムの精度をさらに高めていく予定である。また、最終処分場の安定化度の指標である発生ガスの把握についても取り組んでゆきたいと考えている。

参考文献

- 1) 石崎俊夫, 小宮哲平, 中山裕文, 島岡隆行, 久保市浩右, 眞鍋和俊, 大野博之 (2005): アジアメガシティの大規模廃棄物処分場における環境モニタリングのための現地植生調査. 土木学会環境システム研究論文集, Vol. 33, pp37-45
- 2) 小宮哲平, 石崎俊夫, 中山裕文, 島岡隆行 (2006): 大規模最終処分場安定化モニタリングにおけるNDVIの可能性に関する検討. 土木学会環境システム研究論文集, Vol. 34, pp423-431
- 3) 島岡隆行 (2008): 廃棄物管理におけるリモートセンシング技術の役割. 生活と環境, 53(1), pp46-52
- 4) 石崎俊夫, 島岡隆行, 中山裕文, 小宮哲平, 眞鍋和俊 (2004): 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, pp311-318
- 5) 作野裕司, ルイ ソチェー, 國井秀伸, 田中義和, 國貞栄二, 若松芳樹 (2009): 気球搭載ビデオカメラによる中海のアマモ場の植被推定. 水工学論文集, 53, pp1357-1362

Summary

A monitoring method using remote aerial sensing technology is suitable for a large-scale landfill site

since it is difficult to conduct ground-based observations efficiently for such a large area. In order to measure the temperature distribution of the landfill surface, the authors have developed a balloon monitoring system that can load a small thermal infrared remote sensing device. The authors attempted to conduct monitoring of landfill surface heat distribution at a final disposal site early in the morning to avoid the effect of heat increase due to the sun. Subsequently, spectral reflectance, thermal image, visible image, and temperature from a ground survey and remote sensing were compared. Results indicated

that the temperature of the cover soil placed over the landfilled waste was 22 ~ 23 °C. The area where the organic sludge was disposed of showed a slightly higher temperature compared to other areas. Subsequently, a regression equation was derived from spectral pattern analysis and moisture content contour was determined. The above results clearly show that thermal infrared remote sensing is effective as a method for implementing quick and efficient monitoring of a landfill surface and for the evaluation of the degree of stabilization of waste in landfill sites.