

# 低高度リモートセンシングによる 最終処分場モニタリングに関する研究

高山裕明<sup>1</sup>・宮原哲也<sup>2</sup>・中山裕文<sup>3</sup>・島岡隆行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 九州大学大学院工学府都市環境システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: takayama-h@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>2</sup>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 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: miyahara@jesc.or.jp

<sup>3</sup>正会員 九州大学大学院工学府環境社会部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: nakayama@doc.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>フェロー会員 九州大学大学院工学府環境社会部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: shimaoka@doc.kyushu-u.ac.jp

本論文では、気球に空撮用カメラおよびサーモカメラを搭載した低高度リモートセンシングシステムを用い、一般廃棄物最終処分場を対象とした覆土表面の温度分布や含水率分布のモニタリングを試みた。気球に搭載された撮影装置をラジコン送受信機で操作し、地上モニターで確認しながら熱赤外画像と可視画像撮影を行い、撮影された複数の画像を加工接合して空撮写真および覆土表層の温度分布画像を作成した。また、低高度リモートセンシングにより得られた熱画像、可視画像と、地上計測によって得られた覆土の温度、含水率、通気係数、分光反射スペクトル等を分析して得られた関係式を導出した。これにより、可視画像や熱画像を撮影することで、最終処分場覆土層の含水率分布を推計することが可能であることを示した。

**Key Words :** landfill site, balloon, remote sensing, cover soil, water content, thermal image

## 1. はじめに

最終処分場のモニタリングでは、埋立処分された廃棄物がどの程度安定化したかを把握することが重要である。廃棄物の安定化度を評価するための指標の一つとして、埋立廃棄物層内部における有機性廃棄物の分解や化学反応に伴い上昇した埋立層内部の温度を測定する方法がある。埋立地の内部温度は一般に 60 度前後になると言われており、分解により発生した埋立ガスが熱対流により輸送されることで、埋立廃棄物層内部において発熱して高温となっている場所から、地表部分へも熱が伝わってくることが考えられる。そのため、上空から最終処分場の覆土表面の温度分布を計測することで、内部の有機性廃棄物の分解状況を有る程度推測できる可能性がある。覆土の表面温度から内部の安定化状況を推定する上で重要となるのが、埋立ガスの移動に影響を及ぼす覆土の含水率や通気係数である。そのため、温度と同時に含水率や通気係数に関する情報を取得する必要がある。そこで、本研究では、最終処分場覆土の表面温度、含水率、通気係数の面的な分布に関するモニタリングを目的とした。

ここで、近年、気球を利用した空撮技術が目覚ましく進歩している。強風下でも安定する特殊形状の小型気球に搭載された撮影装置をラジコン送受信機で操作し、地上モニターで確認しながら被写体を撮影し送信するシステムが開発されている<sup>1)</sup>。このシステムは、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。滞空時間が長く、長時間の撮影も可能なため日射や気温変化に影響を受ける温度分布の撮影を時系列的に実施するモニタリングに適している。これまでは可視画像を撮影するカメラのみ搭載されていたが、本研究では、小型気球に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。

## 2. 低高度リモートセンシングによる最終処分場の可視画像および熱画像の取得

### (1) 調査対象最終処分場

本研究では福岡市にある中田埋立場を調査対象とした。

中田埋立場は、総面積 380,000 m<sup>2</sup>、埋立面積 180,000 m<sup>2</sup>、埋立容量 2,380,000t であり、準好気性の埋立構造となっている<sup>2)</sup>。主として焼却残渣、不燃性廃棄物の破碎残渣等が埋立処分されているが、汚泥や抜根した樹木の根等の有機物が処分されることもある。

## (2) 調査方法

### a) 小型気球による低高度リモートセンシング

中田埋立場における調査は、平成25年7月3日に実施した。太陽光による地表面の温度上昇による影響を避け、埋立地内部からの伝熱やガス輸送による地表面温度分布の状況を把握したかったので、調査は早朝の日の出前から直後にかけて実施した。サーモカメラを搭載した小型気球を対象地上空に上げ、装置から受信したデータを地上モニター（写真-1左）から確認しながら地上から操作し（写真-1右）、最終処分場の熱画像および可視画像の撮影を行った。空中からの観測手法を図-1に示す。今回用いたサーモカメラは、日本アビオニクス（株）社製のサーモショットF30である。写真-2に小型気球により上空200mから撮影した中田埋立場と地上における調査地点を示す。

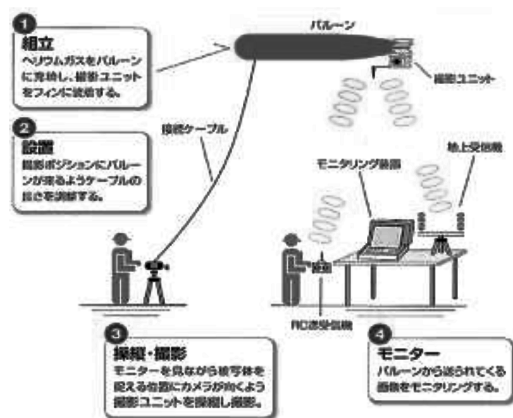


図-1 小型気球を用いた撮影の仕組み<sup>1)</sup>



写真-1 地上モニター（左）ラジコン操作（右）

### b) 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に、現地において覆土のサンプリングを実施した。

写真-3の地点A～Vは攪乱サンプル採取地点、地点F, P, Vは不攪乱サンプルの採取地点である。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、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。



写真-2 小型気球から撮影した中田埋立場と調査地点

### c) 温度、含水率、EC センサ埋設

覆土の表面情報と最終処分場内部の関連性を検討するためにセンサを埋設し地中温度、含水率および、EC（電気伝導度）を測定した。埋設箇所は写真-3の地点F, P, Vであり、各地点において地表面から深さ5cm、25cm、50cm、100cm（100cmは地点Vのみ）の位置にセンサを埋設した。

### d) 携帯型放射温度計による地表面温度測定

上空からのリモートセンシング計測の時間帯に合わせて、埋立地内の22地点において、放射温度計（SK-8940（株）佐藤計量機製作所）を用いて地表面温度を計測した。また、同時に計測地点の測位をGPSを用いて行った。

### (3) 調査結果

#### a) 可視画像、熱画像

小型気球より撮影した可視画像は写真-2 にすでに示した。小型気球よりサーモカメラによって撮影した熱画像を図-2 に示す。埋立地内の地表面温は、裸地部は、22～23℃であり、植生が確認できる個所は、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。



図-2 中田埋立場の地表面温度分布

#### b) 各地点の温度、含水率、通気係数

表-1に、地点A-Vにおいて地上測定した覆土の表面温度を及び攪乱サンプルの含水率を示す。同様に不攪乱サンプルの含水率、通気係数を表-2に示す。含水率は、2.1%～54.4%と場所によって大きく異なる値を示した。

覆土表面温度について、小型気球のサーモカメラを用いたリモートセンシングによって得られた値と、地上において携帯型放射温度計で測定した値を比較した結果、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(表-3)。このことから小型気球に搭載したサーモカメラを用いて覆土表面の温度がある程度の精度で測定が可能であることが示された。

表-1 各地点の表面温度と攪乱サンプルの含水率

地点名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
温度(℃)	20.8	20.2	20.3	20.9	20.5	22.8	20.5	21.1	22.0	20.9	21.8
含水率(%)	11.1	14.9	54.4	21.0	16.5	10.0	12.8	10.2	12.1	7.7	8.0
地点名	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
温度(℃)	21.0	21.0	22.0	22.6	19.8	18.8	21.6	20.5	21.2	22.2	18.7
含水率(%)	7.6	4.6	6.0	4.2	10.3	40.8	4.3	7.7	4.4	2.1	5.7

表-2 不攪乱サンプルの含水率及び通気係数

地点名	A			B	C	
含水率(%)	12.41	10.67	9.76	23.67	22.78	13.97
通気係数(cm/sec)	1.43	0.30	0.03	4.35	3.68	6.02
地点名	F			P	V	
含水率(%)	12.00	14.07	14.75	38.22	13.31	14.30
通気係数(cm/sec)	1.10	1.18	0.89	0.16	0.35	0.48

表-3 小型気球からと地上からの温度測定の比較

地点名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
上空計測温度①	22.6	22.4	20.9	22.4	21.4	22.6	21.6	22.1	22.4	22.3	22.3
地上計測温度②	20.8	20.2	20.3	20.9	20.5	22.8	20.5	21.1	22.0	20.9	21.8
差(①-②)	1.8	2.2	0.6	1.5	0.9	-0.2	1.1	1.0	0.4	1.4	0.5
地点名	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
上空計測温度①	22.0	21.8	24.2	22.9	20.2	22.6	22.1	21.8	22.3	23.0	22.5
地上計測温度②	21.0	21.0	22.0	22.6	19.8	18.8	21.6	20.5	21.2	22.2	18.7
差(①-②)	1.0	0.8	2.2	0.3	0.4	3.8	0.5	1.3	1.1	0.8	3.8

### 3. 可視画像からの含水率分布の推定

#### (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-3)。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 $\theta$ を式(1)により求めた。

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|} \right) \quad \cdots (1)$$

ここでベクトル $\vec{a}$ は基準ベクトルであり、ベクトル $\vec{b}$ 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 $\theta$ 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 $\theta$ と、同サンプルの含水率との関係を図-4に示す。 $\theta$ と含水率の関係求めた結果、 $R^2$ は0.7221となり、相関が認められ、次式(2)を得た。

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

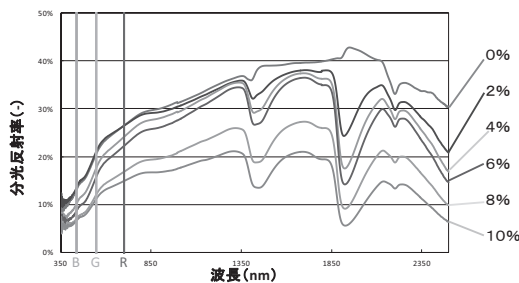


図-3 含水率別にみた覆土の分光反射スペクトル

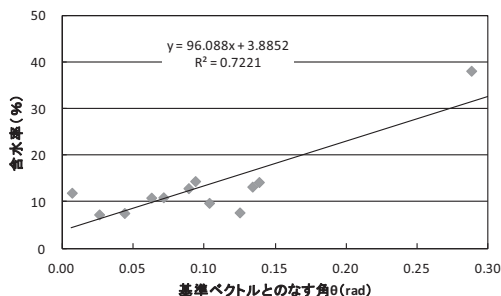


図-4 基準ベクトルとのなす角 $\theta$ と含水率

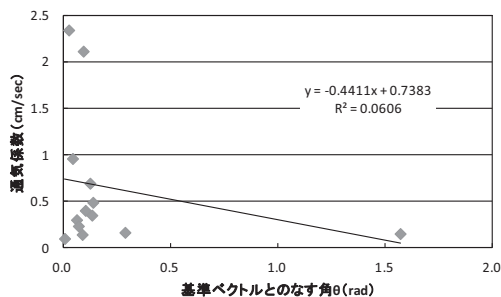


図-5 基準ベクトルとのなす角 $\theta$ と通気係数

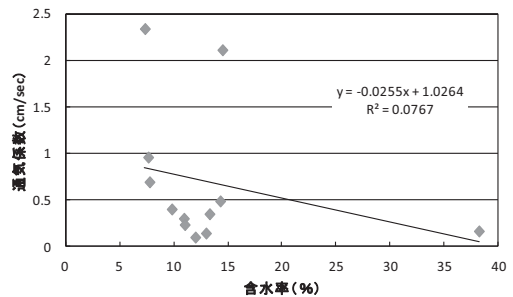


図-6 含水率と通気係数

図-5に基準ベクトルとのなす角 $\theta$ と通気係数、および図-6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 $\theta$ 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。

## (2) 含水率分布

中田埋立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 $\theta$ を式(2)に代入することにより、覆土表面の含水率分布を作成した(図-7)。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で実際に測定した含水率とその差を表-4に、その関係を図-8に示す。図-8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。



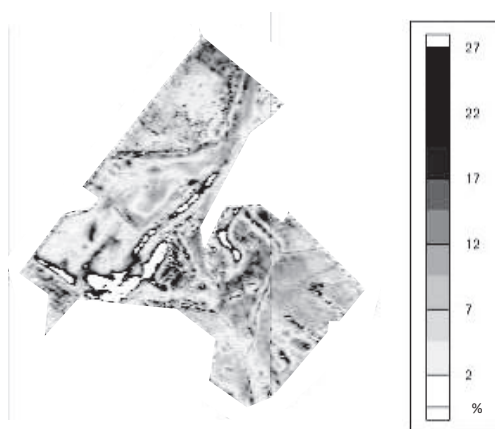


図-7 覆土表面の含水率分布の推計結果

表-4 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	21.0	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	-4.5	3.0	-0.4	-0.1	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	6.0	4.2	10.3	40.8	4.3	7.7	4.4	2.1	5.7
推計値②	7.3	5.8	6.0	13.8	10.9	22.2	5.7	7.7	5.4	4.5	5.7
差(①-②)	0.2	-1.1	0.0	-9.6	-0.5	18.7	-1.4	0.1	-1.0	-2.5	0.0

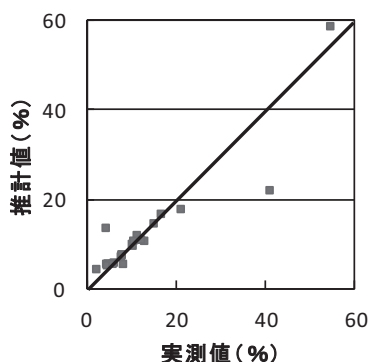


図-8 覆土の含水率に関する実測値と推計値の比較図

## 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、低高度熱赤外線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、以下ようになる。

- ・ 小型気球に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した。
- ・ 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。

## 謝辞：

本研究は、一般財団法人日本環境衛生センター平成25年度（第24回）研究奨励金制度の支援を受けて実施した研究成果の一部である。また、本研究の実施にあたり、MHIプラントエンジニアリング株式会社および株式会社QPHOTOの関係各位には、サーモカメラを搭載した小型気球の製作および撮影において多大なるご協力をいただいた。最終処分場における計測には、福岡市西部埋立場の皆様にご協力をいただいた。この場をお借りしてお礼申し上げます。

## 参考文献：

- 1) MHI プラントエンジニアリング株式会社 HP,  
<http://www.mhipec.co.jp/index.html>
- 2) 福岡市環境局：西部（中田）埋立場パンフレット

(2013. 7. 19 受付)

## MONITORING OF COVER SOIL IN A LANDFILL SITE BY USING LOW ALTITUDE REMOTE SENSING

Hiroaki TAKAYAMA, Tetsuya MIYAHARA, Hirofumi NAKAYAMA, and Takayuki SHIMAOKA

Nowadays, monitoring system in a landfill site by remote sensing is very important, because it can be applied to evaluate the stabilization and to assess the risk of fire in a landfill site. From the previous study, in monitoring a landfill site, they divided the whole landfill area into smaller areas and still use the human power to take the data of monitoring. This method was not effective and efficient. Our aim in this research was to monitor the cover soil in Fukuoka City landfill site by using a balloon as a low altitude remote sensing. The advantage of this monitoring system is no consideration about the cycle of monitoring, such as satellite and air plane. Our methodology in this research: the photo was taken by camera which was controlled from the ground by RC with monitor on the balloon. Spectral reflectance, thermal image, visible image, and temperature from ground survey and remote sensing were compared. Subsequently, regression equation was derived from spectral pattern analysis and water content contour was made. From this research, the usefulness of monitoring by using balloon as remote sensing monitoring system in a landfill site was proved.