

小型気球をプラットフォームとした低高度リモートセンシングによる 埋立地からの発生ガス推計に関する研究

Low-Altitude Remote Sensing for Estimates of Methane Flux at Landfill Sites

宮原 哲也*、島岡 隆行**、中山 裕文**、八村 智明*、永岡 修一*

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

【要約】

本研究は、埋立地の安定化を評価するにあたって、その評価指標となる埋立地内温度およびメタンガスに着目し、主に現地調査に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について検討を行った。その結果、計測エリア面積100m² (10m×10m) の埋立地表面の温度分布を10分程度で計測できた。また、小型気球に搭載したサーモグラフィーから得られた熱画像を用いて、埋立地表面温度とメタンフラックスとの相関関係を検討し、埋立地におけるメタンフラックスの推計を試みた結果、本研究で実施した計測条件において計測高度25m、50mであればある程度の精度でメタンフラックスを推計できることが分かった。

キーワード：最終処分場、リモートセンシング、サーモグラフィー、メタンフラックス

1. はじめに

最終処分場における廃棄物の安定化度を評価するための指標として、埋立層内温度のほかに発生ガスがあげられる¹⁾。その中でもメタンは温室効果ガスのひとつであり、廃棄物埋立地は主要な人為的発生源の一つでもある。埋立地からのメタン放出量の推計手法としては、これまで用いられてきた地表面にお椀型のチャンバーを被せてその中の濃度を計測する閉鎖式チャンバー法や、近年では近赤外波長可変半導体レーザー吸収分光法

(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy : TDL-AS) 等の手法が登場し、計測手法は進化しつつある (US EPA,2006)。しかしながら計測方法にはそれぞれ解決すべき課題が存在する。埋立地の多数のポイントにおいて計測が必要となる閉鎖式

チャンバーは多大な時間と労力が必要であり、また、レーザーメタン検出器やTDL-ASでの計測においても、地表の凹凸や植生による計測阻害や、風の影響を受けやすいため広大な埋立地を一度にカバーすることは不可能である (Gregory et.al.2008)。

そこで、埋立てられた廃棄物の分解により発生したメタンガスが熱対流や濃度拡散により地表面からフラックスとして放出され、ホットスポットとして現れることに着目した。このホットスポットの温度とメタンフラックスとの相関を検討することで埋立地におけるメタンフラックスを推計できる可能性がある²⁾。本研究では、小型気球に搭載したサーモグラフィーから得られた熱画像を用いて、メタンフラックスとの相関関係を検討し、埋立地におけるメタンフラックスの推計を試みた。

2. 計測対象埋立地と計測方法

2.1 計測対象の廃棄物埋立地と計測区画

計測を行った埋立地は、中国上海市崇明県にあり、その概要は表.1、図.1のとおりである。計測対象とした埋立地第一区の埋立面積は 3ha であり、

* 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

埋立容積は76万m³である。

埋立構造は、底部にシートによる遮水および浸出水集水管を設置した改良型衛生埋立構造である。埋立地には主に厨芥類を含む生活系ごみが中間処理を経ずに直接埋め立てられており、ガス抜き管は設置されておらず、更に、埋立物上面には粘土質の覆土が層厚1m程度施されている。この構造により、埋立層内に大気が浸透しにくく、埋立層内は、嫌氣的な状態になっていることが推察される。



表.1 計測対象埋立地の概要

施設名	崇明生活ごみ最終処分場
所在地	中国上海市崇明県
埋立構造	改良型衛生埋立
埋立面積	3ha(第一区)
埋立容量	267万m ³ (第一区は76万m ³)
埋立開始	2005年
処分量	300t/日

計測区画は、崇明生活ごみ最終処分場の第一区北側に10m×10mの正方形の計測区画を選定した(図.1,2)。選定した計測区画内は植生の影響を排除するために伐採し、25区画に等分割した(図.3)。また、区画内に存在しているクラック(C1~C9)の位置を図.3に長さや形状を表.2にまとめた。

図.2 選定した計測区画(10m×10m)の近景

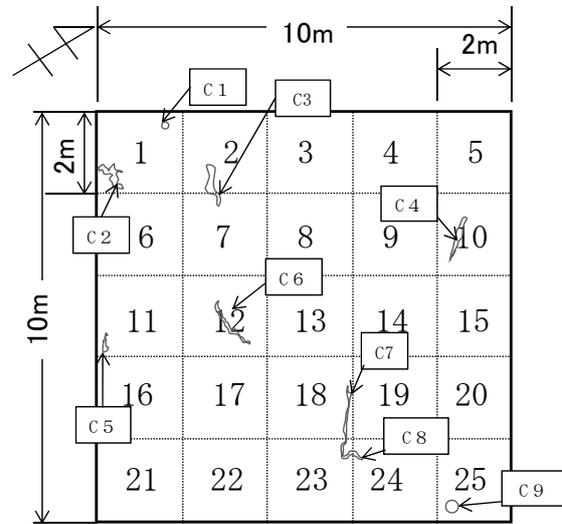


図.3 埋立地表面に設置した計測区画とクラック位置

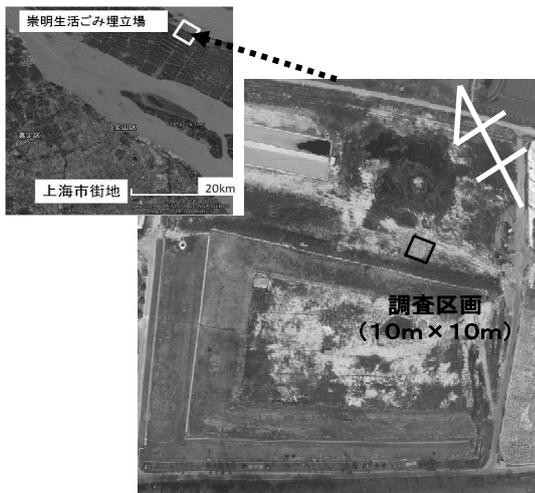


図.1 崇明生活ごみ最終処分場位置

表.2 計測区画内に存在しているクラックの長さや形状

クラックNo	長さ(cm)	幅(cm)	形状
C1	10	10	円形
C2	50	3	筋状
C3	50	3	筋状
C4	120	2	筋状
C5	20	4	筋状
C6	200	5	筋状
C7	150	5	筋状
C8	100	4	筋状
C9	7	10	円形

2.2 小型気球を用いた低高度リモートセンシングによる埋立地表面温度計測の方法

(1) 小型気球を用いた低高度リモートセンシングシステムの概要

図.4に示すように、小型気球は、全長約6m、最大径約0.6mの円筒形である。この気球にヘリウムガスを充填し、計測機器としてサーモグラフィーを搭載した。サーモグラフィーを搭載したユニットは、無線により地上モニターでサーモグラフィーの計測状況をリアルタイムで確認することができる。また、地上からの無線操作によりサーモグラフィーユニットを操作することで、地上でモニターを確認しながら任意の角度に調整し、計測範囲を決定、計測を行うことが可能である(図.5)。

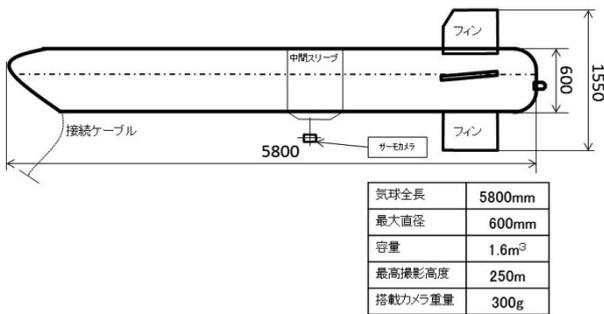


図.4 小型気球の詳細

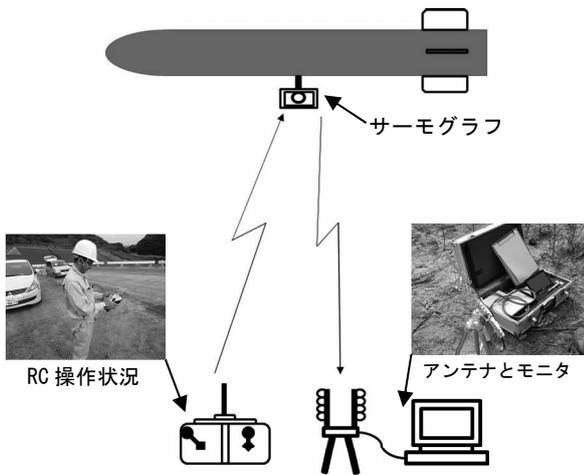


図.5 計測システムの概要

(2) 小型気球に搭載したサーモグラフィーの概要

小型気球には、サーモグラフィー(サーモショットF30、日本アビオニクス(株))を搭載した。サーモグラフィーの仕様は、表.3に示すとおりであり、計測波長は8~14μmである。図.6にサーモグラフィーのユニットへの搭載状況を示す。

表.3 サーモグラフィーユニットの仕様

検出器	2次元非冷却センサ
測定波長	8~14μm
測定温度範囲	-20~100°C
温度分解能	0.1°Cat30°C
測定視野角	28°×21°
空間分解能	3.1mrad



図.6 サーモグラフィーの搭載状況

(3) 計測方法と計測条件

サーモグラフィーによる計測は、小型気球計測ユニットを所定の高度まで浮上させて係留した。サーモグラフィーの高度はレーザー距離計によって確認した。係留された状態で地上モニターの映像により計測区画を確認し、埋立地表面の温度分布計測を行った(図.7)。なお、計測高度によってサーモグラフィーの分解能が変わることからその違いを確認するために、地上から25m(分解能7.8cm)、50m(分解能15.6cm)、100m(分解能:31.2cm)の3段階で実施した。計測の時間帯は、埋立地表面温度への影響が大きい日射量が少ない早朝の午前6時頃を選定した。なお、計測当日は、天候は晴天

であり、気温が18℃程度であった。

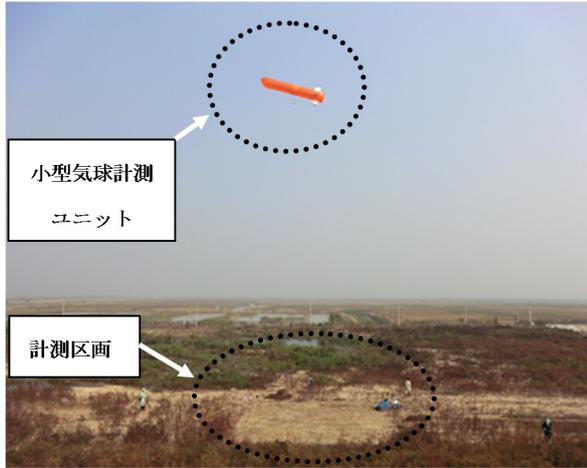


図.7 サーモグラフィーによる埋立地表面（計測区画）の計測状況

3. 計測結果

3.1 埋立地表面温度の計測結果

サーモグラフィーによる計測区画の埋立地表面温度の計測結果を図.8に示す。計測区画における温度は概ね10～16℃の範囲内であった。埋立地表面の温度の分布は均一ではなく、区画東側（区画14、15、19、20、24、25）の温度は、区画全体の平均値（12.1℃）よりも1℃程度高かった。また、スポット状に温度が高い場所が認められた。なお、計測に要した時間は、今回の計測区画程度（10m×10m）であれば10分程度であった。

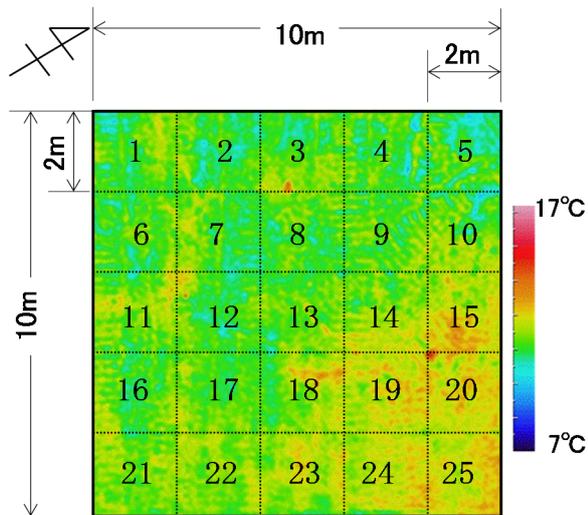


図.8 サーモグラフィーによる埋立地表面の計測結果（各区画の寸法は2m×2mの正方形である。）

3.2 埋立地表面温度分布を用いた廃棄物埋立地のメタンフラックスの計測結果

(1) 計測方法

a) メタンフラックスの計測方法

計測区画はサーモグラフィー計測と同一区画とし、各区画の中央部を代表として計測を行った。

メタンフラックスの計測には静的チャンバー法を用いた。図.9に示すように、チャンバー（内寸：W480mm×D640mm×H580mm）内のメタン濃度をレーザーメタン計（東京ガスエンジニアリング（株）製 LMD-miniG）を用いて計測し、次式(1)を用いてメタンフラックスを算出した。

$$F_c = \rho \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t} \cdot \frac{273}{(273+T)} \cdot 10^{-6} \quad \dots(1)$$

ここで F_c :チャンバー内のメタンフラックス ($g/m^2 \cdot hr$)、 ρ :メタンガスの密度 (g/m^3)、 V :チャンバーの体積 (m^3)、 A :チャンバーの底面積 (m^2)、 $\Delta C/\Delta t$:経過時間濃度変化 ($ppmv/hr$)、 T :チャンバー内の温度 ($^{\circ}C$)である。また、計測範囲内に存在したクラック（表.2）についても個別にクラックから湧出するメタンガス濃度を計測した。埋立地表面に存在したクラックの位置を図.3に示す。なお、図.3中における数字1～25は、区画の番号、C1～C9はクラックの番号である。メタンフラックスの計測と同時に埋立地地表面下50～60cm深度のメタンガス濃度も計測した。

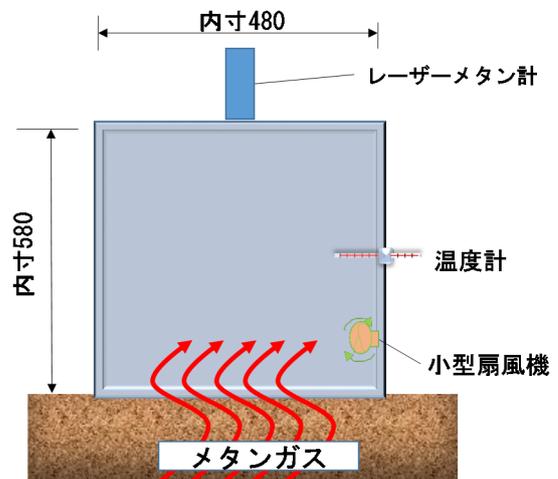


図.9 チャンバー法の概要

b) クラック内温度の計測方法

高濃度のメタンガス発生が確認されたクラックの表層から深さ5cm程度に温度計を挿入して、連続計測を行った(図. 10)。なお、ブランクとしてクラックから1m程度離れたメタンガスの発生が認められない地点の埋立地表面温度も同時に計測した。



図. 10 クラック内温度計測地点

(2) 計測結果

a) メタンフラックス

計測区画中央の埋立地表面および、クラックを有する場所のメタンフラックスとその埋立地表面下50cm~60cm深度のメタンガス濃度を表. 4に示す。

各区画 (1~25) のメタンフラックスは0~17.64g/m²/hrであり、区画によって値のばらつきが認められた。また、クラック部 (C1~C9) のメタンフラックスは1.12~34.85g/m²/hrであり、区画の計測結果と同様にクラックによって値のばらつきが認められた。埋立地表面下50~60cmのメタン濃度は0.10~15.50%であった。各区画において計測した埋立地表面下のメタン濃度とメタンフラックスの関係を図. 11に示す。両者の回帰式の決定係数は0.06であり、相関関係は認められなかった。

表. 4 計測区画、クラック別のメタンフラックスおよび地中メタンガス濃度

区画 No.	フラックス (g/m ² /hr)	地中メタン濃度 (%)	区画 No.	フラックス (g/m ² /hr)	地中メタン濃度 (%)
1	7.29	0.20	18	5.66	2.00
2	0.16	10.20	19	9.72	7.60
3	0.50	0.30	20	2.22	3.00
4	0.10	4.00	21	10.88	9.80
5	0.05	0.10	22	0.05	1.00
6	0.09	2.00	23	3.74	0.10
7	17.64	10.70	24	0.33	3.70
8	0.21	3.90	25	0.53	22.00
9	0.67	4.30	C1	15.38	-
10	0.26	3.60	C2	16.67	-
11	6.81	15.50	C3	34.85	-
12	3.79	7.30	C4	4.24	-
13	4.05	0.10	C5	6.64	-
14	0.24	0.10	C6	5.66	-
15	0.31	4.60	C7	17.69	-
16	0.00	3.60	C8	1.12	-
17	0.71	12.90	C9	9.91	-

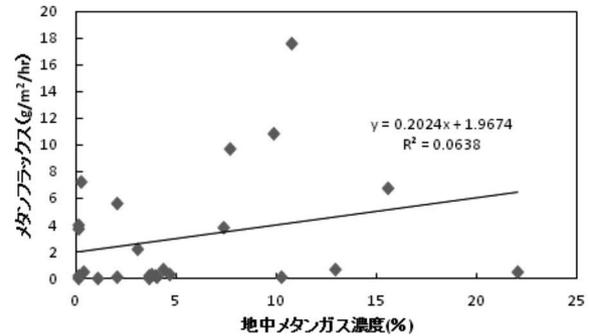


図. 11 メタンフラックスと埋立地中メタンガス濃度の関係

b) クラック内温度

晴天の条件において、高濃度のメタンガス放出が確認されたクラック (図. 12) 内部とメタン放出がない埋立地表面付近温度の経時変化を図. 13に示す。日没後(18:00頃)から明け方(7:00頃)の間におけるクラック内部の温度は17.3~20.1℃、メタン放出がない埋立地表近くの温度は12.1~17.4℃程度と3℃程度クラック内部の温度が高いことが分かる。しかし、6:30頃から地表面温度が上昇し始め、8:00頃にはクラック内部温度とメタン放出が

ない埋立地表面温度が逆転する現象が認められた。高濃度のメタンガス放出が確認されたクラックは直下に数cm程度の空間を有しており、これが埋立層内の有機物の分解によって発生した熱やガスが大気放散される間に滞留しているものと推察される。この空間における熱とガスの滞留現象が夜間時におけるクラック内部温度がメタンの放出がない埋立地表面付近の温度より高くなったことが原因であると考えられる。また、6:00頃の日の出後の温度の逆転現象については、クラック端部が底のように盛り上がった形状になっていることから日射の方向によりクラックの内部が日陰になったため、平坦部と比較して日射の影響を受けにくかったことが原因であると推察される。これらの現象から、クラックは埋立層内の有機物の分解によって発生した熱とメタンガスの大気への放熱・放散口となっているが、その放熱の影響は日射の影響よりも小さく、また、地表面の形状にも影響を受けることが分かる。



図. 12 メタン放出が確認されたクラック（中央部に温度センサーを挿入）

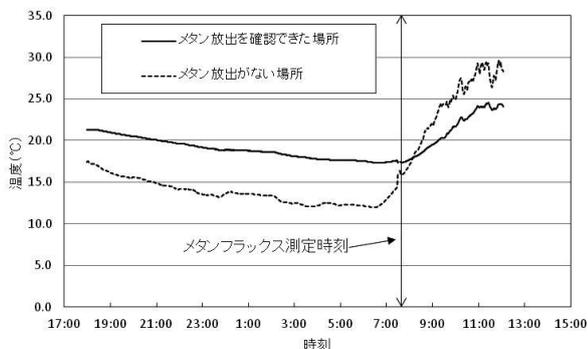


図. 13 メタン放出の有無と埋立地表面付近温度の経時変化の比較

4. 埋立地からのメタン放出量の推計

4.1 熱画像の温度とメタンフラックスの関係

小型気球により高度25mから撮影した熱画像から得られた埋立地表面温度と、チャンパー法によって計測した埋立地表面に設置した各区画のメタンフラックスとの関係を図. 14に示す。なお、回帰式は、次式 (2) のとおりであり、決定係数は0.45となった。

$$F_t = 9.66t - 112.97 \quad \dots(2)$$

ここで、 F_t :推計されたメタンフラックス($\text{g}/\text{m}^2/\text{hr}$)、 t :地表面温度($^{\circ}\text{C}$)である。

続いて高度50m、100mから撮影された画像を用いて同様の解析を行った結果を図. 15、16に示す。計測高度50m、100mにおける回帰式の決定係数はそれぞれ0.25、0.12となった。

これらの結果より、今回の計測時の状況（計測対象が裸地であり・天候が晴天であり・早朝の気温が 18°C 前後である条件）において、本研究で使用したサーモグラフィーの分解能では、計測高度25m、50mであれば、ある程度の精度でメタンフラックスを推計することが可能であることが分かった。

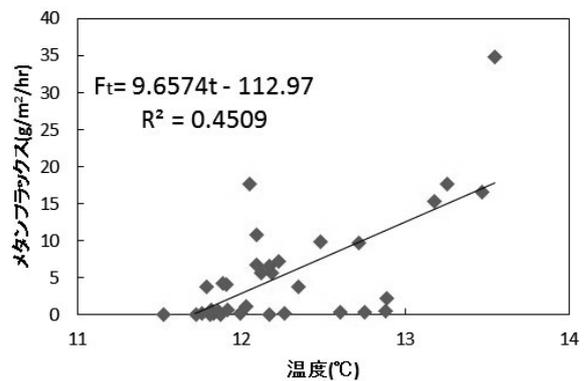


図. 14 メタンフラックスと地表面温度（計測高度25m）

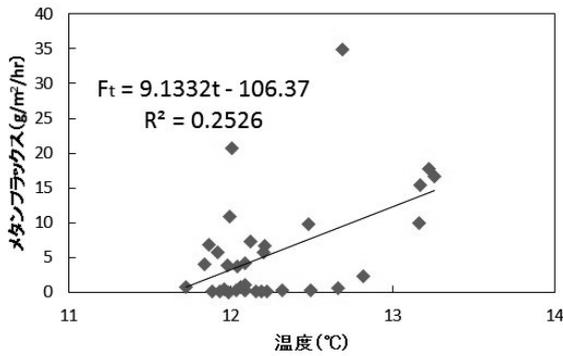


図. 15 メタンフラックスと地表面温度（計測高度50m）

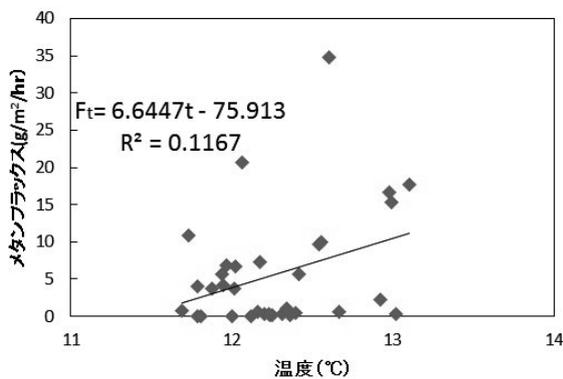


図. 16 メタンフラックスと地表面温度（計測高度100m）

5. まとめと今後の検討課題

本研究では、小型気球に搭載したサーモグラフィから得られた熱画像を用いて、メタンフラックスとの相関関係を検討し、埋立地におけるメタンフラックスの推計を試みた。

得られた結果と今後の課題を以下にまとめる。

- ① 小型気球をプラットフォームとしたサーモグラフィ計測システムを用いて、計測エリア面積100m²（10m×10m）の埋立地表面の温度分布を10分程度で計測できた。
- ② 今回の計測時の状況（計測対象が裸地であり・天候が晴天であり・早朝の気温が18°C前後である条件）において、本研究で使用したサーモグラフィの分解能では、計測高度25

m、50mであれば、ある程度の精度でメタンフラックスを推計することが可能であることが分かった。

- ③ 埋立物の安定化に伴って埋立地表面に現れる埋立地内温度とメタンガスは、常に一定の関係ではなく、気温・気圧などの気象条件の変化や裸地・植生やクラックの有無などの埋立地表面の状況の違いによっても変動することが考えられることから、狭い範囲の埋立地覆土表面温度とメタンフラックスを実測し、その結果から得られた回帰式と小型気球から計測した計測対象全域の熱画像を用いることによって迅速かつより高い精度でメタンフラックスが推計できると考えられる。

今後は、これらの点を踏まえて、幅広い条件下で適応できる式を構築するために、気象条件や埋立地表面の状況による影響などの検討を行いたい。

謝辞

本研究をすすめるにあたり、MH I 船海エンジニアリング株式会社の山下修一氏、吉田誠氏には小型気球での計測について技術的な指導・支援をいただきました。また、同済大学環境科学と工程学院の柴晓利先生と学生の皆さまには現地処分場調査の調整・手配・技術指導と助力をいただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 廃棄物資源循環学会学会(2002)：廃棄物最終処分場廃止基準の調査評価方法。
- 2) 山田正人、小野雄策、長森正尚、高橋伴幸(2001)：第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集、埋立地における地温とメタンフラックスの関係、pp. 1026-1027。

Summary

To maintain landfill sites, it is important to monitor the landfilled waste and to evaluate the degree of waste stabilization. One useful index for such an evaluation is

the generated methane gas of the waste layer at the landfill site. In this way, it is possible to grasp the spatial distribution of the organic decomposition activity at the site. In this study, authors developed a small thermographic device mounted on a balloon monitoring system to monitor the surface temperature of landfill sites. It is possible to estimate the methane flux of the landfill sites using the thermal image captured from the sky by the small balloon. The small balloon is an effective platform to monitor landfill sites via remote sensing.