

〈特集〉

廃棄物処分場からの温室効果ガスの測定と維持管理への応用

遠藤和人¹⁾, 山田正人²⁾

¹⁾ 独国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2 E-mail: k-endo@nies.go.jp)

²⁾ 独国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2 E-mail: myamada@nies.go.jp)

概要

温室効果ガス放出量が比較的小さい我が国の最終処分場に適用可能な測定手法を示した。処分場から温室効果ガスの発生量は空間的に不均一であり、最初に、地表面の温度やメタンカラム濃度を用いて発生量の大きい領域（ホットスポット）を検索することが重要である。地表面ガスフラックスを測定する閉鎖式チャンバー法は、日本のような焼却灰主体でガス発生量が小さい処分場を対象にした地表面フラックス測定には有効であるが、ガス発生量が大きい場合、測定面積に対するチャンバーの容積を大きくし、測定時間を短くして、内圧上昇による測定誤差を防ぐ必要がある。上部を密閉した場内観測井を用いたガス放出量の測定法は、流量を計測する必要が無く、数 mL/min 以下のごく小さいガス放出量を測定できることが特徴であり、定点観測により、処分場からの温室効果ガス発生量の増加と減衰、すなわち埋立廃棄物の安定化の進行度を捉える。

キーワード：廃棄物処分場、温室効果ガス、現地調査、観測井戸、地表面フラックス

原稿受付 2010.5.21

EICA: 15(1) 24-27

1. はじめに

日本の2008年度の温室効果ガス排出量のうち、廃棄物分野が占める割合は1.6%で2,005万トン（CO₂換算）であり、この廃棄物分野からの排出量のうち、メタンを排出する最終処分場の寄与は17.9%と報告されている¹⁾。埋立処分場からの排出量は、IPCCガイドライン²⁾に従って、算定対象年度内に生物分解される廃棄物量に生物分解された廃棄物からのメタンの生成率を乗じ、さらに埋立構造が準好気性や嫌気性であること等を考慮して算定している。しかしながら、実際の処分場からのメタン排出量は、埋立地の形状や埋め立ての方法、処分場の深さ等の影響も強く受けている。最近、クリーン開発メカニズム（CDM）プロジェクト等で同様の手法でメタン発生量を事前に推計する事例が多いが、その精度が低いことが問題となっている³⁾。この問題の解決には、算定方法を現場観測により、排出量のデータを蓄積していくことが重要である。

最終処分場からの温室効果ガスは、主にガス抜き管と地表面（最終覆土表面）から放出される。ガス抜き管とは管理型最終処分場や一般廃棄物再処分場に鉛直方向に設置され、廃棄物層中から発生するガスを大気へと逃がす役割を担っている設備である。最終処分場から排出される温室効果ガスは埋立地ガスと呼ばれ、埋立廃棄物中に含まれる有機物が安定化してゆく過程での分解代謝産物であり、処分場の運営において、維持管理の終了を判断する廃止基準において必須のモニタリング項目となっている。ガス抜き管からの発生量

の計測には、熱線風速計や石鹸膜流量計などを用いる手法が提案されているが、生ごみではなく焼却灰主体の処分場では、ガス流速が著しく小さく、水蒸気が多量に含まれていることから、どちらも有効な手段であるとはいえない。そのため、送気式（フォースド）チャンバー法⁴⁾を用いる方法、レジャーサーを用いて流量を測定する方法⁵⁾が提案されている。地表面から放出されるガスの測定には、閉鎖式チャンバー法を用いた測定法⁶⁾がよく用いられる。これは、湿地帯や農地などから放出されるメタン等を測定するために古くから用いられている手法である。これは地表面直上に閉鎖空間を作り、そこに溜まるメタン等のガス濃度の時間に対する上昇率を求め、フラックスに換算する。ガス抜き管と地表面を含めた処分場全体からの温室効果ガス放出量を測定する手法には、フラクスタワーを用いた手法⁷⁾やトレーサーガスを用いた手法⁸⁾などがある。これら手法を処分場に適用する際には、天候や地形などの影響の受けやすさ、労力やコスト等の点で一長一短がある⁷⁾。

本稿では、温室効果ガスの放出量が小さい我が国の処分場に適した簡便な測定手法として、処分場内に設置された密閉式の観測井戸や閉鎖式チャンバーを用いて温室効果ガス放出量を測定する手法とその留意点について述べる。

2. 処分場ガス放出点の探索

最終処分場では、単一種類の廃棄物を受け入れるこ

とは珍しく、多くの処分場では数種類の許可品目に該当する廃棄物を受け入れて埋め立てを実施している。また、サンドイッチセル埋立工法などに代表されるように、一日ごとに埋立区画を決め、一日の埋立作業が終了すると即日覆土と呼ばれる土を数十センチ程度被せる作業が行われる。また、廃棄物の種類や十数年に渡る埋立期間で有機物量や分解速度なども変化し、結果として極めて不均一な埋立地盤が形成させることになる。これが、温室効果ガス放出量の時空間的な不均一性の一因となり、特に処分場内の近接した位置でもガス放出量は大きく異なる。したがって、ある最終処分場において代表性がある、または全体のガス放出量を測定するためには、等間隔メッシュによる測定点を設けるだけではなく、ガス放出量の多い地点を探す作業を行わなければならない。

処分場内部は微生物分解による代謝熱等により一般的に気温よりも温度が高く、また、土壌中のメタン酸化細菌による代謝熱のため、ガスの放出が大きい領域の地温は、その他の領域よりも高いことが知られている^{9,10)}。したがって、ガス放出量の多い地点は、温度計や赤外線式サーモグラフィを用いて処分場表面の温度をくまなく踏査することによって特定することができる^{7,9)}。ただし、地表面温度は日射や植生等の影響を受けるため、地温が低い夜間から夜明けにかけて踏査する必要がある、草本が繁茂している場所や夏期に特定しにくい。また、オープンパス型のレーザーメタン検出器（東京ガスエンジニアリング社製、以下LMDとする）を用いて処分場表面付近のメタンカラム濃度を踏査する手法でもメタン放出量の大きい地点を特定することが可能である^{11,12)}。

こうして特定されたガスの放出量が大きい地点は、ホットスポットと呼ばれ、覆土の透過性が良いか、有機物分解活性もしくは含有率の高い廃棄物が直下に埋め立てられていることを示しており、最終処分場の長期的なガス放出挙動を監視する上で重要な地点である。また、ガス放出量が大きい地点の特定は、処分場の土地利用による火災や爆発等の事故対策においても重要である。このような踏査によって得られるホットスポットの数は、処分場によって異なり、1 haあたり数カ所から数十カ所に至ることもある。処分場（表面）からの温室効果ガスの全放出量は、等間隔メッシュによる地点にホットスポットを含めて測定した等フラックス線図を描いて求める¹⁰⁾。長期観測する地点を選定する場合は、多数存在するホットスポットから、地形や埋立年代などの観点から数地点を選択して、内部浸透水やガス濃度、温度等のモニタリングを行う場内観測井戸（Fig. 1）を設置する¹³⁾。

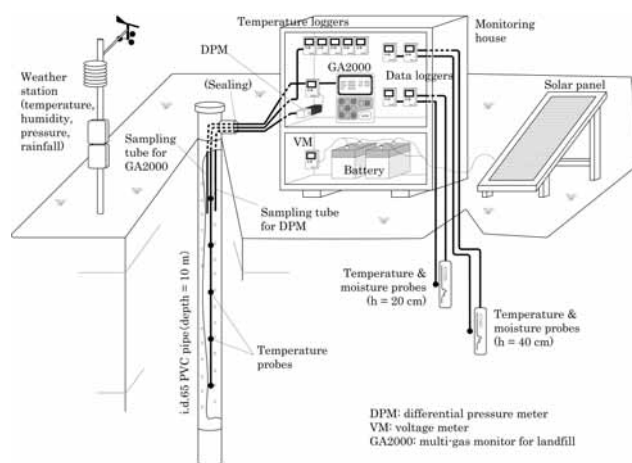


Fig. 1 Monitoring well system in landfill site

3. 地表面フラックス測定

地表面ガスフラックスは、Photo 1 に示すような閉鎖式チャンバーを用いて測定する。著者らは、桶式のチャンバーを地表面に被せて適当な時間間隔毎にガスをサンプリングする方法と、カラム状のチャンバーを用いてLMDの測定値を連続的に記録する手法¹⁴⁾の二種類を採用している。どちらもフラックス評価の原理は同じであり、Fig. 2 に示すように経過時間と測定値をプロットしてその傾きを求めることで地表面ガスフラックスを算出する。

閉鎖式チャンバーは、桶もしくはカラム中に放出されてくる埋立地ガスを蓄積して測定することから、放出量が過度に大きい場合に、チャンバー内の圧力が上昇し、地表面から放出されるガスがチャンバー内に入らず、チャンバーの外へと迂回して大気中へと放出されることにより、測定された放出量が実際の放出量よりも小さく見積もられる恐れがある。温室効果ガス放出量の測定値の信頼性を示すためには、チャンバー法の測定誤差の要因を把握する必要がある。ガス発生圧力がチャンバー内で測定される処分場ガス濃度に及ぼす影響を数値計算した結果と実測値を Fig. 3 に示す¹⁵⁾。



(a) Tub type chamber

(b) LMD column chamber

Photo 1 The closed chamber method for landfill gases flux measurement from the surface

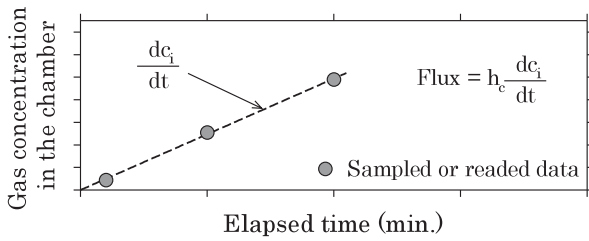


Fig. 2 Flux calculation method of the closed chamber

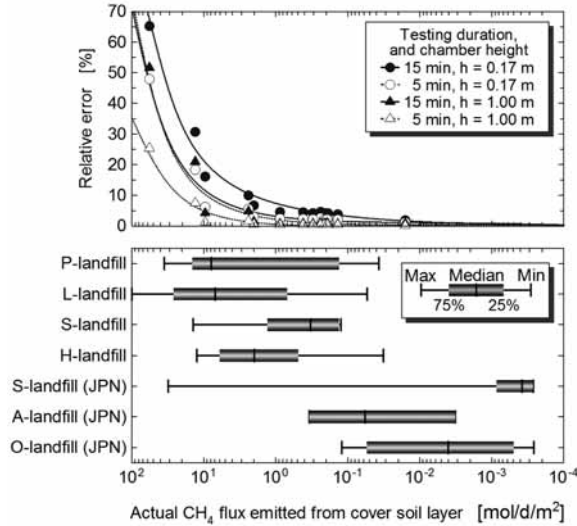


Fig. 3 Monitored and calculated surface gas flux

下図は東南アジアと日本の処分場において閉鎖式チャンバー法を用いて測定された地表面フラックスの実測値分布である。上図は、ガス発生圧力やチャンバーの幾何条件をパラメトリックに変化させて得られた数値計算の結果である。なお、メタン、二酸化炭素、酸素、窒素の4成分ステファン・マクスウェル相互拡散方程式を考慮したガス1相の密度依存流を考慮した浸透流方程式について、COMSOLによって数値解を求めた。結果として、測定対象となる地表面ガスフラックスが $10^{-1} \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 以下であれば、ガス発生圧力による誤差は十分に小さいが、 $10^{-1} \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 以上の値になると、測定誤差が無視できなくなる。また、この誤差は測定時間経過に伴うチャンバー内圧の上昇によって生ずるから、地表面フラックスが大きいと判断されるような処分場では、チャンバーの高さを高く、すなわち、測定面積に対する容積を大きくしたり、測定時間を短くしたりすることによって誤差を抑制することが可能である。以上は、日本のような焼却灰主体でガス発生量が小さい処分場を対象にした地表面フラックス測定には閉鎖式チャンバー法は有効であるが、他国のように生ごみや有機汚泥を無処理で埋め立てている処分場においては、測定条件によってガスフラックス量を30%程度小さく見積もる可能性があることを示している。

4. 場内観測井戸を用いたガス発生量測定

先述した Fig. 1 に示す廃棄物最終処分場内観測井戸は、井戸上部を常時閉鎖した構造となっている。これは、大気に希釈されない処分場ガスを測定し、気温の影響を受けない地中温度を測定し、また外気の影響を受けない保有水を採取するためである。

この観測井戸を用いて、井戸に集まってくる処分場ガス量を測定する手法を Fig. 4 に示す。常時閉鎖されている井戸上部を一時的に解放し、ブローアやファン等を用いて井戸内部のガスを大気と入れ替える。このとき、井戸内深部の酸素濃度を計測して大気と同程度であることを確認する。次に、井戸上部を閉鎖し、処分場ガスポータブルモニターである GA2000 (Geotechnical Instruments 社製) などを用いて数時間毎に井戸内部のメタン、二酸化炭素および酸素濃度をモニタリングする。初期に大気と同程度となっていた井戸内部は、埋立地ガスが発生するにつれ、メタンと二酸化炭素濃度が徐々に上昇していく。時間に対する濃度の上昇率を求めることによって、閉鎖式チャンバー法と同様の考え方で井戸1本当たりのガス放出量を得ることができる¹⁴⁾。

この手法によって測定された場内観測井戸のガス濃度の経時変化を Fig. 5 に示す。(a)は陸上処分場の事例であり、二酸化炭素濃度よりもメタン濃度の上昇率が大きい。(b)は海面処分場の事例であり、二酸化炭素濃度のみが上昇した。初期の濃度上昇の傾きを線形の最小自乗法によって求めて算出した、場内観測井戸1本当たりから放出される温室効果(埋立地)ガス放出量を Table 1 に示す。この手法は、流量を計測する必要が無く、数 mL/min 以下のごく小さいガス放出量を測定できることが特徴である。なお、求められたガス放出量は、観測井戸周辺の廃棄物層から放出され、かつ観測井戸に集められたガスのみを対象にしており、処分場全体を代表した放出量を求める場合には、地表面フラックスと同様に、複数地点での測定が必要となる。しかし、定点観測により、最終処分場の維持管理期間にわたってガス放出挙動の時系列変化を把握

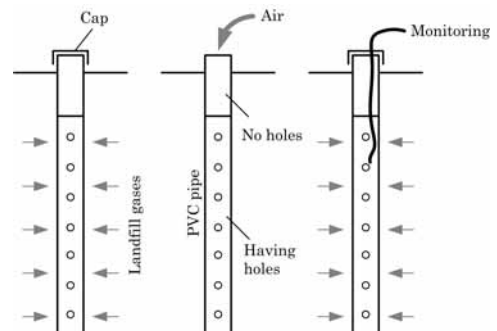


Fig. 4 Gases flux measurement method in a well

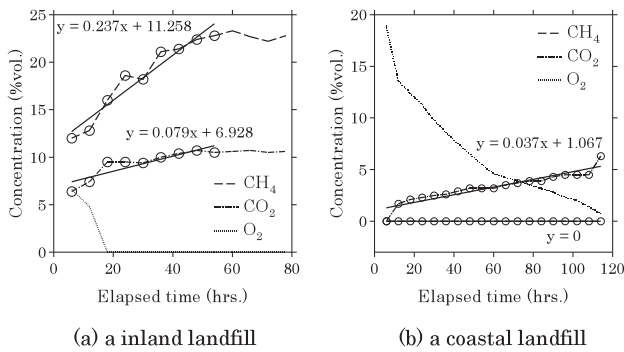


Fig. 5 Example of greenhouse gases flux measurement results

Table 1 Example of greenhouse gases emission from a well

	A inland landfill	A coastal landfill
CH ₄ (mol/day)	1.27	0
CO ₂ (mol/day)	0.42	0.20

することで、処分場からの温室効果ガス発生量の増加と減衰、すなわち埋立廃棄物の安定化の進行度を捉えることができる。また、本手法は、焼却灰主体の処分場から放出される低流量のガスを評価することができ、既存のガス流量測定の代替手法として利用可能と考えられる。

5. おわりに

我が国の廃棄物処理では、公衆衛生の向上や輸送効率の向上、埋立容量の逼迫により、早くから焼却処理や破碎選別等の中間処理の導入が進められたため、直接（無処理）埋立が主流である諸外国と比較して最終処分場からの温室効果ガスの放出量は比較的小さく、また年々減少傾向にある¹⁶⁾。また、埋立地ガスの主成分であるメタンや二酸化炭素は有害物質では無いため、火災や爆発を防ぐために速やかに大気へ希釈・分散させることのみには注意が払われ、廃止確認のために必要であるにもかかわらず、実際の処分場で埋立地ガス発生量を維持管理のために長期的に計測した事例は少ない。しかし、焼却残さや破碎残さなどから埋立地ガスがまったく発生しないということはなく、過去に未処理で埋め立てられた廃棄物からの埋立地ガスの放出は続いており、気候変動対策としてだけでなく、処分場の安全な跡地利用のために、時空間的な放出挙動を把握することが依然として重要である。本稿では、最終処分場からの温室効果ガス/埋立地ガスの計測手法について、筆者らがここ十年来、我が国の処分場で埋立地ガスをモニタリングしてきた経験を踏まえて、実用的な手法を中心に示した。我が国以外では、排出権取引やCDMの導入により、埋立地ガスの計測は日々、新たな知見が発表されている、研究、実業ともに非

常にホットな話題である。

参考文献

- 1) 国立環境研究所地球環境センター温室効果ガスインベントリオフィス編：日本国温室効果ガスインベントリ報告書，第2章（2010）
- 2) IPCC：2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories（2006）
- 3) 河井紘輔，山田正人：廃棄物分野におけるCDM事業活動——現状と課題——，廃棄物資源循環学会誌，第20巻，第4号，pp.165-170（2009）
- 4) 長森正尚，渡辺洋一，木持謙，小野雄策，河村清史，山田正人，石垣智基，井上雄三：管理型最終処分場の廃止基準に関する考察(1)，第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.972-974（2002）
- 5) 長森正尚，山田正人，石垣智基，小野雄策：管理型最終処分場の廃止基準に関する考察(6)，第20回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.465-466（2009）
- 6) 山田正人：埋立地ガスのモニタリング，新政策，特集号「負の遺産にしない埋立処分場」，pp.78-81（2001）
- 7) A. Trégourès, A. Beneito, P. Berne, M. A. Gonze, J. C. Sabroux, D. Savanne, Z. Pokryszka, C. Tauziède, P. Cellier, P. Laville, R. Milward, A. Arnaud, F. Levy and R. Burkhalter: Comparison of seven methods for measuring methane flux at a municipal solid waste landfill site. Waste Management Research, Vol. 17, No. 6, pp. 453-458（1999）
- 8) P. M. Czepiel, B. Mosher, P. M. Crill and R. C. Harriss: Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. D11, pp. 16721-16729（1996）
- 9) 山田正人，小野雄策，長森正尚，高橋伴幸：埋立地表面における地温とメタンフラックスの関係，第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.1026-1027（2001）
- 10) T. Ishigakil, M. Yamada, M. Nagamori, Y. Ono and Y. Inoue: Estimation of methane emission from whole waste landfill site using correlation between flux and ground temperature, Environmental Geology, Vol. 48, No. 7, pp. 845-853（2005）
- 11) 山田正人，石垣智基，井上雄三，長森正尚，小野雄策，高田光康：レーザーメタン検出器を用いた処分場地表からのメタン放出地点のスクリーニング，第14回廃棄物学会研究発表会発表講演集，pp.1077-1078（2003）
- 12) 大渡俊典，山田正人，石垣智基，國森雅彦，高田光康，宇佐見貞彦：レーザーメタン計を用いた最終処分場内のメタンガス平面濃度分布調査，第20回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集，pp.443-444（2009）
- 13) 遠藤和人，小野雄策：廃棄物最終処分場の抱える潜在環境汚染ポテンシャルの評価とモニタリング，生活と環境，Vol. 53, No. 1, pp. 82-87（2007）
- 14) 山田正人，遠藤和人，阿部誠，相沢智之，梅宮知佐，中根英昭，坂内修，朝倉宏，井上雄三，石垣智基，小野芳朗，上江川幸雄，W. Y. Komsilp, T. Sirintornthep, 高橋通正，福井博：最終処分場からのメタン放出量の2つの新しい現場計測手法，第17回廃棄物学会研究発表会講演論文集，pp.1057-1058（2006）
- 15) H. Ishimori, K. Endo and M. Yamada: Reliability evaluation for static chamber method at landfill sites, Proceedings of COMSOL conference 2009, Boston（2009）
- 16) 山田正人：埋立物制御技術としての中間処理，廃棄物資源循環学会誌，第20巻，第6号，pp.292-296（2009）