

【論 文】

メタンを指標とした不法投棄物・埋立廃棄物の掘削現場における有害ガス簡便モニタリング手法の検討

谷川 昇*・古市 徹*・石井 一英*・岩崎 謙二*

【要 旨】 不法投棄物や最終処分場の埋立廃棄物の掘削現場において、ハンディタイプオープンパス型メタン自動計測器によって連続計測した ppm レベルの大気中メタン濃度を指標とする作業環境の有害ガス簡便モニタリング手法を提案し、掘削現場への適用可能性を検討した。

不法投棄現場や最終処分場から発生するガス中の有害ガスはメタンと共存すること、有害ガスとして注目されるのは硫化水素であることが多いこと、硫化水素のメタンに対する濃度比の最大値は 10^{-1} 程度であることを示し、大気中メタン濃度が発生ガス中の有害ガスの潜在的な危険性を安全側で評価する指標になることを明らかにした。

また、掘削現場での影響が懸念される硫化水素等の有害ガスの許容濃度、有害ガスのメタンに対する濃度比の最大値および安全率を考慮して設定したメタン濃度の管理値を計測値と比較する提案手法が、掘削現場の安全管理のためのモニタリングに適用できることを示した。

キーワード：メタン、オープンパス型計測器、最終処分場、有害ガス、硫化水素

1. 緒 言

産業廃棄物の不法投棄の残存件数と残存量の合計は、平成 18 年度末では 2,774 件、1,565 万 ton にのぼっており¹⁾、それらの不法投棄現場から生活環境保全上の支障を除去する原状回復事業の実施が急務となっている。また、環境保全上の問題を残している不適正な最終処分場や埋立跡地の適正化対策の実施が望まれている²⁾。さらに、最終処分場の新規建設が非常に困難な状況にあるため、既存の最終処分場において埋立廃棄物を掘り起こして資源化・減容化処理し、適正化や埋立容量の回復を行って延命化を図る再生が必要となり、その実証試験や事業化事例が報告³⁻⁵⁾されている。

このような不法投棄現場の原状回復、最終処分場の適正化・延命化の実施にあたっては、不法投棄物や埋め立てられている廃棄物（以下、不法投棄・埋立物と記す）

の掘削作業を伴う。不法投棄・埋立物中の硫黄分が微生物によって有害な硫化水素に変換される⁶⁾場合があること、不法投棄・埋立物がベンゼンやトルエン等の揮発性有害化学物質を含む⁷⁾場合があること等から、掘削作業時には、これらの有害物質を含むガス（以下、掘削ガスと記す）の発生を想定する必要がある。掘削ガスは、現場の作業環境や周辺環境に影響を及ぼす可能性があり、作業環境の安全確認および周辺環境への影響に対する住民の不安を払拭するためには、作業現場における大気環境モニタリングが不可欠である。

ただし、従来の不法投棄・埋立物掘削現場での大気環境モニタリングは、作業実施前に掘削現場付近の特定の有害ガスの大気中濃度を検知管によって確認する、掘削作業時に定点においてメタン検知器または硫化水素検知器で連続監視する等の方法で行われている例^{7,8)}が多い。しかし、それらの方法には、ガス濃度に分布があると考えられる作業現場での一部の空間の結果しか得られない、連続監視できるガス検知器の定量下限がメタンでは 0.1% 程度、硫化水素では 2 ppm 程度と高いので低濃度のモニタリングができない、検知管によるモニタリングは間欠的で測定頻度に限界があるなどの課題がある。

原稿受付 2008. 5. 13 原稿受理 2009. 10. 8

* 北海道大学大学院工学研究科

連絡先：〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目

北海道大学大学院工学研究科 谷川 昇

そのため、掘削現場では、保護具の着用と個人用ガスモニターの携行によって、発生ガスによる生命に係わる万一の危険性を回避している。このような掘削現場での安全管理を一層充実させるには、作業員が働く範囲の空間での有害ガスを含む掘削ガスの発生状況をリアルタイムで低レベルまで簡便に連続自動計測し、建屋内の製造現場等と同じように作業環境が評価できるモニタリング手法の開発が求められている。

そこで、本研究では、掘削ガスの主成分と考えられるメタンに注目し、定量下限が0.2 ppmのハンディタイプオープンパス型メタン自動計測器⁹⁾によって連続自動計測した大気中のメタン濃度を指標とする有害ガス簡便モニタリング手法を提案するとともに、その手法の実際の不法投棄原状回復事業現場への適用可能性を検討した。

2. 実 験

2.1 提案するメタンを指標とした有害ガス簡便モニタリング手法

不法投棄・埋立物掘削現場における作業環境の安全管理のために提案するメタンを指標とした有害ガス簡便モニタリング手法（以下、提案モニタリング手法と記す）は、掘削ガス中の有害ガスはメタンと共存し、その濃度はメタン濃度と比較して十分に低く、有害ガスのメタンに対する濃度比（以下、有害ガスのメタン濃度比と記す）が一定範囲内に収まることを前提条件にする。そして、次の手順によって、連続自動計測した大気空間の平均メタン濃度から掘削ガスの発生を検知し、平均メタン濃度計測値と有害ガスのメタン濃度比等に基づいて掘削ガス中の有害ガスの潜在的な危険性を安全側で評価し、作業環境の安全管理に役立てる。

- ① 不法投棄・埋立物掘削現場で発生する有害ガスの中で作業環境への影響が最も懸念される有害ガスAを特定し、有害ガスAのメタン濃度比の最大値（たとえば0.01）をあらかじめ把握する。
- ② ㈱日本産業衛生学会が勧告する許容濃度¹⁰⁾等と安全率を考慮して、不法投棄・埋立物掘削現場での有害ガスAの管理値（同0.2 ppm）を設定する。
- ③ 有害ガスAの管理値とメタン濃度比の最大値に対応したメタン濃度の管理値（同0.2 ppm/0.01=20 ppm）を設定し、その値を超えた際の具体的な安全措置を決める。
- ④ 不法投棄・埋立物掘削現場において、Table 1のアンリツ(株)製ハンディタイプオープンパス型メタン自動計測器（以下、オープンパス型メタン計測器と記す）とスリーエム(株)製三面体キューブ素子

Table 1 Specifications and performance of a portable open-path type methane analyzer tested

Detection principle	Wavelength-modulation spectroscopy for infrared absorption
Light source	InGaAsP distributed-feedback laser
Wavelength (nm)	1653.7
Response time (s)	0.1
Weight (kg)	4
Nickel-metal hydrate battery (V)	12

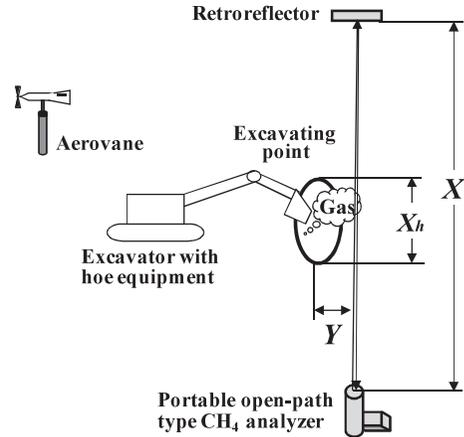


Fig. 1 Schematic of the proposed monitoring method for hazardous gas based on methane at an excavating point in a landfill or illegal dumping site, using a portable open-path type methane analyzer and a retroreflector

反射板（以下、反射板と記す）を Fig. 1 に示すように配置⁹⁾する。

- ⑤ 掘削作業開始前の一定距離 X (m) の空間の大気中メタン濃度 C_0 (ppm) を、メタンコラム密度計測値 A_0 (ppm·m) から式(1)によって計測する。掘削ガスが希釈・拡散されずに移流して測定空間の濃度分布が大きいと考えられる掘削穴直近などの作業環境をモニタリングする場合には、オープンパス型メタン計測器で計測したメタンコラム密度 A (ppm·m) をもとにして、式(2)によって最も濃度が高くなると考えられる光路上の空間距離 Xh のメタン平均濃度 C (ppm) を計測する。また、掘削ガスが希釈・拡散によって大気と混合した状態で移流して、測定空間の濃度分布が無視できると考えられる掘削穴から Y (m) 離れた作業環境をモニタリングする場合には、式(3)から空間距離 X の平均メタン濃度 C' (ppm) を計測する。

$$C_0 = A_0 / X \quad (1)$$

$$C = \{A - C_0(X - X_h)\} / X_h \quad (2)$$

$$C' = A / X \quad (3)$$

C : 掘削作業時の掘削現場近傍の大気中メタン濃度 (ppm)

C_0 : 掘削作業開始前の現場の大気中メタン濃度 (ppm)

C' : 掘削作業時の掘削現場から Y (m) 離れた地点の大気中メタン濃度 (ppm)

A : 掘削作業時のメタンコラム密度 (ppm-m)

A_0 : 掘削作業開始前のメタンコラム密度 (ppm-m)

X : 計測距離 (m) X_h : 掘削穴の幅 (m)

- ⑥ 現場に設置した風向風速計の風向と風速の測定値に配慮しながら、メタン濃度計測値の変動を監視し、現場が掘削穴の風下となる風向時のメタン濃度計測値がメタン濃度の管理値近くになる場合には、掘削ガス中の有害ガス A の濃度が管理値を超える可能性があると判断し、所定の具体的安全措置をとる。

2.2 メタンを指標とした有害ガス簡便モニタリング手法の前提条件の検討

提案モニタリング手法では、掘削ガス中の有害ガスはメタンと共存し、その濃度はメタン濃度と比較して十分に低く、有害ガスのメタン濃度比が一定範囲内に収まることを前提条件に、大気中メタン濃度を有害ガスモニタリングの指標として、掘削ガス中の有害ガスの潜在的な危険性を安全側で評価する。そこで、掘削ガスと不法投棄現場や最終処分場から発生する埋立ガスの組成には大きな差はないと考え、文献調査および実測調査によって、埋立ガス中のメタン濃度と他の有害ガス濃度の関係を解析し、この前提条件の成立を確認した。

文献調査では、埋立ガス、メタン、有害ガスをキーワードとして JDreamII 等により、1970 年以降の日本の埋立ガスの組成の研究調査報告を検索した。実測調査

では、廃棄物の種類や廃棄物の埋立時期に配慮して、Table 2 に示すオープン型とクローズド型の一般廃棄物最終処分場とオープン型の産業廃棄物最終処分場を選定した。各最終処分場において、Fig. 2 のように、ガス抜き管内にプラスチックチューブの先端を埋立面より約 1.5 m 以上の深さまで挿入し、ポンプによってポリエステル製バッグに約 10 L 採取した埋立ガス中のメタン、二酸化炭素、酸素とその他の有害ガスの濃度を計測した。% オーダーのメタン濃度と二酸化炭素、酸素濃度は、熱伝導度検出器付きの SHIMADZU ガスクロマトグラフ GC-8A によって、ppm オーダーのメタン濃度は、(株)堀場製作所製水素炎イオン化検出法炭化水素自動計測器を用いて計測した。また、有害ガスとしては、硫化水素、二酸化硫黄、一酸化炭素、二酸化窒素、窒素酸化物、ベンゼン、トルエン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、メチルメルカプタン、アセトアルデヒド、アンモニア、アミン類について、その濃度を検知管法で測定したが、検知管法での各有害ガスの検出下限は、それぞれ 0.05 ppm, 0.05 ppm, 1 ppm, 0.5

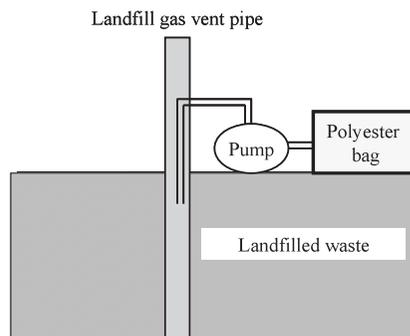


Fig. 2 Schematic of the sampling method for landfill gas in landfill sites

Table 2 Outlines of landfill sites tested

Category of landfill site	Site name	Category of main landfilled waste	Elapsed year* (y)	Type of landfill site
Landfill site for domestic waste	A	All domestic waste	15	Open
	B	All domestic waste	0**–5	Open
	C	All domestic waste	1–10	Open
	D	All domestic waste	0.5	Open
	E	Ash and incombustible waste	10	Open
	F	Ash and incombustible waste	15	Open
	G	Residue of crushed incombustible and large size wastes	0**	Closed system
	H	Residue of crushed incombustible and large size wastes	0**	Closed system
	I	Residue of crushed incombustible and large size wastes	0**	Closed system
Landfill site for industrial waste	J	All industrial waste	10	Open

*: Elapsed year after landfill had stopped ** : Under landfilling

ppm, 2.5 ppm, 0.5 ppm, 1 ppm, 0.1 ppm, 0.1 ppm, 0.3 ppm, 0.1 ppm, 1 ppm, 0.5 ppm, 0.5 ppm である。

2.3 メタンを指標とした有害ガス簡便モニタリング手法の現場適用可能性の検討

有害物質を含む堆肥様物、汚泥様物、焼却灰が主に不法投棄されたZ不法投棄現場において、油圧ショベル（以下、重機と記す）を用いて連続的に不法投棄物を掘削する作業を行い、提案モニタリング手法の現場適用性を検討した。Fig.1 に示すように、掘削穴から約20 m離れた場所に風向風速計を設置するとともに、掘削穴からみて主風向の風下になるYが約0.5 mまたは約7 mの位置に、ハンディタイプオープンパス型計測器と反射板を地表からの高さ約0.5 m、距離X10 mに保って配置した。Yが0.5 mの場合は幅X₁1 mの掘削穴直近の作業環境のモニタリング例として、約7 mの場合は掘削穴から離れた地点での作業環境のモニタリング例として行い、メタン濃度は、それぞれ式(1)、(2)と式(3)を利用して求めた。そして、いずれの場合にも、重機による掘削作業時に放出される掘削ガスに由来する大気中メタン濃度の変化が簡便に連続自動モニタリングできることを、メタン濃度計測値が現場の安全管理に活用できることを検証した。

3. 結果および考察

3.1 メタンを指標とした有害ガス簡便モニタリング手法の前提条件の検討

埋立ガス組成の文献調査を行ったが、埋立ガス中のメタン濃度と有害ガス濃度を同時に測定している報告は少なく、有害ガスを測定している例でも、ほとんどが硫化

水素のみを対象としていた。硫化水素以外の有害ガスとしては、アンモニアと一酸化炭素やメチルメルカプタン等の微量臭気成分がわずかに測定されているにすぎず、その測定値は硫化水素に比べて低い値であった。文献¹¹⁻²²⁾から整理した埋立ガス中のメタン、二酸化炭素、硫化水素の測定結果の範囲をTable 3に示す。

また、実測調査において採取した埋立ガス中の二酸化硫黄、一酸化炭素、二酸化窒素、窒素酸化物、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、メチルメルカプタン、アセトアルデヒド、アミン類等の濃度は、検知管法の検出下限以下であった。そのため、実測調査で計測できたメタン、二酸化炭素、酸素、硫化水素、ベンゼン、トルエン、アンモニアの濃度範囲をTable 4に示した。

Table 3, 4より、一般廃棄物最終処分場、産業廃棄物最終処分場および不法投棄現場から発生するガスは、メタンと二酸化炭素が主成分であり、硫化水素も含まれている場合が多かった。実測調査では、他にベンゼン、トルエン、アンモニアも含む場合もみられたが、硫化水素とそれらの有害ガスの濃度は、共存するメタンの濃度と比べて十分に低い値であった。また、硫化水素、ベンゼン、トルエンおよびアンモニアの埋立ガス中の最大濃度が、それぞれ32,000 ppm, 26 ppm, 60 ppm, 50 ppmであったこと、それぞれのガスの許容濃度が5 ppm, 1 ppm, 25 ppm, 50 ppmである¹⁰⁾ことから、不法投棄・埋立物掘削時における安全管理のためには、発生ガス中の有害ガスとしては、相対的に濃度が高く許容濃度も低い硫化水素に、注目すれば良いと考えられた。

次に、文献調査と実測調査から得られたメタンと硫化水素の濃度から、一般廃棄物最終処分場、産業廃棄物最終処分場および不法投棄現場における発生ガス中の硫化

Table 3 Results of gas concentration in landfill and illegal-dumping sites by literature search

Type of site	Site name	Category of main landfilled waste	Concentration range reported		
			CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
Landfill site for domestic waste	K ¹¹⁾	Domestic waste	35-57	25-37	2-3
	L ¹²⁾	Domestic waste, Ash	18.2-59.4	14.9- 37.5	0.24-52.2
	M ^{13, 14)}	Domestic waste, Ash	14-59	—	0.4-150
	N ¹⁴⁾	Domestic waste, Ash	56-66	—	5-87
Landfill site for industrial waste	O ¹⁴⁾	Domestic waste, Ash	24-66	—	7-120
	P ¹⁵⁾	Various industrial waste	19-85	0.8-7.8	0.1-100
	Q ¹⁶⁾	Various industrial waste	1.0-12	1.0-15	0.005-0.05
	R ¹⁷⁾	Various industrial waste	0.6-62	0.2-27	0.3-5.4
	S ¹⁸⁾	Various industrial waste	10-57	13-32	60-1190
Illegal dumping site	T ¹⁹⁾	Various waste	0.3-75	0-19	0.1-1200
	U ¹⁷⁾	Various waste with sulfate pitch	33-95	—	10-32000
	V ²⁰⁾	Various waste with gypsum	0.05-78	—	0-22000
	W ^{21, 22)}	Various waste	2.2-46	9.5-19	1.2-6400

Table 4 Results of measured gas concentration in 10 landfill sites tested

Type of site	Site name	Elapsed years(y)*	Concentration range measured						
			CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	Benzene (ppm)	Toluene (ppm)	NH ₃ (ppm)
Landfill site for domestic waste	A	15	16.2-27.8	8.5-12.5	12.1-13.9	0.1-0.5	ND	ND	ND
	B	5	2.1-15.5	0.9-11.8	16.7-18.9	0.2-0.8	ND-0.7	2-8	ND
		2	34.8-57.7	23.3-35.2	0.1-13.6	12.0-27.0	0.2-2.0	2-4	ND
		0**	45.7-57.3	31-38.6	0.2-4.7	25-130	0.2-26	25-60	1-3
	C	1	18.5-44.0	10.9-32.3	5.2-12.6	2.0-20.0	ND-2.0	4-5	ND
		10	0.19-7.99	0.012-0.3	19.6-20.1	ND	ND-5.0	ND	ND
	D	5	1.4-2.8	0.33-2.0	19.9-20.1	ND	ND	ND	8-50
	E	10	0.062-5.4	0.06-4.5	9.5-20.2	ND	ND	ND	ND
	F	2	0.76-3.77	0.42-3.07	12.4-20.3	ND-0.1	ND	ND	ND
G	0**	0.0050-0.031	0.05-0.8	19.4-20.1	ND	ND	ND	ND	
H	0**	0.00023-0.00091	0.05-0.5	20.1-20.5	ND	ND	ND	ND	
I	0**	0.00023-0.00142	0.055-0.3	19.6-20.6	ND	ND	ND	ND	
Landfill site for industrial waste	J	10	0.0094-2.2	0.05-0.37	19.3-20.1	ND	ND	ND	ND

*: Elapsed year after landfill had stopped ** : Under landfilling ND : Not detectable

水素のメタン濃度比とメタン濃度との関係を Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 に示す。実測調査において硫化水素が不検出であった最終処分場の数値は, Fig. 3 と Fig. 4 に示していない。なお, 実測調査で酸素濃度が高い試料は, 埋立ガスと大気とが混合している可能性があるが, その場合でも, 硫化水素のメタン濃度比の値は影響を受けない。

一般廃棄物の直接埋立を行っている A, B, C, K, L, M, N, O 最終処分場では, 硫化水素のメタン濃度比は埋立時期が新しい場所ほど高くなる傾向がみられたが, 最大値は約 4×10^{-4} であった。一般廃棄物中の厨芥のみを嫌気発酵させて得られるバイオガスでは, メタン濃度は約 59~63%, 硫化水素濃度は約 500~3,000 ppm と報告²³⁾されているので, 硫化水素のメタン濃度比の最大値は, 約 5×10^{-3} となる。また, 一般廃棄物中に厨芥と同程度含まれる有機性廃棄物である紙を嫌気発酵させた場合には, 紙の揮発性硫黄含有量とメタン発生量は, それぞれ厨芥の 1/2 程度²⁴⁾, 約 2.5 倍²⁵⁾であることから, 硫化水素のメタン濃度比は, 厨芥の値の数分の 1 になると推定される。これらの結果より, 厨芥や紙などの有機性廃棄物を多く含む一般廃棄物最終処分場での硫化水素のメタン濃度比は, 最大で 10^{-3} 程度と考えられた。

なお, 埋立物が焼却灰や不燃物破砕物主体の E, F, G, H, I 最終処分場では, Table 4 に示したように硫化水素が不検出の例が多かったが, メタンはわずかに発生していた。これは, 焼却灰には 5% 未満の未燃物が含まれていること, 不燃物には可燃物が一部混入していること等のためと考えられる。ただし, F 最終処分場のように硫化水素が発生している場合でも, 硫化水素のメタン濃度比は, 最大約 10^{-5} と小さな値であった。

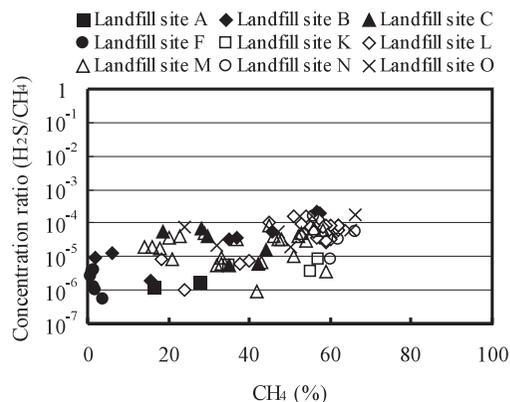


Fig. 3 Relationship between CH₄ concentration and concentration ratio (H₂S/CH₄) in landfill sites for domestic waste

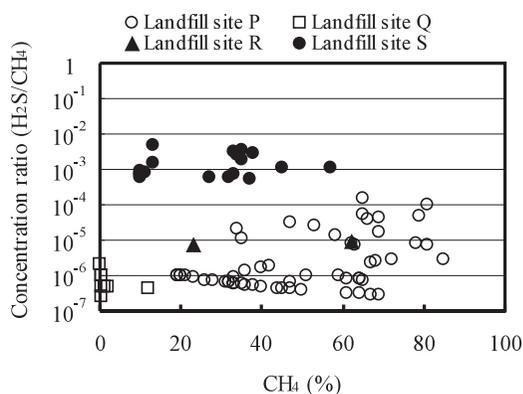


Fig. 4 Relationship between CH₄ concentration and concentration ratio (H₂S/CH₄) in landfill sites for industrial waste

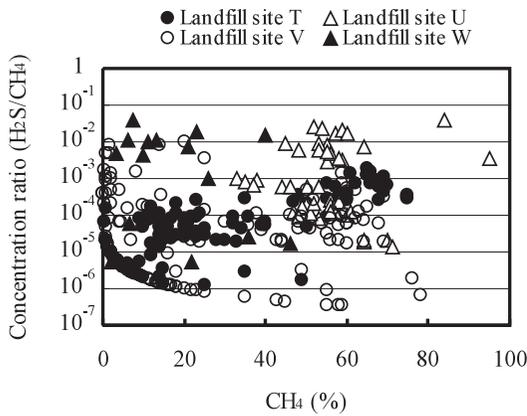


Fig. 5 Relationship between CH_4 concentration and concentration ratio ($\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$) in illegal dumping sites

産業廃棄物最終処分場における硫化水素のメタン濃度比は、Fig. 4 に示すように P, Q, R 最終処分場では、一般廃棄物最終処分場の値とはほぼ同程度であったが、S 最終処分場ではやや高い値となった。そのため、産業廃棄物最終処分場での硫化水素のメタン濃度比は、最大 10^{-2} 程度であった。

一方、不法投棄現場で発生する埋立ガス中の硫化水素のメタン濃度比は、Fig. 5 に示すように、一般廃棄物処分場や産業廃棄物処分場と比べて、全般的に高い値となった。硫酸ピッチや石膏ボード等の硫黄分を多く含む廃棄物が不法投棄されている U, V 不法投棄現場では、硫化水素のメタン濃度比は特に高く、最大 10^{-1} 程度であった。

以上の結果より、不法投棄・埋立物掘削現場から発生する掘削ガス中の有害ガスはメタンと共存すること、影響が懸念される有害ガスとして注目されるのは硫化水素であることが多いこと、硫化水素のメタン濃度比は最大 10^{-1} 程度であることがわかり、大気中メタン濃度が掘削ガス中の有害ガスの潜在的な危険性を安全側で評価するモニタリング指標になることが示された。なお、現場によっては、掘削ガスには硫化水素以外の有害ガスが含まれる場合があるので、その有害ガスを特定し、メタンに対する濃度比の最大値を把握する必要がある。

3.2 メタンを指標とした有害ガス簡便モニタリング手法の現場適用可能性の検討

Z 不法投棄現場において、重機を用いて不法投棄物の掘削と掘削物の仮置きを繰り返した際に、掘削穴近傍または掘削穴から約 7 m 離れた地点で、メタン濃度と風向風速をモニタリングした例を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。

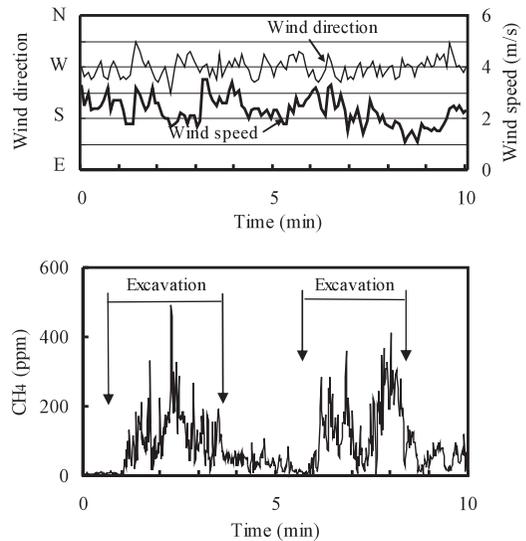


Fig. 6 Examples of CH_4 concentration change and wind change at a reclamation site near an excavation point ($X=10\text{ m}$, $X_b=1\text{ m}$, $Y=0.5\text{ m}$, $C_0=4.5\text{ ppm}$)

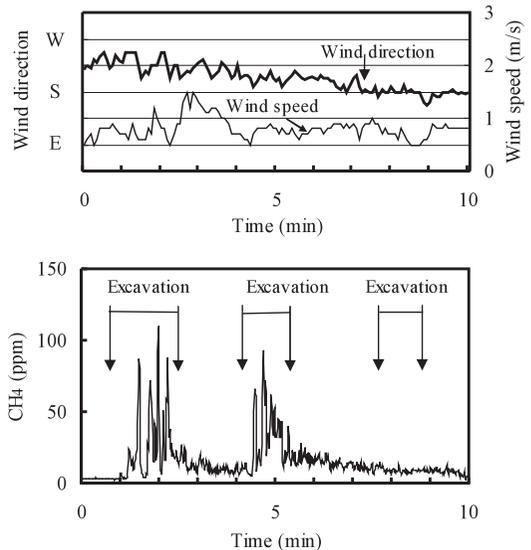


Fig. 7 Examples of CH_4 concentration change and wind change at a reclamation site located 7 m from an excavation point ($X=10\text{ m}$, $Y=7\text{ m}$, $C_0=4.5\text{ ppm}$)

掘削穴近傍でのモニタリング時には、Fig. 6 に示すように、風速は約 1.0~3.5 m/s の範囲であり、風向はモニタリング地点が掘削現場に対して風下になる西でほぼ安定していた。掘削作業前のメタン濃度は、一般的な大気中のメタン濃度約 2 ppm より高い約 4~5 ppm であり、

現場内では地表面等からメタンを含むガスがわずかであるが常に発生していると考えられた。掘削作業開始直後の覆土の掘削に要した約 30 秒間のメタン濃度は、ほとんど変化しなかった。しかし、覆土が除去されて不法投棄物の掘削に入るとメタン濃度は上昇し、現場の掘削ガス由来と考えられるメタンの数 ppm～数百 ppm の激しい濃度変化をモニタリングできた。Fig. 6 には、最大で約 500 ppm のメタン濃度ピークが間欠的に出現していたが、ほとんどのピークは重機によって不法投棄物を掘削した時に生じており、掘削直後に掘削ガスがモニタリング地点に移流していると推定された。Fig. 6 では、掘削作業を 2 回に分けて行ったが、それぞれの掘削作業におけるメタン濃度の変化の状況は、異なっていた。風向、風速の変動は大きくないので、この濃度変動の違いから、掘削場所が少し変わると掘削ガスの発生量も異なる可能性が考えられた。ただし、1 回目と 2 回目の掘削作業時間帯のメタン濃度平均値はそれぞれ約 130 ppm、約 140 ppm と同程度であった。また、1 回目と 2 回目の掘削作業を停止した後は、メタン濃度は低下するものの作業開始前の濃度レベルにすぐには戻らず、掘削現場から継続して掘削ガスが発生している状況を把握できた。

掘削穴から約 7 m 離れた地点でのモニタリング時には、Fig. 7 に示すように、風速は約 0.5～1.5 m/s の微風であった。風向は、当初はモニタリング地点が掘削現場に対して風下になる西南西であったが、次第に変化して実験終了時には南となった。そのため、モニタリング地点が掘削穴からの掘削ガスが流入する風向であった 1 回目と 2 回目の掘削作業では、Fig. 6 の掘削穴近傍でのモニタリング例と同様に、掘削作業に伴うメタン濃度の激しい変化がモニタリングできた。そして、風向が南となって掘削ガスがモニタリング地点に直接到達しないと考えられた 3 回目の掘削作業では、不法投棄物を掘削しても大気中のメタン濃度の上昇はほとんどなかった。

このように提案モニタリング手法によって、不法投棄物等の掘削によって放出されたガスに由来する大気中メタン濃度の急激な変化が ppm レベルで計測でき、その結果から、重機による不法投棄物の掘削作業ごとに掘削ガスが発生する、掘削場所が少し変わるとガス発生量は異なる可能性がある、掘削作業を中断してもガスが発生し続ける等の掘削ガスの発生状況が連続モニタリングできた。オープンパス型メタン計測器は固定電源不要で軽量かつ操作が簡単なこと、反射板は軽量で光学的調整が不要なことから、これらを任意の場所に随時移動⁹⁾できるので、モニタリング対象の場所が変更されてもメタン濃度の計測が簡便に行える。ただし、大気中メタン濃度は掘削作業時の風向風速の影響も受けるので、モニタリ

ング時には必ず風向風速も測定し、それらの測定値から掘削ガスの現場への風による移流と希釈の状況に配慮して、メタン濃度の計測結果を評価する必要がある。

筆者らが、現場の埋立廃棄物層中から吸引したガスの組成をあらかじめ調べたところ、この現場で発生して影響が懸念される有害ガスは硫化水素であり、硫化水素のメタン濃度比の最大値が約 2×10^{-3} と把握されていた。硫化水素の許容濃度が 5 ppm であるので、たとえば安全率を 5 と仮定すれば、現場での硫化水素の潜在的な危険性を安全側で評価するためのメタン濃度の管理値は、約 500 ppm と設定される。Fig. 6 と Fig. 7 のモニタリング例では、メタン濃度の計測値は、この管理値と比べて同程度のピークはあるものの平均は低い値となっており、掘削ガス中に硫化水素が含まれていたとしても、作業環境は良好な状態であったといえる。もし、メタン濃度の管理値が 200 ppm に設定されて Fig. 6 のモニタリング結果から管理値を超える状況が予見される場合や、硫化水素のメタン濃度比からピーク値が危険レベル濃度に達する可能性が推定できる場合には、あらかじめ決められている現場での換気・散気、退避等の安全措置が必要となる。

以上の結果から、風向風速に配慮しながら、事前に調べた不法投棄・埋立物掘削現場で発生して影響が懸念される有害ガスの許容濃度、有害ガスのメタン濃度比の最大値および安全率を考慮して、あらかじめ設定したメタン濃度の管理値を計測したメタン濃度と比較する提案モニタリング手法は、掘削現場の作業環境における有害ガスの潜在的な危険性を予見でき、現場での安全管理に適用可能であることが示された。

4. 結 論

保護具の着用と個人用ガスモニターの携行が不可欠な不法投棄物や最終処分場の埋立廃棄物（不法投棄・埋立物）の掘削現場の安全管理を一層充実させるために、ハンディタイプオープンパス型メタン自動計測器と反射板によって連続計測した大気中のメタン濃度を指標とする作業環境の有害ガス簡便モニタリング手法を提案し、その手法の現場への適用可能性を検討したところ、次の結果が得られた。

- 1) 文献調査と実測調査により、最終処分場や不法投棄現場において発生するガス中の有害ガスはメタンと共存すること、影響が懸念される有害ガスとして注目されるのは硫化水素であることが多いこと、硫化水素のメタン濃度比は最大 10^{-1} 程度であることがわかり、不法投棄・埋立物掘削現場の

大気中メタン濃度が発生ガス中の有害ガスの潜在的な危険性を安全側で評価するモニタリング指標になることが示された。

- 2) 提案モニタリング手法は、不法投棄・埋立物の掘削時に放出されたガスに由来する大気中メタン濃度の変動を ppm レベルで連続的に自動計測可能であり、掘削作業時のガス発生状況を簡便に把握できることがわかった。
- 3) 風向風速に配慮しながら、不法投棄・埋立物掘削現場で事前に調べた影響が懸念される有害ガスの許容濃度、有害ガスのメタン濃度比の最大値および安全率を考慮して、あらかじめ設定したメタン濃度の管理値を計測値と比較する提案モニタリング手法は、掘削現場の作業環境における有害ガスの潜在的な危険性を予見でき、現場での安全管理に適用可能であることが示された。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金萌芽研究19651072によって行ったことを付記する。

参考文献

- 1) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部産業廃棄物課：適正処理・不法投棄対策室産業廃棄物の不法投棄等の状況（平成18年度）について（2007）
- 2) 谷川 昇, 古市 徹, 石井一英, 戸田佑紀, 小松敏宏, 稲葉陸太：最終処分場再生のための埋立廃棄物のバイオガス化処理可能性の検討, 廃棄物学会論文誌, 第18巻, 第1号, pp.30-36 (2007)
- 3) 笹井 裕：埋立地再生・延命化の事例, 廃棄物学会誌, 第16巻, 第3号, pp.150-160 (2005)
- 4) 井上雄三, プレント・イナッチ：欧米における埋立地再生の現状, 廃棄物学会誌, 第16巻, 第3号, pp.161-169 (2005)
- 5) 小山 俊, 服部末彦, 川口光雄, 桒本雅春：既設最終処分場における埋立廃棄物減容化技術, 第16回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.331-333 (2005)
- 6) 井上雄三編：安定型最終処分場における高濃度硫化水素発生機構の解明ならびにその環境汚染防止対策に関する研究, 御国立環境研究所 (2005)
- 7) 青山和史：不法投棄対策における土木技術の現状と展望, 廃棄物学会誌, 第18巻, 第2号, pp.103-109 (2007)
- 8) 古市 徹監修 土壌・地下水汚染診断・修復システム開発研究会編著：土壌・地下水汚染 循環共生をめざした修復と再生, オーム社 (2006)
- 9) 谷川 昇, 古市 徹, 石井一英, 松尾見治, 井関孝弥：ハンディタイプオープンバス型計測器による大気環境中メタン計測手法の廃棄物最終処分場への適用, 廃棄物学会論文誌, 第17巻, 第5号, pp.305-312 (2006)
- 10) 財団法人産業衛生学会：許容濃度等の勧告 (2007年), 産業衛生学雑誌, 第49巻, pp.149-174 (2007)
- 11) 花嶋正孝, 吉田千鶴子, 松藤康司：廃棄物と埋立処理処分, 都市と廃棄物, 第3巻, 第9号, pp.22-36 (1973)
- 12) 中村 豊：埋立処分場発生ガスに関する調査, 昭和60年度東京都清掃研究所研究報告, pp.176-190 (1989)
- 13) 福山丈二：有害ガスの調査——ごみ埋立地におけるガス発生——, 地質と調査, 第2巻, pp.22-28 (1995)
- 14) 山田浩一, 福山丈二, 本多淳裕：埋立地ガスの発生特性, 用水と廃水, 第20巻, 第11号, pp.1339-1346 (1978)
- 15) 本田富義：廃棄物最終処分場からの湧出ガス成分の経年変化, 愛知県環境調査センター所報, 第31号, pp.55-58 (2004)
- 16) 笹島武司, 土原義弘, 高 茂雄, 島田純子：産業廃棄物最終処分場（管理型）の安定化に関する研究（第9報）, 富山県環境科学センター年報, 第31号, pp.42-46 (2003)
- 17) 三重県ホームページ：環境森林部 不法投棄等の是正推進事業（安全性確認調査）の実施状況
<http://www.eco.pref.mie.jp/>
- 18) 高橋浩司, 土田大輔, 鳥羽峰樹, 永瀬 誠, 宇治宮彬：安定型産業廃棄物処分場における事故調査, 福岡県保健環境研究所年報, 第30号, pp.192-195 (2003)
- 19) 宮城県ホームページ：環境生活部竹の内産廃処分場対策室村田町竹の内地区産業廃棄物処分場問題
<http://www.pref.miyagi.jp/takenouchi/>
- 20) 滋賀県ホームページ：RD最終処分場問題対策委員会配布資料
<http://www.pref.shiga.jp/shingikai/rd/shiryou1.html>
- 21) 岐阜市ホームページ：岐阜市企画部企画調整課 産業廃棄物不法投棄事業現地調査
<http://www.city.gifu.lg.jp/c/02020150/02020150.html>
- 22) 岐阜市ホームページ：岐阜市企画部企画調整課 産業廃棄物不法投棄現場燃焼ガス発生状況調査業務委託報告書
<http://www.city.gifu.lg.jp/c/02020149/02020149.html>
- 23) 谷川 昇, 古市 徹, 石井一英, 西上耕平：生ごみバイオガス化施設におけるメタン回収量, 環境保全性, 経済性の検討, 廃棄物学会論文誌, 第19巻, 第3号, pp.182-190 (2008)
- 24) 及川 智, 三森啓介, 谷川 昇：平成11年度排出源等ごみ性状調査, 東京都環境科学研究所年報（廃棄物研究室）2000, pp.28-41 (2000)
- 25) 杉本知輝, 古市 徹, 谷川 昇, 石井一英：不法投棄廃棄物のバイオガス化検討のためのメタン発生量と残渣性状の実験的検討, 第18回廃棄物学会研究発表会講演集, pp.483-485 (2007)

Study on a Convenient Method for Monitoring Hazardous Gas Based on Methane Determination during Waste Excavation at Reclamation Sites

Noboru Tanikawa*, Toru Furuichi*, Kazuei Ishii* and Kenji Iwasaki*

* Laboratory of Sound Material-Cycle Systems Planning,
Graduate School of Engineering, Hokkaido University

† Correspondence should be addressed to Noboru Tanikawa :
(Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-8628 Japan)

Abstract

We propose a convenient method for monitoring hazardous gas based on the determination of ppm-level concentrations of CH_4 in ambient air. The proposed method can be applied during the excavation of landfill or dumped waste at reclamation sites, and we investigated its usability in an actual field. A portable open-path type analyzer and a retroreflector were used to determine the CH_4 concentration.

The hazardous gas in landfill gas emitted from final disposal and illegal-dumping sites always contains CH_4 and H_2S occurring together, with the latter considered to be the main hazardous component. The maximum concentration ratio ($\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$) at final disposal and illegal-dumping sites was expected to be about 10^{-1} . This study showed clearly that the ambient CH_4 concentration could be useful as an indicator for the monitoring of hazardous gas for the evaluation of potential danger.

It was also shown that the proposed method could be useful for monitoring as a safety control at a reclamation site. This method works by comparing the measured ppm concentration levels of CH_4 with a management value that is decided by considering the maximum concentration ratio (of the hazardous gas that was most harmful at the site, such as $\text{H}_2\text{S}/\text{CH}_4$), its acceptable concentration and a safety ratio.

Key words : methane, open path analyzer, landfill site, hazardous gas, hydrogen sulfide