

クローズドシステム最終処分場における 場内作業環境の安全管理に関する研究 -埋立ガス濃度と換気効果の検討-

岩崎 謙二¹・古市 徹²・谷川 昇³・石井 一英⁴

¹非会員 北海道大学修士 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13 条西 8 丁目)

E-mail: iwasaki@kanri-er.eng.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13 条西 8 丁目)

E-mail: t-furu@eng.hokudai.ac.jp

³非会員 前北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13 条西 8 丁目)

現在 (財) 日本産業廃棄物処理振興センター (〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町 2-8-4)

E-mail: tanikawa@jwnet.or.jp

⁴正会員 北海道大学助教 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13 条西 8 丁目)

E-mail: k-ishii@eng.hokudai.ac.jp

設置例が増加している屋根と外壁によって外部と仕切られたクローズドシステム最終処分場(CS処分場)において、埋立廃棄物の種類と場内埋立ガス、浮遊細菌濃度の関係、および、機械換気量と場内外の温度差・場外の風による自然換気量との関係を調べる実験を行った。有機物量が多い廃棄物を埋め立てているCS処分場内では、メタン濃度は約90~400ppmと不燃物を埋め立てているCS処分場と比較して数十倍超の高い濃度であり、アンモニア、一酸化炭素、ジクロロメタンがメタン濃度と比べて十分に低い値で検知された。また、CS処分場内の自然換気量の推定が可能となり、場外の気象状況に応じて、CS処分場内の安全管理に配慮した効率的な換気ファンの運転ができること、メタン濃度の連続モニタリングがCS処分場内の換気量監視に有用であることが示せた。

Key Words : closed system disposal facility, methane, work environment, landfill gas, ventilation

1. 緒言

大型のテントや鉄骨・パネル構造などで屋根と外壁をつくって最終処分場を屋内化したクローズドシステム最終処分場(CS処分場)は、雨水の埋立廃棄物への浸透量を制御して最終処分場の浸出水の効率的な管理が達成できるとともに、廃棄物、粉じん、衛生害虫などの外部への飛散防止等の周辺環境保全に配慮できる特徴を有することから、その設置例が増えている^{1,2)}。CS処分場には、不燃ごみ・粗大ごみ破碎残渣、焼却灰・不燃ごみなど有機物含有量が少ない廃棄物が、主に埋め立てられているが、生ごみを含む有機物含有量が多い廃棄物を埋め立てている施設も存在する。

CS処分場は、その構造から埋立廃棄物の分解によって発生する埋立ガス、廃棄物に付着した浮遊粒子状物質や浮遊細菌(浮遊物質)を含む空気が希釈されにくいので、

換気口を設けるとともに換気ファンによる機械換気を行って、場内作業者の健康リスクを抑えている。

しかし、CS処分場に埋め立てられる廃棄物の種類と場内の埋立ガス、浮遊物質濃度の状況との関係、機械換気量と場内外の温度差・場外の風速による自然換気量の関係は明らかにされていない。

そこで、今後建設事例が多くなると考えられるCS処分場の作業環境の安全管理に資するために、埋立廃棄物の種類が異なるCS処分場内の埋立ガスと浮遊物質のレベルを明らかにした。さらに、一つのCS処分場において、換気ファンの稼働台数を段階的に変化させながら計測した場内のメタン濃度、場内外の温度、場外の風速の値を利用して、換気量の予測式に基づくパラメーターフィッティングを行い、自然換気量を推定するとともに、CS処分場における効果的な換気方法を検討した。

2. 実験

(1) 埋立ガスおよび浮遊物質

表-1に示す埋立廃棄物の種類が異なるCS処分場内において、埋立ガスおよび浮遊細菌、浮遊粒子状物質(浮遊物質)の濃度を測定した。これらのCS処分場の埋立廃棄物は、現在埋立が行われている廃棄物の種類を網羅するものである。

埋立ガスの測定では、ポータブルポンプを用いて、各CS処分場内の埋立廃棄物面から約1m上の数地点の空気を10Lポリエステル製バッグに採取した。そして、実験室に持ち帰ったポリエステル製バッグ内の空気中のメタン、二酸化炭素とその他の有害ガスの濃度を計測した。メタン濃度は、ガスクロマトグラフまたは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を行った。二酸化炭素ならびに有害ガスである硫化水素、一酸化炭素、二酸化窒素、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、アミン類の濃度は、検知管法で計測した。

浮遊細菌の計測は、以下の手順³⁴⁾で行った。作業環境測定用オープンフェースに47mmの滅菌済みメンブランフィルターを装着し、ミニポンプを用い0.5L/minの吸引速度で、CS処分場内の空気を代表すると推定された中央部の埋立廃棄物面から高さ約1m付近の空気を、適量(5~20L)吸引した。採取後のメンブランフィルターは、0~4℃に冷蔵して分析室に送付し、公定法³⁾に準じて一般細菌と真菌類を培養した。培養後に培地上に出現した全てのコロニー数をかぞえ、その計測数と吸引空気量とを併せて一般細菌コロニー数(個/m³)を算出した。真菌類(CP加ポテトデキストロース培地)は、抗生物質により細菌が増殖しないようにするとともに、二次培養や顕微鏡観察等を併用して同定し、吸引空気量と併せて真菌コロニー数(個/m³)を算出した。

また、ハイボリュウムエアーサンプラーを用いて、一般細菌と真菌測定用試料を採取した場所付近の浮遊粒子状物質を700 L/minの吸引量で同時に捕集し、浮遊粒子状物質濃度を計測した。

表-1 対象としたクローズドシステム処分場

施設名	埋立廃棄物	埋立容量 (m ³)
A処分場	不燃ごみ・粗大ごみ破砕物 選別ふるい下残渣	7,100
B処分場	不燃ごみ破砕物・焼却灰	3,825
C処分場	厨芥を除く一般廃棄物	11,910
D処分場	全ての一般廃棄物	258,550

(2) 自然換気量の検討

a) 換気量の予測式

処分場内の換気量の予測では、式(1)~式(4)が成り立つとされている⁹⁾。式(1)の右辺の第一項が場内外温度差に伴う重力換気量、第二項が場外の風に伴う風力換気量、第三項が換気ファンによる機械換気量である。自然換気量は、重力換気量と風力換気量の和となる。

$$Q = A \left\{ c_1 \alpha_1 \left(\frac{2g}{\gamma} \Delta P \right)^{1/2} + c_2 \alpha_2 u \Delta C_P^{1/2} \right\} + c_3 n W \quad (1)$$

$$\Delta P = \Delta H(\gamma_{in} - \gamma_{out}) = \Delta H \cdot 35325 \left(\frac{1}{273 + T_{in}} - \frac{1}{273 + T_{out}} \right) \quad (2)$$

$$W = nw \quad (3)$$

$$C = M/Q \quad (4)$$

Q: 全換気量, A: 開口面積, α_1 : 流量係数(重力), α_2 : 流量係数(通風), ΔP : 上部・下部開口間の圧力差, γ : 空気比重, g: 重力加速度, u: 外部風速, ΔC_P : 入口、出口間の風圧係数差, W: 機械換気量, ΔH : 上部・下部開口間の高さ, T_{in} : 入口空気温度, T_{out} : 出口空気温度, n: 天井換気ファン稼働台数, w: 天井換気ファン風量, c_1 : 効率係数(重力), c_2 : 効率係数(通風), c_3 : 効率係数(機械), C: 屋内平均ガス濃度, M: ガス発生量

式(1)~式(4)において、定数もしくは設計値、文献等により値を決定できるのは、A, α_1 , g, γ , α_2 , ΔC_P , W, Δ であり、現場等での実測で決定できるのが、u, n, T_{in} , T_{out} である。そして、M, c_1 , c_2 , c_3 はパラメーターであり、理論計算によって算定したガス濃度と実測ガス濃度がほぼ一致するように値をフィッティングすることで推定できる。

b) クローズドシステム処分場内のガス濃度等の計測

全ての一般廃棄物を直接埋め立てしているために、埋立ガスが安定して発生しているD処分場において、式(1)式の c_1 , c_2 , c_3 のおよび式(4)のMの値を決めるための計

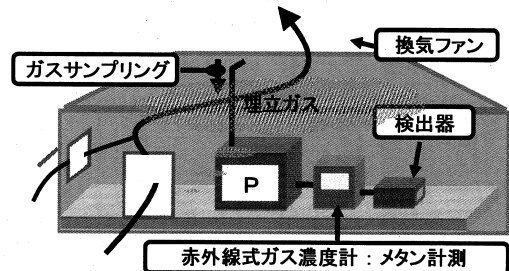


図-1 D処分場内のガス濃度計測の概要

測を行った。すなわち、2009年10～11月の約3週間にわたって、図-1に示すように、天井換気ファン付近の3箇所に設置してある施設の大気採取管より一定間隔でサンプリングした空気中のメタン濃度と二酸化炭素濃度を島津製作所の赤外線吸収式ガス濃度計を用いて自動測定した。測定レンジは、メタンが0～2000 ppm、二酸化炭素が0～5000 ppmである。

測定期間中には、廃棄物を搬入せずに出入口を閉じる17時～翌日8時までの時間帯および日曜日の全時間帯において、27基ある天井換気ファン運転台数を0、2、8、12、20基の5段階に調整するとともに、D処分場外での風向風速および処分場内外の温度を計測した。なお、廃棄物を搬入する時間帯の通常天井換気ファン運転台数は8台である。

3. 結果および考察

(1) 埋立ガスおよび浮遊細菌

CS処分場内の埋立ガス濃度の計測結果を表2に示す。埋立廃棄物中の有機物量が少ないA、B処分場内のメタン濃度は、通常の大気中濃度約2ppmと同程度であった。しかし、埋立廃棄物中の有機物量が多いC、D処分場内のメタン濃度は、約90～400ppmとA、B処分場内濃度と比較して約10倍から約100倍高い値となっていた。すなわち、CS処分場内のメタン濃度は、埋立廃棄物の種類によって異なり、有機物量が多い廃棄物を埋め立てた場合には換気条件によって数百ppmになることがわかった。

検知管法で計測した12種類の有害ガスの中では、アンモニア、一酸化炭素、ジクロロメタンのみが検知されたが、それらの濃度は、全て産業衛生学会が示している許容濃度を超過してはいなかった。また、表-2に示している有害ガスの平均濃度をメタン平均濃度で除した値(メタン濃度比)は、1よりかなり低い値であり、メタン濃度は他の有害ガスよりも十分に高い濃度でCS処分場内に存在していると考えられた。したがって、CS処分場内

表-2 埋立ガス濃度の計測結果

処分場	サンプル数	平均メタン濃度(ppm)	平均ガス濃度/平均メタン濃度		
			アンモニア	一酸化炭素	ジクロロメタン
A処分場	3	2.3	ND	ND	ND
B処分場	4	5.9	0.04	ND	ND
C処分場	4	397	ND	0.003	ND
D処分場	8	89	0.13	0.03	0.03

表-3 浮遊細菌と浮遊粒子状物質濃度の計測結果

処分場	浮遊粒子状物質濃度(mg/m ³)	一般細菌濃度			真菌濃度		
		平均濃度(個/m ³)	サンプル数	変動係数(%)	平均濃度(個/m ³)	サンプル数	変動係数(%)
A処分場	0.04	660	12	55	170	12	36.9
B処分場	ND	160	5	42.4	270	5	48.8
C処分場	0.134	3800	11	74.6	2700	11	40.7
D処分場	0.167	3900	9	11.2	2100	9	96.5
バックグラウンド	-	16.6	1	-	ND	1	-

のメタン濃度を監視すれば、埋立ガスの発生の程度と埋立ガス中の有害ガスの潜在的なリスクを評価できることが示唆された。

CS処分場内のメタン濃度の測定結果より、A処分場とB処分場では、埋立ガスによる健康リスクは無視できると考えられるが、C処分場とD処分場では、場内のメタン濃度のモニタリングを行いながら、場内換気量を制御して、場内の作業環境の安全管理を行っていく必要がある。

浮遊細菌と浮遊粒子状物質濃度の計測結果を表3に示す。一般大気環境中の一般細菌と真菌のレベルは、数十から数百CFU/m³であると報告³⁰⁾されている。埋立廃棄物中の有機物量が少ないA処分場、B処分場の一般細菌と真菌の測定値は、このレベルであった。しかし、埋立廃棄物に有機物が多く含まれているC処分場とD処分場の一般細菌と真菌の測定値は、一般大気環境中のレベルの約10倍であり、条件が類似している一般廃棄物処分場再生事業現場における測定結果⁹⁾と同程度であった。また、各処分場内の浮遊粒子状物質濃度は、通常の都市環境大気のレベル⁷⁾であった。

(2) 自然換気量の検討

図-2に、D処分場において、換気ファンの稼働台数を時間帯によって2基、8基、2基に変化させた場合の場外の風速、場内外の温度差およびメタンと二酸化炭素濃度の計測結果例を示す。場内のメタン濃度と二酸化炭素濃度は、換気ファンの稼働台数を2基から8基に増やすと低下し、8基から2基に減らすと増加しており、換気ファン

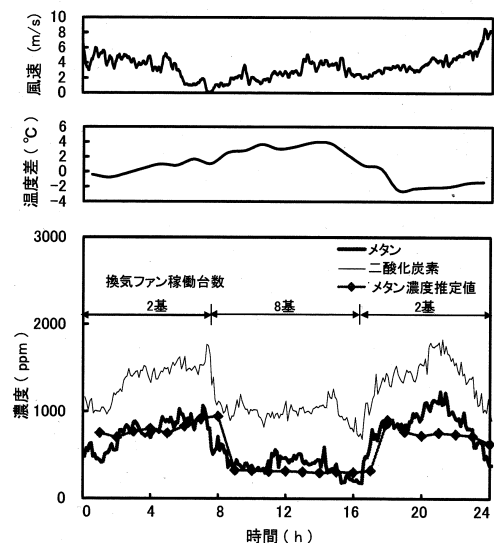


図-2 D 処分場における場外風速、場内外の温度差およびメタンと二酸化炭素濃度の計測結果例とメタン濃度推定例

表-4 メタン濃度推定に用いた値

ガラリ面積 (m ²)	9.75
出入り口面積 (m ²)	18.9
天井換気ファン面積 (m ²)	11.9
流量係数 ⁸⁾	0.6
風圧係数 ⁸⁾	0.3
天井換気ファン流量 (m ³ /s)	3.3
上部・下部開口間の高さ(m)	18

による場内のガス濃度制御効果を明確にできた。また、換気ファンの稼働台数を一定に保っても、メタンと二酸化炭素濃度は変化しており、自然換気の影響が現れていると考えられた。なお、埋立ガスの主成分であるメタンと二酸化炭素の濃度変動はよく一致しており、通常の大気中濃度を考慮したメタンと二酸化炭素の濃度比は、概ね40 : 60であった。

表-4 の値と式(1)～式(4)を利用して、約 3 週間の測定期間中のメタン濃度実測値にできるだけ合わせるパラメーターフィッティングを行って推定したメタン濃度例も、図-2 には示した。ここで、開口面積の合成方法には、式(5)と式(6)に示す直列合成と並列合成の 2 種類があるが、ガラリ面積と出入口面積は並列合成で、その計算結果と天井換気ファン面積は直列合成で計算した。

$$\alpha A = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1 A_1}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_2 A_2}\right)^2}} \quad (5)$$

$$\alpha A = \alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2 \quad (6)$$

メタン濃度の推定結果により、CS 処分場内でのメタン発生量 M が 781 (mol / s)、重力換気の効率係数 c_1 が 0.4、風力換気の効率係数 c_2 が 0.3、機械換気の効率係数 c_3 が 0.8 と求められ、実現場の CS 処分場内においても式(1)から式(6)による理論計算式が適用可能であることがわかった。

これらの定められた数値と式(1)を利用すれば、重力換気量と風力換気量の推定が可能となる。D 処分場における重力換気量と風力換気量の推定結果を図-3に示す。縦軸の目盛は、D 処分場での1基あたりの天井換気ファンの換気量に対応させている。計測期間における場内外の平均圧力差は22 kg/m²、平均風速は3.3 m/sであった。したがって、重力換気による平均の換気流量は、換気ファン3.7基に相当する12.1 m³/s、風力換気による平均の換気流量は、換気ファン1基に相当する3.6 m³/sとなり、CS 処分場内の自然換気では、重力換気の方が風力換気より寄与が大きいことがわかった。

図-3のような結果が得られていれば、CS 処分場周辺の気象条件に応じて、換気ファンの稼働台数の調整が可

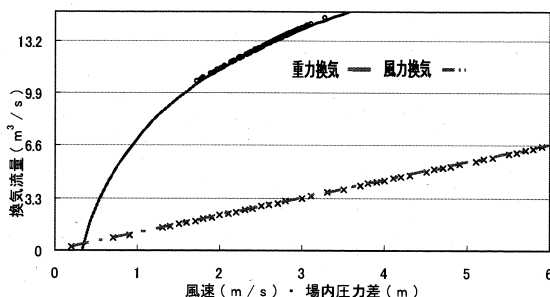


図-3 D 処分場における重力換気量と風力換気量の算出結果

能となる。また、有機物多く含む廃棄物が埋め立てられているCS処分場においては、場内のメタン濃度をオープンパス型メタン自動計測器の利用により常時監視すれば、場内の安全管理に配慮した効率的な換気ファンの運転ができる。

4. 結論

これまで明らかにされていないクローズドシステム処分場(CS 処分場)の埋立廃棄物の種類と埋立ガス濃度等との関係、および、機械換気量と場内外の温度差・場外の風による自然換気量の関係を調べる実験を行った。その結果、次の事項が明らかとなった。

- (1) 不燃物主体の廃棄物を埋め立てている CS 処分場内のメタン濃度は、通常の大気中メタン濃度(約 2ppm)と同程度であったが、埋立廃棄物中の有機物量が多い CS 処分場内のメタン濃度は、その 10 倍から 100 倍超の高い濃度であった。埋立廃棄物中の有機物量が多い CS 処分場では、アンモニア・一酸化炭素・ジクロロメタンが検知されたが、その値はメタン濃度と比べて十分に低かった。
- (2) メタン濃度、気温、風速の実測によって、自然換気量の推定が可能となり、場外の気象状況に応じて、CS 処分場内の安全管理に配慮した効率的な換気ファンの運転ができることを示した。

謝辞：本研究の実施にあたり、(株)大林組 技術研究所 諏訪 好英に多大なるご協力をいただきましたことに、感謝いたします。

参考文献

- 1) 花嶋正孝，古市徹 監修：はじめてのクローズドシステム処分場，pp3-31，オーム社，2002。
- 2) クローズドシステム処分場開発研究会編，花嶋正孝，古市

- 徹 監修：絵で見るクローズドシステム処分場，環境新聞社，2006.
- 3) 日本業学会編：衛生試験法・注解，2010
- 4) 日本作業環境測定協会編：作業環境測定ガイドブック，2010
- 5) 建築換気設計：石原正雄，朝倉書店，1969.
- 6) 清水雅子，本田富義，富田孝子，佐野昌之：一般廃棄物最終処分場の再生事業における微生物について，平成 17 年度愛知県環境調査センター研究発表会，2006.
- 7) 松藤敏彦，田丸敏弘，高田光康，松下正和，松藤康司：一般廃棄物最終処分場における粉じん飛散調査，第 11 回廃棄物学会講演論文集，2000.
- 8) 亀井勇，丸田栄蔵：切妻屋根をもつ建物の風圧係数に関する風洞実験，日本建築学会大会学術講演集，pp.887-888，1975.
- 9) 谷川昇，古市徹，石井一英，岩崎謙二：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，廃棄物学会論文誌，第 20 巻，第 1 号，pp. 1-9，2010.

STUDY ON SAFETY MANAGEMENT FOR WORK ENVIRONMENT CONDITION OF CLOSED SYSTEM DISPOSAL FACILITY - ESTIMATION OF LANDFILL GAS AND SUSPENDED MATTER CONCENTRATION AND EXAMINATION OF VENTILATION EFFECT -

Kenji IWASAKI, Toru FURUICHI, Noboru TANIKAWA and Kazuei ISHII

The Closed system disposal facility (CSDF) has a barrier, such as a roof or an artificial foundation and increasingly used. We investigated the relationship between the indoor concentration of landfill gas and suspended matter, and landfilled waste in four CSDFs. In addition, we estimated the amount of natural ventilation caused by the temperature differential between the inside and the outside of a disposal facility and by the outside wind in a CSDF.

Indoor CH₄ concentrations in CSDFs for organic-rich domestic waste were about 90- 400 ppm. They were dozens of times CH₄ concentration in CSDFs for incombustible domestic waste. NH₃, CO and dichloromethane were detected in CSDFs for organic-rich domestic waste and their concentrations were enough lower than CH₄ concentration.

We clarified that the amount of natural ventilation in a CSDF can be estimated and the operation of ventilation fans for safety management of work environment can be effectively controlled considering outside weather conditions. We also cleared the continuous monitoring of indoor CH₄ concentration was useful for the operation control of ventilation fans in a CSDF.