

(24) 廃棄物埋立場におけるガス抜き管の配置密度に関する研究

福岡大学工学部	○山崎	惟義
夕	花嶋	正孝
福岡大学理学部	大西	和栄
福岡大学工学部	長野	修治

1. はじめに

焼却などによって廃棄物の減量化が計られているが、産業廃棄物も含めると、埋立てざるを得ない廃棄物の量は増加の一途を辿ると考えられる。ところが、従来の廃棄物埋立場は、その設計思想も含めて十分な環境保全対策がなされていたとは言い難い。このため、埋立場を新に計画するに当たって、住民による反対運動などの問題が生じ、その用地取得が増々困難になって来ている。これらの問題を解決するには、環境保全を十分考慮した、高度に跡地利用可能な埋立場を建設する必要がある。

廃棄物埋立場に関する環境影響要因としては、数多くのものが挙げられるが、それらのうち最も重要と考えられるものは、浸出液と発生ガスである。これらの要因の影響を十分小さくした、かつ経済的な埋立場の計画、設計に数理的な解析手法適用の可能性について検討した。また、実際に埋立場を建設するに当っては経済的側面も無視することはできない。そこで、コストを最小にし得る埋立場設計のための最適設計手法の確立を当面の目標とした。

前述の浸出液とガスに対応するため、今回取上げた問題は、上記の目標を達成するために必要と考えられる要因のうち、集水管とガス抜き管の最適配置と密度である。

現在最も多く建設されている埋立場は、準好気性埋立である。この埋立には、2種類の穴明管が設置されている。そのうち、廃棄物層内に鉛直に設置された管は、層内で発生するガスを層外に導くためのガス抜き管と呼ばれるものである。もう一つの管は廃棄物層底部に設置され、雨水が廃棄物と接触する事によって生ずる浸出液を槽外に導くための集水管である。また、この管の一端は大気中に開放されており、これを通して廃棄物層内へ空気が導入され、廃棄物層内がより好气的になる。

廃棄物は一気に計画埋立高まで埋立てられるわけではなく、1日に搬入された量づつ埋立てられる。従って、そのままでは常に新しい廃棄物の面が出現する。これが、悪臭、害虫獣の発生の原因となる。そのため1日の埋立終了の時点で覆土を行う。また、埋立高が計画埋立高に達した時点で跡地利用のために最終覆土を行う。このような覆土の方法をサンドイッチ工法と呼ぶ。

許容放出汚染物質量を決定する事は非常に困難であり、現在までのところ、この事に対する解答は得られていない。そこで今回は、埋立場を計画設計するに当って、デザインパラメーターとして、(1)単位廃棄物重量あたり集水管から流入する空気量、(2)集水管によって集められる浸出液と地中へ浸透する浸出液の量の比(3)覆土を通して大気中へ放出されるガス抜き管に集まるガス量の比を与える。

また、これに関する設計すべき諸量として、(1)集水管の種類、構造、大きさ、配置密度、(2)ガス抜き管の種類、構造、大きさ、配置密度、(3)覆土の種類、厚さを挙げておく。

最小にすべき目的関数としては、単位廃棄物重量当りの埋立コストを考える。

浸出液、ガス問題を含めた1つのシステムとして埋立場を設計すべきであるが、まず手始めとして、今回の報告では、上記の問題をガスについてのみ検討した。

2. 準好気性埋立

2.1 埋立地の構造

前記の進好気性埋立地の構造の概念図を図1に示した。

今回は、ガス問題についてのみ検討を行うので、廃棄物の特性も、ガスに関係のあるものについてのみ考える。

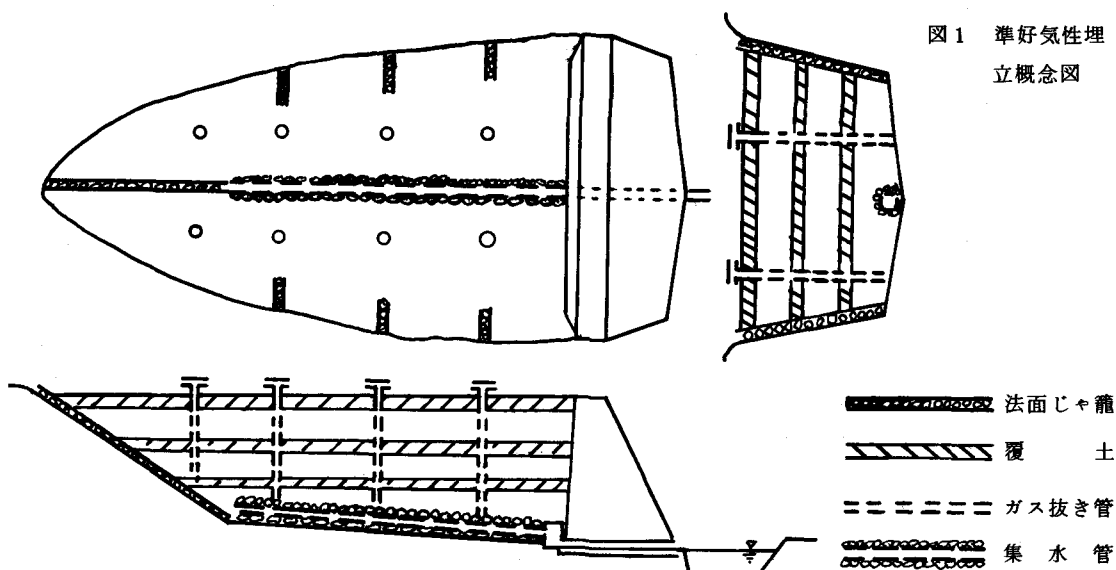


図1 準好気性埋立概念図

このような場合考えるべき因子は、単位廃棄物量あたりのガスの発生量と、透気係数である。ガスの発生量についてはいくつかのデータが得られるが、透気係数に関するデータは非常に少ない。又、それらのデータも基礎となる考え方、次元、単位なども不統一である。そこでこれらを整理するとともに、後述の理論解析に合せた単位系に変換した。

透気係数についてはデータが少ないので、透水係数の測定値からの換算も試みた。

これを表1に示した。

2.3 覆土の特性

覆土については透気係数のみについて検討した。これを表2に示した。

表1 廃棄物の透気係数

文 献	2)	当実験室実験データ	3)	4)
測定データ	透 気 係 数	透 気 係 数	透 気 係 数	透 水 係 数
廃棄物の種類	人 工 ゴ ミ	破 碎 生 ゴ ミ	家庭一般系ゴミ	生 ゴ ミ
測 定 値 k'	水平方向 k_r 1.391×10^{-5} (s) 鉛直方向 k'_3 1.261×10^{-4} (s)	好気性埋立 k_1 0.272 (cm/s) 嫌気性埋立 k_2 1.998 (cm/s)	10^{-1} (m/s)	1.985×10^{-1} (cm/s)
変 換 値 k (m')	k_r 2.138×10^{-5} k_3 1.938×10^{-4}	k_1 4.266×10^{-4} k_2 3.134×10^{-3}	1.569×10^{-2}	1.808×10^{-10}

表2 覆土の透気係数

2.4 ガス抜き管の構造

ガス抜き管の構造は種々のものが考えられるが、今回検討するガス抜き管としては図2に示した構造を有するとする。これはポーリ

文 献	5)	6)	7)
測定データ	透 水 係 数	透 水 係 数	透 気 係 数
覆土の種類	ま さ 土	シルト質砂① ローム②	
測 定 値	6.1×10^{-5} (cm/s)	① $10^{-2} \sim 10^{-3}$ (cm/min) ② $10^{-5} \sim 10^{-7}$ (cm/min)	2.4×10^{-10} (m')
変 換 値 (m')	5.556×10^{-14}	① $1.518 \times 10^{-11} \sim 10^{-13}$ ② $1.518 \times 10^{-14} \sim 10^{-16}$	2.4×10^{-10}

ングを行った後穴明管を挿入するという簡単な施工によって得られる。

2・5 集水管の構造

集水管の構造は図3に示したものが用いられている。

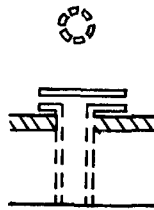


図2 ガス抜き管の構造

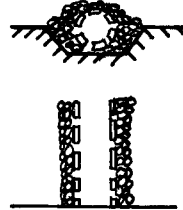


図3 集水管の構造

3. ガス抜き管の最適設計

3.1 ガスの発生

埋立られた廃棄物中の有機物が分解される過程でガスが発生する。このガスの主な成分は、CH₄、CO₂、H₂、N₂等である。その組成は廃棄物の種類、酸素濃度によって異なるが、化学量論的には、嫌気性分解の場合CH₄:CO₂は、ほぼ1:1(標準状態における体積あたり)、好気性の場合ほとんどCO₂のみとなる。しかし実際の埋立地のガス抜き管から放出されるガスの場合CH₄:CO₂は、3:7~1:1⁸⁾である。同様に発生量については、単位分解有機物当たり120~310ℓ/kg⁹⁾程度であることが知られている。

ところが、有機物の分解速度は、有機物の種類と、量、PH、温度、酸素濃度、微生物量等非常に多くの要因の影響を受けるため、ガスの発生速度を予測する事は非常に困難である。そこで今回は実験によって得られたデータを用いる。これを表3に示した。

表3 ガス発生速度

文 献	3)	10)
単位体積当たり ガス発生量	0.102×10^{-6} kg/m ³ ・s	0.183×10^{-1} kg/m ³ ・s

3.2 ガス流動の基礎方程式

埋立廃棄物を解析対象領域Ωとし、空間座標をx_i(i=1, 2, 3;(m),(1, 2は水平方向, 3は鉛直方向を表わす)とする。

ガスフラックスは圧力勾配に比例すると仮定して

$$J_i = - C_i d^2 \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i} + \delta_{i3} \rho g \right) \tag{3.1}$$

- J_i : ガスフラックス (kg/m²・s)

p : ガス圧力 (Pa)

C_i : 無次元定数

d : 空隙の径 (m)
- μ : ガスの粘性係数 (kg/m・s)

ρ : ガスの密度 (kg/m³)

g : 重力の加速度 (1.807 m/s²)

δ_{ij} : クロネッカーのデルタ

を得る。一般に用いられる透気係数kは、k_i = C_i d² で与えられる、方向異方性がないとすると、k₁ = k₂ となる。k_i は廃棄物や覆土の粒子の大きさ、形、空隙率等に依存する。μとρはガスの組成、温度、圧力によって定まる。簡単のため、μは一定と仮定し、ρについてボイルシャルルの法則

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) \tag{3.2}$$

- ρ₀ : 標準状態におけるガスの密度 (kg/m³)

p₀ : 大気圧 (1.103×10⁵ Pa)

T₀ : 標準温度 (273.15 K)

を考える。

廃棄物単位体積あたりのガスの発生速度をS(kg/m³・s)とすると、定常状態におけるガスの収支は

$$\frac{\partial J_i}{\partial x_i} = S \tag{3.3}$$

で表わされる。ガス管周辺の流れは、ガス管を中心とする軸対称になると考えられる。式(3.1)を円筒座標を用いて書きなおすと、

$$J_r = -C_r d^2 \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad J_z = -C_z d^2 \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g \right) \quad (3.4)$$

J_r : 半径方向のフラックス ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

C_r : 半径方向の係数

r : 半径方向の座標 (m)

となる。

3.3 境界条件

図4の平面図に示したように各ガス抜き管が間隔 $2R_2$ の密度で配置されているとする。

一般にこのような問題は3次元問題としてとらえなければならないが、本報では2次元化するため次の簡略化を行う。そのガス抜き管に隣接する領域から発生するガスのうち、ガス抜き管に集められるガスはすべてその管に集まるような領域を影響範囲と呼ぶ。この時1つの管の影響範囲は、半径 R_1 から R_2 までの間の範囲であると考えられる。

即ち、ガス流がガス抜き管を中心とする軸対称の流れをするとして仮定した時、実際の廃棄物層内の圧力分布は影響範囲を R_2 にしたときより低く、 R_1 にしたときより高いはずである。従って覆土を通して大気中へ放出されるガス量は、影響範囲を R_1 として解析した時よりも多く、 R_2 として解析した時よりも少なくなる。

以上の仮定を採用すれば、大気中へ流れるガス量を一意的に決定することはできないが、その範囲は求めることができる。

図4に示した境界条件 $\Gamma_1 \sim \Gamma_3$ を考える。

ここに $\Gamma_1 \sim \Gamma_3$ は

Γ_1 : $p = p^*$ (p^* : 大気圧 (Pa))

Γ_2 : $J_r = 0$ (J_r : 半径方向のガスフラックス ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$))

Γ_3 : $J_z = 0$ (J_z : 鉛直方向のガスフラックス ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$))

である。

3.4 有限要素法によるガス流動解析

直交座標系での基礎方程式(3.1)、(3.3)から、仮想圧力 δp に対して、次の変分原理が得られる。

$$\int_{\Omega} k_i \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_i} \frac{\partial \delta p}{\partial x_i} d\Omega = - \int_{\Omega} k_z \frac{\rho}{\mu} \rho g \frac{\partial \delta p}{\partial z} d\Omega + \int_{\Omega} S \delta p d\Omega \quad (3.5)$$

前節の境界条件によって、境界面上の積分は消える。式(3.5)を円筒座標で表示すれば

$$\int_{\Omega'} \left(k_r \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \frac{\partial \delta p}{\partial r} + k_z \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial \delta p}{\partial z} \right) r dr dz \quad (3.6)$$

$$= - \int_{\Omega'} k_z \frac{\rho}{\mu} \rho g \frac{\partial \delta p}{\partial z} r dr dz + \int_{\Omega'} S \delta p r dr dz$$

を得る。ここに Ω' は、図5(a)に示されるような $R_1 < r < R_2$, $0 < z < H_2$ の領域である。

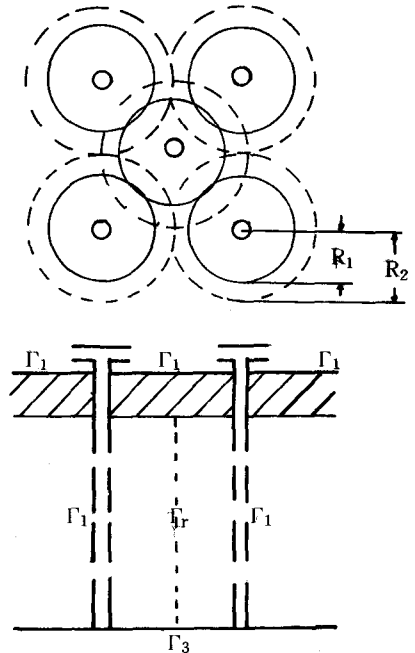


図4 ガス抜き管の配置

本報では、専ら軸対称のガス流動を扱うので、以下では、式(3.6)について無次元化を行う。有限要素法によって式(3.6)を解く場合、積分領域 Ω' の寸法がまちまちでは、要素分割に多くの労力を要する。位置変数 r と z を

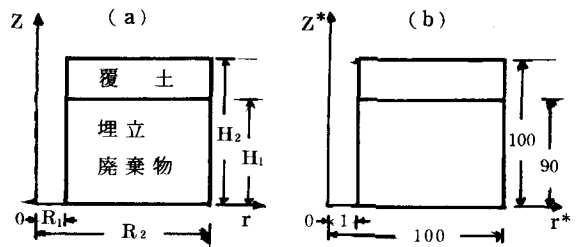


図 5

$$r^* = 1 + 99 \frac{r - R_1}{R_2 - R_1} \quad (R_1 \leq r \leq R_2) \quad (3.7)$$

$$z^* = 90 + 10 \frac{z - H_1}{H_2 - H_1} \quad (H_1 \leq z \leq H_2) \quad (3.8)$$

または

$$z^* = \frac{90}{H_1} z \quad (0 \leq z \leq H_1) \quad (3.9)$$

で無次元変数 r^* , z^* に変換すると、領域 Ω' は図5(b)のような領域Dに写される。式(3.7)－(3.9)に従って(3.6)を変換すると、廃棄物層($0 \leq z \leq H_1$)の有限要素について

$$\begin{aligned} & \int \left\{ k_r \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{99}{R_2 - R_1} \right)^2 \frac{\partial p}{\partial r^*} \frac{\partial \delta p}{\partial r^*} + k_z \frac{\rho}{\mu} \left(\frac{90}{H_1} \right)^2 \frac{\partial p}{\partial z^*} \frac{\partial \delta p}{\partial z^*} \right\} \\ & \quad \phi(r^*) \left(\frac{R_2 - R_1}{99} \right) \left(\frac{H_1}{90} \right) dr^* dz^* \\ = & - \int k_z \frac{\rho}{\mu} \rho g \frac{90}{H_1} \frac{\partial \delta p}{\partial z^*} \phi(r^*) \left(\frac{R_2 - R_1}{99} \right) \left(\frac{H_1}{90} \right) dr^* dz^* + \\ & + \int S \delta p \phi(r^*) \left(\frac{R_2 - R_1}{99} \right) \left(\frac{H_1}{90} \right) dr^* dz^* \end{aligned} \quad (3.10)$$

を得る。ただし、 $\phi(r^*) = R_1 + (R_2 - R_1)(r^* - 1)/99$ である。覆土層($H_1 \leq z \leq H_2$)についても同様の式が得られる。式(3.10)の未知関数 p をアイソパラメトリック要素で補間し、節点圧力についての連立一次方程式を解いて、有限要素解 p と、フラックス J_i 、境界 Γ_i における法線フラックス J_n が求められる。

3.5 ガス抜き管設計の最適化

最適設計においては、設計パラメーターと最適にすべき目的関数の選び方が重要である。本報では、設計パラメーターとしてガス抜き管の半径 R_1 、管の配置密度の代表長さ R_2 、覆土までの埋立高さ H_2 を選んだ。廃棄物の高さ H_1 、透気係数 k_i 、温度分布 T 、ガス発生量 S は、系の定数として与えることにする。これら設計パラメーターの間には次の制約条件が成り立たねばならないとした。

$$0.1 < R_1 < 2.0 \quad (\text{m}) \quad (3.11)$$

$$10 < R_2 < 200 \quad (\text{m}) \quad (3.12)$$

$$H_1 + 0.1 < H_2 < H_1 + 3.0 \quad (\text{m}) \quad (3.13)$$

更に、覆土を通して大気中へ放出されるガス量と、ガス抜き管に集まるガス量について、集ガス率を、ガス抜き管1本当たり

$$\text{集ガス率} = \frac{\text{ガス抜き管からのガス量}}{\text{ガス抜き管からのガス量} + \text{覆土からのガス量}} \quad (3.14)$$

を定義するとき、集ガス率の上下限界も制約条件として考慮する。これらのガス量は、有限要素解の境界法線フラックスを用いて計算される。

最適化の目的は、廃棄物単位体積あたりの埋立費用を最小にすることであるから、差し当り、目的関数として

$$C = \alpha (H_2 - H_1) + \frac{10^5}{\pi R_2^2} H_2 \times \beta R_1 \quad (3.15)$$

を選ぶ。ここに

C	； 単位面積当りのコスト	円/㎡
α	； 単位面積、単位高さ当りの覆土のコスト	円/㎡・m
$H_2 - H_1$	； 覆土の高さ	m
$10^5/\pi R_2^2$	； 単位面積当りのガス抜き管の本数	本/㎡
H_2	； 埋立て高さ	m
βR_1	； ガス抜き管の単位長さ当りのコスト	円/m

制約条件 (3.11) - (3.14) のもとに (3.15) を最小にするための計算法は、有限要素法と最適化手法の1つを組み合わせて実行される。不等式制約条件が与えられており、高い精度は必要でないため、本報では、BOXの非線形シンプレックス法を用いた。¹¹⁾

4. あとがき

以上の様な廃棄物埋立場の最適設計手法の検討を行い、ガス問題についてはその設計システムの確立を試みたが最終的な結論を得ることができなかった。今後流入空気量、浸出液の集水も含めた埋立場全体の設計システムの開発に努めたい。

謝辞、今回本研究を進めるに当り市村聡枝さんの多大なる協力を得た事を付記し、感謝の意を表する。又、同時に本研究は、昭和56年度一般研究B(547050)のサポートを受けている事を関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 山崎惟義 他、準好気性埋立に関する理論的研究、第16回衛生工学研究討論会講演論文集、pp. 126-131. 1980.
- 2) M. Hanashima *et al.*, Heat and Gas Flow Analysis in Semiaerobic Landfill. ASCE, EE1, 2., 1981.
- 3) 長野修治 他、埋立場からのガス発生とその対策、第30回廃棄物処理対策全国協議会全国大会講演集、1979.
- 4) 好気性埋立処分の技術に関する研究報告書、日本環境衛生センター、1976.
- 5) 大西和栄 他、山間埋立による土壌地下水汚染の長期予測法、福岡大学研究所報、第49号、12., 1980.
- 6) 土質工学ハンドブック、土質工学会編、技報堂、1965.
- 7) Houshang Esmaili, Control of Gas Flow from Sanitary Landfills. ASCE, EE4, 8., 1975.
- 8) G. J. Farquhar, *et al.*, Gas Production During Refuse Decomposition. Water, Air, and Soil Pollution, 2., pp. 483-495. 1973.
- 9) R. K. Ham, Predicting Gas Generation From Landfill. Waste Age, 11., pp. 50-58. 1979.
- 10) F. B. Dewalle *et al.*, Gas Production from Solid Waste in Landfills. ASCE, EE3, 6., 1978.
- 11) M. J. Box, A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods. Computer J., 8., 1965.