

北海道大学工学部 正会員 高畑 恒志 (現, EX都市研)

正会員 田中 信寿

正会員 神山 桂一

はじめに 埋立処分地における主な環境影響要因である浸出水やガスの発生に大きな影響を与えるのは、ごみ層内で生ずる生物化学的反応であり、ごみ層内部が好気的になるか、嫌気的かでその様相が大きく異なる。このことは大気中からの酸素の浸入がごみ層のどこまで及ぶかという問題であり、ごみ層のもつ酸素吸収速度とごみ層内でのガスの移動速度(移動抵抗)によって決まる。また、処分地内で発生するメタンガスがどのように放散されていくのかも、ごみ層内でのガス移動現象が重要な役割をはたす。ここでは湿潤型ごみ層におけるガス移動現象のモデル化とそのパラメータの決定について述べる。

1 モデル式の提案 ごみ層を多孔体(porous media)と考え、ごみ層内のガス移動は深さ方向の1次元の式として次のように書ける。

$$\text{連続の式 } \varepsilon \frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\partial N_i}{\partial z} + Y_i \quad (1)$$

拡散の式(ごみ層内は常圧常温に近いので Stefan-Maxwell の式を適用)

$$\frac{\partial x_i}{\partial z} = \frac{\pi}{\sum_{j=1}^n (x_i N_j - x_j N_i) \{C \mathcal{D}_{ij} (\varepsilon/\xi)\}^{-1}} \quad (2)$$

流動式(種々の仮定に基づいて)

$$(P/\varepsilon) \frac{\partial u}{\partial z} = -u/(\xi K) - \partial(P - p_g)/\xi \partial z \quad (3)$$

ここで、 C_i : オイル成分ガスの空隙中の濃度(mol/m³)、 x_i : モル分率(-) [$\equiv C_i/C$]

C : 全ガス成分濃度(mol/m³) [$\equiv \sum_{i=1}^n C_i = RT/p$]、 T : ごみ層内温度(K)

P : ごみ層内全圧(Pa)、 R : ガス定数(m³Pa/mol・K)、 u : ガスの空塔速度(m/s)

[$\equiv \sum_{i=1}^n M_i N_i / \sum_{i=1}^n C_i M_i$ (M_i はオイル成分ガスの分子量)], N_i : オイル成分ガスの多孔体単位断面

面積当りの移動速度(mol/m²s)(下向きに正)、 Y_i : オイル成分ガスの多孔体単位容積当りの

生成速度(mol/m³s)[液相と固相から生ずるごみ塊から発生して気相(空隙)に流入する速

度で、ガスが吸収される時は負値]、 ε : ガス相容積率(空隙率)(-)、 ξ : 圧曲係数(-)

K : 透気係数(m²/Pa s)[毛管束モデルによれば $K \equiv R^2/(8\mu\xi)$ 、 R は毛管の直径(m)、 μ はガス

の粘度(Pa・s)、 p : ガス圧(Pa)、 $\mathcal{D}_{ij}$: i, j 2成分系の分子拡散係数(m²/s)、

g : 重力加速度、9.8 m/s²、 t : 時間(s)、 z : 表面を0とした深さ方向距離(m)

流動式(3)について定常状態で圧力勾配が大きい時には

$$u = -K \frac{dP}{dz} \quad (D'Arcy \text{ の式}) \quad (3)'$$

又、浮力項 p_g が無視できない時(定常で多孔体内の状態が均一である時)

$$u = -K(p_{out} - p_{av})g \quad (3)'' \quad [\text{下向きに正}]$$

以上のモデル式では主なガス移動機構としてガス成分の吸収、発生反応と濃度差による拡散、及び内外の温度差によって生ずる浮力による空気の吸込みを取り上げ定式化した。これらの他に大気圧や気温の急激な変動あるいは降雨水の移動や底層飽和水面の移動、ごみ層の圧密などに伴うガス移動が考えられるが、その量はわずかと考えている。

2. 実験によるパラメータの決定と簡単な場合でのモデルの検証

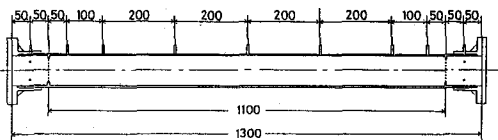


図1 通気実験及び拡散実験装置

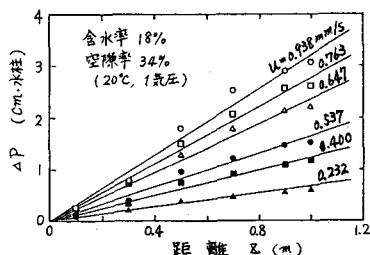


図2 流れ距離と圧損の関係

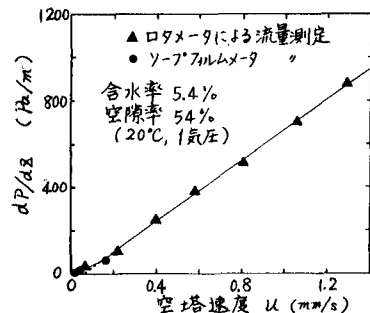


図3 圧力勾配と流速の関係

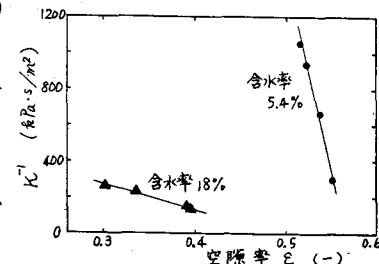


図4 透気係数と空隙率の関係

バッチ炉から採取した焼却灰(炉から直接採取したものと埋立地から採取したものを混合して風乾し、9.5mm以下のもの)を供試材料とした。この灰の真密度は 1.8 kg/m^3 、50%径は 0.5 mm である。

2.1 通気実験による透気係数の決定 内径8cmの水平塩ビ管に灰を長さ1.1mに充填し(図1)、 N_2 ガスを流して流速 u と圧損 ΔP の関係を測定した(図2)。図3に圧力勾配と u の関係を示した。流速の違い所でslip flowが現われる。直線部分から透気係数 K を求めると図4のようになる。なお、含水率25, 31%では抵抗が大きく、通気できなかった。このように実測された K の最小値 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$ から、毛管直径 R を計算すると $20 \mu\text{m}$ となり、常温常圧での平均自由行程 $0.4 \mu\text{m}$ に比べてはるかに大きく、灰層での拡散はKnudsen領域にはついていることがわかる。

2.2 拡散実験による ϵ の決定 通気実験と同じ装置で灰充填後空気を N_2 ガスで置換し、充填層の両端の空間に、各々、 Ar ガスと N_2 ガスを両端の圧力を等しくしながら定期的に通気する。両端に移動してくるガス組成が定常になった時、図5のような濃度分布を示す。式(1)、(2)で $Y_1 = Y_2 = 0$ ($1:\text{Ar}$, $2:\text{N}_2$)とおいて解くと $X_1 = (X_1^0 - a)e^{bz} + a$ (4) $a \equiv \frac{N_1^0}{N_1^0 + N_2^0}$, $b \equiv \frac{N_1^0 + N_2^0}{C D_{12} (\epsilon/\xi)}$ ここで X_1^0 は $z=0$ における X_1 の値、 N_1^0 , N_2^0 は Ar , N_2 の定常フラックスである。実測値から求めた $X_1^0 = 0.9753$, $X_1(z=1.1\text{m}) = 0.0214$, $N_1^0 = 1.11 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$, $N_2^0 = -1.36 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$ (多孔体では $N_2/N_1 = -\sqrt{M}/M_2$ であることが知られていて、この実験値はこれを満足している)を式(4)に代入すると、 $(\epsilon/\xi) C D_{12} = 1.41 \times 10^{-4} \text{ mol/m}\cdot\text{s}$ が求まり、 $\epsilon = 0.303$, $C = 41.6 \text{ mol/m}^3$, $D_{12} = 0.20 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (20°C)を代入すると $\xi = 1.8$ と求まる。以上の値を式(4)に代入すると、図5の実線のようになる。

2.3 準好気型焼却灰埋立模擬槽での O_2 濃度分布 内径25cmの塩ビ管に深さ2mに焼却灰を充填した(充填密度 935 kg/m^3 (含水率18.6%), 空隙率40.2%)。

この灰には少量のでんぷん、肉エキスを加えてある。上部空間には内径12mmの塩ビ管2本を側面に設け、下部には、10cmの主砂利を敷き、同径の塩ビ管11cmを側面に設け、大気開放した。埋立後100日後の濃度分布(ほぼ定常)を図6に示す。この時、定常状態を仮定し(内外の温度差はほとんどない)、さらに O_2 吸収速度が全層で一定で発生した CO_2 は灰に吸収され、気相側に出てこないとする、式(1)、(2)から ($1:\text{O}_2$, $2:\text{N}_2$, N_2 ガスは静止状態だから $N_2^0 = 0$)、 $Q_n(1-X_1)/(1-X_1^0) = (N_1^0 + \frac{r_1^0}{2} z) z / \{C D_{12} (\epsilon/\xi)\} = -r_1^0 (Z^* - \frac{z}{2}) z / \{C D_{12} (\epsilon/\xi)\}$ (5) と解ける。ここで図6の実測値から $z=0$ で $X_1^0 = 0.198$, $z=2.0\text{m}$ で $X_1 = 0.172$ 及び O_2 吸収速度 r_1^0 が実測されているので $dx_1/dz=0$ となる点 Z^* を図から読み取ると $Z^* = 1.28\text{m}$ となり、これらを代入すると $-r_1^0 / \{C D_{12} (\epsilon/\xi)\} = 0.057 \text{ 1/m}^2$ となる。今、 $\epsilon = 0.402$, $D_{12} = 0.20 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $\xi \approx 2$ とおくと $-r_1^0 \approx 1 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2\cdot\text{s}$ と求まる。これらのパラメータ値を式(5)に代入して O_2 濃度分布を画くと図6の実線のようになり、ほぼ実測値を説明している。

2.4 同上埋立槽での空気の吸込み速度の測定 灰層の深さ0.4, 1.0, 1.6mに棒状ヒーターを直径方向に挿入し、加熱した。温度測定点が少なく正確な温度分布が測定できなかったが表1のような測定値を得た。図4から $K = 0.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$ を求め、流速がslip flowの領域にあることを考え $K = 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{Pa}\cdot\text{s}$ とおき、式(3)から吸込み速度 u を求めると表1のようになる。温度、流量の測定の粗さを考えれば、オーダー的に合致している。

参考文献 1) Bird, R.B. et al; "Transport Phenomena", 2) Gunn, R.D. et al: AICHE, vol.15, No.4, P.507 (1969), 3) Aljaydi, A.A. et al: AICHE, vol. 24, No.1, P.35 (1978), 4) Evans, R.B. et al: J. Chem. Phys., vol.35, No.6, P.2076 (1961), & vol.36, No.7, P.1894 (1962)

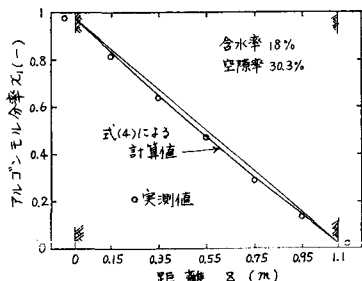


図5 拡散実験での Ar 濃度分布

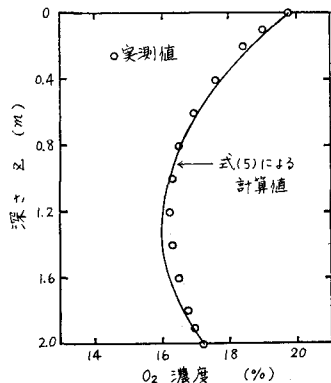


図6 埋立実験での O_2 濃度分布

表1 反層の空気吸込み速度

層内平均温度	吸込み(空塔)速度 (m/s)	
	実測値	計算値
298K[25℃]	8.3×10^{-7}	3×10^{-7}
302K[29℃]	1.4×10^{-6}	5×10^{-6}
305K[32℃]	1.7×10^{-6}	7×10^{-6}

外気 20°C , $\rho_{\text{out}} = 1.205 \text{ kg/m}^3$