

(4) 廃棄物埋立処分場における大気中酸素の廃棄物層への
浸入深さとフラックスについて

PENETRATING MASS FLUX OF OXYGEN AND AEROBIC ZONE DEPTH
IN SANITARY LANDFILL LAYER

田中信寿,* 高畑恒志,** 神山桂一*

Nobutoshi TANAKA*, Kohshi TAKAHATA**, Keiichi KOHYAMA*

ABSTRACT ; An important function of sanitary landfill is decomposition of putrescible materials in buried solid waste, which leads to reduce organic pollutants in leachate. Biological degradation occurs under both aerobic and anaerobic conditions. The more oxygen should be taken in the waste layer to increase aerobic degradation but the rate of anaerobic fermentation decreases by oxygen penetrating into the layer. In respective cases, it is essential how much oxygen is supplied into the waste layer from atmosphere.

In this paper, the oxygen flux and penetrating depth are studied theoretically in the solid waste layer which is not saturated with water. Some results of column experiments are comparing with calculated values based on the presumption that oxygen may diffuse through many tortuous capillary tubes. In the case of the waste layer both with and without top soil cover it was practiced under the following situations; (1) when the bottom of the layer is open to atmosphere and the temperature of the layer is higher than that of atmosphere, (2) when the bottom is closed to atmosphere and the absorption of CO₂ occurs in the layer, and (3) when the bottom is closed and the anaerobic gas generation occurs in the lower part of the layer.

KEYWORDS ; Sanitary landfill, Solid waste, Oxygen diffusion, Oxygen flux

1. はじめに

埋立処分場の機能の1つは、廃棄物中の分解性成分(有機物)を無機物に変化させて土に還元することである。近年、好気性微生物の活発な分解力を利用する準好気性埋立構造が秀れているとの研究成果¹⁾が発表され、この構造をとる処分場が各地に増えている。この構造では処分地内の滞留飽和水を流出させることによって集水管を開放し、廃棄物層下部を大気に連結して廃棄物層内の温度と外気温の差により、空気を自然に吸込もうとする²⁾。一方では、処分用地の確保難から埋立厚が増加したり、廃棄物の破碎等により充填密度が大きくなったりする傾向があるので、果して広い範囲で好気性生物分解反応を維持できるだけの酸素浸入が可能であろうかという疑問がある。さらに、埋立構造上、廃棄物層下部が水封されている場合でも廃棄物層表面から酸素の浸入があり、この埋立構造の処分地で生ずるメタン発酵を阻害する酸素の浸入がどの程度の深さまで起り得るか興味がある。

本報では、酸素の浸入は層内の気相間隙でのガス移動によっていると考え、間隙を毛細管で模擬する計算モデルの適用を提案する。モデルの計算範囲について考察した後、モデルのパラメータの決定方法について述べる。さらに、外気からの酸素浸入が生ずる5つのケースについてモデルの(近似)解析解を求め、間隙の構造や廃棄物層の酸素吸収速度などに対して酸素浸入深さと浸入フラックスを計算して図示する。また、いくつかのケースについて実験値との比較によって毛細管モデルの妥当性を検討する。

* 北海道大学工学部 Faculty of Engineering, Hokkaido University

** エックス都市研究所(株) EX Urban & Environmental Research Institute Co. Ltd.

2. 計算モデル

2.1 処分地内への酸素の浸入機構

処分地内への酸素浸入は気相を通して流入する場合と降水中の溶存酸素が流入する場合とがある。後者の量は、年間降雨量 $1600\text{mm}/\text{年}$ 、 20°C で飽和($9\text{mg}/\text{l}$)と仮定して $1.4 \times 10^{-7} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ の酸素フラックスと計算され、気相による酸素浸入量に比べて小さい(図7, 8参照)。

気相による酸素浸入機構は、①廃棄物層内での酸素消費によって生ずる内外の濃度差により拡散浸入する、②分解反応熱などによる内外の温度差によって、廃棄物層下部が大気開放されていると空気が流入する、③廃棄物層内に炭酸ガス吸収力があると、炭酸ガスの発生反応がみられず好気性反応による酸素の吸収反応のみが起り、内部が負圧となり、空気が吸込まれる。④処分地内の飽和水面の低下によって空気が吸込まれる(年間で 800mm の水を汲上げると、それによる酸素浸入フラックスは $2 \times 10^{-7} \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ と計算され、無視できる)、⑤内外の温度、気圧が変動し、処分地内部の気相が膨張、収縮する、などが考えられる。

本報では、上記の①, ②, ③の機構を取扱う。また、ガス拡散については、濃度差拡散の他に、温度(熱)拡散や圧力拡散などもあるが、一般にそれらの効果は小さい¹³⁾ので無視できる。また、拡散は、廃棄物層内の空隙がガスの平均自由行程 λ の λ 以下になるとKnudsen拡散が支配的となり、 λ の10倍以上になると通常の分子拡散が支配的になると言われている³⁾。後述するように、廃棄物層内においては両拡散の間域から通常分子拡散域における濃度(分圧)勾配、及び全圧勾配下でのガスの移動現象を扱うことになる(図1参照)。

2.2 毛細管モデルによる計算式

水で飽和していない廃棄物層は連続した気相の存在する多孔体と考えることができ、本報で扱うべきガス移動現象のモデルとしてCapillary tube model⁴⁾とDusty gas model^{5~7)}があり、各々長短がある。本報では比較的理解が簡単でパラメータ(実験定数)の決定し易い前者のモデルを、Alzaydi et al.⁴⁾の考え方を一部修正[※]して用いる。

濃度勾配による拡散フラックス N_i^d と濃度(分圧)勾配との間には次式が成立する³⁾

$$-\frac{1}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial z} = \left(\frac{N_i^d}{D_{k1}} + \sum_{j=1}^n \frac{N_j^d}{D_{1j}} \frac{x_j - N_j^d}{D_{1j}} \right) \frac{\xi}{\varepsilon} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

ただし $(n-1)$ 個の式が独立

右辺の()内で第一項はKnudsen拡散項で、第二項は通常分子拡散項である。右辺の ξ/ε は多孔体中での移動距離と空間の広さを補正する項である。

さらに全圧勾配が存在する場合には、それによる流動フラックス F は次式で表現できる³⁾

$$F = - \left(\frac{r^2}{8\mu_{m1x}} + \frac{r}{S_{m1x}} \right) \frac{P}{RT} \frac{\partial(P + \rho gz)}{\partial z} \frac{\varepsilon}{\xi} \quad (2)$$

右辺の()内の第一項は粘性流動項で、第二項はスリップ流動項である。

濃度勾配と全圧勾配が同時に存在する時には、上式で計算した両フラックスを加算して全フラックス N_i^t が算出できる⁶⁾

$$N_i^t = N_i^d + x_i F \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

全フラックスは次の連続の式を満足する。

$$\frac{\varepsilon}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial t} = - \frac{\partial N_i^t}{\partial z} + R_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

以上の式により濃度分布やフラックスを決定するには、情報が不足していて拡散フラックス N_i^d に関する別の情報が必要である。流動フラックス F が存在しないか、既知の時には現象の物理的条件から N_i^d の関係が求まる⁹⁾が、 F に関する情報がない時には現象の物理的条件と共に閉空間での拡散に対して実験的(2成分⁸⁾)、理論的に証明されている⁵⁾次式を使って、 F や N_i^d を求める。

$$\sum_{i=1}^n \sqrt{M_i} N_i^d = 0 \quad (5)$$

以上の式に含まれるパラメータ(物性)は次のように、温度、圧力、組成の関数として与えられる。

※：修正の内容は次の通りである。式(1), (2)においてAlzaydiらは r に分布があるとして扱い、 ξ も r の関数として扱っているが、ここでは充填層の特性を表す代表値として1つの r と ξ を用いるという簡略化を行なった。さらに、式(2)において ρgz の重力ポテンシャル項を加えたこと、式(4)に反応項を加えたこと、及びAlzaydiらが2成分ガスの取扱いきり行なっていないのを3成分以上に拡張したことである。

$$\text{Knudsen 拡散係数} \quad D_{ki} = 3.07 r \sqrt{\frac{T}{M_i}} \quad (6)$$

相互拡散係数 D_{ij} については、2 分子ガスのそれは低圧(常圧)では圧力に逆比例し¹⁰⁾ 温度の約 2 乗に比例する。¹¹⁾ 273K, 1 気圧における D_{ij} 値として右の表の値を用いる。

$$\text{混合ガスの粘度} \quad \mu_{\text{mix}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{1j}} \quad (8)$$

ここで

$$\Phi_{ij} = \sqrt{\frac{1}{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{1/4}\right]^2 \quad (8')$$

さらに、各成分の粘度 μ_i は低圧(常圧)では圧力には独立で $\mu \propto T^{0.6 \sim 1.0}$ の関係にある。¹²⁾

$$\text{混合ガスのスリップ係数} \quad S_{\text{mix}} = 3 \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i}{2\pi RT}\right)^{1/2} p_i (9) \quad D_{ij} = D_{ij}(273K, 1\text{atm}) (T/273)^m (P_0/P) \quad (7)$$

また、多孔体の構造的特性を示す r, ϵ, ξ は後述するように実験的に定める必要がある。

2. 3 計算範囲の設定

どのような範囲でモデルの計算を行えばよいかを検討するために、実測されている透水係数から間隙半径 r を推定してみる。式(2)で流体が水の場合にはスリップ項が無視でき次式が導ける。

$$u = \frac{RT}{P} F = -\frac{r^2}{8\mu} \frac{\epsilon d(P + \rho g z)}{dz} = -k' \frac{dh}{dz} \quad (10)$$

上式で $(P + \rho g z)$ を全水理ポテンシャル $h[\text{cm}]$ で置換えた時の透水係数 $k'[\text{cm/s}]$ は $(P + \rho g z)$ を $[Pa]$ で測定した時の透水係数 $k_L[\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})]$ と次の関係にある。

$$k_L = (k'/98.07) \times 10^{-4} \quad (11)$$

$$\text{水の粘度を } 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s} \text{ とおくと、式(10)から} \quad r = \sqrt{(\xi/\epsilon) k' \times 8 \times 10^{-7} / 98.07} \quad (12)$$

ϵ は気相の容積率で比較的容易に推定できる[式(14)]が、廃棄物層の屈曲係数 ξ の実測値はない。例えば、平均間隙径 $1.45 \times 10^{-7} \text{m}$ の fine grained soil に対して $\xi=2.71$ 、平均間隙係 $2.0 \times 10^{-8} \text{m}$ の coarse grained soil に対して $\xi=1.55$ として計算を行っている例がある。¹³⁾ 図 1 に $\xi/\epsilon=1.5 \sim 20$ に変化させて(4.2 節の実験から ξ/ϵ が大きくなる可能性もある)、 r と k' の関係を示した。また、水の通路とガスの通路が同じであるとしてガスの粘度 $2 \times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s}$ を用いると、透水係数 $k'[\text{cm/s}]$ と透気係数 $k[\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})]$ の間に次式が成立する。 $k = 5.1 \times 10^{-5} k'$ (ガスの粘性流領域で) ⁽¹³⁾

廃棄物の飽和透水係数の実測例は 10cm 以下の粒径の焼却灰に対して 0.20, 0.25 cm/s, 3cm 以下の粒径の焼却灰に対して 1.0×10^{-2} , $5.5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ の報告¹⁴⁾があり、筆者らは紙・布・ビニールチューブで作った人工ごみの透水係数を $5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ と測定している。¹⁷⁾ また、池口が EPA の研究成果を紹介したもの¹⁸⁾ から透水係数の概略値を見ると $2 \times 10^{-2} \sim 10^{-4} \text{cm/s}$ (下限は正確でない)と読み取れる。これらの値と共に、土の透水係数¹⁹⁾ も合わせて示した。

廃棄物の透気係数の実測例は、本報で報告しているもの(焼却灰, 図 3)と筆者らが人工ごみの強制通気好気性分解実験で得た圧損(ごみ層の上下間の差圧)から計算した値^{20, 21)}があり、合わせて示した。なお、後者の実験では、通気開始後に徐々に圧損値が上昇し始め、最終値は初期値の 20 倍程度となる。図 1 の範囲はこれを示している。

ガス移動の解析に当っては、パラメータを通して温度、圧力の影響がある。圧力については大気圧を大きくすることはないと考えられるが、温度については温度を規定する熱方程式を連立させる必要がある。また、ガスの反応速度も濃度、温度の関数として与えねばならないが、これら

	O ₂	CO ₂	N ₂	CH ₄
O ₂		0.187	0.181	0.187*
CO ₂	$m \approx 2^{**}$		0.144	0.153
N ₂	$m = 1.75$	$m \approx 2^{**}$		0.185*
CH ₄	$m \approx 2^{**}$	$m = 1.75$	$m \approx 2^{**}$	

Source: "Kagaku Binran (KisoHen)" in Japanese
*estimated value¹¹⁾ at 273K and 1 atm
**presumed value, $P_0 = 1\text{atm}$ in Eq.(7)
 D_{ij} at given temperature T and pressure P is estimated, using the following equation.

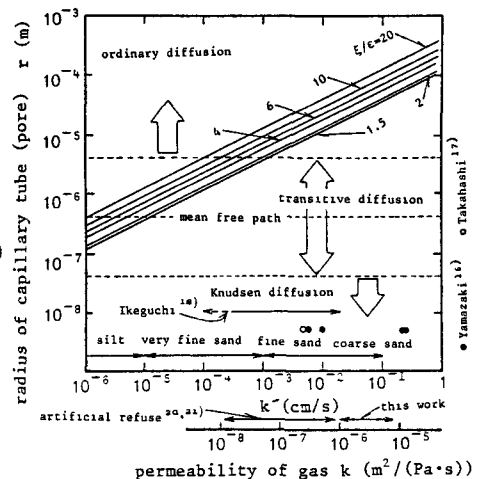


Fig.1 Relationship between permeability and radius of capillary

の事はまだ未解決の部分が多いので一定の区間で一定の値をとるとして解析を進めた。また、廃棄物層内には水蒸気が存在するが、本報では無視した(40℃の飽和水蒸気量は $x_{H_2O}=0.07$ である)。

3. 実験による r , ϵ , ξ の測定

計算モデルを使用するためには、 r, ϵ, ξ を各廃棄物層で決定する必要がある。その方法について述べる。

実験は図2に示す内径8cmの塩ビ管を水平に置き、行った。実験材料はパッチ炉から採取した焼却灰(炉と処分地から採取したものを風乾し、9.5mm以上の大型物は除いた。実験条件の含水率には水を加えて調整した)を用いた。この灰の真密度は 1.8kg/l , 50%径は 0.5mm である。また、この灰には少量のでんぷん(約 1g/kg 風乾灰)と肉エキス(約 0.2g/kg 風乾灰)を添加してある。(灰の未燃分がないように思われたので有機物を添加したがその効果はなかったようだ。)

以下の2つの実験により、 r と ξ が求まる。 ϵ は廃棄物の真密度 ρ_s を別に測定し、充填密度 $\bar{\rho}(\text{wet kg/m}^3\text{ layer})$ と含水率 w を知れば次式で計算できる。

$$\epsilon = 1 - \bar{\rho}_w - \bar{\rho}(1 - w) / \rho_s \quad (14)$$

3.1 通気実験による透気係数 k の測定

焼却灰充填層の一方から N_2 ガスを流し(空気を流すと反応が起る)、圧損 Δp と流下距離 z の関係を u を変えながら測定した。この時、純ガスの強制流動に対して式(2)

$$\text{から } u = F \frac{RT}{P} = - \left(\frac{r^2}{8\mu} + \frac{r}{S} \right) \frac{\epsilon}{\xi} \frac{\Delta p}{z} \equiv -k \frac{\Delta p}{z} \quad (15)$$

が成立するので、上式により k を計算する。結果を図3に示す。横軸の ϵ はガス空隙率であり、一般に含水率が高い程 ϵ は小さくなるために k は小さく考えられるが、この場合は逆の結果となっている。この理由は、灰を含水率18%に調整した際に灰粒子が造粒されて間隙径が大きくなり通気性がよくなったためである。また、含水率を25, 31%にすると抵抗が大きく通気できなかった。

3.2 2成分拡散(等圧)実験による ξ/ϵ の測定

図2の実験装置を用いて充填層内のガスを N_2 で置換した後、装置の両端の空間に各々 Ar ガスと N_2 ガスを両端の圧力が同じになるように通気する。一方から他方への移動フラックスが定常となった時に、各々のガス流量と濃度を測定してフラックスを求める。

$$\text{この時、式(1)から (1: Ar, 2: } N_2) \quad - \frac{\epsilon}{\xi} \frac{P}{RT} \frac{dx_1}{dz} = \frac{N_1^d}{D_{K1}} + \frac{N_1^d x_2 - N_2^d x_1}{D_{12}} \quad (16)$$

この式を、 N_1^d = 定数、 $x_1 + x_2 = 1$ で解くと $[B.C. \ x_1(z=0) = x_1^0, \ x_1(z=\Lambda) = x_1^\Lambda]$

$$x_1^\Lambda = (x_1^0 - \beta) \exp(\alpha \Lambda) + \beta \quad (17)$$

$$\text{ここで } \alpha \equiv \frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \frac{N_1^d + N_2^d}{D_{12}}, \quad \beta \equiv \frac{1 + D_{12}/D_{K1}}{1 + N_2^d/N_1^d} \quad (18)$$

測定結果の一例を図4(図中のプロット点は実測値で、実線は式(16)の解)に示す。この例では $x_1^0 = 0.9753$, $x_1^\Lambda = 0.0214$, $N_1^d = 1.11 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$, $N_2^d = -1.36 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2 \cdot \text{s}$ ($-N_2^d/N_1^d = \sqrt{M_1/M_2}$ で左辺は1.225, 右辺は1.194で式(5)をはほぼ満足している), $\Lambda = 1.1\text{m}$, 物性値 $D_{12} = 0.20 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (20℃), 実験条件 $P = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ (1atm), $T = 293\text{K}$ を式(17)に代入して $\xi/\epsilon = 5.9$ と求まる。ただし、この場合、

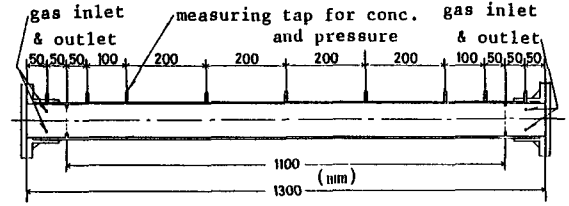


Fig.2 Experimental apparatus for r, ξ measurement

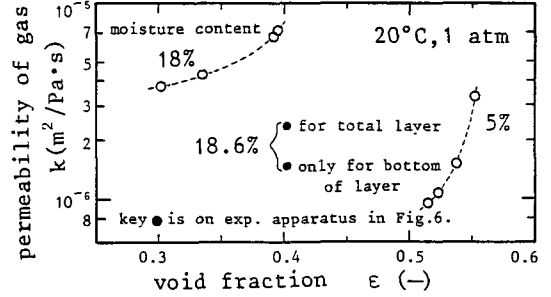


Fig.3 Permeability of incinerator residue

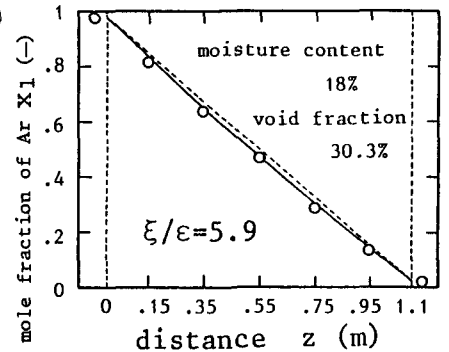


Fig.4 Steady distribution of Ar conc. through incinerator residue layer

$D_{12}/D_{K1} \ll 1$ である。空隙率 ϵ は0.303であるから $\xi=1.8$ となる。一方、透気係数 $k=3.76 \times 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ であるから式(15)を使って r を計算すると(この例では $r^2/8\mu \gg r/S$)、 $r=6 \times 10^{-5} \text{ m}$ となる。この実験条件は通常分子拡散域にある。なお、実験領域が中間域にある場合は、式(15)と(17)を連立させて解く。

4. 酸素浸入深さ及び酸素浸入フラックスの計算

以上で述べた計算モデルを用いて廃棄物層内への一次元的な酸素浸入の5つのケースについて浸入深さとフラックスを解析的に求める。解析に当っては廃棄物層内の反応速度 R_1 及び温度 T は時間的にゆるやかに変化すると考え、擬定常 $\partial p_i / \partial t = 0$ とし、さらに R_i と T は一定の区間で一定の値をとり、圧力 P は大気圧にほぼ等しいとの近似を用いた。さらに各節でもいくつかの近似、仮定をおいている。

4.1 内外に温度差があり、層の下部が大気開放されている場合の酸素浸入(準好気性構造における酸素浸入)

A) 内部に反応がなく、内外の温度差のみがある場合

温度差による空気吸込み量を求めることになる。廃棄物層内を均一の組成をもった流体が下から上へ流れ、全区間で一定の温度 T であるとする、式(2)から

$$u = -k \frac{d(P + \rho g z)}{dz} \quad (19)$$

この式を $z=0$ で $P=P_0$ 、 $z=\Lambda$ で $P=P_0 + \rho_{\text{out}} g \Lambda$ のB.C.で解くと、内外の密度差による吸込み量を求める式を得る。

$$u = -k(\rho_{\text{out}} - \rho) g \quad (20)$$

次に内外の温度差 $\Delta T = T - T_{\text{out}}$ と流入

空気量の関係を求める。内外の量について次式が成立する。

$$u = (T/T_{\text{out}}) u_{\text{out}} \quad (21)^{*}, \quad k = (T/T_{\text{out}})^{\theta} k_{\text{out}}, \quad (\theta \approx 0.8) \quad (22)^{**}$$

$$\rho = (T_{\text{out}}/T) (M/M_{\text{out}}) \quad (23)^{***}$$

式(20)に上式を代入して ΔT の1次近似式を導出すると次式となり、この関係を図5に示す。

$$\frac{-u_{\text{out}}}{k_{\text{out}} \cdot \rho_{\text{out}} \cdot g} \approx (1 - \frac{M}{M_{\text{out}}}) + \{ (\theta - 1) (1 - \frac{M}{M_{\text{out}}}) + \frac{M}{M_{\text{out}}} \} \frac{\Delta T}{T_{\text{out}}} \quad (24)$$

式(24)の関係を確かめるために実験を行った。実験装置を図6に示す。内径25cmの塩ビ管に深さ2mに前述の焼却灰を充填した(初期条件：充填密度935kg wet/ m^3 、含水率18.6%、空隙率40.2%)。装置の上部空間には内径12mmの塩ビ管2本を側面に付け、下部には10cm厚の玉砂利を敷き、内径12mmの塩ビ管(長さ11cm)を側面に付け、大気開放にしている。

この灰充填層の透気係数 k を実測した。ほぼ層全体(深さ20~190cm)で $k=2.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ であった(図3にプロット)。この層に棒状ヒータをさし込んで加温し、空気流入量を測定した。均一に加温できないという実験技術上の問題があったが、次のような層内の平均温度と空気流入量の関係が得られた。

$$T=298\text{K}: -u_{\text{out}}=8.3 \times 10^{-7} \text{ m/s}, T=302\text{K}: -u_{\text{out}}=1.4 \times 10^{-6} \text{ m/s}, T=305\text{K}: -u_{\text{out}}=1.7 \times 10^{-6} \text{ m/s}, \text{ 外気温度 } 20^\circ\text{C}$$

内部のガス組成を $x_{\text{O}_2}=0.17$, $x_{\text{N}_2+\text{Ar}}=0.83$ (図12参照)とすると $M/M_{\text{out}}=0.99$ となる。 $\rho_{\text{out}}=1.205 \text{ kg/m}^3$, $k_{\text{out}}=2.4 \times 10^{-6} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ を用いて測定値を図5にプロットした。空気量がわずかで測定の難しいことを

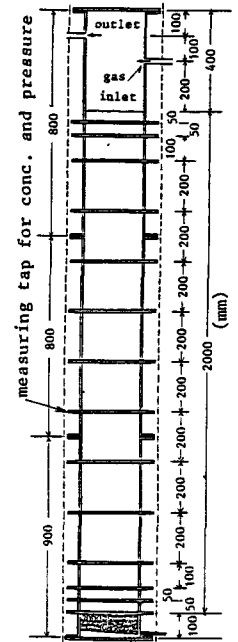


Fig.6 Model experiment of landfill of incinerator residue

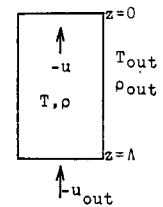


Fig.5 Effect of temperature difference of inflow rate of air

* : 内外でモル速度が保存されると考える。

** : 空気の吸込みは間隙半径 r の大きい領域で起ると考え、 $k \propto \mu^{-1}$ 、一方、 $\mu \propto T^{\theta}$ ($\theta=0.6 \sim 1$ 、計算では $\theta=0.8$ とする) であるから。

*** : 内部のガス組成が空気とは違う。 M_{out} は空気の平均分子量、 M は内部ガスの平均分子量。

考えればよく一致している。

また、透気係数などが異なる層が重なっている場合には、同様に解析することにより、

$$\sum_{i=1}^N \zeta_i \frac{(-u_i)}{k_i} = (\rho_{out} - \sum_{i=1}^N \zeta_i \rho_i) g \quad (25) \quad *$$

透気係数 k は充填物や覆土によってオーダ的に変化するので最も小さな k_1 の影響を大きく受けて流入空気量 u_{out} が決まる。

B) 濃度勾配による拡散フラックスが伴う場合

前節で求めた流動フラックス $F(=uP/RT)$ に濃度勾配による拡散フラックスが重なると仮定して解析する。廃棄物層下部からの酸素浸入によって深さ $L \sim \Lambda$ の間で好氣的分解反応 (1 モルの酸素の吸収に対して 1 モルの炭酸ガスの発生がある, i.e. $R_1 + R_2 = 0$) が生じ、深さ $0 \sim L$ での反応はないと考える。(1: O_2 , 2: CO_2 , 3: N_2 (Arも含めて))

式 (4) で定常状態を仮定し、簡単な考察で $0 < z < L$ で $N_1^t = 0$, $N_2^t = 0.21F$, $N_3^t = 0.79F$ であることがわかるから $L < z < \Lambda$ で $N_1^t = (-R_1)(L-z)$, $N_2^t = R_1(L-z) + 0.21F$, $N_3^t = 0.79F$ (26)

次に式 (3) を使って拡散フラックス N_i^d が求まる。

$$L < z < \Lambda \text{ で } N_1^d = (-R_1)(L-z) - x_1F, \quad N_2^d = R_1(L-z) + (0.21 - x_2)F, \quad N_3^d = (0.79 - x_3)F \quad (27)$$

連立微分方程式 (1) を式 (27) の N_i^d で解くが、解析解を得るために、消費された O_2 と等モルの CO_2 が生成することから、 $x_1 + x_2 = 0.21$ (i.e. $x_3 = 0.79$, $N_3^d = 0$, $N_1^d + N_2^d = 0$) を仮定して式 (1) から

$$-\frac{\epsilon}{\xi} \frac{P}{RT} \frac{dx_1}{dz} = \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{0.21}{D_{12}} + \frac{0.79}{D_{13}} \right) \{ (-R_1)(L-z) - x_1F \} \quad (28)$$

この式を B.C. $z=L$ で $x_1=0$, $z=\Lambda$ で $x_1=0.21$ ※ で解くと

$$(\Lambda-L) - (1/\alpha) [1 - \exp\{-\alpha(\Lambda-L)\}] = 0.21\alpha/\beta \quad (29)$$

$$\text{ここで } \alpha \equiv \frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{0.21}{D_{12}} + \frac{0.79}{D_{13}} \right) (-F), \quad \beta \equiv \frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{0.21}{D_{12}} + \frac{0.79}{D_{13}} \right) (-R_1) \quad (30)$$

式 (29) を満足する $(\Lambda-L)$ が酸素の浸入深さであり、 $(\Lambda-L)(-R_1)$ が酸素浸入フラックスである。いくつかの条件で計算したものを図 7 に示す。また、流動フラックス $F=0$ の時、すなわち濃度勾配のみにより酸素が浸入する場合 (覆土なし) に対して $\alpha \rightarrow 0$ ($F \rightarrow 0$) とすると式 (29) から次式が求まる。

$$\Lambda-L = \sqrt{0.42/\beta} \quad (31)$$

いくつかの条件で計算したものを図 8 に示す。

図 8 から、廃棄物層内への酸素の浸入深さは D_{k1} が D_{1j} に等しくなるあたり ($r=10^{-6} \sim 10^{-7} m$) から、急激に小さくなる。廃棄物の酸素吸収速度の測定値はあまりないが、筆者らはちゅう介を中心とする人工ごみの強制通気好気性分解実験 (1 次発酵) で $-R_{O_2} = 2.5 \times 10^{-3} \sim 10^{-4} mol/(m^3 \cdot s)$ の値を得ている。^{20, 21)} 同様のこみに対して本報の実験 (4.2 節) で $-R_{O_2} = 5 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-5}$ の値を得ている。また、本報の実験 (4.3 節) で焼却灰に対して $-R_{O_2} = 10^{-5}$ の値を得て

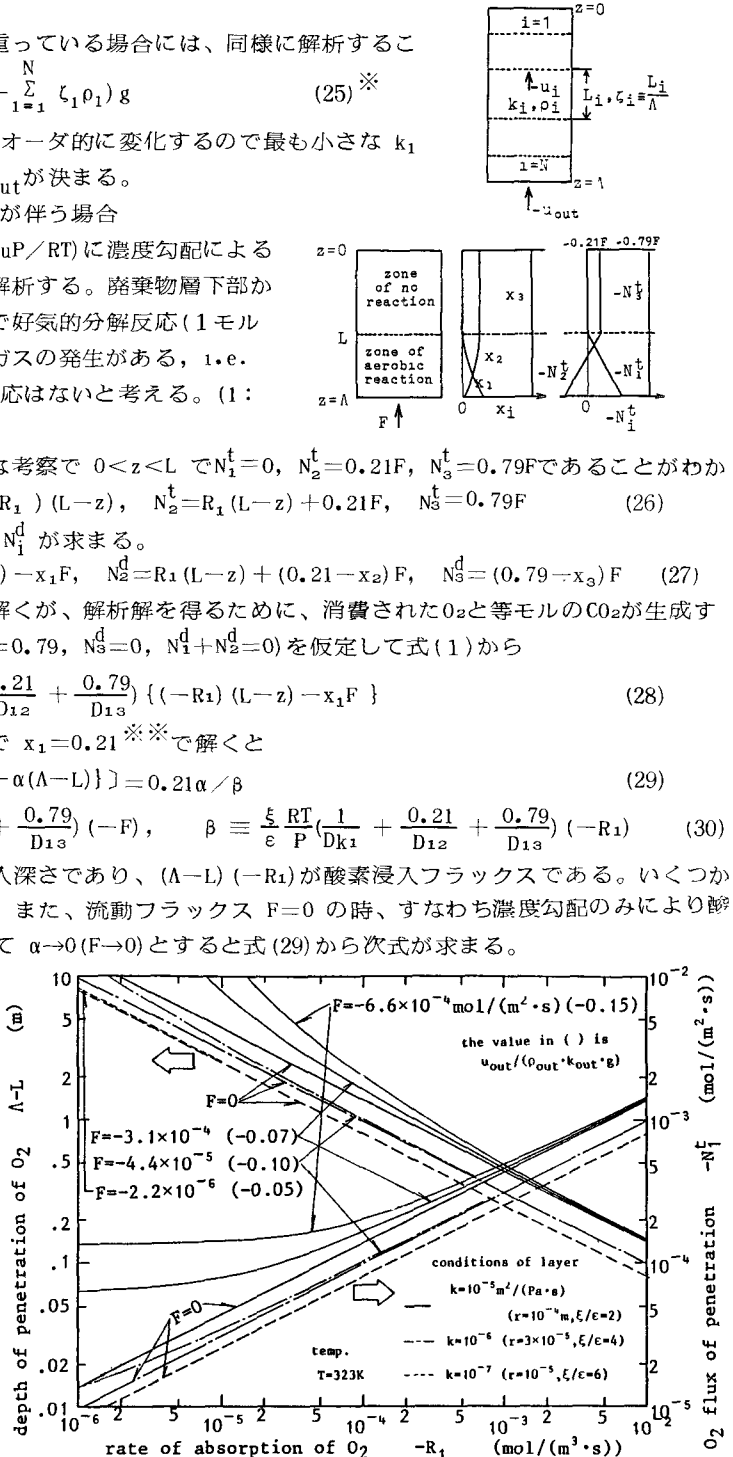


Fig.7 Depth of penetration of O_2 and O_2 flux of penetration, resulted from temperature difference and O_2 conc. gradient

※ : モル速度が保存されるとすると、 $u_i = (T_i/T_{out}) u_{out}$ である。

※※ : $z=\Lambda$ での状況により、必ずしも $x_1=0.21$ の値をとらず、それよりも小さな値となることも考えられるが、代表値として $x_1=0.21$ とした。

いる。したがってちゅう介の多いごみが活発な反応をしている時は、高々1mの浸入深さであり、充填密度が大きく、 ξ/ε が大きくなると浸入深さは数十cmとなる。さらに層内に有機物が無くなってくると、すなわち時間が経過すると、浸入深さは数mに達する。図8には酸素浸入フラックスも示してある。その量は $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ である。

また、図7(廃棄物層の透気係数が大きい場合に、空気の吸込みが起ると考え、透気係数の大きい所で計算してある)から、温度差による吸込みの効果は意外に小さい。すなわち、酸素吸収速度 $(-R_1)$ が大きい領域では、微生物活動が活発で内外の温度差が大きくなり得るが、 $(-R_1)$ が大きいために空気吸込みによる酸素浸入深さやフラックスの増加分がわずかである。一方、 $(-R_1)$ が小さい領域では、空気吸込みによる酸素浸入深さやフラックスの増加分は大きい、 $(-R_1)$ が小さいために微生物活動は活発でなく廃棄物層内の温度上昇はそれ程期待できない。

4.2 覆土を通しての酸素浸入($R_1+R_2=0$ の場合)

右図に示すように、廃棄物表面に覆土があり、それを通して酸素が拡散浸入する場合を考える。上部($L_1 < z < L_2$)では $R_1+R_2=0$ の好気性反応が生じ、下部($L_1 < z < \Lambda$)では反応がなく、 $z=\Lambda$ でフラックスは無い(閉鎖条件)と考える。

この時、式(3)、(4)から N_1^t と N_1^d について式が成立する。(1: O_2 , 2: CO_2 , 3: N_2)

$$0 < z < L_1 \quad N_1^t = (-R_1)(L_2 - L_1) = N_1^d, \quad N_2^t = R_1(L_2 - L_1) = N_2^d, \quad N_3^t = 0 = N_3^d \quad (32)$$

$$L_1 < z < L_2 \quad N_1^t = (-R_1)(L_2 - z) = N_1^d, \quad N_2^t = R_1(L_2 - z) = N_2^d, \quad N_3^t = 0 = N_3^d \quad (33)$$

一方、4.1, B)節と同様に、 $R_1+R_2=0$ の反応から $x_1+x_2=0.21$ (i.e. $x_3=0.79$)と仮定する[※]と、

$$0 < z < L_1 \quad -\frac{\varepsilon}{\xi} \frac{P}{RT} \frac{dx_1}{dz} = \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{0.21}{D_{12}} + \frac{0.79}{D_{13}} \right) (-R_1)(L_2 - L_1) \quad (34)$$

$$L_1 < z < L_2 \quad -\frac{\varepsilon}{\xi} \frac{P}{RT} \frac{dx_1}{dz} = \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{0.21}{D_{12}} + \frac{0.79}{D_{13}} \right) (-R_1)(L_2 - z) \quad (35)$$

両式をB.C. $z=0$ で $x_1=0.21$, $z=L_2$ で $x_1=0$ で解き、両式の解を $z=L_1$ で連続させると

$$0.21 = (\beta/2)(L_2 - L_1)^2 + \alpha(L_2 - L_1) \quad (36)$$

$$\alpha \equiv \left[\frac{\xi}{\varepsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{0.21}{D_{12}} + \frac{0.79}{D_{13}} \right) \right]_{\text{cov}} \times (-R_1)L_1$$

$$\beta \equiv \left[\frac{\xi}{\varepsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{0.21}{D_{12}} + \frac{0.79}{D_{13}} \right) \right]_{\text{ref}} \times (-R_1) \quad (37)$$

覆土がない時、i.e. $L_1=0$ ($\alpha=0$)の時、式(36)は式(31)に一致する。

いくつかの条件で酸素浸入深さ (L_2-L_1) を計算した結果を図9に示す。 $(-R_{O_2})$ の大きい所では覆土の影響は大きく、粘土〜かたいシルトを覆土に用いると浸入深さは10cm以下となる。したがってちゅう芥を含む廃棄物を好気的狀態で維持しようとするは、細砂のような空隙の大きい覆土を用いねばならない。

※: この仮定の誤差は次のように計算できる。式(32)から $N_1^d + N_2^d = 0$ だから、式(1)を $0 < z < L_1$ で解くと、 $x_3 = 0.79 \exp \left\{ \frac{\xi}{\varepsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{a1}} - \frac{1}{D_{a2}} \right) N_1^d z \right\}$ となる。例えば $z=0.5m$ で $x_3=0.79 \times 0.95$, ($\xi/\varepsilon=4$, $N_1^d=10^{-4} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T=300k$), $x_3=0.79 \times 0.60$, ($\xi/\varepsilon=4$, $N_1^d=10^{-5} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T=300k$)などと計算できる。

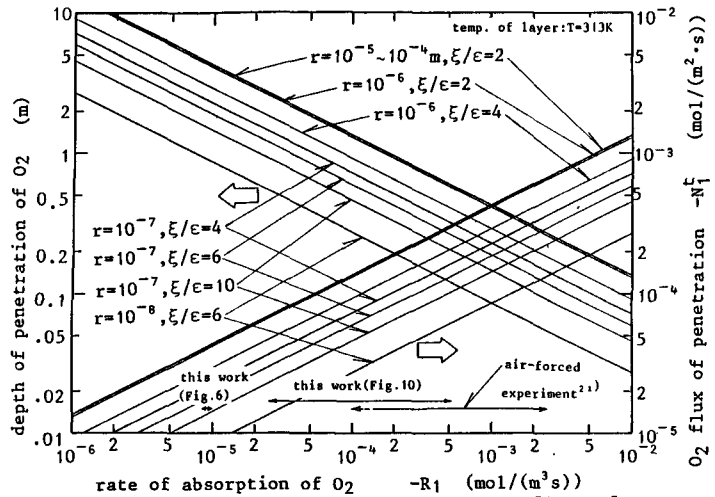
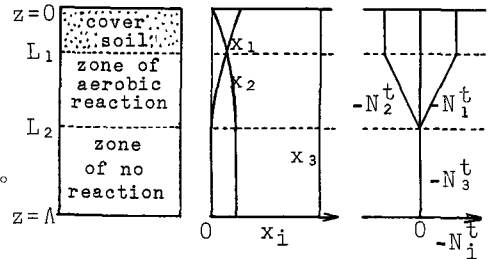


Fig.8 Depth of penetration of O_2 and O_2 flux of penetration in the case of layer without soil cover, resulted only from O_2 conc. gradient



一方、 $(-R_{O_2})$ の小さな所では、覆土による浸入深さの減少は大きくない。

次に、この節で取扱ったケースに相当する実験²²⁾の解析を行う。この実験では覆土がなく、好気ゾーンの下部は無反応でなく、嫌気性の炭酸ガス発生がある。炭酸ガス発生量はわずかなので、4.4節の解析からこの実験では酸素移動に影響しないことがわかる。実験装置は図10に示すように、断面積が $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ で深さ 1.75 m の直方形容器で、人工ごみ〔植物性ちゅう芥：32.36%，動物性ちゅう芥：7.63%，紙類：28.47%，繊維類：5.40% 木葉：3.04%，プラスチック：10.47%（その内フィルム：7.21%），ガラス：4.33%，陶器：0.91%，金属：4.03%，その他：3.0%，調整時湿ベース〕を充填密度 0.243 kg wet/l （含水率50.3%）で 1.48 m の深さに充填した。充填後、15日目と92日目のガスの濃度分布を図11に示す。充填層の上部に空気を通してガス組成を測定することで求めた $(-N_{O_2}^t)$ 、 $N_{CO_2}^t$ を図中に示す。 $N_{CO_2}^t + N_{O_2}^t$ が嫌気ゾーンでの炭酸ガスフラックスである。

この場合、式(35)を解いて(I.C. $z=0$ で $x_1=x_1^0$ ：充填層上部空間の濃度)

$$x_1 - x_1^0 = -\beta \left(Lz - \frac{z^2}{2} \right) \quad (38)$$

(L ：好気性ゾーンの深さ)

各々の実験結果に一致するように、

β と L を決定すると、15日目のデータでは、 $\beta=20$ ， $L=0.135$ ，92日目の

データでは $\beta=1.0$ ， $L=0.63$ と求まる。この結果のみでは、充填層の間隙の構造を一義的に決定できないが、 $\xi/\epsilon=20$ とすれば両データから各々、 $r=10^{-7}\text{ m}$ ， $r=0.8 \times 10^{-7}\text{ m}$ ，また $\xi/\epsilon=10$ とすれば各々、 $r=3 \times 10^{-8}\text{ m}$ ， $r=3 \times 10^{-8}\text{ m}$ と良く似た値が求まる。これらのことから間隙の構造としては、 ξ/ϵ が大きく r が小さいものと思われるが、その理由はごみ中へのプラスチックフィルム混入量が多かったことによると推察される。

4.3 廃棄物層内で炭酸ガス吸収がある場合 ($R_2=0$)

焼却灰のようにアルカリ分を含む廃棄物では好気性反応で生成した炭酸ガスが気相側に出てこない。この場合、層内で酸素の吸収のみが起るので層内は負圧となり、全圧勾配下での拡散問題を解くことになる。

右図に示すように廃棄物表面に覆土があり、それを通して酸素が拡散浸入する。上部 ($L_1 < z < L_2$) では $R_2=0$ の好気

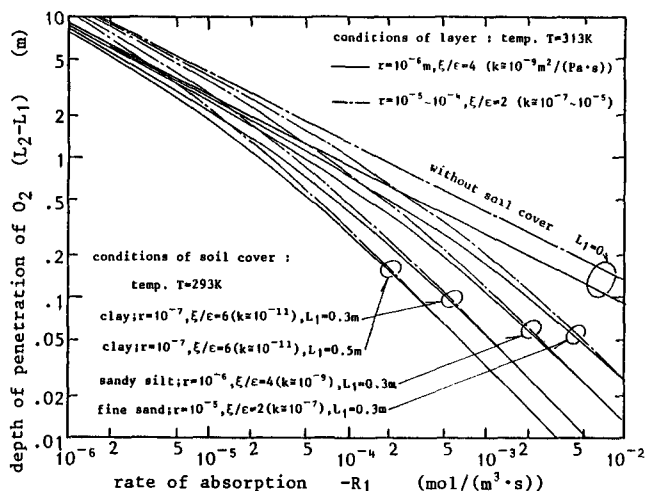


Fig.9 Depth of penetration of O_2 in the case of layer with soil cover

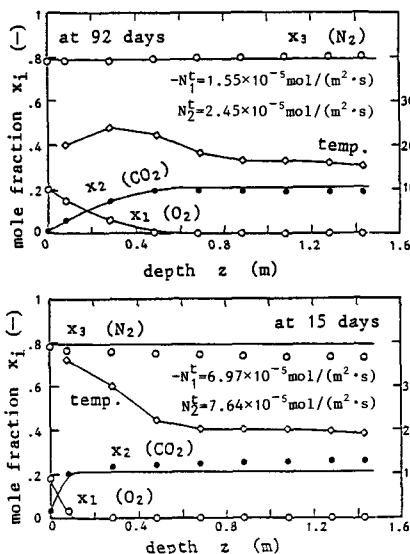


Fig.11 Conc. and temp. distributions through layer of artificial refuse

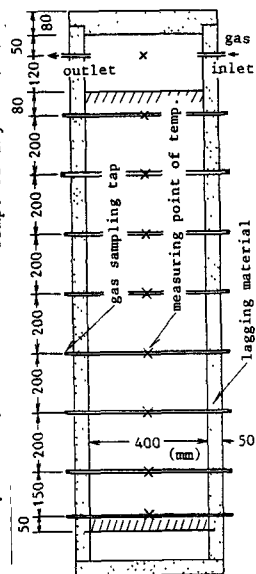
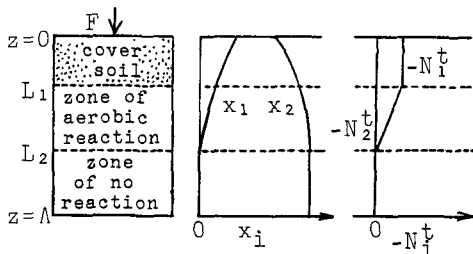


Fig.10 Model experiment of landfill of artificial refuse



性反応、下部 ($L_2 < z < \Lambda$) ではガス反応がなく、 $z = \Lambda$ でフラックスが無いと考える。(1: O_2 , 2: N_2)

この時、式(3), (4) から

$$0 < z < L_1 \text{ で } N_1^t = (-R_1)(L_2 - L_1) = N_1^d + x_1 F, \quad N_2^t = 0 = N_2^d + x_2 F \quad (39)$$

$$L_1 < z < L_2 \text{ で } N_1^t = (-R_1)(L_2 - z) = N_1^d + x_1 F, \quad N_2^t = 0 = N_2^d + x_2 F \quad (40)$$

いま、Fを求めるために式(5)の関係式を代入すると、 $\sqrt{M_1} N_1^d + \sqrt{M_2} N_2^d = 0$ であるから、式(39), (40)から

$$\text{各々、 } F = \frac{\sqrt{M_1}(-R_1)(L_2 - L_1)}{\sqrt{M_1} x_1 + \sqrt{M_2} x_2} = \frac{\sqrt{M_1}(-R_1)(L_2 - L_1)}{\sqrt{M_1} x_1 + \sqrt{M_2}(1 - x_1)} \doteq \frac{\sqrt{M_1}}{\sqrt{M_2}} (-R_1)(L_2 - L_1) \quad (41)^*$$

$$F \doteq \frac{\sqrt{M_1}}{\sqrt{M_2}} (-R_1)(L_2 - z) \quad (42)^*$$

$x_1 + x_2 = 1$ の関係式と式(39)~(42)を使って式(1)から

$$0 < z < L_1 \text{ で } \frac{dx_1}{dz} - \alpha_1(L_2 - L_1)x_1 + \alpha_2(L_2 - L_1) = 0 \quad (43)$$

$$L_1 < z < L_2 \text{ で } \frac{dx_1}{dz} - \beta_1(L_2 - z)x_1 + \beta_2(L_2 - z) = 0 \quad (44)$$

ここで

$$\alpha_1 \equiv \left[\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{\sqrt{M_1/M_2}}{D_{k1}} + \frac{1}{D_{12}} \right) \right]_{\text{cov}} \times (-R_1), \quad \alpha_2 \equiv \left[\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{1}{D_{12}} \right) \right]_{\text{cov}} \times (-R_1) \quad (45)$$

$$\beta_1 \equiv \left[\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{\sqrt{M_1/M_2}}{D_{k1}} + \frac{1}{D_{12}} \right) \right]_{\text{ref}} \times (-R_1), \quad \beta_2 \equiv \left[\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{1}{D_{12}} \right) \right]_{\text{ref}} \times (-R_1) \quad (46)$$

両式をB.C. $z=0$ で $x_1=0.21$, $z=L_2$ で $x_1=0$ で解き、両解を $z=L_1$ で連続させると、

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} + (0.21 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1}) \exp[\alpha_1 L_1 (L_2 - L_1)] = \frac{\beta_2}{\beta_1} [1 - \exp\{-\beta_1 (L_2 - L_1)^2 / 2\}] \quad (47)$$

上式で $(L_2 - L_1)$ を求めると、浸入深さが計算できる。また、上式で $L_1=0$ とおくと(L : 浸入深さ)

$$L = \sqrt{-\frac{2}{\beta_1} \ln(1 - \frac{0.21\beta_1}{\beta_2})} \quad (48), \quad \beta_1 = \beta_2 \text{ の領域では } L = \sqrt{0.47/\beta_1} \quad (48')$$

となり、 $R_1 + R_2 = 0$ で覆土のない場合の浸入深さ[式(31)]より、わずかに大きくなるだけである(11%増)、また、覆土がある場合も浸入深さが25~11%増加するだけであり、 $(-R_{O_2})$ の大きい所で増加率が大きい。

また、式(41), (42)の流動フラックスFを式(2)に代入して $z=L_2$ における圧力 $P(z=L_2)$ を求めると、

$$\Delta p \equiv P(z=L_2) - P_0 = \frac{(-R_1)(L_2 - L_1)}{P_0} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \left\{ \left(\frac{T}{k} \right)_{\text{cov}} \times L_1 + \left(\frac{T}{k} \right)_{\text{ref}} \times \frac{L_1 + L_2}{2} \right\} R \quad (49)$$

例えば、 $(-R_1) = 10^{-3} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、覆土: $T=293\text{K}$, $k=10^{-9} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ (ゆるいシルト), $L_1=0.3 \text{ m}$ 、腐棄物: $T=313\text{K}$, $k=10^{-7} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ とすると、 $L_2 - L_1 = 0.1 \text{ m}$ で $\Delta p = -780 \text{ Pa} = -8 \text{ cmH}_2\text{O}$ となる。

図6に示した焼却灰模擬埋立実験では、この節の解析に該当する現象が起っている。層の上下が大気に開放されているが内外の温度差はない。充填後、100日目の濃度分布を図12に示す。上下の大気開放の様子が異なるので両端の酸素濃度が違う。

この場合、両端から酸素の浸入があるので層のほぼ中央の $z=L^*$ で $N_1^t = N_2^t = 0$ として解く。式(44)と同様の式が導出できて

$$\frac{dx_1}{dz} - \beta_1(L^* - z)x_1 + \beta_2(L^* - z) = 0 \quad (50)$$

$$\text{ここで } \beta_1 \equiv \left[\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{\sqrt{M_1/M_2}}{D_{k1}} + \frac{1}{D_{12}} \right) \right] (-R_1) \quad (51)$$

$$\beta_2 \equiv \left[\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{k1}} + \frac{1}{D_{12}} \right) \right] (-R_1)$$

I.C. $z=0$ で $x_1 = x_1^0$ を用いると、式(50)から

$$x_1 = \frac{\beta_2}{\beta_1} + (x_1^0 - \frac{\beta_2}{\beta_1}) \exp[\beta_1(L^* - z)^2 / 2] \quad (52)$$

また、B.C. $z=\Lambda$ で $x_1 = x_1^\Lambda$ を上式に代入すると

$$x_1^\Lambda - \frac{\beta_2}{\beta_1} = (x_1^0 - \frac{\beta_2}{\beta_1}) \exp[\beta_1(L^* - \Lambda)^2 / 2] \quad (53)$$

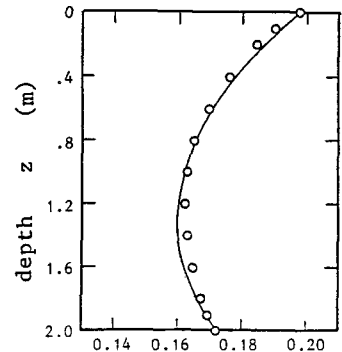


Fig.12 O_2 conc. distribution through layer of incinerator residue

*: 分母 $= \sqrt{M_2} (1 - \frac{\sqrt{M_1} - \sqrt{M_2}}{\sqrt{M_2}} x_1) \doteq \sqrt{M_2}$ で近似誤差 $(\sqrt{M_1} - \sqrt{M_2}) x_1 / \sqrt{M_2} \leq (\sqrt{32} - \sqrt{28}) \times 0.21 / \sqrt{28} = 0.014$ である。

上式に実測値 $x_1^0=0.198$, $x_1^1=0.127$, $l^*=1.28\text{ m}$, $\Lambda=2.0\text{ m}$ を代入すると、 $\beta_2/\beta_1=1$ (3.2参照) だから $\beta_1=0.0570\text{ m}^{-2}$ が求まる。3.2節で求めた $\xi/\epsilon=5.9$, 実測温度 20°C を式 (51) に代入すると、 $(-R_1)=8.2\times 10^{-6}\text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ が求まる。これらの数値を式 (52) に代入して計算したのが図12の実線である。

4. 4 層下部からガスフラックスがある場合

これまでは好気ゾーンの下部には無反応ゾーンがあるとして解析してきたが、無酸素部分では通性嫌気性菌による炭酸ガス発生、あるいは絶対嫌気性菌によるメタン発酵が起り、内圧が増加して内部から表面へ流れる流動フラックスがある。(1: O_2 , 2: CO_2 , 3: N_2 , 4: CH_4)

式 (3), (4) から R_2', R_4' : 嫌気ゾーンにおけるガス発生速度

$$\begin{aligned} 0 < z < L_1 \text{ で } \quad N_1^t &= (-R_1)(L_2 - L_1) = N_1^d + x_1 F \\ N_2^t &= R_1(L_2 - L_1) - R_2'(\Lambda - L_2) = N_2^d + x_2 F \\ N_3^t &= 0 = N_3^d + x_3 F, \quad N_4^t = -R_4'(\Lambda - L_2) = N_4^d + x_4 F \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} L_1 < z < L_2 \text{ で } \quad N_1^t &= (-R_1)(L_2 - z) = N_1^d + x_1 F, \quad N_2^t = R_1(L_2 - z) - R_2'(\Lambda - L_2) = N_2^d + x_2 F \\ N_3^t &= 0 = N_3^d + x_3 F, \quad N_4^t = -R_4'(\Lambda - L_2) = N_4^d + x_4 F \end{aligned} \quad (55)$$

いま、次の近似値をおく、 $\frac{1}{D_{12}} \approx \frac{1}{D_{13}} \approx \frac{1}{D_{14}} \approx \frac{1}{D_{1m}} \approx \frac{1}{3} \left(\frac{1}{D_{12}} + \frac{1}{D_{13}} + \frac{1}{D_{14}} \right)$ (56)

式 (1) から

$$0 < z < L_1 \text{ で } \quad -\frac{\epsilon}{\xi} \frac{P}{RT} \frac{dx_1}{dz} = \left(\frac{1}{D_{1k}} + \frac{1}{D_{1m}} \right) (-R_1)(L_2 - L_1) + \left\{ \frac{-F}{D_{1k}} + \frac{(R_2' + R_4')(\Lambda - L_2)}{D_{1m}} \right\} x_1 \quad (57)$$

$$L_1 < z < L_2 \text{ で } \quad -\frac{\epsilon}{\xi} \frac{P}{RT} \frac{dx_1}{dz} = \left(\frac{1}{D_{1k}} + \frac{1}{D_{1m}} \right) (-R_1)(L_2 - z) + \left\{ \frac{-F}{D_{1k}} + \frac{(R_2' + R_4')(\Lambda - L_2)}{D_{1m}} \right\} x_1 \quad (58)$$

ここでフラックス F は下部からのガスフラックスに等しいと仮定すると※

$$0 < z < L_2 \text{ で } \quad F = -(R_2' + R_4')(\Lambda - L_2) \quad (59)$$

式 (57), (58) を B.C. $z=0$ で $x_1=0.21$, $z=L_2$ で $x_1=0$ で解き、両解を $z=L_1$ で連続させると

$$-\frac{\alpha_2}{\alpha_1}(L_2 - L_1) + \{0.21 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1}(L_2 - L_1)\} \exp(-\alpha_1 L_1) = -\frac{\beta_2}{\beta_1}(L_2 - L_1) - \frac{\beta_2}{\beta_1} [1 - \exp\{\beta_1(L_2 - L_1)\}] \frac{1}{\beta_1} \quad (60)$$

ここで

$$\begin{aligned} \alpha_1 &\equiv \left(\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{1k}} + \frac{1}{D_{1m}} \right) \right)_{\text{cov}} \times (R_2' + R_4')(\Lambda - L_2), & \alpha_2 &\equiv \left(\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{1k}} + \frac{1}{D_{1m}} \right) \right)_{\text{cov}} \times (-R_1) \\ \beta_1 &\equiv \left(\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{1k}} + \frac{1}{D_{1m}} \right) \right)_{\text{ref}} \times (R_2' + R_4')(\Lambda - L_2), & \beta_2 &\equiv \left(\frac{\xi}{\epsilon} \frac{RT}{P} \left(\frac{1}{D_{1k}} + \frac{1}{D_{1m}} \right) \right)_{\text{ref}} \times (-R_1) \end{aligned} \quad (61)$$

式 (60) から酸素浸入深さ $(L_2 - L_1)$ が求まる。その結果を図13に示す。メタン発酵の場合は、 $R_2'(\Lambda - L_2) \approx R_4'(\Lambda - L_2) = 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ の範囲にある²³⁾ と思われ、また、筆者らが小型の嫌気性人工ごみ埋立実験²⁴⁾ で得た値を深さ 20 m の層に換算すると $10^{-3} \text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ のオーダーとなるので、 $R_2'(\Lambda - L_2) = -R_4'(\Lambda - L_2)$ が $0, -10^{-4}, -10^{-3} \text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ の3ケースについて計算した。図から、下部からのフラックスが $10^{-4} \text{ mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以下の場合には、酸素浸入深さは $R_1'=0$ の場合とほとんど変わらない。 $(-R_{\text{O}_2})$ の小さいところで下部フラックスの影響が大きい。また、渣土の透気係数が小さい程、下部フラックスにより浸入深さが小さくなる度合いが大きい。なお、式 (60) で $R_1'=0$ とおくと式 (36) に一致する (ただし、 $1/D_{1m} = 0.21/D_{12} + 0.79/D_{13}$ として)。

5. おわりに

微生物分解性有機物が投棄される処分地で酸素の浸入深さや浸入フラックスを知ることが、廃棄物層内における生物反応を制御する上で重要である。廃棄物層内におけるガスの移動現象を取扱う計算モデルを

※: 式 (5) を用いて式 (54) からフラックスを求めてみる。

$$F = \{ (\sqrt{M_1} - \sqrt{M_2}) (-R_1)(L_2 - L_1) - (\sqrt{M_2} R_2' + \sqrt{M_4} R_4') (\Lambda - L_2) \} / \sum_{i=1}^4 \sqrt{M_i} x_i$$

ここで $(\sqrt{M_1} - \sqrt{M_2}) (-R_1)(L_2 - L_1) \ll (\sqrt{M_2} R_2' + \sqrt{M_4} R_4') (\Lambda - L_2)$ の近似を考えると、

$$F \approx -(\sqrt{M_2} R_2' + \sqrt{M_4} R_4') (\Lambda - L_2) / \sum_{i=1}^4 \sqrt{M_i} x_i$$

さらに $\sum \sqrt{M_i} x_i = \sqrt{M_1} x_1 + \sqrt{M_2} (1 - x_1 - x_3 - x_4) + \sqrt{M_3} x_3 + \sqrt{M_4} x_4 = \sqrt{M_2} + (\sqrt{M_1} - \sqrt{M_2}) x_1 + (\sqrt{M_3} - \sqrt{M_2}) x_3 + (\sqrt{M_4} - \sqrt{M_2}) x_4$
 $\approx \sqrt{M_2}$ と近似すれば、 $F \approx -(R_2' + \sqrt{M_4/M_2} R_4') (\Lambda - L_2)$ と近似できる。

毛細管モデルにより導き、モデルのパラメータを決定するための実験及び廃棄物層内のガス分布測定実験を行い、モデルの解析解と比較することによりモデルの妥当性を示した。また本報の課題とした廃棄物層内への酸素浸入深さと浸入フラックスについて近似解であるが、解析解を求めて計算を行い、以下の主な結論を得た。

- 1) 廃棄物層内への酸素浸入の主な機構は濃度差による拡散である。
- 2) 各種廃棄物の間隙の構造をさらに多く測定する必要があるが、拡散はKnudsen拡散と通常分子拡散の中間域から通常分子拡散域で生ずる。

3) 覆土のない場合の浸入深さは、通常分子拡散域では ξ/ϵ が大きく影響し、中間域では間隙半径 r も大きく影響する。ちゅう介を含む廃棄物では浸入深さは数十 cm ~ 高々 $1 m$ で、廃棄物層内の有機物が無くなり酸素吸収速度が小さくなると浸入深さは数 m に達する。

4) 内外の温度差による空気吸込量は、温度差にはほぼ比例するが、その量は透気係数に大きく左右される。また、それによる浸入深さの増加はわずかである。

5) 粘土がある場合、酸素吸収速度が大きいところでは、酸素浸入深さが小さく、さらに、廃棄物層の透気係数が小さいと、浸入深さは大きく減少し、粘土~かたいシルトで覆土すると、浸入深さは $10 cm$ 程度となる。

6) 好気性反応で生成する炭酸ガスが層内の固相や液相に吸収されて気相側に出てこない場合は、吸収がない場合に比べて $10 \sim 25\%$ の浸入深さの増加があるにすぎない。

7) 層下部で嫌気性ガス発生がある場合には、酸素吸収速度の大きいところでは浸入深さはそれによってほとんど変化しないが、酸素吸収速度の小さいところでは浸入深さは急激に小さくなる。

引用文献

1) 花島 正孝他：土木学会論文報告集，第310号，p69 (1981)， 2) Hanashima, M., et al : ASCE, vol.107, No.EE1, February, p1 (1981)， 3) Scott, D.S., et al : AIChE Journal, vol.8, No.1, p111 (1962)， 4) Alzaydi, A.D., et al : AIChE Journal, vol.24, No.1, p35 (1978)， 5) Evans, R.B., et al : J. Chem. Phys., vol.35, No.6, p2076 (1961)， 6) ibid. : J. Chem. Phys., vol.36, No.7, p1894 (1962)， 7) Mason, E.A., et al : J. Chem. Phys., vol.46, No.8, p3199 (1967)， 8) Hoogschagen, J. : Ind. Eng. Chem., vol.47, p906 (1955)， 9) Bird, R.B., et al : "Transport Phenomena", p520 (1960), John Wiley & Sons, Inc., New York, 10) ibid. : p505, 11) ibid., p511, 12) ibid., p23, 13) ibid., p567, 14) 永科野郎他：「化学工学概論」, p294 (1979), 産業図書 (株)， 15) Moore, C.A., et al : ASCE, vol.18, No.EF1, February, p89 (1982)， 16) 山崎修範他：第36回土木学会年講義，第2部，p39 (1981)， 17) 高橋好弘他：第38回土木学会年講義，第2部，p691 (1983)， 18) 池口孝：都市と廃棄物，vol.14, No.7, p17 (1984)， 19) 山村和也他：「土と水の諸問題」, p16 (1977), 創風出版会， 20) 田中昌寿他：北海道大学工学部報告，第113号，p89 (1983)， 21) 神山村一他：衛生工学研究論文集，vol.19, p136 (1983)， 22) 神山村一他：「昭和57,58年度科研費報告書，都市廃棄物の酸化・処理・処分システムにおけるエネルギー資源の有効利用に関する研究 (代表者 平岡正勲)」, p5 (1984)， 23) 田中勘他：環境技術，vol.11, No.8, p598 (1982)， 24) 田中昌寿他：第35回廃棄物処理対策全国協議会全国大会講演集，p101 (1984)

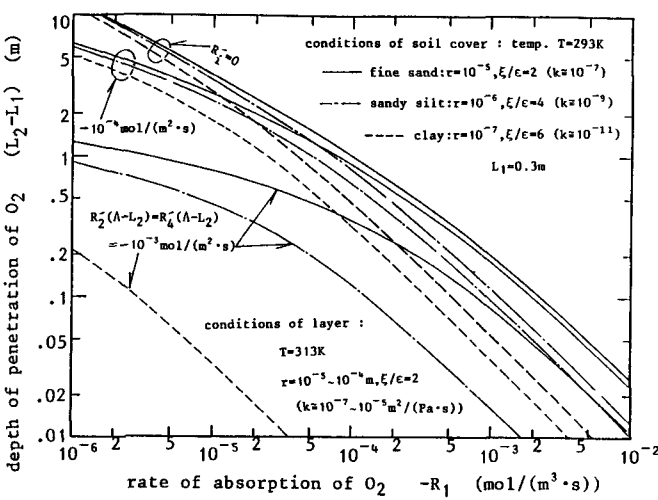


Fig.13 Depth of penetration of O_2 in the case of layer, in the lower part of which steady gas generation occurs

使用記号

- D_{k1} : 第 1 成分のknudsen 拡散係数 $[m^2/s]$
- D_{ij} : 相互分子拡散係数 $[m^2/s]$
- F : 全圧勾配及び重力項による流動フラックス (空塔断面当り) $[mol/(m^2.s)]$
- g : 重力係数 $=9.8 m/s^2$
- h : 全水頭ポテンシャル $[cm]$
- k : 透気係数 $[m^2/(Pa.s)]$
- k_l : 透水係数 $[m^2/(Pa.s)]$
- k' : 透水係数 $[cm/s]$
- L_1, L_2 : 廃棄物層内の深さ位置
又は長さ $[m]$
- M_1 : 第 1 成分の分子量 $[kg/mol]$
- M : 混合ガスの分子量 $[kg/mol]$
- n : ガス成分数 $[-]$
- N_1^0 : 第1成分の濃度勾配による拡散フラックス (空塔断面当り) $[mol/(m^2.s)]$
- N_1^1 : 第1成分の全フラックス (空塔断面当り) $[mol/(m^2.s)]$
- p_1 : 第1成分の分圧 $[Pa]$
- P : 全圧, P_0 : 大気圧 $[Pa]$
- Δp : 差圧, 圧力損失 $[Pa]$
- R_1 : 第1成分の反応速度 (空塔容積当り) (好気ゾーン) $[mol/(m^3.s)]$
- R_1' : 第1成分の反応速度 (空塔容積当り) (嫌気ゾーン) $[mol/(m^3.s)]$
- R : カス定数 $=8.314 m^3 Pa / (mol K)$
- r : 毛細管モデルの相当半径 (充填層の間隙半径) $[m]$
- S : スリップフロー係数 $[Pa.s/m]$
- T : 温度 $[K]$
- ΔT : 温度差 $=T-T_{out}$ $[K]$
- t : 時間変数 $[s]$
- u : (空塔) カス速度 $[m/s]$
- w : 含水率 $[-]$
- x_1 : 第1成分のモル分率 $=p_1/P$ $[-]$
- z : (重力方向の) 距離変数 $[m]$
- ϵ : 空隙率 $[-]$
- ξ : 式 (25) での層長さ率 $=L_1/\Lambda$ $[-]$
- Λ : 廃棄物層深さ $[m]$
- in : 混合ガス, out : 廃棄物層外
- ref : 廃棄物層, cov : 覆土