

## (18) 準好気性埋立に関する理論的研究

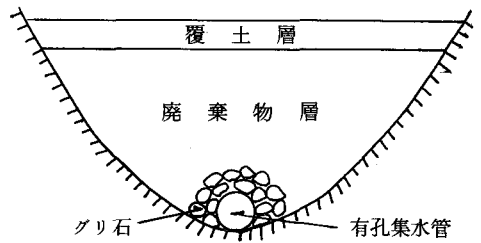
福岡大学工学部 ○山崎 惟義  
〃 花嶋 正孝  
福岡大学理学部 大西 和栄  
福岡大学工学部 松藤 康司

1 はじめに 廃棄物処分の衛生工学における重要性は言を待たない所であろう。昭和51年における一般廃棄物においては、排出量約7000t/日このうち焼却63%、直接埋立26%であるが、焼却灰の埋立も合せると38%程度となる。<sup>1)</sup>このように中間処理のいかんにかかわらず、最終的には埋立にたよるを得ない。このように埋立場が、廃棄物処理処分に対して重要な意味を持っているにもかかわらず、その埋立技術は十分に開発されておらず、埋立場も廃棄物の投棄場であるという考え方が主流であった。

そこでこれらの問題点を考慮し提案されたのが、埋立場は廃棄物の早期安定化のための処理処分場であるという考え方に立脚した、「埋立構造」の概念である。<sup>2)</sup>

これによると、埋立場は5つに分類されているが、大きく分けると、嫌気性埋立構造、好気性埋立構造およびその中間の準好気性埋立構造である。これらの埋立構造の特質についてはすでに多くの記述があり、<sup>3)</sup>準好気性埋立構造は次のような特徴を有する埋立構造であるとされている。

準好気性埋立構造をモデル的に図(1-1)に示す。本埋立構造は、有孔管およびそれをとりまくグリ石よりなる集水施設、その上の廃棄物層並びに覆土層より成っている。そして本構造と嫌気性埋立構造との違いは有孔管が外気と連絡しているかどうかという点であり、好気性埋立構造との違いは、有孔管より強制的に送風するかどうかという点である。



図(1-1) 準好気性埋立構造

一般に廃棄物埋立場が周辺環境に及ぼす悪影響として、ガス、悪臭による大気汚染、浸出汚水による水系および土壌汚染が上げられる。この観点から、本埋立構造は嫌気性埋立構造より浸出汚水、ガス、臭気とも良好で好気性埋立構造に近く、又跡地利用をより容易にしている。

次に経済性について考えると、好気性埋立構造に対して、送風施設が不要であり、送風のための維持費も不要である。このように、準好気性埋立構造の特徴として ①浸出汚水の水質が良好である。②有害ガスの発生が少ない。③安定化の速度が速い。④建設維持管理費が低廉である。が上げられる。

以上のような特徴を有する準好気性埋立構造ではあるが、歴史が浅いこと、安定化に関与すると考えられる因子が多いこと、廃棄物の特色である不均一性が大であることなどの理由から、安定化機構について、理論的検討がなされていない。したがって実際の埋立場の設計に当っては、経験に頼って試行錯誤されている現状である。

そこで本研究は、埋立場の設計(集水管の大きさ、配置、形状、配置密度、埋立高などの決定)に資することを目的として、まず準好気性埋立の安定化機構に関与する主要因を上げ、これに関する支配方程式を提案し、実際の埋立地に適用し得るように変形した。次にこれらの方程式ならびに、各種条件を用いて数値計算を行なった。また、数値計算結果と実験結果とを比較することにより、今回提案した方法を検討した。

2 理論 2-1) 準好気性埋立の安定化機構 一般に廃棄物埋立場の安定化をして、埋立られた廃棄物の構造的な安定化と、生物化学的な安定化とが考えられる。ここでは生物化学的な安定化を検討する。

埋立られた廃棄物中に生物分解可能な有機物が含まれていると、分解のされ方は埋立構造によって異なるが生物分解を受けて安定化していく。この過程で、廃棄物の材料的な強度も小さくなり、沈下等をくりかえしながら、構造的にも安定化していくと考えられる。

この生物分解の過程では、廃棄物中の温度、水分、酸素供給量などの因子が、分解(分解速度、分解生成

物など)に大きな影響を与えることが知られている<sup>4)</sup>。

準好気性埋立においても、その安定化機構を明らかにし実際に適用するには、上記の因子の影響を定量的に明確にする必要がある。そこで本節ではこれらについての定量化に関する考え方について検討する。

埋立られた廃棄物層内部には、種々雑多な物質が色々な分布状態で存在しており、その形態は非常に複雑であるが模式的には図(2-1)のように考えられる。すなわち、廃棄物塊が、固体として充填されており、その空隙を水とガスが流れていると考えられる。準好気性埋立を特徴づける最も大きな要因は、酸素の自然供給であると考えられるので、酸素の収支を十分に定量化する必要がある。廃棄物層内において、遊離酸素はガス中および、溶存酸素として水中に存在する。そして好気性微生物によって固体表面近くで消費されると考えられる。水中の溶存酸素は降雨とともに埋立廃棄物表面から供給される。一方ガス中の酸素は空気の流れによって供給されると考えられる。この空気の流れは好気性埋立の場合とは異り、外部から送風は行なわれないので、埋立地自体にその供給機構があると考えられる。この機構の要因として、気圧変動、水位変動、風など天然現象の他、廃棄物層内と外部の気体との密度差が考えられる。すなわち、埋立廃棄物中の有機物が生物分解を受ける過程で発生する醗酵熱により、廃棄物層内のガスが熱せられ、外部の気体との間に温度差が生じ、この温度差によって密度差が生ずる。この密度差が廃棄物層内部のガスに対して浮力として作用し、内部のガスに下から上への流動を生じさせると考えられる。

以上のことを考慮すると、酸素の収支を解明するには、ガスと水の運動、およびそれによる酸素と熱の輸送、ならびに生物反応による酸素の消費と熱の発生を検討しなければならない。

上記の水、ガスの流れ、酸素と熱の収支の様子を単純化してモデル的に表わすと図(2-2)のようになると考えられる。同図からわかるように、気、液、固、各相互間で酸素と熱の交換を考えなければならない。又この時水とガスとが、空隙内を流れていることも考慮しなければならない。

2-2) 支配方程式 2-1)で述べた考え方に基づいて、各因子を定量的に検討するには、これらの因子に関する支配方程式を考えなければならない。実際の埋立地は3次元的な構造を有しているが、山間埋立地などの場合、谷線にそってかなり細長い構造が多いこと、3次元問題の場合は解析が困難になることを考え、ここでは2次元構造として考える。又各因子の時間的変動は大きいとは考えられないのですべて定常であるとする。

1) ガスの流動 ガスの流動は充填物内における温度密度流と考えられるから、次のように表される。

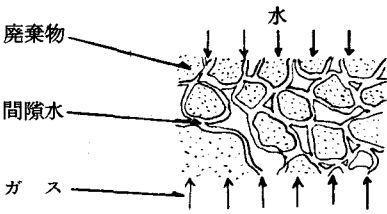
$$J_x = -k_x \frac{\partial p}{\partial x} \quad (2-1)$$

$$J_z = -k_z \left( \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_g g_0 \right) \quad (2-2)$$

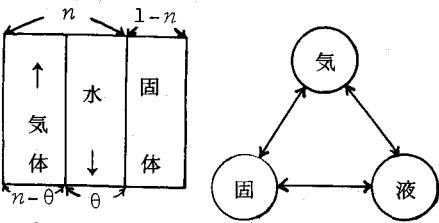
ガスの発生と消費を無視すると、連続の式は

$$\frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_z}{\partial z} = 0 \quad (2-3)$$

又  $\rho_g$  については、湿潤空気の状態方程式<sup>5)</sup>から次式が導かれる。



図(2-1) 廃棄物モデル



廃棄物層の構成 熱、酸素の交換  
( $\leftrightarrow$ )は熱、物質の移動を示す。

図(2-2) 廃棄物内熱、物質移動

- $x, z$ ; 水平、鉛直方向座標 (cm)
- $p$ ; 圧力 ( $g/cm^2$ )
- $k_x, k_z$ ;  $x, z$  方向透気係数 ( $g/cm/g \cdot s$ )
- $\rho_g$ ; ガスの密度 ( $g/cm^3$ )
- $J_x, J_z$ ;  $x, z$  方向ガスフラックス ( $g/cm^2 \cdot s$ )
- $g_0$ ; 質量単位  $g$ ; 重量単位
- $g'$ ; 質量単位

$$\rho_G = \rho_0 \left( \frac{T_0}{T} \right) \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (2-4)$$

$\rho_0$ ; STPにおける空気密度 ( $1.239 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ )

$T_0$ ; 273.16°K,  $P_0$ ; 1気圧,  $T$ ; 温度(°K) ここで, 温度の項と圧力の項を比較すると, 温度差を50~60℃とすると,  $T_0/T = 0.82 \sim 0.845$ となる。一方高さを10mとすると,  $P = \rho_G g h$ として,  $P/P_0 \approx 1.001$ となり,  $P/P_0$ の項は1.0とみなし得る。したがって, 式(2-4)は  $\rho_G = \rho_0 T_0/T$  近似される。

Ⅱ) 水の流れ 水の流れは, 鉛直方向のみの不飽和浸透と考えられるから, 水の生成蒸発を無視すると,

$$\frac{\partial V_L}{\partial z} = 0 \quad (2-5) \quad V_L = -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) \quad (2-6)$$

$\theta$ ; 体積含水率,  $D(\theta)$ ; 水分拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $K(\theta)$ ; 不飽和透水係数 ( $\text{cm}/\text{s}$ ),  $V_L$ ;  $z$ 方向の水の流速(空筒速度) ( $\text{cm}/\text{s}$ )

Ⅲ) 熱の収支 気液固相間に温度差がないとすると, 熱の収支は次式で表わされる。

$$J_X C_G \frac{\partial \theta}{\partial x} + (J_Z C_G + V_L \rho_L C_L) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K \nabla^2 \theta - q + e = 0 \quad (2-7)$$

$\rho_L$ ; 水の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $K$ ; 廃棄物層の熱伝導率 ( $\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ ),  $C_G, C_L$ ; ガス, 水の比熱 ( $\text{cal}/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ),  $\theta$ ; 温度( $^\circ\text{C}$ ),  $q$ ; 発熱量 ( $\text{cal}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ ),  $e$ ; 蒸発熱 ( $\text{cal}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ )

Ⅳ) 酸素の収支 気液間で酸素の平衡が成立していると仮定すると酸素の収支は次式で表わされる。

$$J_X \frac{\partial X}{\partial x} + (J_Z + V_L K_d) \frac{\partial X}{\partial z} - (D_G + D_L) \nabla^2 X + r = 0 \quad (2-8)$$

$X$ ; ガス中の酸素濃度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $K_d$ ; ガス中

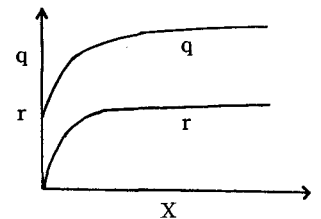
水中酸素の平衡係数,  $D_G, D_L$ ; ガス中, 水中における酸素の分散係数 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $r$ ; 廃棄物の酸素消費速度 ( $\text{g}/\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ )

Ⅴ) 各因子と各方程式について 熱発生, 酸素消費速度と酸素濃度との関係としては図(2-3)に示したようなものが考えられる。(酸素消費は酸素がなければ, 0であるが,

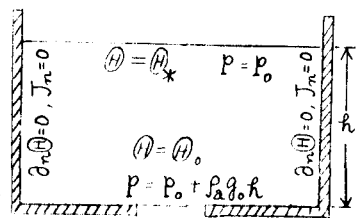
熱発生は嫌気性酵酵もあり, 0とは考えられない。又酸素濃度が大きになると一定値に近づくと考えられる。) 各式とも相当に複雑であり, 容易に連立させて解くことは困難である。そこで, 準好気性埋立において最も重要であると考えられる, 酸素の供給すなわち温度密度流と熱収支とを連立させて解くことを考える。式(2-5), (2-6)の水の流速については, 単位面積あたりの雨水浸入量に等しい。

Ⅵ) 境界条件 埋立地の断面は図(1-1)に示すようなものであるが 図(2-4)境界条件のモデルここでは簡単のため, 図(2-4)に示す領域を考える。この場合境界条件は, ①壁面において; 壁は断熱的であり, 透気性もない。すなわち,  $\partial \theta / \partial n = 0, \partial P / \partial n = 0$  ( $n$ ; 法線ベクトル) ②上表面において; 圧力は外気圧に等しく, 温度は測定値とする。すなわち,  $P = P_0, \theta = \theta_s$  (表面の圧力, 温度を  $P_0, \theta_s$  とする) ③入口において; 圧力は外気圧に等しく, 温度は外気温に等しい。すなわち,  $P = P_0 + \rho_a g_0 h, \theta = \theta_0$  ( $\theta_0$ ; 外気温)となる。

③ 数値計算 前節で述べた支配方程式をその境界条件の下に解けば, 準好気性埋立地  $\Omega$ 内の各点の圧力, ガスフラックス, 温度が得られる。しかし, 式(2-7)の  $q, e, K$ 等を実際に求めるのはかなり困難である。その反面, 埋立地内部の温度を測定することはそれほど困難ではない。そこで今回の計算においては, 式(2-7)のかわりに次式を, 与えられた境界条件と測定された温度を満足するように解くことにより,



図(2-3) q r のモデル



温度分布を求めることにする。

$$\nabla^2 \theta = 0 \quad (3-1)$$

又今回計算に用いた境界条件および有限要素分割を図(3-1)(3-2)に示す。

式(3-1)(2-1)~(2-4)の弱形式を有限要素法により近似する。温度 $\theta$ 、圧力 $P$ の既知な境界条件上で0である任意の連続な変分 $\delta \theta$ 、 $\delta P$ に対して、

$$\int_{\Omega} \nabla^2 \theta \delta \theta d\Omega = 0$$

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{J}) \delta P d\Omega = 0$$

ここに $d\Omega$ は微小体積要素を表わす。壁面での境界条件を考慮し、Gauss-Greenの定理より、

$$\int_{\Omega} \nabla \theta \cdot \nabla \delta \theta d\Omega = 0 \quad (3-1)$$

$$\int_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{J}) \delta P d\Omega = -k_z \rho_{G0} \int_{\Omega} \left( \frac{T_0}{T} \right) \frac{\partial \delta P}{\partial Z} d\Omega \quad (3-2)$$

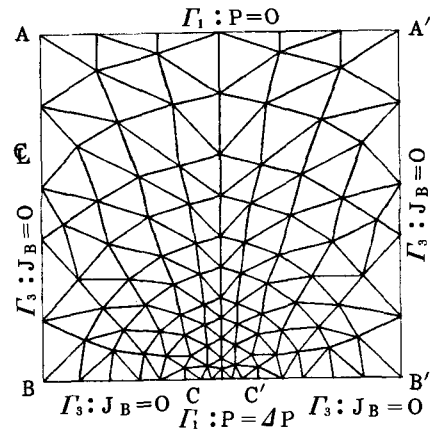
を得る。ただし  $\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_z \end{pmatrix}$  である。

廃棄物層内 $\Omega$ を三角形有限要素 $\{e\}$ に分割してできた $\Omega$ の近似領域も $\Omega$ で表わす。各 $e$ 上で、節点の値 $\{\theta_i\}_e$ 、 $\{P_i\}_e$ を形状関数 $N_i$ で線形補間した。

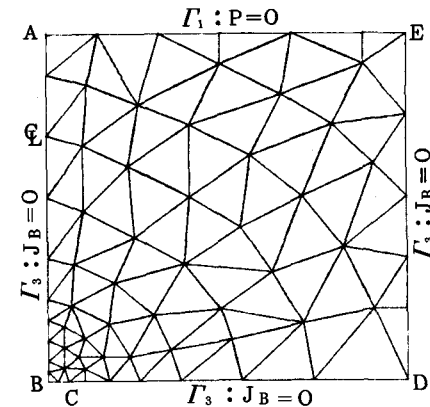
$$\theta^e(x, z) = \sum_i N_i(x, z) \theta_i \quad P^e(x, z) = \sum_i N_i P_i$$

を式(3-1)~(3-2)に代入し、 $\{\delta \theta_i\}$ 、 $\{\delta P_i\}$ の任意性を考慮すると、離散化された、構成方程式が得られる。更に、既知の $\theta$ 、 $P$ の測定値を与えて、節点値ベクトル $\{\theta\}$ 、 $\{P\}$ についての連立方程式、 $[\mathbf{G}]\{\theta\} = \{\mathbf{b}\}$  (3-3)  $[\mathbf{H}]\{P\} = \{\mathbf{F}(T)\}$  (3-4) が得られる。ここに、 $[\mathbf{G}]$ 、 $[\mathbf{H}]$ は正則な定数行列であり、 $\{\mathbf{b}\}$ は定列ベクトル、 $\{\mathbf{F}\}$ は温度 $T = T_0 + \theta$ に依存する列ベクトルである。連立一次方程式(3-3)をGaussの消去法で解いて、各節点での $\theta$ を求め、それを式(3-4)の右辺に代入して、式(3-4)を解く。結果として得られた、 $P$ (ただし、 $P = P_0 + P$ )を式(2-1)(2-2)に代入して 各要素 $e$ でのガスフラックス $\mathbf{J}$ を求める。

実験槽C-Iについて、 $\theta = 30^\circ\text{C}$ 、 $\theta_* = 50^\circ\text{C}$ 、 $\Delta P = 0.099 \text{ g/cm}^2$ とし、槽内測定温度表(3-1)を与えて計算した時の温度分布 $\theta$ 、圧力分布 $P$ 、ガスフラックス $\mathbf{J}$ を図(3-3)~(3-5)に示す。更に、圧力ポテンシャル  $\phi = P + \rho_G g Z$ を図(3-6)に示す。温度分布で槽内に極大点2ヶ所現われるのは、その位置が測定点であったためである。局所的な温度の変化は $\phi$ 図においても局所的な凹凸となって影響が現われている。しかし、 $\phi$ の



図(3-1) C-Iの境界条件，有限要素分割

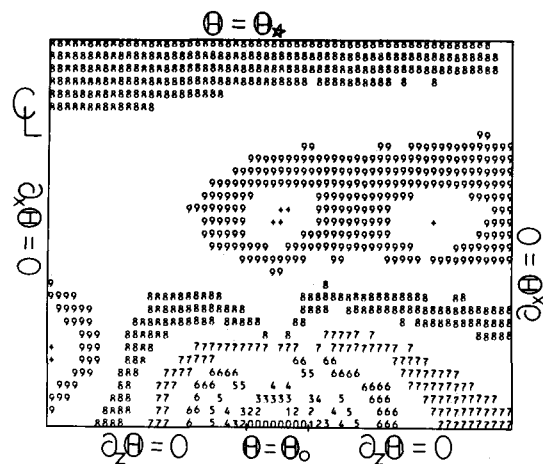


図(3-2) C-IIの境界条件，有限要素分割

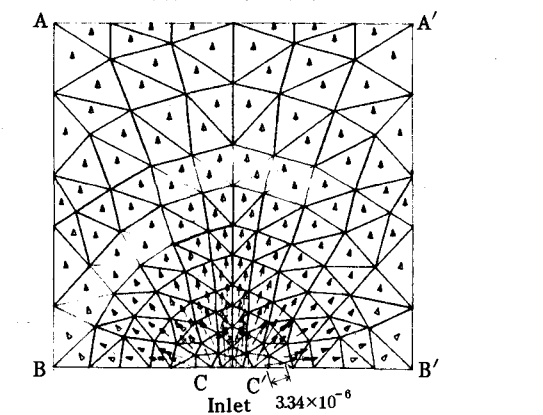
| NO. | C - I | C - II |
|-----|-------|--------|
| 1   | 54.8  | 50.6   |
| 2   | 51.1  | 58.3   |
| 3   | 55.2  | 64.8   |
| 4   | 52.3  | 57.8   |
| 5   | 50.9  | 66.2   |
| 6   | 55.1  | 61.3   |

表(3-1) 温度の測定値(°C)

温度による局所的な変化はごく小さいものであり、大局的には、ガスの流れた、余り影響しない。実験槽C-Ⅱについても同様の計算を行ないφの図(3-7)が得られた。



図(3-3) C-Ⅰの温度分布 + ; 5.5℃, 0 ; 30℃を20等分した等温分布図

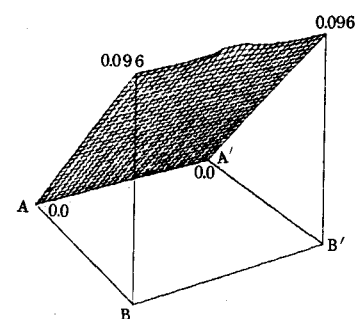


図(3-5) C-Ⅰのガスフラックス

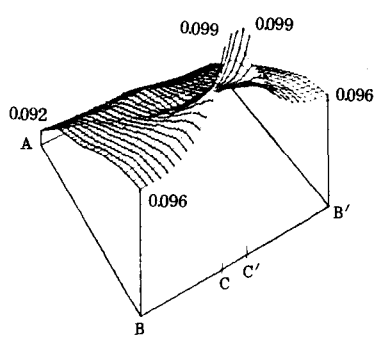
4 実験との比較 実験装置の概略を図(4-1)に示す。本実験装置を用いて、①廃棄物槽内の温度、②吸入空気量、③透気係数測定のための強制送風時における、送風量と入口圧力、を測定した。表(4-1)(4-2)に実験結果を示した。

一般に、廃棄物埋立場の数式モデルをシミュレートする場合、系に含まれるパラメーターを推定するためのデータが不足していることが常である。本研究においても、式(2-1)～(2-3)を解く場合、透気係数( $k_x, k_z$ )を実験槽C-Ⅱを使った実験データから推定しなければならなかった。

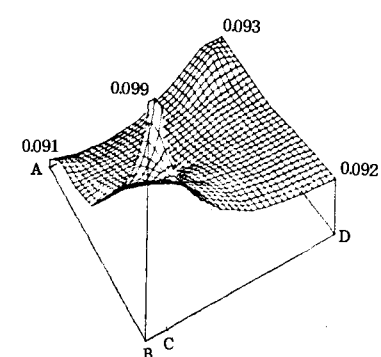
図(3-2)のBC-AE間に加圧した圧力差 $\Delta P^* = 1.34 (g/cm^2)$ を与えたとき、集水管からの全流入空気量より計算したAE上のガスフラックスは $J_B^* = 2.22$



図(3-4) C-Ⅰの圧力分布図



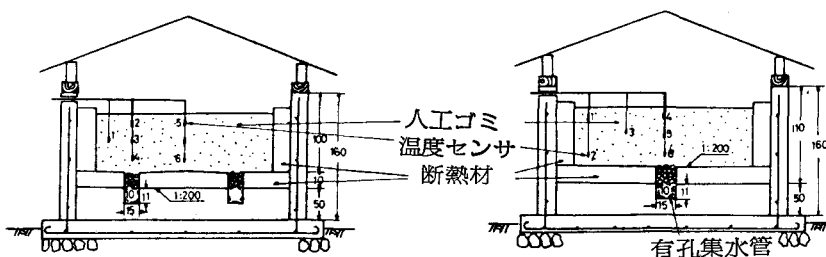
図(3-6) C-Ⅰのポテンシャル



図(3-7) C-Ⅱのポテンシャル

・ S ) が得られた。

均一，等方性と，  
圧力に依存しないこ  
とを透気係数に仮定  
して， $k_x = k_z = k$   
(定数)とおき， $k$   
の値を適当に推定し  
た後，境界条件を図  
(3-2)ただしB



図(4-1) 実験装置

C上では  $J = J_B^*$  とした数値解が B C 上で  $P = \Delta P^*$  と等しくなるかどうかを検討する。もし  $\Delta P^*$  との差が、計算誤差の範囲以上であれば、試行錯誤によって  $k$  を修正し  $P = \Delta P^*$  となるまでくりかえす。温度分布として表(3-1)を使用すると  $k = 0.022$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{cm}/^{\circ}\text{C}$ ) となった。

このとき境界BCに隣接する有限要素のフラックスの平均が、 $\bar{J}_B^e = 1.484 \times 10^{-3}$  (g/cm<sup>2</sup> S)であったから、境界BC上のフラックス  $J_B^*$  との比は、 $\alpha = J_B^* / \bar{J}_B^e = 1.5$  となった。この比  $\alpha$  は有限要素法によって得られた、境界に接する要素のフラックスから、境界上のフラックスを推定するための換算係数として利用できよう。

以上の計算で求めた透気係数、表(3-1)に示した温度分布、図(3-1)(3-2)に示した境界条件の下に、入口に接する有限要素内のガスフラックスを求め、 $\alpha = 1.5$ として、入口におけるフラックスを計算し、実験結果との比較を表(4-2)に示した。これによると実験と計算との結果は2~3倍程度の差がある。

| NO. | 送氣量 $\ell/S$ | 圧力 $g/cm^2$ |
|-----|--------------|-------------|
| 1   | 2.3          | 1.14        |
| 2   | 2.3          | 1.21        |
| 3   | 2.6          | 1.18        |
| 4   | 2.6          | 1.44        |
| 5   | 2.6          | 1.44        |

表(4-2) 透気係数の測定

|          | C - I                | C - II              |
|----------|----------------------|---------------------|
| 實驗<br>結果 | $26 \times 10^{-6}$  | $25 \times 10^{-6}$ |
| 計算<br>結果 | $6.8 \times 10^{-6}$ | $11 \times 10^{-6}$ |

表(4-2) 実験と計算の比較  
単位 ( $g \cdot cm / g \cdot s$ )

5 あとがき 本報告において、①準好気性埋立に関する理論的考え方、②埋立地内部における、Ⅰ) ガスの流れ、Ⅱ) 水の流れ、Ⅲ) 酸素の収支、Ⅳ) 熱の収支に関する支配方程式、③支配方程式の簡略化、④簡略化した方程式の数値計算、⑤ガスの流量について、数値計算と実験の比較、について述べた。数値計算と実験の比較からそれらの比は2～3倍程度となることがわかった。

このような理論と実験との誤差は、仮定の多いこの程度の検討では止むを得ない結果かも知れないが、原因として、風速の吸込み空気量に対する影響、実験における測定誤差等も考えられる。又この考え方を実際に適用するには集水管の最適密度、配列の計算、実際の埋立場における透気係数と温度分布の測定などが必要である。これらについては今後の研究課題としたい。終りに、本研究を行なうに当り、数値計算などで多大の協力をいただいた、本学土木工学科の黒木健実助教授、数学科の小柳洋子さん、小畑錦子さんに心から感謝致します。

尚、本論文は昭和54年文部省科学研究費による研究の一部である。

## 参考文献

- 1) 高松英昭 「都市ごみ処理の現状と展望」 環境情報科学 8巻 2号 P,23
- 2) 花嶋正孝他 「山間埋立による諸問題」 生活と環境 20巻 7号, 9号
- 3) 長野修治他 「廃棄物と好気性埋立」 第32回土木学会年講
- 4) G.Tchobanoglous et al; Solid Wastes • McGrawhill INC, (1977)
- 5) 正野重方 気象力学 P10 岩波書店(1970)