

固形廃棄物埋立処理に伴う環境汚染問題

福岡大学○花嶋正孝 黒木健実 大西和栄
山崎雅義 松藤康司

1.はじめに

廃棄物と最終処分との関係は、図1-1に示すように時代とともに変化している。すでに中間処理における廃棄物の減量化が進められ、70年代後半に至って廃棄物の資源化が取りあげられたことを考えると、80年代は単に廃棄物の資源化、減量化の方向だけでなく、造成された土地を資源と見なす資源化、用地化の時代であると考えられる。そのためには、よりいっそうの最終処分技術の向上と、それに伴う造成中、造成後の環境保全の問題が最も大きな問題として、クローズアップしてこよう。

今回、著者らは最終処分の目的と廃棄物の隔離、安定化、利用としてとらえて、環境汚染防止の面から、埋立に伴う諸問題を階層化し、これに基づく下記の項目について解析法の拡張を試みた。①最終処分に伴う諸問題の階層化

②最終処分から資源化への系を確立する上で有効な、対策、評価に関する新しい手法の開発；i.浸出液中に含まれる細菌数の経年変化、ii.有限要素法による埋立地の浸透流解析、iii.環境保全からみた適正埋立規模に関する評価手法、iv.確率微分方程式による廃棄物の透水系数の算定 v.境界要素法による準好気性埋立槽のガス流動解析

2.環境汚染問題の階層化

最終処分に伴う汚染問題を階層化するために、図2-1に示す環境汚染問題階層化モデルを作成した。これは最終処分の目的を3つのシステムから成ると考え、さらに、3つのシステムがそれぞれ、液相(L)、気相(G)、固相(S)のサブシステムから成り立っているとして、各々のサブシステムに、汚染問題(ex. $L_{1-1}, G_{1-1}, \dots$)を類別できるようにしている。同時に、この汚染問題の項目に対策、評価のための手法が対応できるモデルである。

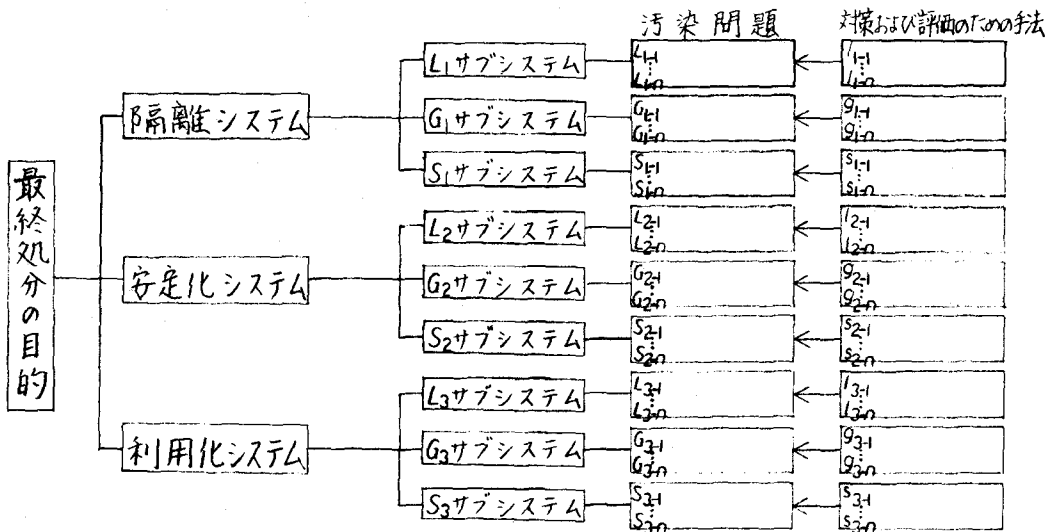


図2-1. 環境汚染問題階層化モデル

4 対策・評価のための手法

図3-1に示した廃棄物埋立に関する対策・評価のための解析手法は、これまでいくつか試みられているが、水理学等で確立された手法を援用することが多く、満足できるものとなっていない。また、解析手法がどのような条件を満たすべきかも充分議論されてはいない。ここでは、廃棄物埋立に適合すると期待されるいくつかの手法を紹介する。

4-1. 浸出液中に含まれる細菌数の経年変化

埋立てられた廃棄物が安定化する主要因は、廃棄物層内における微生物の代謝機能である。代謝活性を測る指標として安定化に関与する微生物が第1に考えられるが、固形廃棄物単位体積中の微生物を計数する方法を標準化することは困難である。そこで、実験槽からの浸出液中に含まれる一般細菌と好熱性細菌を3年間に亘り計数した²⁾。今、 $N(t)$ を埋立後 t ヶ月後の月内平均細菌数(ml 浸出液)とし $X_{\log} = \log N$ とおく。時系列 $X_{\log}(t)$ の長期変動傾向を検出するため、 n 次の多項式 $p_n(t)$ ($n \leq 6$)を当てはめ、統計的に有意($**1\%$ 、 $*5\%$)な次数までを採り $X_{\text{cal}}(t)$ とおく。測定値 $X_{\log}$ からの偏差 $Y(t) = X_{\log} - X_{\text{cal}}$ を定常時系列と見なしてコレログラムにより周期性を検出する。時間のズレで(τ)をもつ有意な自己相関係数 ρ_τ に対して、自己回帰型のモデル $Y(t) = \bar{Y} + \sum \alpha_\tau \{Y(t-\tau) - \bar{Y}\}$ を求める³⁾。図4-1は一般細菌に対する一次の $X_{\text{cal}}(t)$ と $\tau=1, 5, 6, 16, 17, 22$ で有意な $Y(t)$ のコレログラムである。図4-2は好熱性細菌に対する3次の X_{cal} と $\tau=26$ で有意な $Y(t)$ のコレログラムである。種々の埋立構造と実験条件に対して、本法は使用可能であったが、まだ例数が少ないため、結果の再現性を確かめることはできない。

4-2. 埋立地の浸透流解析

海岸埋立であれ、山間埋立であれ、評価の基準は異なっても共通した解析手法の用いられることが多い。廃棄物層からの浸出汚水による土壌・水界汚染防止に関して、浸透水流の飽和・不飽和解析がなされてきた^{4), 5)}。埋立てられた廃棄物層を標準砂で覆土、ないし土層をマサ土で置換したいわゆる砂土モデルに対し、透水係数の異なる層間をどのように浸透水が流れるかを、種々の条件のもとにヒステレシスまで考慮して数値計算を実行した。図4-3は廃棄物層へ浸入流下した降雨が、化驗した埋立層底面に沿って集水されることを示し、図4-4は埋立地周囲の地下水面が、急激に上昇した場合、地下水は透水係数の異なる層境界面に沿って浸入することを示している。浸透流対策においては、両層間の透水係数の比が重要な因子となる。図4-5は、覆土によって降雨が廃棄物層へ浸透するのを遮げられる、いわゆるWick効果を示しているが、覆土は更に、あらかじめ廃棄物層内に保水されている汚水が、下方へと移動することを遮げるという効果をもつ。

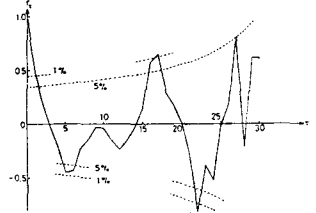
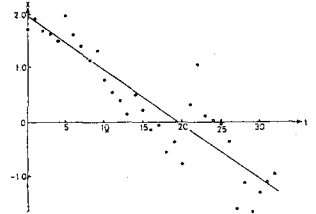


図4-1 Linear trend (above) and the correlogram (below) for log-number of micro-organisms in Run 3, Vessel 1.

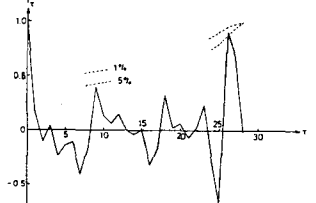
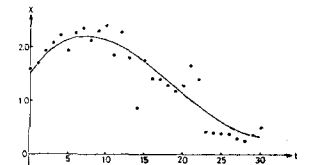


図4-2 Cubic trend (above) and the correlogram (below) for log-number of micro-organisms in Run 3, Vessel 1.

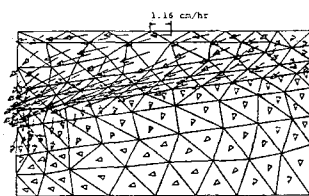


図4-3

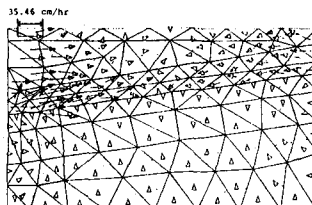


図4-4

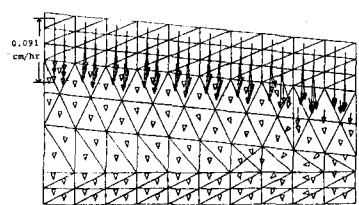


図4-5

4-3. 環境保全からみた適正埋立規模に関する評価手法

4-4. 廃棄物の透水係数のモデル化

国形廃棄物埋立地の浸透流解析に砂・土モデルを適用することに、多くの批判が寄せられ、とくに廃棄物層を砂層で置き換えることに難点が集中している。確かに、埋立られた廃棄物は不規則、不均質な多孔質混合物であるから、批判は妥当なものといえよう。廃棄物を、浸透特性が連続体として取り扱えるスケールで変動する媒体であると仮定すれば、不規則、不均質系における浸透は、ランダムな含水率(θ)ー圧力水頭(h)曲線と、ランダムな透水係数(K)ー圧力水頭曲線を係数にもつ、飽和・不飽和浸透の確率微分方程式で表わされることになる。^{7),8)} 我々の得たい情報は巨視的スケールで変動する h の値であるから、確率微分方程式から h の空間平均を与えてくれるような θ - h 曲線と K - h 曲線の有効値を求めることが目的となる。定常状態での有効 K - h 曲線は、ランダム媒体における拡散が参考となるが、⁹⁾ 非定常状態での浸透問題では、非線形性を別にして、非定常熱伝導に関して開発された統計理論を援用すればよい。¹⁰⁾ 図4-6は、4-2節に相当する実験に使用した砂と土の K - h ヒステリシス曲線である。今、砂と土を(1- ϕ): ϕ の体積比に充分混合したと想定した場合に、長谷の結果を適用して得られた K - h 曲線を図4-7に示す。廃棄物自体について、本報の妥当性を検証するような実験的研究が望まれる。

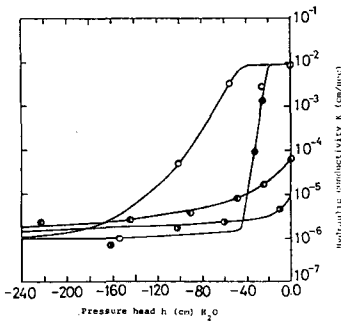


図4-6 Hydraulic conductivity - pressure head hysteresis. HSC and HMC for sand (○, ●) and clay (●, ○).

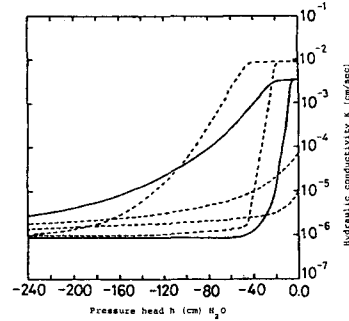


図4-7 Effective hydraulic conductivity for mixed randomized soil with sand and clay ($\phi=0.5$).

4-5. 境界要素法による準好気性埋立層のガス流動解析

準好気性埋立は、自然対流によって空気をゴミ層へ供給して、その早期安定化をはかる埋立構造である。図4-8は、この埋立工法によるゴミ層断面の一例を示したもので、ゴミ層底部の空気流入口は排水管の役割も兼ね、浸出液の導入路ともなる。

本構造の有効性を調べるために、ゴミ層内は準定常状態で且つガスの生成が無視できると仮定して、有限要素法によるガス流動の定量的な評価を試みた。¹²⁾

その後、有限要素法に変わる、より有効な解析手法の知見が得られたので、ここに紹介する。

図4-8に示すような問題では、一般に領域の形状と境界条件が複雑になる。したがって、解析は近似計算によることになる。その中で有限要素法は実用的で汎用性にすぐれた解法であり、その有用さは広く認められている。しかし、この解法は、無限領域をもつ問題や特異点をもつような問題に対しては難点がある。しかも、基本的には差分法と同様に、領域の状態を領域内の有限個の点の状態で代表させる解法であるから、空気流入口が複数個ある埋立地を想定して、流入口の配置や大きさの適正化をはかるような問題に対しては、コンピューターの容量、インプットデータ量、計算精度などの面でいろいろと制約を受け、有限要素法は必ずしも万能とはいえないよう

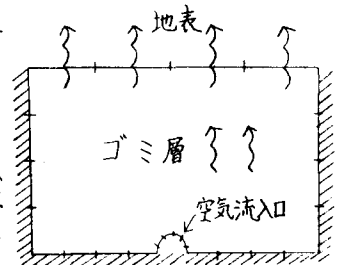


図4-8 ゴミ層断面図

である。

このような問題に、有効に対応できると期待される解法として、境界要素法 (Boundary Element Method) があげられる。本解法のアイディアは古く、ポテンシャル問題では Green 関数を使った、境界だけに限る積分方程式に離散化手法を考慮した解法といえよう。重み付き残差法の一様で、重み関数に基本解を選ぶことにより、領域内に関する積分を消去し、境界のみに限る積分方程式とすることで、境界要素法の特徴である。本法では、図4-8に示すように“境界”を有限個の要素(線分)に分割する。すると、境界のガス圧力とガスフラックスに関する連立方程式が得られる。この分割点の数に等しい次数の連立方程式に境界条件を考慮すれば、境界における未知の境界値(ガス圧力またはガスフラックス)が算出されることになる。次に、全ての境界値を使えば、内部の任意の点における圧力、フラックスは逐一計算される。このように、境界要素法は、2段階の計算手順から成り、境界値と内部の値を求めるためのプログラムに共通の仕様が多く使える。また、プログラミングも有限要素法に比べると容易であり、インプット量や連立方程式の元数を大巾に減少させることも可能である。⁽³⁾

次に、本法の上記の問題への具体的な適用方法について述べる。本法は、今のところ線形解析に威力を発揮する解法であるから、ガス流動解析では水平と垂直方向の透気係数の比を一定とし、ガス密度は温度 $T(x', z)$ のみに依存するとして、次の支配方程式を使う。

$$k_z \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z p) = 0 \quad \text{但し、} p = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (4-1)$$

ここに、 k_z = 垂直方向の透気係数 $[ML^{-1}]$ 、 p = ガス圧力 $[ML^{-1}T^{-2}]$ 、 x', z = 水平、垂直座標 (z は上向き正)、 ρ = ガスの密度 $[ML^{-3}]$ 、 $p_0 = 0^\circ C, 1$ 気圧下のガス密度、 $x' = \sqrt{k_z/k_x} X$ 、 k_x = 水平方向の透気係数、 X = 実際の水平座標

上式に、 $\partial^2 u^*/\partial x'^2 + \partial^2 u^*/\partial z^2 = 0$ の基本解 $u^* = (1/2\pi) \ln(1/r)$ (但し r は動径) をかけて積分し u^* の原点を境界上の i 点にとれば

$$\frac{1}{2} p_i + \int_{\Gamma'} \frac{\partial u^*}{\partial n'} k_z p d\Gamma' = \int_{\Gamma'} u^* J d\Gamma' - \int_{\Omega'} k_z p \frac{\partial u^*}{\partial z} d\Omega' \quad (4-2)$$

ここに、 p_i = i 点の圧力、 Γ' = 境界、 Ω' = 領域、 J = フラックス $[ML^{-2}T^{-1}]$

この式を離散化して、連立方程式を求めれば、 $[H]\{P\} = [G]\{J\} + b$ 、ここに、 P は境界の圧力、 J は境界のフラックス。未知の境界値を左辺に、既知の境界値を右辺にうつせば、 $[A]\{X\} = \{F\}$ 。今、図4-8において、空気流入口と地表面で圧力を、残りの境界(斜線部)でフラックス $J = 0$ を与えると、 X は空気流入口、地表面のフラックスと斜線部の圧力のベクトルとなる。

一方、 i 点が領域内部にあるときは、(4-2) で p_i の係数 $1/2$ を 1 で置き換えた式がそのまま用いられる。したがって、境界値がすべて求められれば、内部の圧力 p は容易に算定されることになる。

5. あとがき

固形廃棄物埋立処理に伴う、環境汚染問題を階層化することにより、汚染問題の所在を明らかにして、汚染防止対策およびその評価項目を整理し、これらの項目に実験および解析手法を対応させる Scheme を導入した。その中で、浸出汚水と発生ガスに関する問題の階層図を紹介し、これらの問題に有効な有限要素法、確率微分方程式および境界要素法等の適用例を示した。

階層化はまだ不十分と考えられ、今後、現場観察を重ねて問題点の掘り起こしを行ない、更に優先順位付きの価値判断を伴った階層化が必要であろう。

一方、解析にあたっては、実験データ不足のため基礎方程式に廃棄物の特性を充分に取りこんでいない点もあり、現段階では、方程式の解と実験結果あるいは現場における現象との整合性の検討が不十分である。

複雑多岐に亘る廃棄物埋立問題の解決には、本論文で提案したような階層化から手法の開発までを通して、系

統的なアプローチが必要であろう。

本研究に関して、御協力を得た土木工学科、大守敦子さん、伊藤朋子さん、理学部応用数学科、大浦洋子さん、小畑錦子さんに感謝致します。

— 参考文献 —

- 1) Nelson, R. W.; Technical Requirements and Analysis Methods for Evaluating The Environmental Consequences of Groundwater Contamination, Prog. Wat. Tech., Vol.9, pp.167-181 (1977)
- 2) 松藤康司, 他; 埋立構造と微生物, 第16回衛生工学研究討論会講演論文集, pp.117~125 (1980)
- 3) 鈴木栄一; 気象統計学, 地人書館 (1968)
- 4) 黒木健実, 他; 海面埋立地周辺の汚染防止に関する研究, 第7回環境問題シンポジウム講演論文集, pp.81-86 (1979)
- 5) 大西和榮, 他; 山間埋立における土壌地下水汚染防止に関する長期予測, *id.*, pp.87-92 (1979)
- 6) Frind, E. O., et al.; Application of Unsaturated Flow Properties in The Design of Geologic Environments for Radioactive Waste Storage Facilities, in Gray and Pinder (eds.) Finite Elements in Water Resources, pp.3133-1363 (1977)
- 7) Beran, M. J; Statistical Continuum Theories, Interscience, (1968)
- 8) 今村勤; 確率場の数学, 岩波書店 (1977)
- 9) Crank, J; The Mathematics of Diffusion, pp.266-285 (1975)
- 10) 長谷隆; 複合材料の熱伝導に関する統計理論, 日本機械学会論文集, Vol.45, No.395, pp.1003-1010 (1979)
- 11) Gillham, R. W., et al.; Hydraulic Properties of a Porous Medium, J. Soil Sci. Soc. America, Div. S-1, pp.203-207 (1976)
- 12) M. Hanashima, et al.; Heat and Gas Flow Analysis in Semiaerobic Landfill, ASCE E.E.Div.
- 13) C.A.Brebbia, The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press (1978)