

地下水流動シミュレーションと透水係数分布の同定

Simulation of groundwater flow and identification of permeability

岡山大学・大学院環境学研究科 水藤寛 (Hiroshi Suito)
堀川靖夫 (Yasuo Horikawa)
七澤洋平 (Youhei Nanazawa)
塚崎哲也 (Tetsuya Tsukazaki)
諸泉利嗣 (Toshitsugu Moroizumi)
小野芳朗 (Yoshiro Ono)

Graduate School of Environmental Sciences, Okayama University

E-mail: suito@ems.okayama-u.ac.jp

Abstract

This computational study is intended to facilitate construction of a simulation system for underground water flow around landfill sites and assessment of areas influence by leachate leakage accidents. Landfill site in Japan are located in mountainous regions because the Japanese population must reside in limited flat areas. Consequently, landfill locations necessarily coincide with water supply areas. For that reason, it is important to evaluate leachate influence on external underground water quality. This study adopts Navier-Stokes equations for governing equations and finite-difference method for discretization.

1. はじめに

廃棄物最終処分場は、我々の生活にとって必要不可欠なものであるが、処分場は周辺の環境にさまざまな悪影響を与えるのではないかという不安がある。そのひとつに処分場からの浸出水による地下への汚染物質の流出の可能性に対する不安があげられる。現代の処分場はそういった浸出水を防ぐような技術を用いて建設されているのであるが、何らかの事故等により汚染物質を含んだ浸出水が地下に漏洩した場合を想定して対策を用意しておくことが、安全・安心保障のために欠かせない。

そこで本研究ではある最終処分場を解析対象として、モデルサイトの局地的地形データから解析メッシュの生成と数値シミュレーションをおこなった。そして、この汚染水の移流拡散シミュレーションを環境への影響評価のツールとして用い、事故対策を

充実させることで安全・安心保障につなげることを最終的な目標としている。

地下における流れを決定する重要なパラメータである透水係数は、ボーリング調査によって現地データを得ることは可能であるものの、その空間構造は明らかではなく、土壌を採取して実験室で精密に測定した値も、現地での値と同じである保証はない。そこで本研究では、地下における透水係数の分布をフーリエ級数によって近似し、その係数を最適化することで、透水係数の分布を同定する手法を用いた。

2. 地形モデル生成

処分場周辺の標高図より、750m×450mの領域における地形モデルを作成した。ボーリング調査の結果より得られた地質データと、地質データより特定の地層面を補間により求めた結果を図1に示す。右側に等値面で示したのが不透水層である。

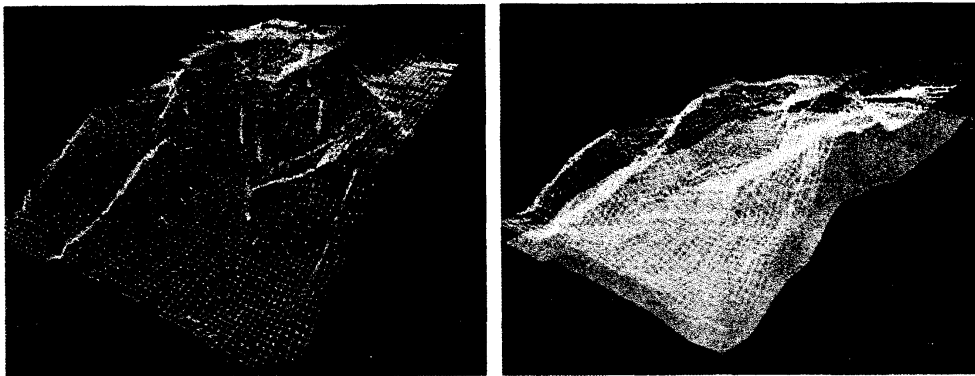


Fig. 1 Geological data and an impermeable layer

2. 支配方程式

支配方程式には Navier-Stokes 方程式、連続の式、水分量の移動の式、汚染物質の移流拡散の式を用いた。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} - \frac{|g|}{K} \mathbf{u} - g$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \theta = 0$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) s = \lambda \Delta s$$

$\mathbf{u}$: 速度	θ : 水分量
t : 時間	ν : 動粘性率
ρ : 密度	g : 重力
s : 濃度	K : 透水係数
p : 圧力	λ : 拡散係数

これらの方程式を差分法によって離散化し、観測データから補間によって求めた初期条件と適切な境界条件の下に解く。圧力 Poisson 方程式は GP-BiCG 法を用いて解

いている。

3. 数値シミュレーション結果

図2に、汚染物質が何らかの事故によって地下水中に放出された場合を仮定した汚染水の移流拡散シミュレーションの結果を示す。初期条件として地下水面を与え、境界条件として地表面に降雨による水分量を与えている。汚染水の濃度に対しては埋め立て物の下部に漏洩源を設定している。

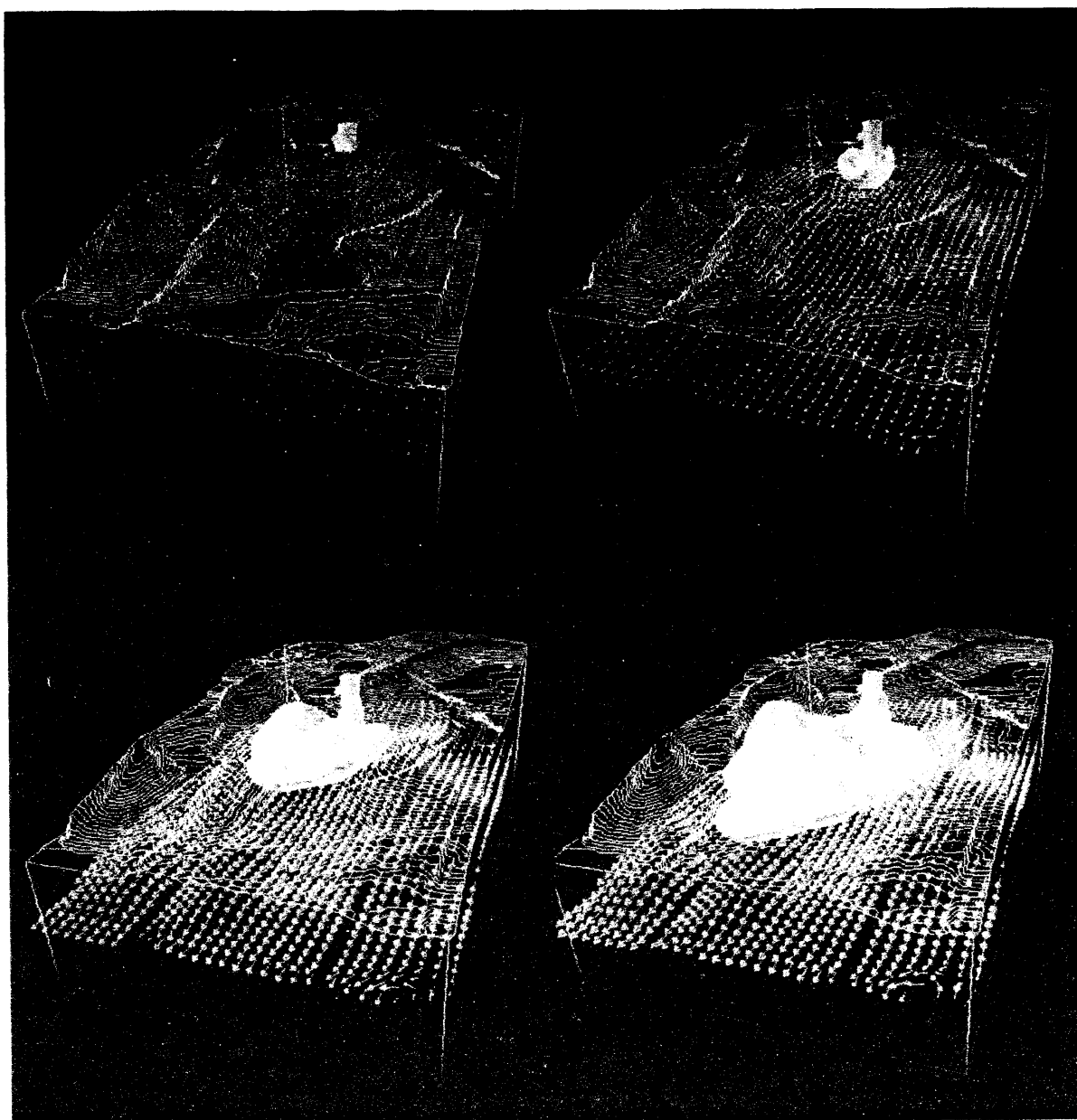


Fig. 2 Contour surface of leachate

4. 透水係数分布の同定

前節に示したようなシミュレーション結果を信頼性あるものとするためには、観測データとの比較、及び地下における透水係数の推定が必要である。そのため、モデルサイト周辺に設置した観測用井戸における地下水位と、それに対応する数値計算結果の水位を比較し、それを用いて透水係数の分布を同定することを試みた。図3に、モデルサイトに設置したモニタリング用井戸の配置を示す。



Fig. 3 Location of monitoring wells

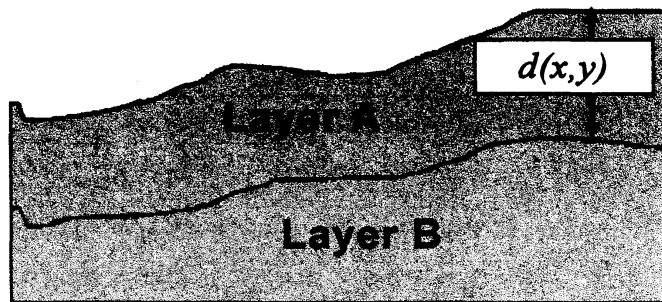
観測データとシミュレーション結果を比較するため、モニタリング井戸における地下水位に関する目的関数を次のように定義する。

$$J(k_A^v, k_A^h, k_B^v, k_B^h, d(x, y)) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{h_i(T) - H_i(T)\}^2$$

- k_j^v : Permeability of layer j in the vertical direction
- k_j^h : Permeability of layer j in the horizontal direction
- $d(x, y)$: Depth of boundary surface between layers A and B
- $h_i(t)$: Computed water table level
- $H_i(t)$: Observed water table level

ここで $h(T)$ は時刻 T において数値シミュレーションによって得られた地下水位、 $H(T)$ は観測用井戸における同時刻の地下水位を示す。添字 i はモニタリング井戸の番号である。この目的関数を最小化するような透水係数の分布を求めることになる。

本研究では、透水係数の異なる二つの層を設定し、それぞれの層の水平方向、鉛直方向の透水係数を同定した。また、二つの層の境界面の深さを $d(x, y)$ とし、次のようなフーリエ級数の形で表現した。



$$d(x, y) = \sum_{l=0}^L \left\{ \sum_{m=0}^M (a11_{l,m} \sin 2\pi my + b11_{l,m} \cos 2\pi my) \sin 2\pi lx + \sum_{m=0}^M (a22_{l,m} \sin 2\pi my + b22_{l,m} \cos 2\pi my) \cos 2\pi lx \right\}$$

ここで、それぞれ $(L+1) \times (M+1)$ 個の係数 $a11$, $a22$, $b11$, $b22$ が未知数となって、境界面形状を決定することになる。例として $L=M=1$ の場合を下に示す。

$$\begin{aligned} d_2(x, y) = & (a11_{0,0} \sin 0 + b11_{0,0} \cos 0 + a11_{0,1} \sin 2\pi y + b11_{0,1} \cos 2\pi y) \sin 0 \\ & + (a22_{0,0} \sin 0 + b22_{0,0} \cos 0 + a22_{0,1} \sin 2\pi y + b22_{0,1} \cos 2\pi y) \cos 0 \\ & + (a11_{1,0} \sin 0 + b11_{1,0} \cos 0 + a11_{1,1} \sin 2\pi y + b11_{1,1} \cos 2\pi y) \sin 2\pi x \\ & + (a22_{1,0} \sin 0 + b22_{1,0} \cos 0 + a22_{1,1} \sin 2\pi y + b22_{1,1} \cos 2\pi y) \cos 2\pi x \end{aligned}$$

目的関数を最小化するための手法としては、遺伝的アルゴリズムと準ニュートン法 (BFGS 公式) のハイブリッド型最適化法を用いた。まず遺伝的アルゴリズムによって最小値の近傍に到達し、その後準ニュートン法によって精度よくパラメータの同定を行うためである。このようにして同定されたパラメータによって地下の透水係数分布を定め、それを用いて地下水位変化の計算を行った結果を図4に示す。

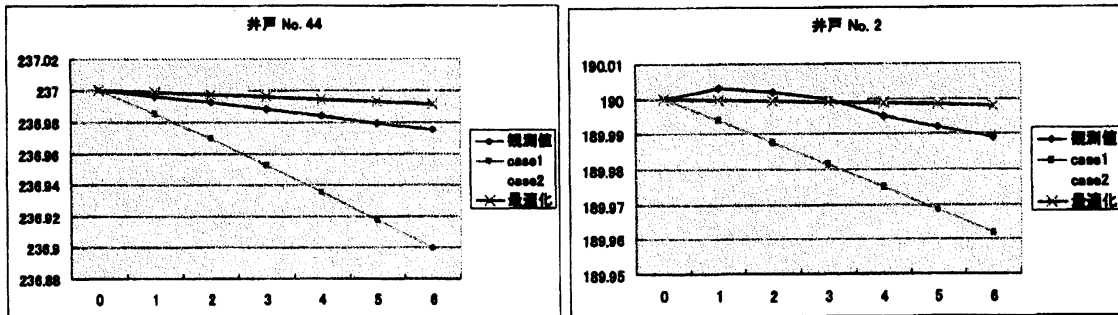


Fig. 4 Water table levels at monitoring wells

透水係数の分布を同定したことにより、事前ボーリングによって得られた透水係数をそのまま用いて計算を行ったとき(case1, case2)に比べて、地下水位の変動がより正確に再現されていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、ハイブリッド型最適化法を用いて、地下透水係数の分布を推定し、最終処分場周辺の地下水流動状況をより正確に再現するための手法を提案した。より

精度よいシミュレーションを行うには、鉛直方向の透水係数分布を2層のみでなく、連続的に変化するように与えることなどが考えられる。このような高精度化により、漏洩汚染水の影響予測シミュレーションをより信頼性のあるものとする事が可能になることが期待される。

6. 謝辞

本研究は科学技術振興調整費、重要課題解決型研究「廃棄物処分場の有害物質の安全・安心保障」の支援を受けて行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] ライナー・ヘルミク：“地下環境での多相流と輸送現象”，シュプリンガー・フェアラーク東京，2004.
- [2] ダニエル・ヒレル：“環境土壌物理学 I -土と水の物理学”，農林統計協会，2001.
- [3] M. Vauclin, D. Khanji and G. Vachaud : "Experimental and numerical study of a transient two-dimensional unsaturated-saturated water table recharge problem", WATER RESOURCES RESEARCH Vol.15 pp. 1098-1101, 1979.
- [4] H. Suito, Y. Horikawa, T. Moroizumi and Y. Ono, Numerical simulation of underground water flow around landfill sites, Proceedings of Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia, Italy, CD-ROM proceedings, 2005.