

数値シミュレーションによる山腹斜面内の 移流分散過程に関する基礎的研究

STUDY ON ADVECTION DISPERSION PHENOMENA IN THE MOUNTAIN SIDE BY USING 3D NUMERICAL SIMULATION

齋藤 雅彦¹・石原 匠²・中川 啓³

Masahiko SAITO, Takumi ISHIHARA and Kei NAKAGAWA

¹正会員 博（工）神戸大学助教 自然科学系先端融合研究環 重点研究部（〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1）

²東海旅客鉄道株式会社 関西支社（〒532-0011 大阪市淀川区西中島五丁目5-15 新大阪セントラルタワー7F）

³正会員 博（工）鹿児島大学准教授 農学部生物環境学科（〒890-0065 鹿児島市郡元1-21-24）

Illegal waste disposal at the mountainside is one of serious problem in Japan. However, the conventional approaches to the groundwater pollution problem mainly focus on the urban area or flat land. In this study, 3D numerical simulations of the advection dispersion phenomena in the simple slope under cyclic rainfall were carried out to investigate the affects of hydraulic conductivity or geometric relation between the source area and pumping well. The results show that the delicate change of the streamline or presence of seepage in the middle of the slope affects sensitively the observed concentration data at the observation well. Obtained results seems to be useful to evaluate the contamination process in the real slope.

Key Words : *illegal abandonment, groundwater pollution, advection dispersion phenomena, 3D Numerical Simulation*

1. 序論

産業廃棄物、医療廃棄物、一般廃棄物等の不法投棄が後を絶たない。規制や監視の強化により産廃の大規模な不法投棄には一応歯止めがかかったものの、一般廃棄物の不法投棄に関する検挙件数はむしろ増加している地域もある。

不法投棄は、監視の目が届きにくい山林や河川敷にて多発しているが、特に山腹斜面等に投棄された廃棄物に有害物質が含まれていた場合、水源地の土壌および地下水を汚染することから、生態系や農産物への悪影響が懸念されている。また、山間部では上水道が整備されていない地域も残されているため、最悪の場合は飲料水の汚染による人体への健康被害も生じないとは言いきれない。

一方、土壌・地下水汚染や、斜面内の降雨浸透に関する研究は、国内外を問わず従来から活発に行われている。たとえば、汚染物質の溶出挙動や化学的性質については、おもに室内実験等から多くの知見が得られており^{1), 2)}、また、輸送過程については、多種の数値モデル（移流分散解析、多相流解析等）が提案され、様々な物質に対する輸送過程の数値シミュレーションが試みられている³⁾。

4) . さらに、斜面内の浸透問題については、これまでも主に土砂災害防止の観点から、実験的・解析的を問わず、多くの検討がなされている^{5), 6)}。

しかしながら、地下水汚染に関する従来の取り組みは、都市部や平野部における汚染問題を取り扱ったものが中心であり、山腹斜面における不法投棄を対象としたものはほとんど見られない。このような山間部に排出された後の汚染物質の拡散・分散挙動については、複雑な基盤面形状や降雨による希釈効果、あるいは早い地下水位の変動等の平地とは異なる斜面特有の問題が考えられるが、これらについても未解明な部分が極めて多く、また、フィールドにおける実測例や解析例の蓄積も不十分であり、残念ながら「現地で測定してみなければわからない」というのが実情であろう。

本研究では、3次元斜面における水溶性物質の拡散・分散挙動の評価に目的を絞り（難溶性物質は検討対象に含めない）、比較的単純なモデル斜面を用いて、周期的な降雨条件の下に、斜面の透水性、および汚染源と取水位置の関係が、斜面内の汚染物質の輸送状況に与える影響等について数値シミュレーションにより検討する。

2. 基礎方程式

(1) 飽和・不飽和浸透流解析

飽和・不飽和浸透流の基礎式^{7), 8), 9)} は以下のように表される.

$$\left(\phi \frac{dS_w}{d\psi} + \beta S_s \right) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathbf{K} \cdot (\nabla \psi + \nabla Z)] \quad (1)$$

ここに、 ϕ は空隙率、 S_w は飽和度、 S_s は比貯留率、 $\mathbf{K}$ は透水係数テンソル、 ψ は圧力水頭、 Z は位置水頭である. また、 β は、飽和領域 ($S_w=1$) で $\beta=1$ 、不飽和領域 ($S_w \neq 1$) で $\beta=0$ である. また、透水係数テンソルは、比透水係数 k_r および飽和透水係数テンソル $\mathbf{K}_s$ により以下のように表すことができる.

$$\mathbf{K} = k_r \cdot \mathbf{K}_s \quad (2)$$

境界条件は、圧力規定の境界 Γ_1 上で、

$$\psi = \psi_l \quad \text{on} \quad \Gamma_1 \quad (3)$$

流束 q が規定される境界 Γ_2 上で、

$$q = q_2 = -\mathbf{n} \cdot \mathbf{K} \cdot (\nabla \psi + \nabla Z) \quad \text{on} \quad \Gamma_2 \quad (4)$$

ここに、 $\mathbf{n}$ は境界面上の単位外向法線ベクトルである.

(2) 不飽和浸透特性

解析に必要な水分特性曲線は、式(5)のvan Genuchtenの式¹⁰⁾を用いる.

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \left\{ 1 + (\alpha \psi_c)^n \right\}^{-m} \quad (5)$$

ここに、 ψ_c は毛管圧($= -\psi$)、 S_e は有効飽和度、 S_r は残留飽和度、 α , n , m は形状パラメータであり、 n , m は無次元、 α は圧力水頭の逆数の次元を持つ. また、 n と m の関係は、 $m = 1 - 1/n$ とする.

また、比透水係数と有効飽和度の関係は、

$$k_r = S_e^\varepsilon \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right\}^2 \quad (6)$$

と表される¹¹⁾. ここに、 ε は空隙の連続性に関わるパラメータであるが、一般に、 $\varepsilon=1/2$ が用いられることが多い. また、式(5)を ψ_c で微分して整理すると次式を得る.

$$-\phi \frac{dS_w}{d\psi_c} = \phi \alpha m n (1 - S_r) (\alpha \psi_c)^{n-1} \left\{ 1 + (\alpha \psi_c)^n \right\}^{-m-1} \quad (7)$$

(3) 移流分散方程式

地下水流による水溶性物質の輸送過程の基礎式 (移流分散方程式) は、以下のように表される.

$$\theta \frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C) - \mathbf{q} \cdot \nabla C \quad (8)$$

ここで、 C は濃度、 θ は体積含水率 ($=\phi S_w$)、 $\mathbf{D}$ は分散係数テンソル、 $\mathbf{q}$ はダルシー流速ベクトルである. また、式(8)における $\mathbf{D}$ の成分 D_{ij} は、次式で与えられる¹²⁾.

$$\theta D_{ij} = \alpha_L |\mathbf{q}| \delta_{ij} + (\alpha_L - \alpha_T) \frac{q_i \cdot q_j}{|\mathbf{q}|} + D_m \theta \delta_{ij} \quad (9)$$

ここで、 α_L は流れ方向の分散長、 α_T は流れに垂直な方向の分散長、 q_i はダルシー流速ベクトル $\mathbf{q}$ の i 方向成分、 D_m は分子拡散係数、 δ_{ij} はクロネッカーデルタテンソルの成分である.

境界条件は、濃度規定の境界で、

$$C = C_A \quad \text{on} \quad \Gamma_A \quad (10)$$

濃度勾配規定の境界で、

$$F = F_B = -\mathbf{n} \cdot (\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C) \quad \text{on} \quad \Gamma_B \quad (11)$$

流束規定の境界で、

$$F = F_C = \mathbf{n} \cdot (\mathbf{q} C - \theta \mathbf{D} \cdot \nabla C) \quad \text{on} \quad \Gamma_C \quad (12)$$

式(9)を通常の高ラーキン法により離散化すると、移流項が卓越する場合に解が不安定になることが知られている. この不安定性を抑制するため、本研究では特性曲線高ラーキン法¹³⁾を用いた.

3. 解析条件

(1) 解析領域

モデル斜面の概要と有限要素分割を図-1に示す. 以下では、汚染源の位置に関して2つのパターンについて検討する. まず、Case-Aは2m×2mの汚染源を図-2(a)のように $x=60\text{m}$, $y=200\text{m}$ 付近の谷の部分とし、 y 軸に関する対称性を用いて半分を解析対象領域とする. Case-Bでは図-2(b)のように汚染源を $x=25\text{m}$, $y=200\text{m}$ 付近とする.

また、各ケースとも $x=60\text{m}$, $y=40\text{m}$ に深さ4m, 平面形状1m×1mの取水井戸を設置し、ここから浸出する水の濃度の時間変化を調べた.

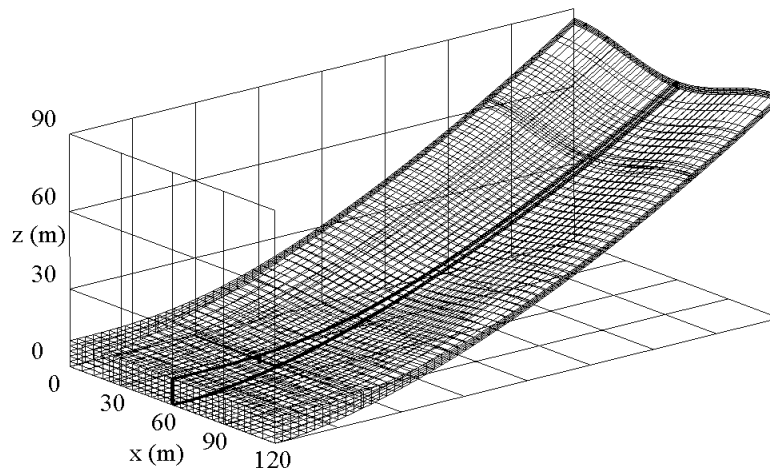


図-1 モデル斜面の概要

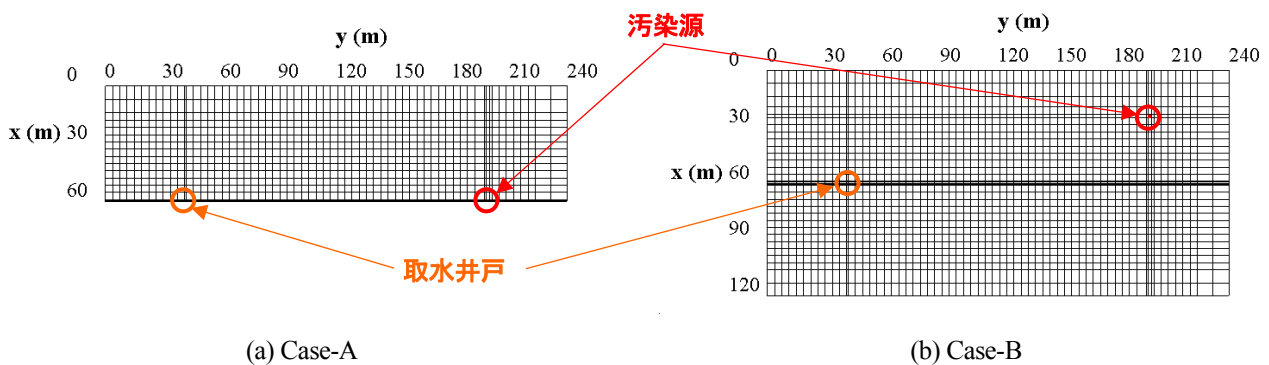


図-2 汚染源および取水井戸の配置

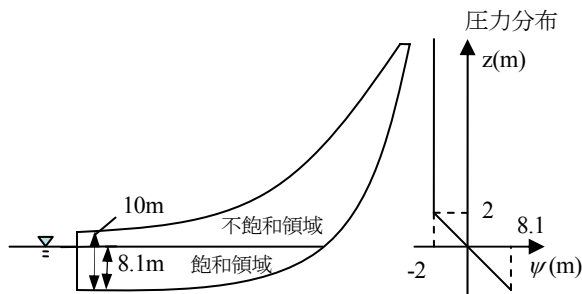


図-3 初期の圧力水頭分布

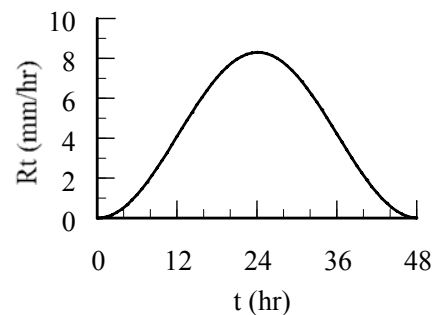


図-4 降雨波形

(2) 初期条件・境界条件と降雨条件

初期の不飽和領域、飽和領域、圧力分布を以下の図-3に示す。ここで、図のように、下流端の底面から8.1mまでの領域を飽和領域とし、そこから上部を不飽和領域とする。圧力分布は、初期の地下水面から+2mまでは静水圧分布、それ以上は-2mで一定値とする。また、濃度分布は、汚染源の地表面において $C=1$ 、それ以外の領域では $C=0$ とする。浸透に関する境界条件は、 $y=0m$ 、 $z<8.1m$ で静水圧分布、地表面および井戸内部は浸出面境界($\psi \leq \text{大気圧}$)とする。移流分散方程式に関しては、汚染源の地表面において $C=1$ 、それ以外の地表面や下流端の境界では濃度勾配 $F_B=0$ とする。

降雨条件は、30日ごとに斜面全体に図-4に示す波形(2日間で200mm)を与える。

(3) 地盤物性値

飽和透水係数は、等方性・均質として、Case-A、Case-Bそれぞれに対して、 $K=1.0 \times 10^{-4}(\text{m/s})$ と $K=1.0 \times 10^{-5}(\text{m/s})$ の2種類、すなわち計4ケースとする。また、空隙率は $\phi=0.4$ とし、水分特性曲線については、Scott *et al.*¹⁴⁾の方法を用いてヒステリシスを考慮する。主吸水曲線と主脱水曲線の関係は、式(5)における α で主吸水曲線と主排水曲線を区別し、それぞれ α_w と α_d とすると、Luckner *et al.*¹⁵⁾を参考に $\alpha_w=2\alpha_d$ とする。ここで用いた値を表-1に示す。

式(9)に用いられる分散長は、微視的分散のみを考え、 $\alpha_L=5.0 \times 10^{-3}m$ 、 $\alpha_T=5.0 \times 10^{-4}m$ とし、分子拡散係数は $D_m=1.0 \times 10^{-9}m^2/s$ とする。

4. 解析結果と考察

(1) 取水井戸における濃度の時間変化

図-5は、各ケースにおいて取水井戸からの浸出水濃度の時間変化である。まず、井戸までの到達時間については、飽和透水係数が大きいCase-A1とCase-B1は約50日、Case-A2とCase-B2は両者とも約280日となっている。一方、濃度のピークについては、汚染源の0.05%~0.25%とケースによって違いが表れている。とくに、汚染物質が取水井戸に到達した後の濃度の上昇過程については、汚染源の違いによって全く逆の傾向が見られ、Case-Aについては、透水係数の大きいCase-A1の方が濃度の上昇が大きいのにに対し、Case-Bでは逆に透水係数の小さい

Case-B2の濃度が大きく上昇していることがわかる。以下では、このような挙動の相違が生じる要因を中心に考察する。

(2) Case-A1とCase-A2の比較

図-6は、Case-Aの360日後の井戸近傍の濃度分布と飽和度分布である。これより、Case-A1は上流部での飽和度が全体的に小さく、おもに基盤面に沿って浸透水が流下しているのに対し、Case-A2では地表面付近まで水深が上がっていることがわかる。また、図-7は両ケースの地表面の飽和度分布を表しているが、それぞれCase-A1は降雨のピーク時、Case-A2は次の降雨の直前（降

	$K(m/s)$	n	$\alpha_w(1/m)$	$\alpha_d(1/m)$	S_r
Case-A1 Case-B1	1.0×10^{-4}	3	3.4	1.7	0.10
Case-A2 Case-B2	1.0×10^{-5}	3	2.0	1.0	0.25

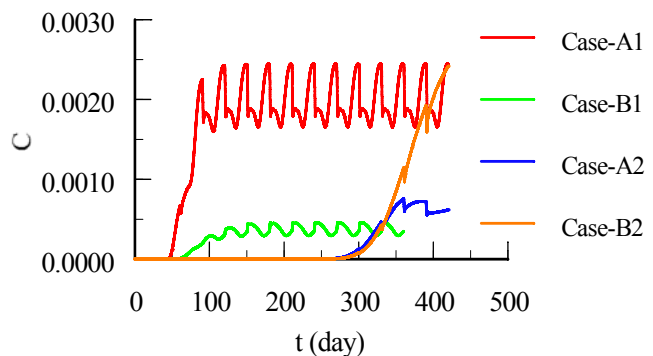


図-5 浸出水濃度の時間変化

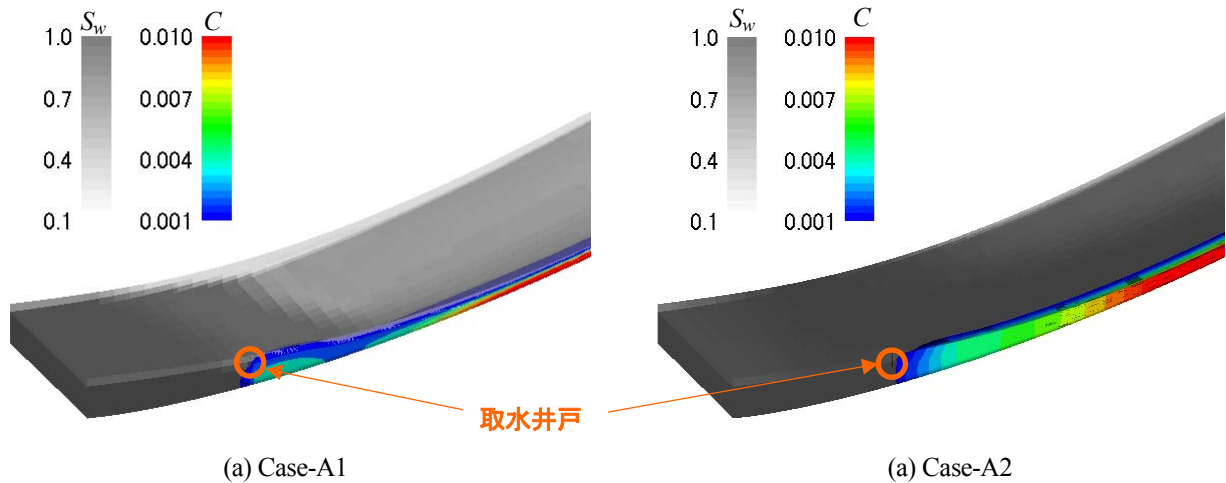
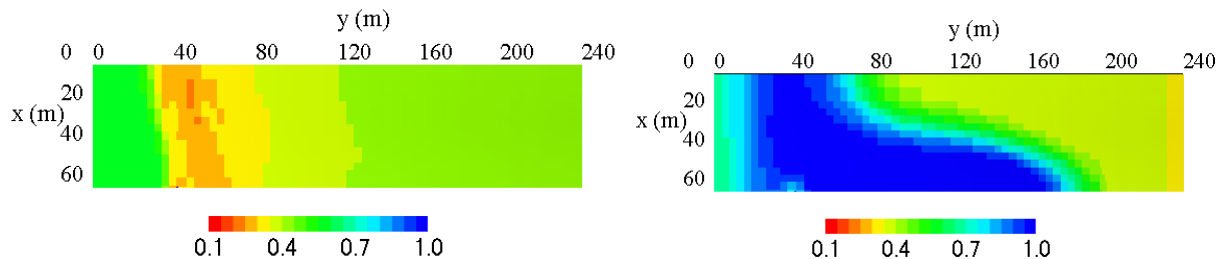


図-6 井戸近傍の360日後の濃度分布と飽和度分布



(a) Case-A1 ($t=331$ 日；降雨のピーク時)

(a) Case-A2 ($t=330$ 日；降雨の直前)

図-7 地表面の飽和度分布

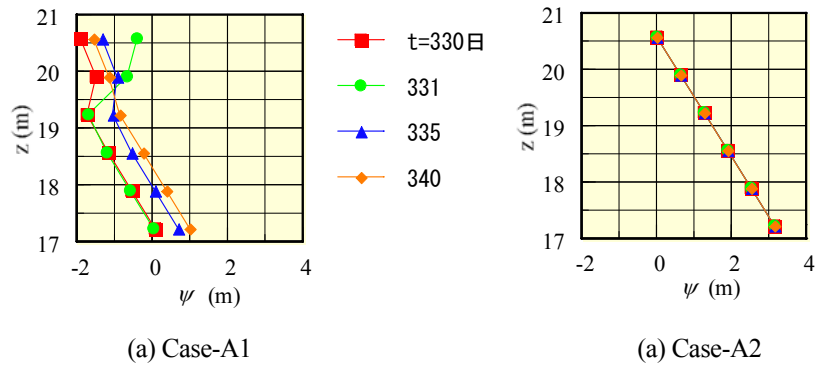


図-8 $x=60\text{m}$, $y=102\text{m}$, $t=330$ 日（降雨直前）～340日（降雨終了から8日後）における鉛直方向の圧力水頭分布

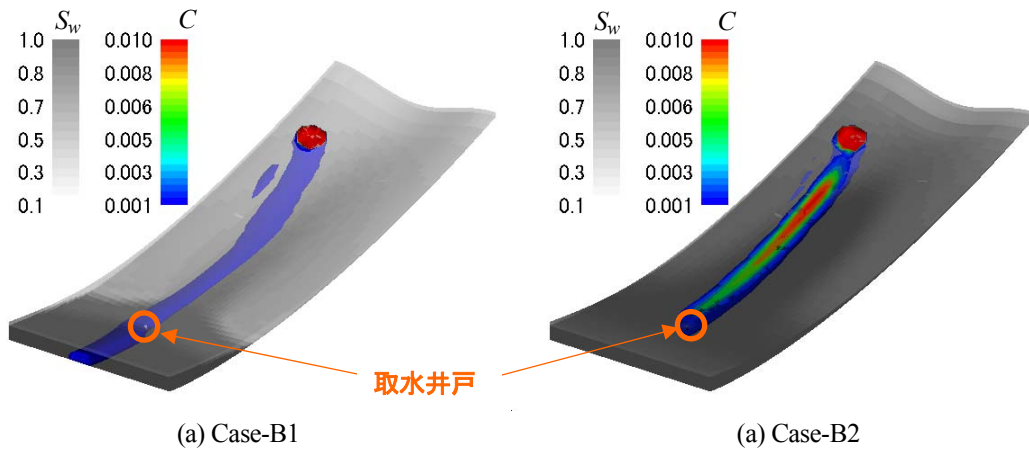


図-9 360日後の濃度分布と飽和度分布

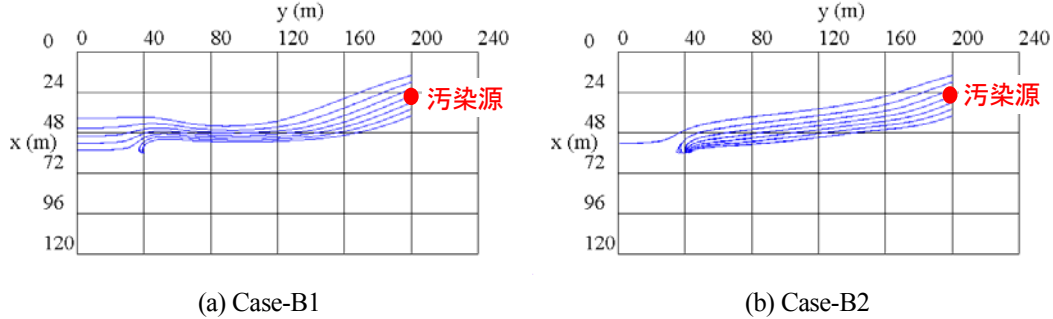


図-10 汚染源近傍を起点とする流線（ $t=380$ 日）

雨終了から28日後）の状態を示している。Case-A1では降雨中も全的に不飽和状態が保たれているのに対し、Case-A2では降雨終了から28日経過後でも谷部を中心に飽和、あるいはそれに近い領域が広がっている。

これより、Case-A2の飽和領域では地表面からの地下水の浸出が広範囲に生じていることが考えられる。例えば、図-8は、 $x=60\text{m}$, $y=102\text{m}$, $t=330$ 日（降雨直前）～340日（降雨終了から8日後）におけるCase-A1, Case-A2の鉛直方向の圧力分布であるが、Case-A1では降雨に反応して圧力分布が変化しているのに対し、Case-A2では降雨に反応せず、地表面の圧力水頭が大気圧と等しい静水圧分布となっており、浸出面であることがわかる。このような地表面の浸出面から汚染物質も流出していると推察される。

つまり、Case-A1では、汚染源から浸透した汚染物質は、すべて取水井戸から浸出しているのに対し、Case-A2では地表面からの流出分が差し引かれるため、取水井戸における濃度が小さくなったものと考えられる。ただし、ここでは一度地盤から浸出した後の再浸透については考慮していないので、実際には再浸透により予想よりも早く、広範囲に汚染物質が拡散する可能性も考えられる。

(3) Case-B1とCase-B2の比較

図-9は、Case-Bの360日後の濃度分布と飽和度分布である。飽和度分布はCase-A1, Case-A2と同様であるが、Case-B1では、プリュームが取水井戸を越えて、下流端にまで到達している。

一方、Case-B2では、プリュームは井戸よりも下流に

は到達していない。図-10は、 $t=380$ 日における汚染源近傍を起点とする流線であるが、この図からもCase-B2の方が集水域が若干ながら広いことがわかる。

また、Case-A2とCase-B2の大きな違いは、Case-B2では、水深が上昇しやすく、浸出量が多い谷部を経由していない点である。これらにより、Case-B2では下流端や地表面からの流出があまり生じないため、取水井戸における濃度が大きくなったものと考えられる。

以上のように、取水井や観測井における濃度の観測結果は、途中における浸出の有無や量、あるいは流線の微妙な違いに敏感に反応するため、数値モデルを用いて汚染状況の推定や予測を行う際には、まず、流れ場の状況をできるだけ正確に把握することが重要であると思われる。

5. 結論

本研究では、3次元斜面における水溶性物質の拡散・分散挙動について、比較的単純なモデル斜面を用いて、斜面の透水性、および汚染源と取水位置の関係が、汚染物質の輸送状況に及ぼす影響等について数値シミュレーションにより検討した。これらによって得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 飽和透水係数が比較的小さい場合は、地下水位が上昇しやすく、谷部からの浸出が生じることがあり、一度地中に浸透した汚染物質が、表流水として再び地表に流出する可能性があることを示した。
- 2) 飽和透水係数の違いによって、水位・水頭分布（すなわち流線）が異なり、これに伴ってプルームの形状も変化するため、下流部への到達状況が大きく異なる可能性があることを示した。
- 3) 取水井戸や観測井戸において得られる濃度の観測結果は、斜面途中における浸出の有無や流線の微妙な変化に敏感に反応するため、まず流れ場の性質を十分に把握することが重要であることを示した。

今後は、実斜面に対する適用も視野に入れ、地盤の不均一性の導入や、複雑な斜面条件等を考慮したより現実的なシミュレーションを実施する予定である。

謝辞：本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究C，研究課題名：「山腹斜面における廃棄物の不法投棄に伴う汚染物質の拡散挙動の解明」，課題番号：21510031，研究代表者：齋藤雅彦）の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日置和昭，青木一男：電解質物質の土粒子への吸脱着特性とその定式化に関する基礎的研究，土木学会論文集C，Vol.62, No.4, pp.840-857, 2006.
- 2) 中川啓・天本茜・関岡洋志・靱井和朗：物理的・化学的不均一場における陽イオン交換反応を考慮した物質輸送実験，水工学論文集，第52巻，pp.397-402, 2008.
- 3) 西垣誠，菅野雄一：地盤への油の浸透に関する基礎的研究，土木学会論文集C，Vol.63, No.1, pp.249-268, 2007.
- 4) 小林健一郎，Reinhard Hinkelmann, Rainer Helmig, 寶馨，玉井信行：2相モデルおよび2相・3相モデルによる地下帯水層メタン輸送数値実験，土木学会論文集B，Vol.63, No.2, pp.120-133, 2007.
- 5) 北村 良介，酒匂 一成，加藤 俊二，水島 俊基，今西 肇：降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土槽試験，地盤工学ジャーナル，Vol. 2, No. 3, pp.149-168, 2007.
- 6) Ripendra AWAL, Hajime NAKAGAWA, Kenji KAWAIKE3, Yasuyuki BABA4 and Hao ZHANG: Numerical and experimental study on 3d transient seepage and slope stability of landslide dam failure, 水工学論文集，第53巻，pp.61-66, 2009.
- 7) Neuman, S. P.: Saturated unsaturated seepage by finite elements, *Proc., ASCE HY*, Vol.99, No.12, pp.2233-2250, 1973.
- 8) Neuman, S. P.: Galerkin method of analyzing non-steady flow in saturated-unsaturated porous media, *Finite element Method in flow problem*, edited by C. Taylor, O.C. Zienkiewicz, R.H. Gallagher, John Wiley & Sons, Chap.19, 1974.
- 9) 赤井浩一，大西有三，西垣 誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析，土木学会論文集，第264号，pp.87-96, 1977.
- 10) van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 11) Maulem, Y. :A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, pp.513-522, 1976.
- 12) Bear, J. :Dynamics of Fluid in Porous Media, Elsevier, New York, 1972.
- 13) Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L.: The Finite Element Method, Vol.3, (5th ed.), *Butterworth-Heinemann*, pp.13-63, 2000.
- 14) Scott, P. S., Farquhar, G. J. and Kouwen, N. :Hysteretic Effects on Net Infiltration, pp.163-170, In *Advances in Infiltration*, Am. Soc. Agric. Eng., St. Joseph, MI, 1983.
- 15) Luckner, L., van Genuchtn, M.Th. and Nielsen, D.R.: A Consistent Set of Parametric Models for the Subsurface, *Water Resources Research*, Vol.25, pp.2187-2193, 1989.

(2009. 9. 30受付)