

大気・土壌・地下水連成モデルによる汚染物質移行手法の開発

A Numerical Approach to Contaminant Migration in Soil and Groundwater

using a Coupling Model between Atmosphere, Soil and Aquifer

佐藤 邦明¹、佐々木 孝^{2*}

Kuniaki Sato¹, Takashi Sasaki²

¹ 埼玉大学地圏科学研究センター

Geosphere Research Institute, Saitama University

² (株) アーク情報システム

Ark Information Systems, Inc.

Abstract

Groundwater contamination by volatile organic compounds(VOC), like trichloroethylene gives a serious environmental problem because of their carcinogenic characteristics in our health. Behaviors on dissolved material in porous media consist of two parts, volatile gases migration in unsaturated zone and liquid phase dispersion in groundwater. The objective of the study aims at the modeling of contaminant migration in soil and groundwater. The results of the study in shallow unsaturated soil showed that moisture plays important role in the vaporization and condensation process and rainfall infiltration enhances the downward transport of contaminant. Referring to laboratory experiments and field scale data, a new numerical model on migration in unconfined groundwater was developed by using the random walk method coupled with the finite difference discretization.

Key Words: Groundwater contamination, VOC(DNAPL) migration, dispersion, saturated porous media, aquifer

1. 研究目的

近年、トリクロロエチレンなどの揮発性有機化合物(VOC)(水より重い難水溶性の意味で、DNAPL: Dense Non Aqueous Phase Liquid と呼ばれる)の発ガン性が大きな社会的問題となり、土壌や地下水への汚染の影響評価が緊急の課題となっている。地下水中に漏洩した汚染物質の挙動は、多孔媒体中の移行として扱うが、いわゆる通気帯(不飽和帯)における揮発性ガスの移行拡散と(飽和)地下水中の分散を同時に考える必要がある。本研究は、土壌・地下水中の汚染物質の挙動を解析するシステムの構築とその実用化を目的としており、①地表面過程を考慮した大気・土壌中の熱、水分と汚染物質の連成モデルの構築、および②帯水層におけるDNAPL 移行モデルの構築という2つのフェーズで研究を展開した。

2. 大気・土壌を連成させた土壌中 DNAPL 移行モデルと解析結果

この解析モデルは、地表面の熱収支を高精度で解析するSALSAモデル(SALSA: Soil Atmosphere Linking Simulation Algorithm)[1]、土壌中の水分、熱と汚染物質の輸送モデルから構成される。

2.1 大気・土壌連成モデル

SALSAモデルは、大気と土壌における熱・水分輸送過程を地表面で連成させて解析するところに特徴がある。鉛直1次元の2つの半無限区間を結合した計算領域に対し、次の7つの主な状態変数によりモデル化される。土壌中の温度、水分、大気中の温位、比湿、水平風速の2つの直交成分、乱れの運動エネルギーである。基礎方程式は、大気の運動方程式、地表面と大気間の交換式、境界層内での輸送、土壌中の熱輸送、土壌中の水分輸送から構成される。このモデルにより、大気・土壌の相互作用を考慮した水・熱収支の予測が可

*〒102-0076 東京都千代田区五番町 4-2 東プレビル
電話 : 03-3234-9233 FAX : 03-3234-9402
Email : sasaki@ark-info-sys.co.jp

能となる。SALSA に必要な入力条件および解析アルゴリズムの妥当性は現地実測値などにより検証されている。

2.2 土壌中の DNAPL 移行モデルと解析結果

一般に汚染物質は水によって運ばれ、土壌水や地下水の運動が汚染物質の拡散、分散を促す。土壌空隙中には DNAPL と水がそれぞれ DNAPL ガスと蒸気水の状態で土粒子間に拡散している。液体状の DNAPL と水は土粒子間を繋ぐように、また土粒子の吸着作用により土粒子表面に存在している。この現象を液状水の移動、蒸気状水の移動、DNAPL 溶液の移動、DNAPL ガスの移動、熱エネルギーの輸送に関する5つの方程式によりモデル化し、これを数値解析で解くことにより汚染物質の挙動を求める(図-1 参照)。

地表面条件を裸地(BS)、草地(SG)、森林(F) 浸透性舗装 (PP) の4つのタイプに分け、さらに降雨条件あり、なしの場合について、DNAPL の移行を解析し、

地表面付近の土壌中の熱・水分が汚染物質の移行に与える影響を検討した事例を紹介する[2],[3] (図-2 参照)。

土壌・大気連成モデルと土壌中 DNAPL 移行モデルに基づく数値解析の結果、液状および気体状 DNAPL の地中への移行は、日中の土壌水分と熱の分布に大きく依存しており、土壌中の水分・熱収支は地表面の状態(植生、土地利用)や土壌特性、気温や日射量、降雨条件などに影響されることが分かった。地表面付近に浸透した DNAPL は、一部は気体として大気中に放散され、降雨によって地中への DNAPL の移行が促進される。気体状 DNAPL の地中への拡がり、液状 DNAPL よりも相当に大きい、という結果が得られた。こうした解析結果により地中における汚染物質の鉛直方向の移行、分布についての基本的知見が得られ、輸送過程の解明や地表面および土壌条件が汚染物質移行の速度や範囲に与える影響の予測が可能となった。

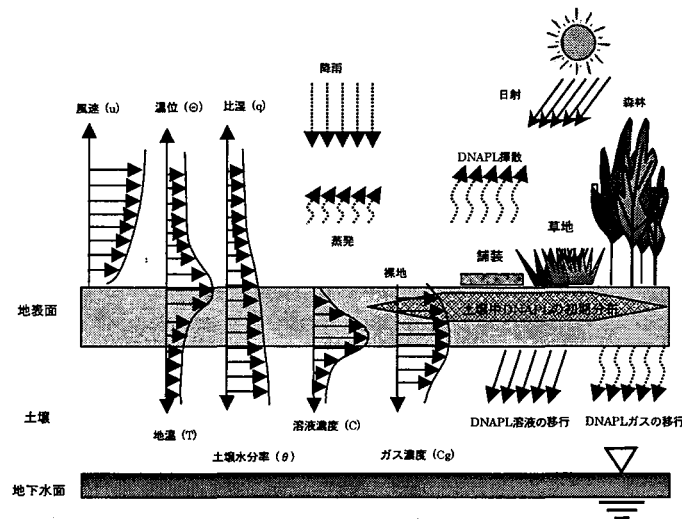


Fig.1 大気・土壌連成解析の概念図

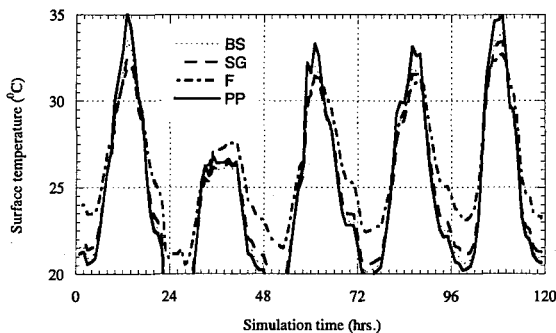


Fig.2 (a) 解析結果 地表面温度
(BS:裸地、SG:草地、F:森林、PP:浸透性舗装)

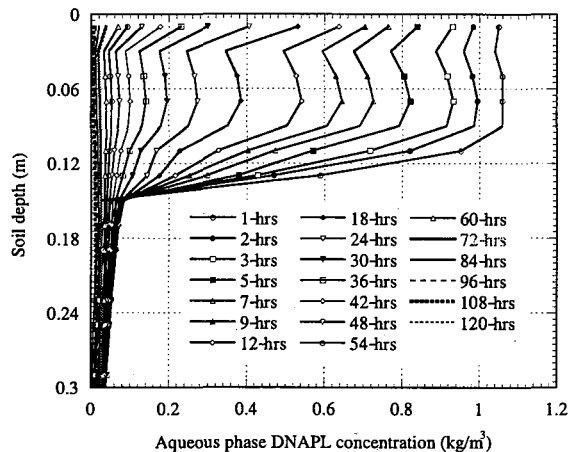


Fig.2 (b) 解析結果 DNAPL 濃度変化
(森林、降雨なし)

3. 帯水層中 DNAPL の移行モデル

帯水層中の DNAPL 移行解析には、溶液相、NAPL 相のそれぞれの移流分散式を支配方程式とする多相流型予測手法が提案され解析事例も報告されている[4]。しかしながら、領域を格子に分割し格子内平均値により解を求めるこうした手法は、長さスケールの違いなどから、重力沈降やフィンガリング（人が指を広げた形の流れ）により地下水中に浸入し、多孔媒体の空隙中に液滴粒子として捕捉される DNAPL の挙動を十分に再現することは難しい[5]。

3.1 空隙内拘束を考慮した移行モデル

本研究では、空隙内に補足される液滴粒子について、室内実験から残留する DNAPL 量を算定して定式化した[6]。これにもとづき、DNAPL 原液を重力沈降する液滴粒子の運動としてランダムウォークにより離散化し、さらに DNAPL 溶液の移流分散方

程式を高精度 TVD 差分スキームにより離散化した新しい DNAPL 移行解析モデルを提案した[7],[8]。

図-3 に液滴粒子のランダムウォーク、差分格子とランダムウォークの結合、空隙内拘束モデルを示す。

3.2 検討ケースと解析条件

汚染源の近傍における残留 DNAPL の分布に注目した現地規模への適用性を検討するため、帯水層厚さ $D=15\text{m}$ 、流下距離 $L=100\text{m}$ の範囲を解析領域とした(図-4、表-1 参照)。鉛直 2 次元領域で一様水平地下水流がある場合を想定して流速 u' を $0.1, 1.0\text{m/day}$ と変化させた。DNAPL の空隙内拘束率は、水面からの距離、粒径、空隙率などの関数となる。ここでは液滴粒子が着底した時点の質量を基準として、 $2/3, 1/3, 1/10$ となるように、距離を含んだパラメータ \square^* を使用した。現地規模における予測を想定し、重力沈降が支配的である汚染源の近傍域について残留 DNAPL の分布や DNAPL プールの形成過程についての解析例を示す。

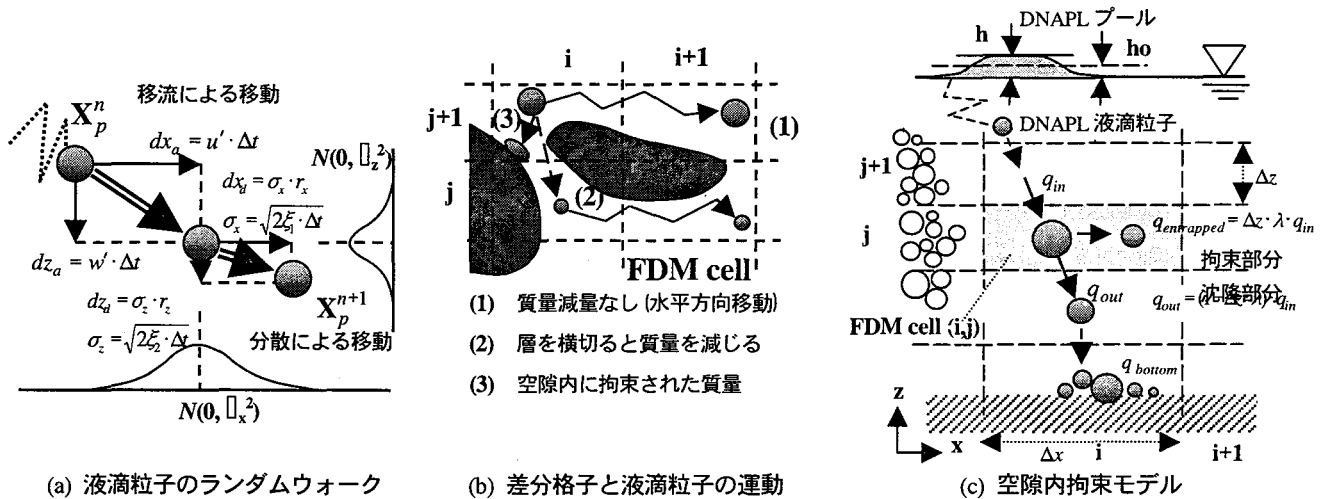


Fig.3 液滴粒子のランダムウォークと差分格子

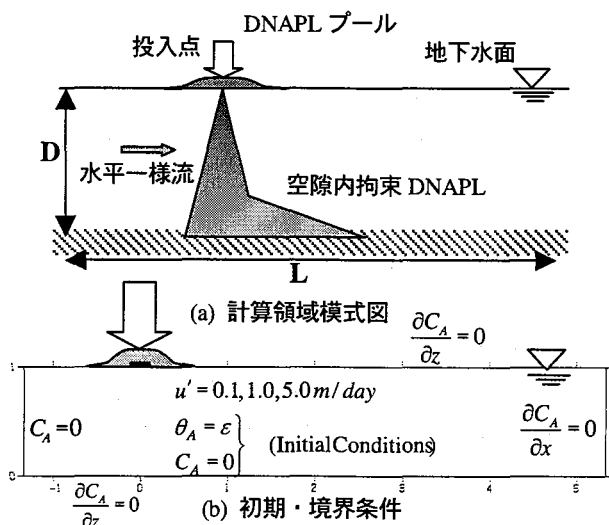


Fig.4 解析領域

Table 1 解析条件

\square		\square_N (g/cm^3)	
(空隙率)	0.4	(DNAPL 密度:TCE)	1.47
d_p (cm)	0.04	μ_N ($\text{g/cm} \cdot \text{s}$)	5.7×10^{-3}
(平均粒径)		(DNAPL 粘性係数)	
格子 (cm)	100×30	C_A^s (mg/L)	1.27×10^3
($\Delta x \times \Delta z$)		(溶液飽和濃度)	
格子 (セル)数	100×50	D_m (cm^2/s)	8.0×10^{-6}
		(溶液分子拡散係数)	
溶液分散長	100, 30	\square (cm) 7 タイプ	0.015~
$\square_{AL}, \square_{AT}$ (cm)		(液滴粒径)	0.1
原液分散長	5.0, 2.5	$\square^* = \square \cdot D$	0.406~
$\square_{NL}, \square_{NT}$ (cm)		(空隙内拘束係数)	2.30

3.3 解析結果と考察

図中、 θ_E 、 C_E 、 θ_A 、 C_A は、DNAPL 原液、溶液の体積含有率と濃度である。シェイディングは原液の分布を、等値線は溶液濃度分布を示している。

図(a)では、原液の液滴粒子は、水平流速が小さいため、投入境界のほぼ直下を沈降し、残存 DNAPL の汚染柱が形成される。投入境界の底部の DNAPL プール

(液溜り) から溶解により溶液濃度分布が拡がる。流速の大きい 1m/day のケース (図(b)) は、流下方向に原液、溶液が移流される。この場合も地下水面と底部の DNAPL プールの濃度分布への影響が分かる。図(c)で空隙内拘束係数 α^* を変化させた 3 ケースを比べると、投入境界付近のピーク濃度に差があるものの、流下方向濃度はほぼ同様の分布を示すことが見て取れる。

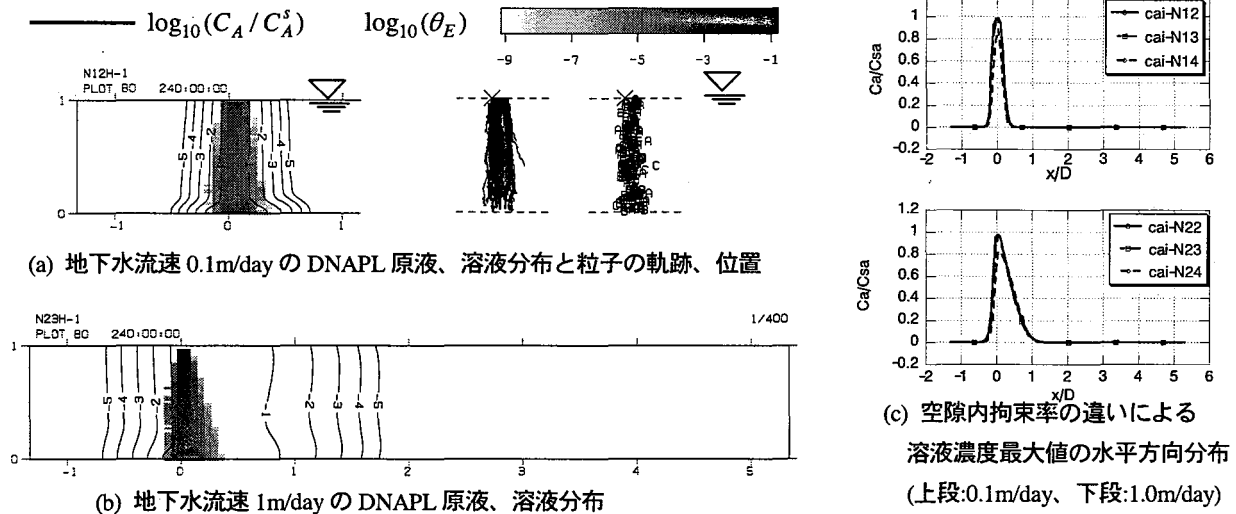


Fig.5 解析結果

4. まとめ

大気・土壌連成モデルと汚染物質の移行モデルを結合した土壌中 DNAPL 移行モデルの解析事例と、帯水層中の DNAPL 移行モデルによる解析事例を示した。土壌・地下水中の汚染物質の移行解析は、これまで構築した土壌中および地下水中の移行モデルを統合することにより一貫した解析が可能となる。今後、モデルの統合と、現地適用性の検討を行う予定である。

参考文献

- [1] ten Berge, H. F. M., *Heat and water transfer in bare topsoil and the lower atmosphere*. Center for Agricultural Publishing and Documentation (Pudoc.), Wageningen, the Netherlands, 1990.
- [2] Rabindra Raj GIRI, Kuniaki SATO, Akira WADA, Yasuhide TAKANO, Takashi SASAKI, A simulation study of aqueous and gas phase DNAPL migration in shallow unsaturated land elements, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering JSCE*, Vol.20, No.2, pp.51-69, 2002.
- [3] 佐々木孝, Rabindra Raj Giri, 佐藤邦明, 和田明, 高野保英, 土地利用を考慮した土壌中の液相・気相 (液溜り) から溶解により溶液濃度分布が拡がる。流速の大きい 1m/day のケース (図(b)) は、流下方向に原液、溶液が移流される。この場合も地下水面と底部の DNAPL プールの濃度分布への影響が分かる。図(c)で空隙内拘束係数 α^* を変化させた 3 ケースを比べると、投入境界付近のピーク濃度に差があるものの、流下方向濃度はほぼ同様の分布を示すことが見て取れる。
- [4] Mayer, A.S. and Miller, C.T., The influence of mass transfer characteristics and porous media heterogeneity on nonaqueous phase dissolution, *Water Resources Research*, vol.32, No.6, 1551-1567, 1996.
- [5] Pinder, G.F. and Abriola, L.M., On the simulation of nonaqueous phase organic compounds in the subsurface, *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 9, pp. 109S-119S, 1986.
- [6] 佐々木孝, 佐藤邦明, 飽和多孔媒体中のフィンガリングによる DNAPL 鉛直輸送に関する基礎的研究, *水工学論文集*, 第 48 巻, pp.313-318, 2004.
- [7] 佐々木孝, 佐藤邦明, 帯水層における空隙内拘束を考慮した DNAPL 移流分散解析手法の現地適用性の検討, *日本地下水学会, 2003 年秋季講演会予稿集*, pp.162-167, 2003.
- [8] 佐々木孝, 佐藤邦明, 和田明, 帯水層中 DNAPL 残存量の算定モデルと現地適用, *日本地下水学会, 2004 年春季講演会予稿集*, pp.74-79, 2004.