

飽和帯水層中の環境汚染物質の移流拡散解析

KUSABUKA, Morito / TAKEUCHI, Norio / 草深, 守人 / 竹内,
則雄 / 秋元, 護 / AKIMOTO, Mamoru

(出版者 / Publisher)

法政大学計算科学研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学計算科学研究センター研究報告 / Bulletin of Computational Science
Research Center, Hosei University

(巻 / Volume)

13

(開始ページ / Start Page)

175

(終了ページ / End Page)

181

(発行年 / Year)

2000-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00024892>

飽和帯水層中の環境汚染物質の移流拡散解析

秋元 護

法政大学大学院工学研究科建設工学専攻修士課程

草深 守人

法政大学計算科学研究センター

竹内 則雄

法政大学工学部土木工学科

近年、有機塩素系化合物による地下水と土壤汚染が深刻化している。汚染の進行状況を知るためには、現場での実測が望ましいが、現実ではその方法は地域に与える影響が大きく困難である。本研究では現実に近いモデルを設定し、浸透流および移流拡散解析プログラムを用い帯水層の汚染の進行と浄化について数値解析を行った。また本研究での解析手法と解析プログラムの妥当性を確認するため、飽和地盤中における汚染物質の移流拡散現象とその浄化に関する模型実験を実施した。

1. はじめに

地下水は多くの国々で主要な水資源の1つになっており、このような水資源を将来にわたって子孫に受け継いでいくためには、注意深く管理され、保護していく必要がある。水資源の開発が進むにつれて、また帯水層に対する人間の影響が増々大きくなるにつれて地下水汚染の事例も数多く表面化しており、地下水管理の必要性が重要となってきた。様々な利害の衝突を軽減し、取り返しのつかないような環境破壊を避けるためには、人間の影響に対する帯水層の応答が予測できなければならないが、広域規模の現象では解析用の数学的手段が必要となる。

本研究の目的は、地下水の汚染過程と社会問題に関する調査、地下水によって輸送される物質の移流拡散問題に関する支配方程式の整理と有限要素離散化、飽和帯水層内部の地下水汚染現象を解析するための有限要素プログラムの整備、汚染された帯水層の浄化に着目した数値シミュレーションとその考察、帯水層の汚染過程と洗浄過程を表現できる模型実験装置の設計・製作、模型実験結果と数値シミュレーション結果の比較・考察、である。

2. 地下水汚染と社会問題

地下水の環境は大気や表流水の環境とは異なり、汚染物質が蓄積しやすく、数十年も前の行為により汚染されていることも珍しくない。また目に見えない所で汚染物質が蓄積・拡散するため、汚染の発見は大気汚染や水質汚染と比較しても困難である。

(1) 地下水汚染の原因物質

近年、科学技術の急速な発達に伴い、過去に存在しなかった汚染物質が出現し始め、特に問題となっているのはトリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物であり、これらの物質は次の特徴¹⁾を持つ。

- ・ 爆発の危険性がない、高性能な溶剤として、全国的に多くの分野で大量に使われてきた。
- ・ 永らく安全な物質と考えられていたため、使用法や使用後の処理方法などに関する総合的管理が行われていなかった。
- ・ 比重が水より大きく粘性が低いという特徴から地下に浸透・拡散して大深度かつ広域の地下水を汚染する。
- ・ 人口の密集する市街地に汚染している場合が数多く見られる。
- ・ 発癌性をもつうえ、地中で変化してさらに発癌性の高い物質に化学変化することがある。

(2) 地下水汚染における特性

土壤汚染を引き起こした有機塩素系化合物は地中において次のような特性¹⁾を示す。

- ・ 土壌の間隙や土壌自体に吸着されやすく、一時的に蓄積される。
- ・ 土壌の吸着容量を超えたり、雨水で洗い流されると、一気に地中に向けて浸透していく。
- ・ 浸透は透水層を通じ、不透水層でいったん留まり、ここに伏流している地下水脈を汚染させる。

(3) 地下水汚染の浄化対策

地下水汚染の実態解明や対策技術において、日本はヨーロッパ・アメリカなどの先進国に比べて大きく立ち遅れている状況にある。それに加え、揮発性有機塩素化合物汚染の浄化対策は歴史が浅く、現在でも新しい浄化対策が開発されている段階である。

浄化対策には高い費用と長い年月が必要とされ、各段階において慎重に対策を行っていかなければならない。図1に現在行われている地下水汚染の診断から浄化までのフローチャートを示す。

広域化・複雑化している現在の地下水汚染の現状から図1の流れに従った対策を可能な限り多くの地点でしかも短いインターバルで繰り返すことにより最も優れた効果が得られると考えられる。

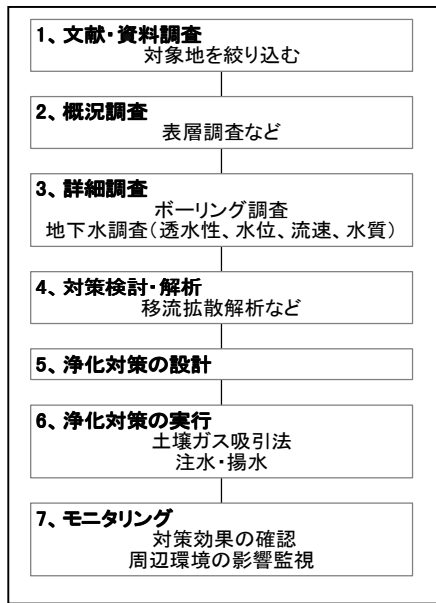


図1 地下水汚染対策の流れ

3. 数値解析手法

本文に示す計算例は、浸透流の支配方程式と帯水層中の物質輸送方程式として知られている式(1)と式(2)をガラキン法により有限要素離散化したものに従っている。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + b = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{u}{R} \cdot \nabla c - \nabla \cdot \left(\frac{D}{R} \nabla c \right) - \frac{q_w}{n_e H R} (c_s - n_e c) + \lambda c - \frac{S_s}{n_e H R} + \frac{c S}{m} \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

ここで、 k_{ij} は透水係数テンソル、 h は水頭、 b はコントロールボリューム内部での単位体積あたりの湧き出し量、 S は貯留係数、 t は時間、 c は地下水に溶解している物質の濃度、 $\vec{u}$ は流速ベクトル、 R は土粒子への溶質の吸着に関する線形等温式を仮定した場合の遅れ係数、 $\vec{D}$ は水中における着目物質の分子拡散係数と間隙内を流れる水の微視的变化による混合を表す分散テンソルの和、 λ は反応によって溶質が土粒子骨格構造に吸着された一次反応項を考慮した場合の減衰係数、 q_w は帯水層境界面から流入する間隙水の流量、 n_e は有効間隙率、 H は帯水層の厚さ、 c_s は帯水層の境界面から流入する水の溶質濃度、 S_s は帯水層平面内で単位面積あたりに湧き出す溶質の質量、 ∇ は微分演算子である。

4. 数値計算シミュレーションの手順と目的

(1) 地下水汚染モデル²⁾

シミュレーションとはあるシステム（地下水盆等）の動態を調べるにあたって、そのシステムそのものを対象にせず、そのシステムを模擬することのできるモデルを設定して、そのモデルで実験を行う手法である。対象となるシステムが巨大であったり、長時間にわたる現象であって直接に実験することが困難な場合にこの手法を用いることが多い。

地下水汚染は、その地域に与える影響が大きいだけに、現地で直接に実験することが難しく、この手法を導入する意義がある。シミュレーション手法は、汚染物質の振る舞いを予測したり、さまざまな対策を行った場合に、どのような効果が得られるかを具体的に検討する上で有効な働きをする。

(2) 数値シミュレーションの運用手順²⁾

システムの分解

まず、帯水層系における地下水汚染現象を個々の要素に分解する。どの程度細かく分解するかは、シミュレーションの目的、データの精度などによって決まる。この要素の抽出は、まず、水文地質構造の解析などの定性的な検討を行ったうえで、帯水層の透水係数の決定など定量的な検定を行っていく必要がある。地下水汚染現象を構成する要素は次の14個に分けられる。

- ・ 帯水層系の水文地質構造と境界条件
- ・ 帯水層系の小領域区分と形状
- ・ 帯水層単元の区分と層厚
- ・ 帯水層の透水係数または透水量係数
- ・ 帯水層の貯留係数または比貯留量
- ・ 帯水層の分散係数または分散度
- ・ 帯水層の間隙率
- ・ 帯水層の初期水頭
- ・ 汚染物質濃度の変化
- ・ 帯水層の初期汚染物質濃度
- ・ 水頭の変化
- ・ 地下水揚水量
- ・ 地下水涵養量
- ・ 汚染物質負荷量

これらの要素のうち、地下水揚水量、地下水涵養量と汚染物質負荷量はモデル外部からのほたらきかけを示す外生変数であり、水頭と汚染物質濃度変化はモデルからの応答で、その他はモデル内部の制約で決まる内生変数である。

システムのモデル化

次に、各要素がどのように帯水層系システムを構成しているか、その数量的な関係をモデル化し数値データ化する。モデル化の程度は、簡単なものから複雑なものまでいくつも考えられる。これは解析の目的やデータの精度によって決められる。

モデルの内挿検定

このモデルに初期条件と境界条件を与え、次に既知データ（地下水揚水量など）を入力して試算を行い、シス

テムの動態（地下水頭・汚染物質濃度など）がよく再現されているかを検討する．計算値が観測値と一致するように比較的に不確定なパラメータ（透水量係数・分散係数など）を補正していく．

将来予測

前項で確認されたモデルに、各種の対策案を入力してモデルの応答（地下水頭・汚染物質濃度）を観察する．

比較検討

将来予測を比較検討し、最終目標と照合して最も好ましいものを採用する．

（３）数値シミュレーションの効用²⁾

シミュレーションは、前述のように、あるシステムの動態を調べる場合に、そのシステム自体を対象とせず、その基本的な構成要素(パラメータ)だけを取りだしてシステムを模擬的に再現したモデルを用いて、システムの動きを観察し、今後の対策を検討するための模擬実験である．地下水汚染問題のように、その地域に与える社会的影響が大きいため現地で直接に実験することの難しい現象については、モデル上で様々な対策の効果を具体的に検討できるため有効な働きをする．

しかしシミュレーション結果から実際取るべき対策を決定する場合には、問題の持つ社会的影響が大きいほど、シミュレーションの特性と限界を充分に考慮する必要がある．したがってシステムのモデル化にあたっては、選んだ構成要素がシステムの動態をどの程度再現しているのか、その精度について慎重に検討しなければならない．

そのためにはシステムの定性的な判断と定量的な判断の相互性、モデルの適合性の検討などが重要となってくる．このような検討が、たとえ充分に行われたとしても、すべての現象が数値化され、モデル化されるわけではない．対象となる事象についての認識の度合いに応じて抽象化、モデル化の精度が高まることも事実であるがこれでもなお完全に数量化できない要素もある．

5. 数値解析結果とその考察

（１）揚水による汚染物質の拡散制御

ここでは揚水井の配置の有無が下流部の汚染物質の濃度にどのような影響を及ぼすか検討した．図 2 はその一例であり、扇状地上流部(x=0m 点)に定常的に 100g/m³の汚染物質を投入した場合、揚水なしの場合と a 点で 0.5m³/s 揚水した場合の 2 ケースを想定して No.1 地点の濃度の時間変動をシミュレーションした．

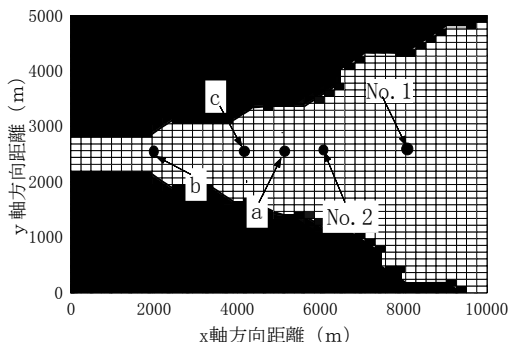


図 2 扇状地による井戸配置と観測点

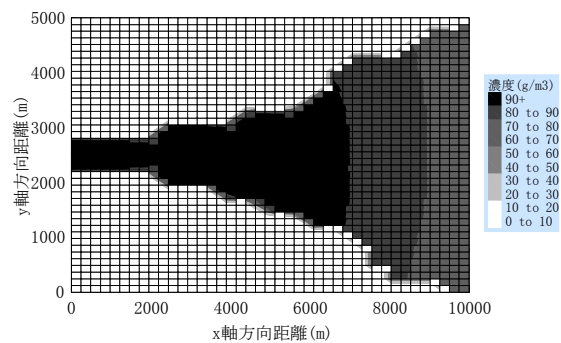


図 3 揚水なしの濃度分布図(3年後)

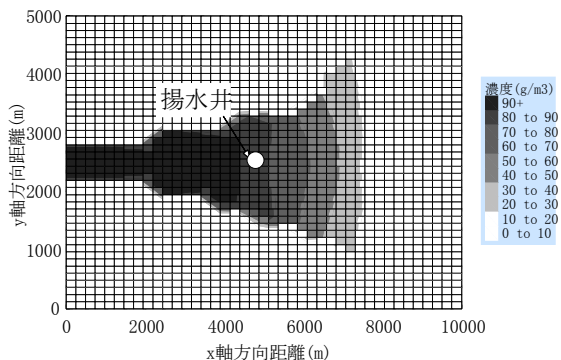


図 4 揚水ありの濃度分布図(3年後)

図 3、4 に濃度分布図の計算結果を示す．明らかに揚水井を設けることによって、下流部への汚染物質の拡散を軽減できることが分かる．図 5 は、図 3、4 の両ケースについて No.1 地点での濃度の経時変化を示したものであり揚水により下流部の濃度を数分の 1 程度に軽減できることがわかる．

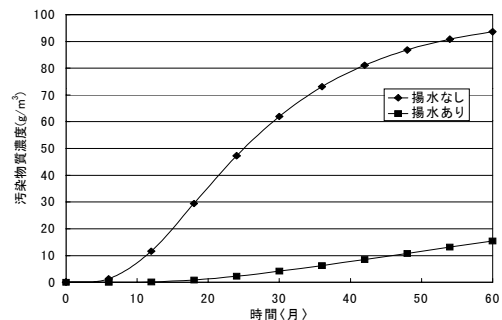


図 5 No.1 節点での経時濃度変化

次に図 6 は、図 2 のモデルにおいて b 点で 0.5m³/s、c 点で 1m³/s 揚水した 2 ケースを想定した場合の No.2 地点におけるの濃度の時間変動を示したものである．揚水量が異なるにも関わらず b 点から揚水した場合と c 点から揚水した場合の濃度に大きな変化が見られない．このことから現実問題として一般的な扇状地での汚染対策を考える場合は、可能な限り汚染源に近い上流部に揚水井を設置することが望ましいと考えられる．

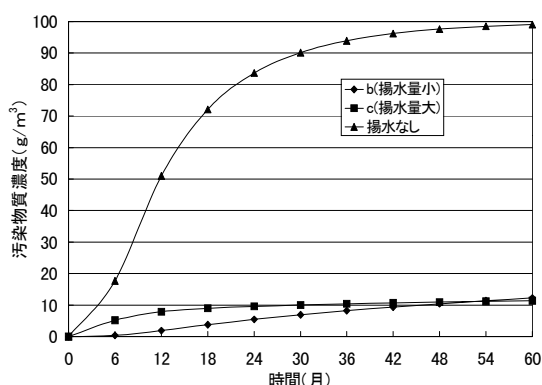


図 6 No.2 節点での経時濃度変化

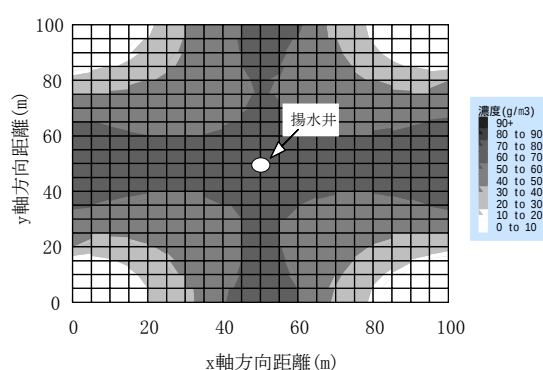


図 9 遅れ係数 1.5 の濃度分布(30 日後)

(2) 水の循環による汚染土壌の洗浄

ここでは、図 7 のような汚染された帯水層の一部の周囲をコンクリート等の遮水壁で囲い、この状態を基準に 4 隅に注水井を設け清水を注入し、モデル中央部から注水量と同量の水を揚水することにより汚染場を浄化する問題を想定した。

図 8～11 は土粒子への汚染物質の吸着に着目して数値解析を行った結果である。図 8 は吸着による遅れ係数を 1.0、図 9 は 1.5、図 10 は 2.0 と考えたときの 30 日後の濃度分布を示したものである。

解析結果によると吸着による遅れ係数は浄化の進行速度に大きく影響することが分かり、数値計算において重要なパラメータの 1 つであることを示している。

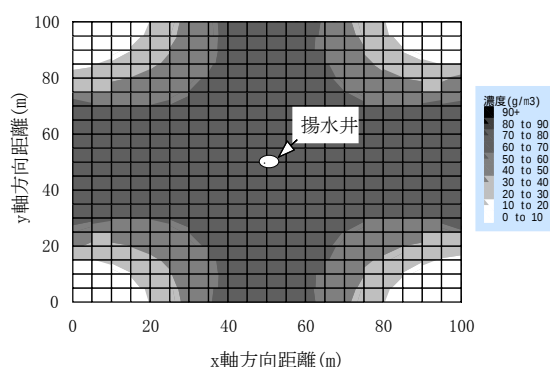


図 10 遅れ係数 2.0 の濃度分布(30 日後)

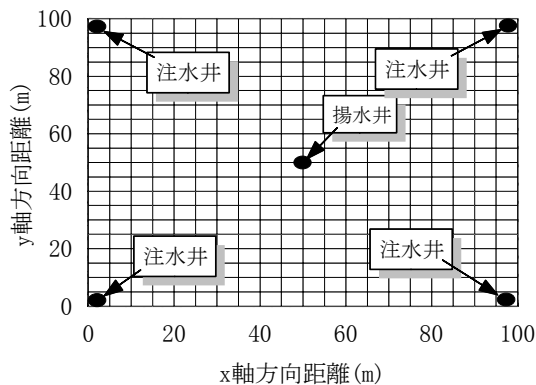


図 7 汚染場における浄化方法

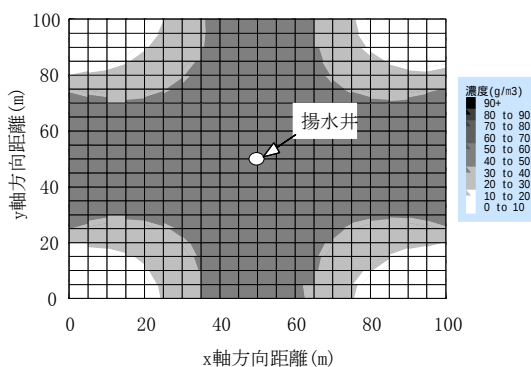


図 8 遅れ係数 1.0 の濃度分布(30 日後)

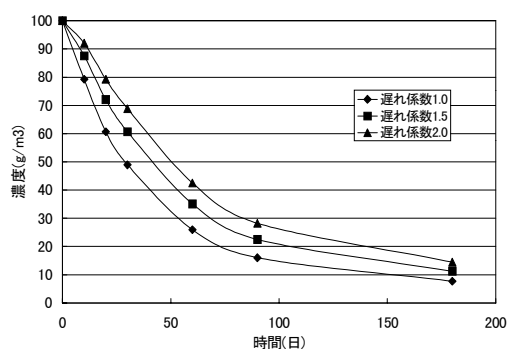


図 11 遅れ係数による経時濃度変化(揚水井節点)

(3) トリクロロエチレンによる汚染場の浄化

現在、トリクロロエチレン等の有機塩素系化合物による地下水・土壌汚染が深刻化していることから本研究では実際にそのような物質の環境基準を考え、汚染場の浄化に着目したシミュレーションを行った。

図 12 に示す領域内に汚染源から環境基準の 1000 倍のトリクロロエチレンが注入されていた場合を想定して、前章と同様な浄化シミュレーションを実施した。図 13 は 30 日後の濃度分布であり、最も汚染された地点でも浄化開始前の 1/10 程度まで濃度が低下しており、注水、揚水による浄化の効果を確認できた。

しかし初期条件としてかなりの高濃度の汚染が進んでいることを前提にしたこともあるが、注水・揚水のみで対策を行ったとき、100×100m のモデルでさえ、トリク

口口エチレンが環境基準（0.03mg/l）まで希釈されるのに 10 年弱の期間が必要であるという結果になった（図 14～16）。

揚水量を増やしたり、井戸配置を変えることによって多少なりとも浄化の時間が短縮される可能性も考えられるが、現実的にはこの方法のみでの対策では効率が悪く実用的でないと思われる。

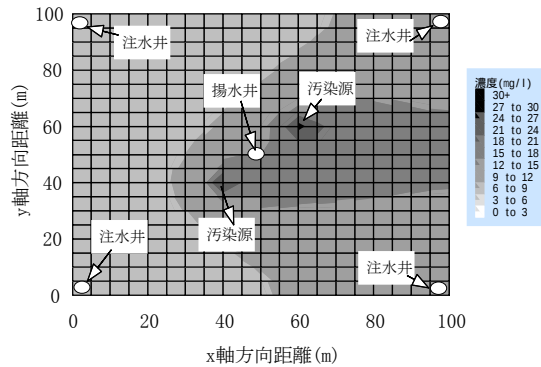


図 12 トリクロロエチレンによる汚染場

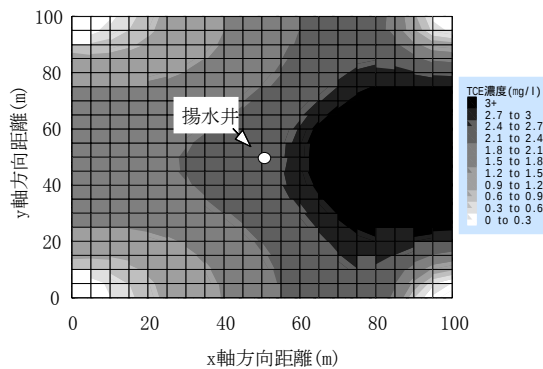


図 13 30 日後の濃度分布

（４）飽和帯水層での模型実験

これまでの、仮想のモデルを用いた数値計算について検討してきたが、ここでは飽和帯水層の模型実験について述べる。図 17 に示す実験装置を用い、定常状態になるまで水を流し、その後汚染物質と仮定したフローエッセン(着色料)を連続注入し汚染状況を観察した。逆に浄化状況を観察するために土槽全体が着色した後、清水を注入する実験も行った。

汚染過程では注水口から同心円状に汚染が拡大した後、しばらくして地表面上部の自由水を伝って水槽の下流からも汚染が拡大していった。この拡大は下流側の汚染が排水口に達した時点で止まり、続いて注水口側の汚染が徐々に下方に拡大し、およそ 20 時間で砂層全体がほぼ完全に汚染された。洗浄過程でも同様な現象が見られおよそ 30 時間で洗浄が完了した。

図 18～図 21 は実験結果と解析結果を比較したものである。発色した地点での汚染物質濃度の測定を行わなかったため、単純な比較はできないが、汚染や浄化の広がり具合からさほど大きな差はないと思われる。

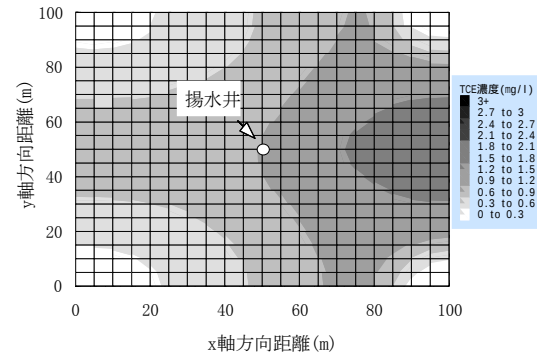


図 14 90 日後の濃度分布

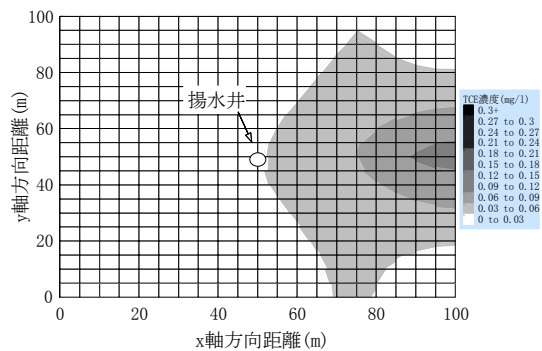


図 15 2920 日後の濃度分布

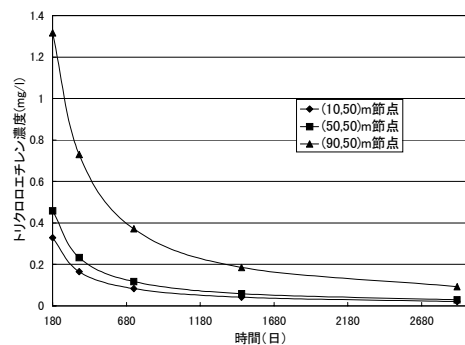


図 16 トリクロロエチレンの経時濃度変化

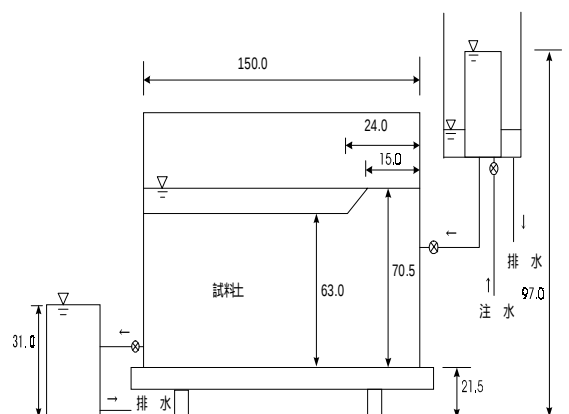


図 17 実験装置図(単位 cm)

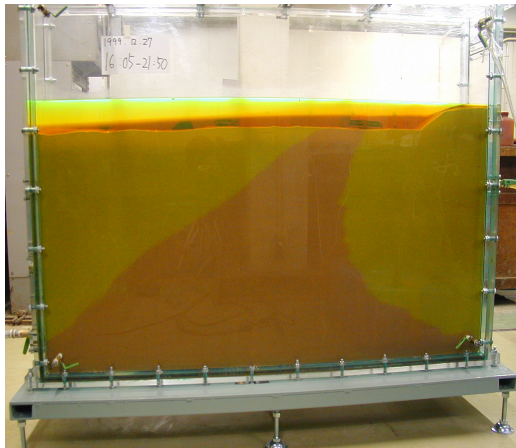


図 18 実験結果 (汚染開始 6 時間後)

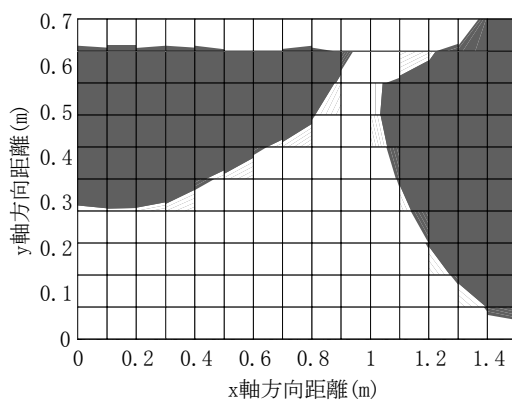


図 19 解析結果 (汚染開始 6 時間後)

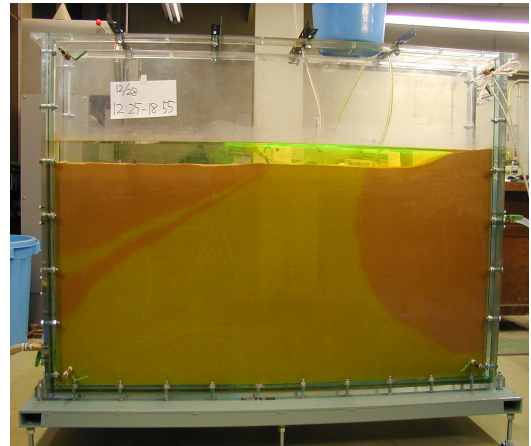


図 20 実験結果 (浄化開始 6 時間後)

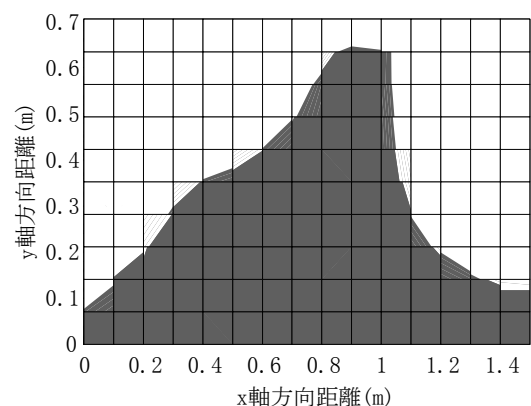


図 21 解析結果 (浄化開始 6 時間後)

6. 結論

浸透流および物質の移流拡散解析プログラムを用いて、扇状地における汚染の進行、水の循環を利用した汚染土壌の浄化、模型実験と同条件での数値解析、と3つの解析を行い、それぞれの解析結果について考察を行った。

その結果、揚水井戸を用いた汚染の拡大防止策や洗浄水の注水と揚水による汚染土壌の浄化対策は、解析値での評価のみではあるが、地下水環境の保全に有効な技術の一手段となりうる可能性も示すことができた。また、数値解析と模型実験との比較では、定量的な評価はできなかったものの、現象観察の範囲では、解析によって実現象をほぼ表現できるようであることを示した。しかし、実際規模の汚染問題を想定した計算結果から、汚染規模が小規模であっても浄化に多くの時間を要するようであり、本文で取り上げた洗浄対策のみで問題を解決できると思われない。したがって実際問題では、いくつかの異なる工法を組合せ利用することにより、それぞれの工法の欠点を互いに補間することを考えざるを得ない。

今後の課題としては、今回実施した模型実験を定量的に考察できるようにするため、少なくとも拡散した汚染物質の濃度の測定を検討すべきと考える。

数値解析では、本文で考察したパラメータを含め、それ以外のパラメータにも着目した解析を実施していくことが必要であると考え。

参考文献

- 1) 地層汚染診断・修復簡易化研究会：土壌地下水汚染の問題 1999
- 2) 地下水問題研究会・編：地下水汚染論、共立出版 1994.
- 3) R.H.Gallaghe, G.Carey, J.T.Oden, O.C.Zienkiewich : Finite Elements in Fluid -Volume 6, WILEY 1985
- 4) 環境庁国立環境研究所：トリクロロエチレン等の地下水汚染の防止に関する研究 1994
- 5) J.Kazda: Finite Element Techniques in Groundwater Flow Study Elsevier 1985
- 6) 平田建正：土壌地下水汚染と対策 丸善 1996
- 7) 住友海上リスク総合研究所：土壌・地下水汚染と企業リスク 化学工業日報社 1997

キーワード.

地下水汚染、有限要素法、帯水層浄化、移流拡散

Summary.

**Numerical Analysis of Environmental Pollutant
Transport Problem in Confined Aquifer**

Mamoru Akimoto

Civil Engineering Major , Division of Engineering , Hosei University

Morito Kusabuka

Computational Science Research Center, Hosei University

Norio Takeuchi

Department of Civil Engineering, Hosei University

In recent years, ground water and the soil pollution by organic chlorine system compound are serious. To know the progress situation of the pollution, the measurement in the scene is desirable, but actually it is difficult. In this study, it set an near model actually, and it did a numerical analysis about the progress and the purge of the pollution of the aquifer using a seepage flow and an advection diffusion program. Also, to confirm the validity of the analysis technique in this study, it implemented a model experiment about the contamination quality advection diffusion phenomenon and the purge of it in the saturated ground.

Keywords.

Groundwater pollution, Finite Element Method, Aquifer decontamination, advection and diffusion