

8.4 土壌・地下水汚染の管理・制御技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 18～平 22

担当チーム：材料地盤研究グループ（土質・振動）

研究担当者：佐々木哲也、森啓年、稲垣由紀子、山木正彦

【要旨】

本研究は公共事業において土壌・地下水汚染に遭遇した際、それらを管理・制御し、適切に建設工事を進める手法の確立を目指すものである。平成 21 年度は、対象現場毎の有害物質の移行特性等を考慮した「サイト概念モデル」を構築し、土壌・地下水汚染による有害物質が周辺環境に及ぼす影響を評価する影響検討手法の検討を行った。また、水流がある地盤条件下でのバイオレメディエーションにおける栄養塩の拡散状況に関する実験を実施し、土質によってその拡散状況が異なることを確認した。

キーワード：土壌・地下水汚染、サイト概念モデル、移流分散解析、バイオレメディエーション、小型土槽実験

1. はじめに

1.1 背景

平成 3 年 8 月の土壌環境基準の設定、平成 15 年 2 月の土壌汚染対策法（以下、「土対法」）の施行を経て、平成 22 年 4 月には改正土対法が施行された。また、東京都や大阪府、千葉県などの地方自治体においても、土壌汚染に関する条例が数多く制定されてきている。

土壌環境基準および法令の歩みに歩調を合わせるかのように、平成 3 年にはわずか 40 件だった土壌汚染の調査は、土対法施行直後の平成 15 年度にはおよそ 20 倍の 762 件、平成 20 年度にはさらにその倍の 1,365 件が実施され、世の中の土壌汚染に対する関心の高まりが伺える。実際に、これらの土壌汚染の調査が実施されたもののうち、平成 20 年度は約半数の 697 件で基準を超過する土壌汚染が顕在化している¹⁾。

特に建設工事における土壌・地下水汚染はその掘削面積が大きく、対応が必要となる汚染土壌の量が多い。この大量の汚染土壌を処分場へ搬出処分することについては処分場の逼迫により困難であり、浄化処理に関してもコストや処理能力の制約から全ての汚染土壌へ適用することは困難である。そこで、建設工事において現場毎に想定される土壌・地下水汚染の影響を把握し、必要に応じて封じ込め等の汚染拡散防止措置を実施するとともに、モニタリングにより周辺への影響が顕在化していないことを確認する影響検討手法や、原位置での効率的な浄化処理技術が必要となっている。

1.2 目的

本研究は公共事業において土壌・地下水汚染に遭遇し

た際、それらを管理・制御し、適切に建設工事を進める手法の確立を目指し、原位置汚染土壌浄化技術の一つであるバイオレメディエーション時の効率的な栄養塩供給方法の検討および有害物質が周辺環境に及ぼす影響を適切に評価する影響検討手法の検討を行うものである。

平成 20 年度には小型土槽を使用し、バイオレメディエーション時の栄養塩拡散状況を把握するための実験を行った。その結果、栄養塩は土質、注入方法などによって拡散状況が異なることが定性的に示された。

平成 21 年度は、自然的原因により存在する重金属等が周辺環境に及ぼす影響を検討する際の「サイト概念モデル」に基づく影響検討手法の検討を行い、「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル（暫定版）」に反映させた。本報では、その「サイト概念モデル」に基づく影響検討とそれに用いる影響予測ソフトウェアの一つである「1DTRANSU」に関して、対応の流れとともに説明する。併せて、昨年度に引き続き、バイオレメディエーションによる対策の実施を円滑に進めるため、水流がある地盤条件下における栄養塩の拡散状況を把握する目的で行った小型土槽実験結果を報告する。

2. サイト概念モデルに基づく影響検討

2.1 土壌汚染対応の流れ

建設工事において土壌汚染に遭遇した場合の対応としては、一般的に図 1 のような対応をとる。本研究の対象とした影響検討は「サイト概念モデルの構築」と「影響評価の実施」により構成される。以下に、それぞれの過程における詳細について記す。

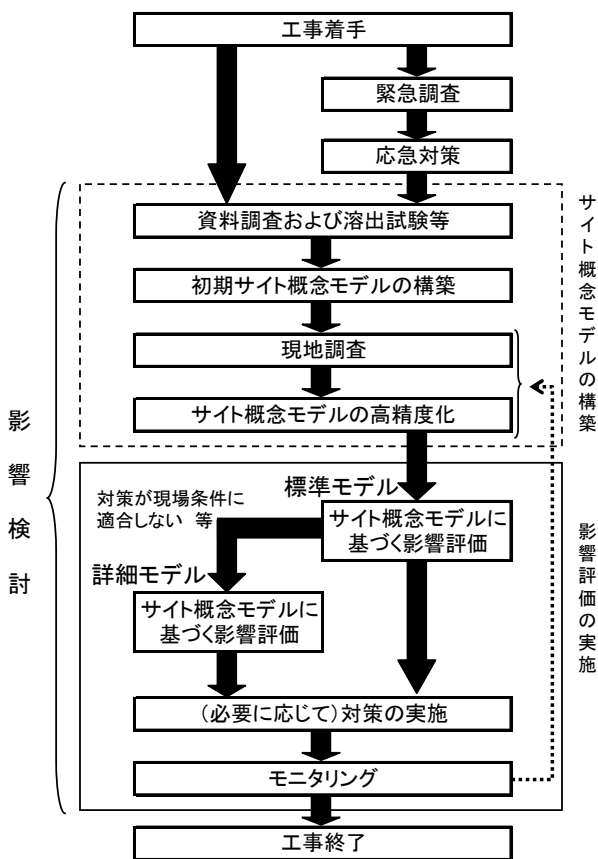


図1 土壌汚染への対応フロー

2.2 サイト概念モデルの構築

2.2.1 サイト概念モデルとは

サイト概念モデルとは、建設工事において現場毎に想定される土壌・地下水汚染の影響を明確にし、対応方針、現地調査計画の立案、影響評価の実施、対策の選定・設計を、効果的かつ効率的に実施するために構築するモデルである。具体的には土壌・地下水汚染の発生源から敷地境界や保全対象までの距離・摂取経路（周辺状況）、周辺地盤における有害物質の吸着特性・地下水の流れ（周辺地盤）などの現場毎の特性を考慮し、構築する。

サイト概念モデルには、対応方針、現地調査計画の立案に活用される「初期サイト概念モデル（図2）」と、影響評価の実施、対策の選定・設計に活用される「サイト概念モデル（図3）」の二種類がある。初期サイト概念モデルは既存の資料調査などによる対象地域の地形・地質、水理特性・水質、土地利用履歴や発生源の有害物質の含有量・溶出試験結果等の情報をもとに、周辺環境への影響を想定し、現地調査計画の立案に活用される。サイト概念モデルは、さらに現地調査などによる発生源および摂取経路における有害物質の土壌への吸着特性、表流水や地下水の詳細な情報を加え、想定される周辺環境への

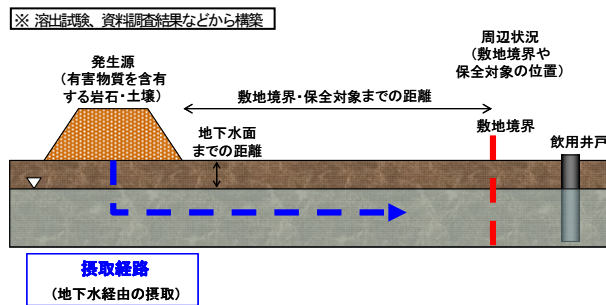


図2 初期サイト概念モデルの例

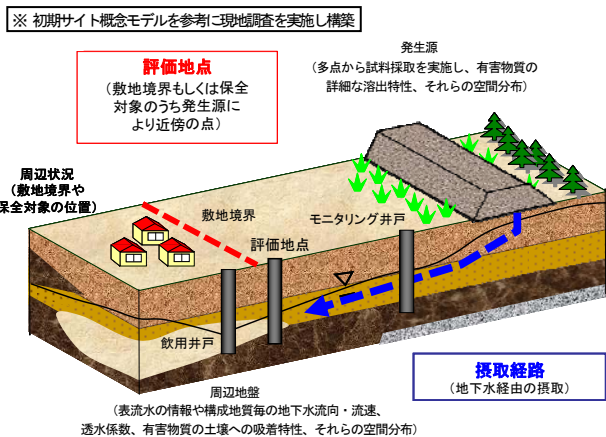


図3 サイト概念モデルの例

影響を明確にし、影響評価の実施、対策の選定・設計に活用される。

2.2.2 初期サイト概念モデルの構築

初期サイト概念モデルは具体的に以下の手順で構築する。

①発生源調査（概略）

発生源における有害物質の含有量あるいは溶出量を溶出試験等から把握する。

②周辺状況調査

発生源調査（概略）の結果、土壌溶出量基準・土壌含有量基準を超過する場合に周辺状況の調査を実施する。周辺状況調査にあたっては、摂取経路を推定するため、敷地境界、飲用井戸など保全対象の位置、地下水までの距離、一般人の立ち入り可能性などを資料調査などにより把握する。

③初期サイト概念モデルの構築

発生源調査（概略）、周辺状況調査の結果をもとに、図2に示すように発生源の有害物質の含有量・溶出量、摂取経路、保全対象の位置・距離等を考慮した初期サイト概念モデルを構築する。

④対応方針および現地調査計画の立案

構築した初期サイト概念モデルを参考に、対応方針を

検討し、必要となる調査範囲の絞り込み等を行い、発生源調査（詳細）と周辺地盤調査からなる現地調査の計画を立案する。

2.2.3 サイト概念モデルの構築

サイト概念モデルは初期サイト概念モデルを高精度化したもので、具体的に以下の手順で構築する。

①発生源調査（詳細）

初期サイト概念モデルの構築の段階における発生源調査（概略）と同様に有害物質の含有量、溶出量を溶出試験等により把握する。ただし有害物質の移行特性を含め、より多くの地点から採取した試料での溶出試験等の結果を反映し、より詳細な発生源の特性および空間分布を把握する。

②周辺地盤調査

周辺地盤における地下水流速、流向等の地下水流況、および周辺土壌の物理特性と有害物質の吸着特性等は、有害物質の移流・分散を支配するため、それらの空間分布を含めて把握する。

③判定基準設定

地下水の摂取経路については、敷地境界もしくは保全対象のうち発生源により近傍の位置を評価地点とし、環境基準値に基づき地下水の有害物質濃度の判定基準を設定する。また、地下水の流況や帯水層の状況などから、必要に応じてモニタリング井戸を設け評価地点の補完を行う。なお直接摂取については、発生源調査（詳細）の結果から、土壌含有量基準に基づき判定基準を設定する。

④サイト概念モデルの構築

現地調査における発生源調査（詳細）、周辺地盤調査の結果をもとに、図3に示すように有害物質の含有量・溶出量、周辺土壌の物理特性と吸着特性、および地下水の流況とそれらの空間分布、実施する対策を考慮し、初期サイト概念モデルを高精度化したサイト概念モデルを構築する。このサイト概念モデルに基づき影響評価を実施する。

2.3 影響評価の実施

2.3.1 影響評価とは

構築したサイト概念モデルを用いて、有害物質が敷地境界や保全対象近傍に達する場合の地下水の有害物質濃度を移流分散解析等により求め、判定基準と比較することで、定量的な影響評価を実施する。この際、評価期間は100年間を目安とする²⁾。なお、この定量的な影響評価の実施は、リスクコミュニケーションの際に使用するツールとしても期待される。

影響評価には比較的簡易なサイト概念モデルを活用し

一次元解析等を実施する「標準モデル（レベル1）による影響評価」と、詳細なサイト概念モデルを活用し多次元解析等を実施する「詳細モデル（レベル2）による影響評価」がある。これらの影響評価に基づき対策の設計を行う。

2.3.2 標準モデル（レベル1）による影響評価

標準モデル（レベル1）による影響評価は、現地調査によって取得した現地のパラメータを利用し、一次元の移流分散解析等を実施する。解析を実施する測線の選定にあたっては現場毎の地下水流況、保全対象位置、想定される影響等を考慮することが必要となる。

本研究では、西垣らが提案した手法³⁾に基づき、かつ現場で事務所職員が使うことを前提とした簡易な影響予測ソフトウェア1DTRANSUの整備を行った。移流分散解析は、理論解自体はエクセルのような表計算シートを使って計算することができるが、地下水の実流速、遅延係数、分散係数など、幅広い専門分野の知識が必要なパラメータを設定する必要がある。式(1)にその一次元移流分散方程式を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - kC \quad (1)$$

C : 地下水への溶出濃度 [mg/L]、 D : 拡散係数 [cm²/秒]、 k : 一次減衰係数 [1/秒]、 v : 間隙内地下水平均流速 [cm/秒]、 x : 発生源からの距離 [cm]、 t : 時間 [秒]

1DTRANSUの整備にあたっては、有害物質移行のシナリオを単純化してイメージを分かり易くすること、計算量を少なくして計算時間を短くすること、データ入力の手間や少ない調査で概略の計算ができることを主眼とした。

有害物質は一次元の移流分散方程式に従い、地表からの降雨浸透に伴い地下水面まで不飽和帯を鉛直下降し、地下水に達した後は帯水層を水平方向に移動する、といった仮定を設定している。

また、発生源の条件設定に関しては、常に発生源から濃度一定で溶出するという安全側の設定が基本となる。

1DTRANSUの計算手順を図4に示す。ここで、入力するデータは①汚染物質の種類、②汚染土総量、③汚染土範囲の面積、④発生源からの溶出量、⑤帯水層のパラメータ（透水係数、間隙率、乾燥密度、分配係数、遅延係数）、⑥発生源から敷地境界までの距離、⑦発生源の地下水位、⑧敷地境界の地下水位、⑨年間降水量、⑩降雨浸透率、⑪地表から地下水面までの距離、となる。また計算時に遅延係数による影響を考慮する、しないも選択可能である。なお、⑤の値が調査結果として得られていない場合は、帯水層の種類（砂、シルト等）を入力することで参考値が自動的に

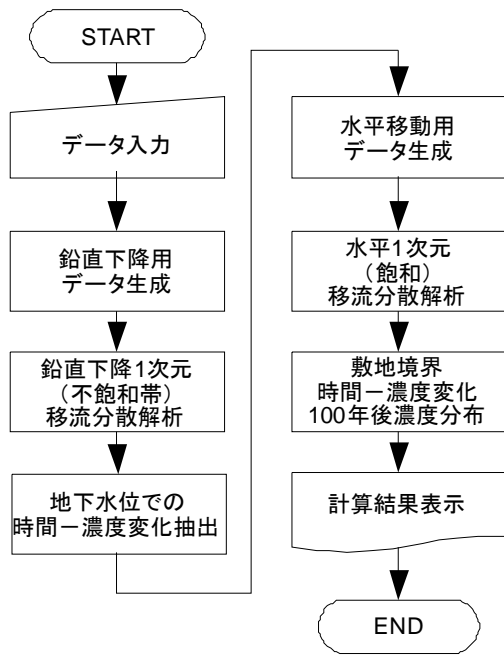


図4 計算手順

設定され、概略の計算ができるようになっている。表1、表2にその参考値を示す。

2.3.3 詳細モデル（レベル2）による影響評価

詳細モデル（レベル2）による影響評価は、標準モデル（レベル1）に基づいて設計した対策が現場条件に適合しない時などに、より詳細な現地調査によって取得した現地パラメータを使用し、多次元の移流分散解析等^{3),8)}（図5参照）を実施する。

2.4 留意事項

サイト概念モデルに基づく影響検討を実施する際は、モニタリングを併用し、その不確実性を担保することが必須となる。また、モニタリングの結果に応じて調査の追加やパラメータの再設定を含むサイト概念モデルの修正等を適宜行い、影響検討の不確実性を可能な限り排除する。その結果新たな対策の必要性が生じた場合は適切な対応を検討する。

2.5 今後の課題

今後、サイト概念モデルに基づく影響検討を活用していく上で、模型実験や現場の実際のモニタリングデータを基に影響予測の精度を高めていくことが重要である。

3. バイオレメディエーション時の栄養塩供給方法の検討

3.1 概要

汚染土壌の原位置浄化技術の一つにバイオレメディエーションがある。土壌中の微生物を活性化させるために

表1 帯水層関連参考値⁴⁾

帯水層種類	透水係数(cm/sec)	乾燥密度(g/cm ³)	間隙率(-)
礫	5×10 ⁻¹	1.6	0.3
砂	5×10 ⁻²	1.6	0.4
シルト質砂	5×10 ⁻³	1.6	0.4
関東ローム	5×10 ⁻³	0.74	0.5
シルト	5×10 ⁻⁴	1.3	0.5
粘土	5×10 ⁻⁵	1.6	0.5

表2 分配係数参考値(L / kg)^{5),6),7)}

帯水層種類 汚染物質	礫	砂	シルト質砂	関東ローム	シルト	粘土
カドミウム	180	180	180	180	180	180
クロム(VI)	8.4	8.4	8.4	8.4	3.4	3.4
セレン(VI)	1.47	1.47	4.1	4.1	4.1	4.1
鉛	347	347	347	6,462	581	581
砒素(V)	2	2	2	2	2	2
ふっ素	0	0	0	0	0	0
ほう素	0	0	0	0	0	0

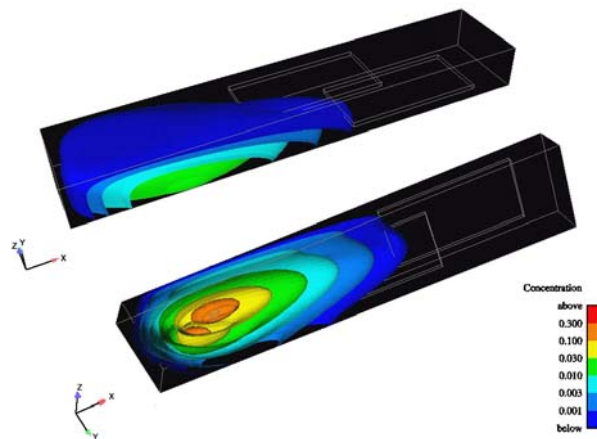


図5 Dtransu-3D · EL の計算例

使用する栄養塩の地盤中での拡散状況については未解明な部分が多く、より効率的な栄養塩の供給方法が望まれている。

平成20年度に小型土槽を用いて間隙水の流動がほとんどない条件下、飽和地盤に栄養塩を注入した際の拡散状況を調べている⁹⁾。引き続き平成21年度は、小型土槽を用いて地盤内に水頭差を与え、水流がある条件下で栄養塩の拡散状況を把握する実験を実施した。

3.2 実験方法

工業用珪砂5号、茨城県美浦町で採取された山砂（以下美浦砂と称する）を用い、水締めにより、図6に示すような模型地盤を作製した。用いた試料の各物性値等は表3の通りである。栄養塩の供給方法は、模型地盤に設けた注入孔（図中A）を遮水した上で注入孔内の水（約

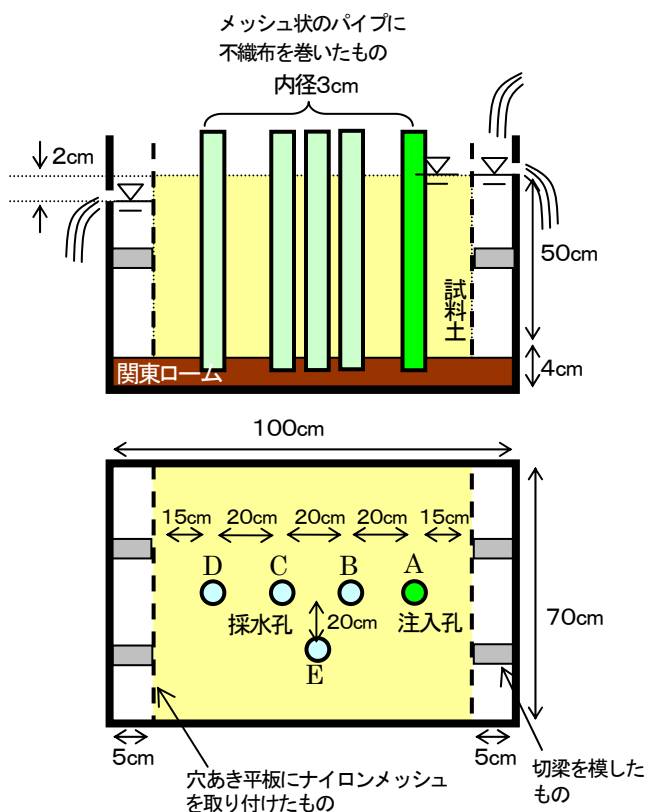


図6 地下水流を想定した模型地盤の模式図

350ml) を抜き取り、栄養塩濃度 10% の溶液 (約 350ml) で置換する方法とした。栄養塩注入後は、所定時間経過後に、模型地盤内に設けた 4 箇所 の採水孔および注入孔の計 5 箇所にて電気伝導率 (EC)、pH、酸化還元電位 (ORP) を各電極を挿入することで測定し、同時に全有機炭素 (TOC) 分析用検液を各孔より 20ml ずつ採水し分析に供した。なお計測深さ、採水深さは 25cm で統一している。

3.3 実験結果

表 4 は 5 種の栄養塩濃度に対して実施した各測定項目の値を整理したものである。これより各々栄養塩濃度に対して相関が見られるが、TOC が一番良い相関がある。ここで、TOC を栄養塩濃度の代表指標とする。

図 7 (a)、(b) は美浦砂と珪砂 5 号の模型地盤の各孔における経過時間と TOC の関係である。図より美浦砂の模型地盤では経過時間とともに注入孔の栄養塩濃度が低下していき、それに応じて注入孔に近い採水孔からピーク濃度が現れているのがわかる。

一方、珪砂 5 号の模型地盤では、1 日後には注入孔に栄養塩は残っておらず、採水孔 B、C、D でも時間が経過しても栄養塩はほぼ検出されないという結果となった。しかし水の流れる方向に対して法線方向にずれた位置に存在する採水孔 E で 3 日後に栄養塩が検出されている。これは単に注入孔からの距離によるものか、もしくは他に

表 3 使用試料の物性値等

試験項目	単位	試料名	
		珪砂5号	美浦砂
土粒子の密度	g/cm ³	2.651	2.705
均等係数	—	1.802	19.938
50%粒径	mm	0.506	0.138
液性限界	%	N.P.	N.P.
塑性限界	%	N.P.	N.P.
懸濁液のpH	—	6.56	6.95
懸濁液のEC(電気伝導率)	mS/m	1.77	10.5
TOC(全有機炭素)	%	0.003	0.016
懸濁液のORP(酸化還元電位)	mV	236	220
透水係数 [*]	m/s	3.9 × 10 ⁻⁴	6.9 × 10 ⁻⁶

^{*}模型地盤内の流量と水頭差より、ダルシー則に従い算出

表 4 栄養塩濃度と各測定値

栄養塩濃度	TOC	EC	pH	ORP
%	mg/L	mS/m	—	mV
10	37000	3980	7.26	137
1	3700	592	7.14	199
0.1	320	63.4	6.32	242
0.01	31	8.77	6.17	285
0.001	4	2.47	6.31	312

要因があるのかは更なる考察が必要である。

図 8 は注入孔からの栄養塩の広がりを視覚的に捉えるために、先の結果を基に濃度変化をコンタ図で示したものである。この図より、栄養塩が時間とともに薄まりながら水流方向に進んでいるが、美浦砂と珪砂 5 号では明らかにその速度が異なる様相が確認できる。両試料の透水係数の違いが影響している可能性が高いが、今後水みちの発生などその他の要因も含めて移流分散解析等により検証していく予定である。

3.4 まとめ

透水係数が異なる土質で栄養塩の拡散状況を実験的に調べた。今後は実験結果に関して詳細な考察を進めるとともに、これら実験結果をフィードバックさせた移流分散解析を実施し、移流分散解析を活用した効率的な栄養塩の供給方法を検討していく。

5. まとめと今後の課題

環境問題への関心が高まる昨今においては、有害物質の影響検討をする際には、科学的根拠に基づいた定量的な予測が重要と考える。そこで本研究ではサイト概念モデルに基づく影響検討手法を提示し、同時に、現場で事務所職員が利用可能な移流分散解析ソフト (IDTRANSU) の整備を行った。これらを活用していく上では、模型実験や現場の観測データをもとにパラメータの設定方法の

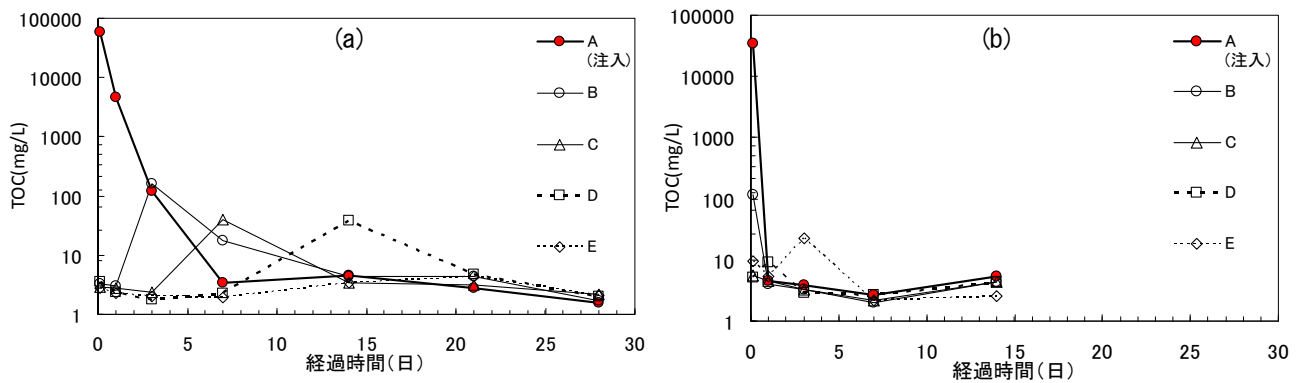


図7 各孔のTOCの経時変化 (a) 美浦砂、(b) 珪砂5号

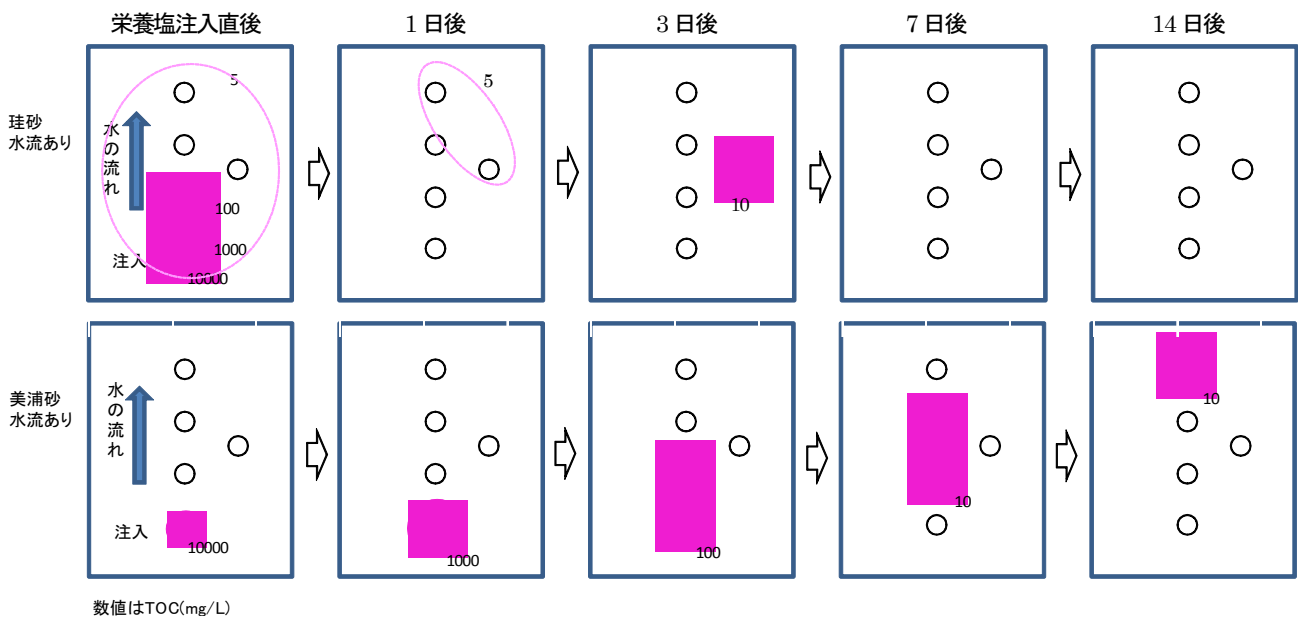


図8 模型地盤内での栄養塩拡散の様子 (TOC濃度で表示)

検討を行い、影響検討の精度を高めていくことが重要である。

また、水流がある条件での栄養塩拡散状況を把握するための小型土槽実験により、地盤の透水係数によりその拡散状況が異なることがわかった。今後はこれらの実験結果の検証および本結果をフィードバックさせた移流分散解析を実施し、移流分散解析を活用した効率的な栄養塩供給方法を検討していく。

上記の検討を進めるとともに、本研究で得られた成果は、今後の「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(暫定版)」の改訂の中で反映させる予定である。

参考文献

1) 環境省水・大気局環境局:平成20年度土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果, 環境省HP, 2010.3.
 2) 社団法人土壌環境センター:土壌汚染対策法に基づく調査及び

措置の技術的手法の解説, 2003.9

3) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎:飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.135-144, 1995.
 4) 独立行政法人土木研究所編:建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル[暫定版], 鹿島出版会, pp.123-128, 2004.
 5) K. J. Cantrell, R.J. Serne, G.V. Last:Hanford Contaminant Distribution Coefficient Database and Users Guide, U. S. Department of Energy under Contract, DE-AC06-76rL91830, pp.68-70, 2003.
 6) 化学物質安全性(ハザード)評価シート(フッ化水素), 財団法人化学物質評価研究機構, pp.1-13, 2001.
 7) 西尾高好:土壌中における重金属の挙動, 産業公害, Vol.26, No.4, pp.289-295, 1990.
 8) 川辺能成, 駒井武:「リスク評価モデルによる土壌中重金属の評価」、資源・素材2009(札幌)C3-14, pp.191-194, 2009.9
 9) 稲垣由紀子, 森啓年, 杉田秀樹:注入による地盤中の栄養塩拡

散に関する実験, 第 64 回土木学会年次学術講演会, 3-216,
2009.

MANAGEMENT METHOD FOR SOIL AND GROUND WATER CONTAMINATION

Budget : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2006-2010

Research Team : Material and Geotechnical Engineering
Research Group (Soil Mechanics and
Dynamics)

Author : SASAKI Tetsuya

MORI Hirotohi

INAGAKI Yukiko

YAMAKI Masahiko

Abstract : The main goal of this research is to establish the management method for soil and ground water contamination in the construction site. The evaluation method for soil and ground water contamination regarding the characteristic of the contamination was proposed at the construction site using the site conceptual model of the Risk Based Corrective Action in the United States. Moreover, the behavior of nutrients for the bio-remediation method in groundwater flow was examined by model test.

Key words : Soil and Ground Water Contamination, Site Conceptual Model, Advection-Dispersion Analysis, Bio-remediation, Model Test