

(S3-23) 地下水汚染機構の解明を目的とした深度別地下水調査とその実施方法

和知剛¹・高木一成¹・佐藤徹朗¹・高畑陽¹リスク評価を活用した地下水汚染の拡散防止措置検討部会¹¹ 土壌環境センター

1. 背景および目的

事業所等における地下水汚染が敷地外に拡散すると様々なリスクが生じることから、汚染の拡散を未然に防止するために適切な対応を講じることが重要である。（一社）土壌環境センターでは、地下水汚染の敷地外への拡散を防止するための手引きを作成し提供することを目的として、「リスク評価を活用した地下水汚染の拡散防止措置検討部会（以下、本部会とする）」を設けている。本部会では、敷地境界において管理目標値を超過しないためのリスク評価や、その評価結果を用いて利害関係者間で適切にリスクコミュニケーションを行う方法について検討している。手引きの具体的な手順と考え方の素案（以下、手引案）について、本部会の前身である「地下水汚染のサイト評価手法の活用検討部会」でとりまとめて報告している¹⁾。手引案では、汚染状況の評価や、「地下水モニタリング措置²⁾」へ移行する際の判断に、観測井戸における地下水の調査を重視している。また、地下水汚染のメカニズムを評価する場合には、帯水層の平均的な濃度の平面分布だけではなく、同一帯水層における地下水汚染の深度分布を把握することが有効であることも示しており、その調査方法として「観測井戸における地下水の深度別調査」を挙げている。本報では、この深度別調査方法の目的と実施方法について詳述する。

2. 地下水汚染の挙動

地下水汚染は、汚染物質が地下水に直接溶解したり、土壌に吸着している汚染物質が地下水に溶出したりすることによって生じる。汚染物質はシルトや粘土のような粒径の小さい土壌に吸着しやすく、吸着後は地下水中に汚染物質を供給し続けることから、地下水汚染が長期的に残存する。更に汚染した地下水は土壌間隙を移動しながら汚染範囲が拡大するため、土壌と地下水の相互作用に基づく汚染物質の挙動を理解しておくことが重要である。

地下水汚染の挙動を把握するためには、地下水汚染プルーム（汚染源から下流に広がる汚染地下水の範囲）の分布や時間変化の情報が必要である。そこで、地下水汚染プルームの規模やライフサイクルについて、以下に説明する。

2.1 地下水汚染プルームの規模

一般に、地下水汚染プルームは汚染物質の種類によってその規模（大きさ）が異なる。日本国内では、「土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン（改訂第3.1版）」³⁾（以下、ガイドラインとする）において地下水汚染の到達距離が示されているが、米国での研究報告では⁴⁵⁾、汚染物質のプルームの平均的な規模（長さ×幅）について、BTEX（ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレン）、塩素化エチレン類、塩素化エタン類毎にまとめている（表-1）。一般に、石油系炭化水素であるBTEXと比べて、TCE等の塩素化エチレン類の地下水汚染プルームは大きくなる傾向が示されている。

表-1 汚染物質の種類によるプルーム規模の違い⁴⁵⁾

プルームの種類	平均的なプルーム形状(m)	評価サイト数
BTEX	64×45	42
TCE等の塩素化エチレン類	300×150	88
TCA、DCA等の塩素化エタン類	150×105	29

BTEX：(B)ベンゼン、(T)トルエン、(E)エチルベンゼン、(X)キシレン

TCE：トリクロロエチレン、TCA：トリクロロエタン、DCA：ジクロロエタン

Depth-specific Groundwater Survey for Elucidating the Groundwater Contamination Mechanism and its Implementation Method

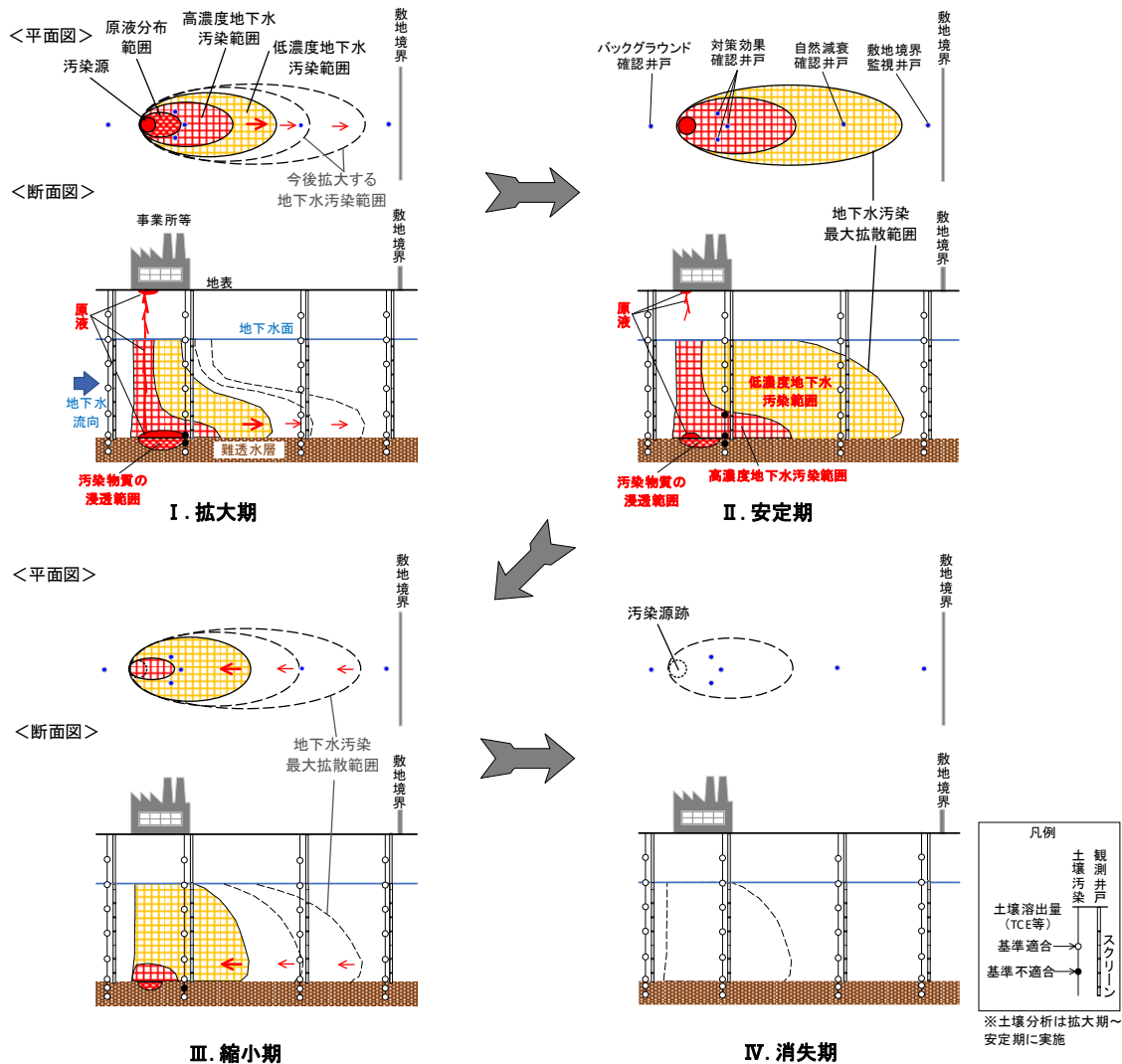
Takeshi Wachi¹, Kazushige Takagi¹, Tetsuro Sato¹, Yoh Takahata¹ and Study Group on Measures to Prevent from the Diffusion of Groundwater Contamination using Risk Assessment¹ (¹GEPC)

連絡先：〒102-0083 東京都千代田区麹町4-5 KSビル3F （一社）土壌環境センター

TEL:03-5215-5955 FAX:03-5215-5954 E-mail:info@gepc.or.jp

2.2 地下水汚染プルームのライフサイクル

地下水汚染プルームは、地盤中での汚染物質の自然減衰（移流、分散、自浄作用による化学的および生物学的な分解等）の進行により、発生から消失に至るまでの4つのステージに区分できることが知られている⁵⁾⁶⁾。TCEなどの塩素化エチレン類の原液（DNAPLs）による土壌・地下水汚染の平面的な汚染プルームと断面的な汚染状況の挙動を図-1に示す。プルーム（塩素化エチレン類）のライフサイクルの平面的な挙動は、Newellら⁵⁾及びLooneyら⁶⁾においてまとめられている。各ステージに対応した断面図については本部会において追加したものである。各ステージの特徴を以下に示す。



I. 拡大期 (Expanding phase)

汚染源に原液を含む汚染物質が高濃度で残留しており、地盤中での汚染物質の自然減衰を上回る汚染物質が地下水に供給されるため、下流域に地下水汚染プルームが拡大しつつある状態を指す。

II. 安定期 (Stable phase)

高濃度域の修復措置により汚染源において地下水中への汚染物質の供給量が少なくなり、プルーム周縁での自然減衰の効果で地下水汚染プルーム長が大きく変化しない状態を指す。汚染物質が漏洩した総量が少ない場合には、汚染源対策や高濃度域の修復措置を実施することなく拡大期から安定期に移行し、さらに縮小期、消失期に至るケースがある。

III. 縮小期 (Shrinking phase)

高濃度域の修復措置により汚染源が収縮して地下水への拡大期・安定期と比較して汚染物質の供給量が減少し、自然減衰が更に進み地下水汚染プルーム中の汚染物質が低下傾向となり、プルームの大きさが縮小しつつある状態を指す。

IV. 消失期 (Exhausted phase)

地下水汚染プルームの最終段階で、地下水汚染プルームの汚染物質の平均濃度が基準値近傍もしくは基準値以下まで小さくなり、プルームが消滅されつつある状態を指す。

2.3 地下水汚染プルームの評価

地下水汚染プルームのライフサイクルは、一般的には観測井戸等で地下水中の汚染物質の濃度を経時的にモニタリングすることで評価できる。カリフォルニア州とテキサス州の 500 近いサイトでの地下水汚染プルームについて、その形状と濃度の両方を評価した結果、全サイトのおよそ 75% が安定期もしくは縮小期の状態であると判定された⁴⁵⁾。これは、地下水汚染が存在している場合でも、地下水汚染が拡大していない場合が多いことを示している。地下水汚染プルームが安定している状態 (安定期) から縮小している状態 (縮小期) であることを的確に評価できれば、バリア揚水対策等の能動的措置から、地下水モニタリング措置のような受動的措置に移行する判断が可能となる。

3. 深度別地下水調査の位置付けと地下水汚染プルーム評価の必要性

一般的に深度別の地下水調査は、任意の深度区間毎の地下水頭や地下水質を測定するために実施し、地下水を賦存する同一の帯水層内の異なる深度から、地下水試料を不攪乱に近い状態で採取する。これまで深度別の地下水調査は、地下水の揚水処理を行う際に、適切な深度で効率的に汚染物質を除去する目的で実施されることが多かった⁷⁸⁾。一方で、手引案における深度別地下水調査は、地下水汚染プルーム全体の三次元的な状況を把握し、ライフサイクルのどのステージに該当するかを評価することを目的としている。地下水汚染の敷地外への拡散を防止する措置として、揚水による汚染地下水の拡大防止など能動的な措置を停止して地下水のモニタリング措置へ移行する場合には、その評価の一つとして、同一帯水層内の平均的な濃度の平面分布だけではなく、地下水汚染の深度分布を把握することが有効であると手引案に記載している。

TCE などの DNAPLs が地盤に浸透して帯水層の下部の難透水層に到達した場合、難透水層上部に滞留、あるいは難透水層に浸透した汚染物質が長期的に地下水に汚染物質を供給する汚染源になることが考えられる。そのため、帯水層の土壌中の汚染物質濃度が低下した後でも、帯水層の下部付近では難透水層から溶出する汚染物質の影響で深度方向に地下水濃度の差が生じる場合がある。このような汚染のメカニズムから、地下水汚染の深度分布は汚染源の範囲や地下水汚染プルームのライフサイクルのステージによって異なり、汚染プルームが安定期から縮小期に移行するにしたがって、深度方向の地下水濃度の差が小さくなるエリアが増加する。

能動的な浄化措置等を停止して地下水モニタリング措置に移行する場合には、汚染源や高濃度プルームの状況を正確に把握して、地下水中の汚染物質濃度がリバウンドしないようにすることが重要である。しかしながら、帯水層内の平均的な濃度の平面分布のみで評価すると汚染プルームのライフサイクルのステージを誤って判断し、汚染源の存在を見逃す可能性がある。地下水濃度に影響を与えるような浸透源や土壌汚染が残っていた場合、深度方向での地下水の濃度に差が生じると予想されるため、汚染源やプルームの状況を判断するためには深度別の地下水調査が有効になると考えられる。深度別の地下水の測定数は、汚染状況や地質の状況に応じて判断することが基本となるが、地下水面付近、帯水層の中間深度、帯水層の底部の少なくとも 3 深度で採水を行い、より精度良く地下水汚染プルームの評価を行いたい場合には測定数を多くする。

4. 深度別地下水の採取と観測井戸の構造

深度方向に汚染濃度が異なる帯水層において、一般的な採水方法と深度別地下水採取を実施した場合の概念を図-2 に示す。同一の帯水層中において深度方向に汚染物質

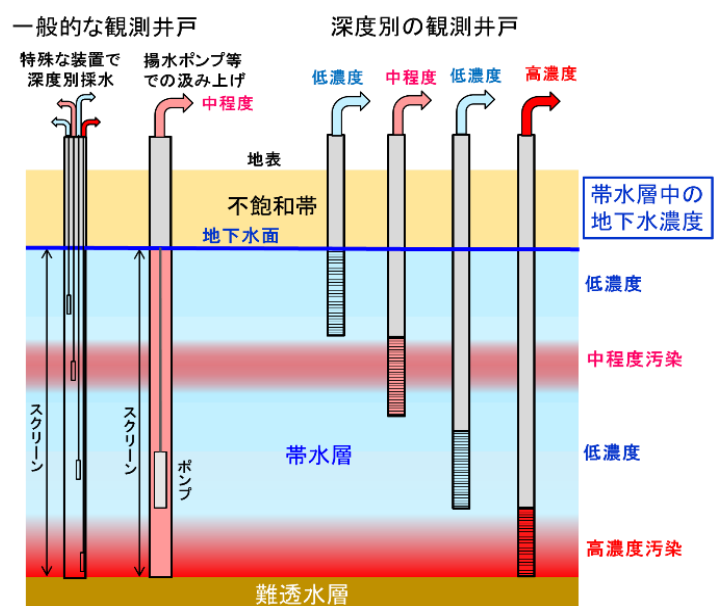


図-2 深度方向に汚染濃度が異なる帯水層における採水方法と地下水濃度の違い

の地下水濃度差が生じている場合、観測井戸のスクリーン区間の中間深度から流量の大きいポンプを用いて採水すると、観測井戸内の地下水が混合した状態で汲み上げられるため、深度別の地下水濃度を把握することが難しい。地下水汚染の深度方向の濃度差を正しく把握するためには、スクリーン深度が異なる観測井戸を複数本設置してそれぞれの観測井戸から地下水を採取することで、ほぼ不攪乱状態の地下水試料が採取でき、高精度の評価が可能となる。しかしながら、同一帯水層において深度別に複数の観測井戸を設置している事例は少ない。

一方、国内ではガイドラインに基づいて、帯水層全体にスクリーンを設けた観測井戸（以下、オールスクリーン観測井戸とする）が設置されることが多い。オールスクリーン観測井戸では完全に不攪乱の試料を採取することは難しいが、採水方法によっては、効率的に深度方向の汚染分布を把握することが可能である。また、観測井戸が存在しない場合には、打撃貫入方法を用いた調査方法が簡便且つ安価に実施できる。そこで、本章ではこれらを使用した採水方法について概説する。

4.1 オールスクリーンの観測井戸を利用した深度別地下水採取方法

オールスクリーン観測井戸内において、図-2に示したような汚染状況の帯水層において、深度方向の地下水濃度の差が把握できる主な地下水採取の方法の例を表-2および表-3に示す。帯水層全体がオールスクリーンになっている観測井戸が存在する場合には、基本的に表-2および表-3に示す不攪乱に近い状態で地下水の採取が可能な方法を用いることを推奨する。採取方法により地下水の採取時の攪乱の程度に差はあるが、特別なサンプラーや採水方法を用いることにより、不攪乱に近い状態での採取ができれば、リスク評価に十分な精度の地下水調査結果を得ることができる。

表-2 深度別地下水採取の方法例の整理（サンプラー浸漬方法）

種類	概要・特徴	採取イメージ
サンプラー浸漬方法	<p>内部に非イオン水が充填されたサンプラーをパージ後の井戸内に複数深度に吊り下げ、設置後約2週間でサンプラー外部とサンプラー内部の濃度が平衡になったところで、サンプラーを引き上げ回収する。各深度に設置した容器のサンプル採取量は100mL程度である。地下水を不攪乱に近い状態で採取することができる。透水性が良く地下水位の回復が早い地層に適しており、水中ポンプが使えない深井戸においても適用可能である。</p>	 <p>文献 8)から引用</p>
	<p>ガラスや硬質ポリエチレン製の両端が解放された40～350mLの特殊な容器を、パージ後に複数深度に吊り下げ、1～2週間後に地上からの操作で密栓し回収する。地下水をほぼ不攪乱状態で採取することができる。水中ポンプが使えない深井戸においても使用可能である。井戸内の地下水中で密栓するため、サンプル移送中の揮発ロスが生じない。</p>	 <p>文献 9)より引用</p>
	<p>パージ後の井戸内に設置し、地下水が安定するまで1週間程度静置する。内管の外側に外管を挿入し、各深度の地下水を採水管内に密閉することで、地下水を不攪乱状態で採取することができる。サンプル採取量は約1,000mLである。</p>	 <p>文献 10)より引用</p>

表-3 深度別地下水採取の方法例の整理（直接採取方法）

種類	種類・特徴	採取イメージ
直接採取方法	深度別揚水法 ¹¹⁾	<p>十分な井戸洗浄後、水質が安定するまで（1週間程度）の期間をあける。採水時にはパージを実施せずに（もしくは少量実施）、低流量ポンプ等を用いて浅い深度から順に採水する。サンプルはある程度攪乱される可能性はあるが、任意の量が採取可能である。</p> <p>本報のために作成</p>
	パッカー法 ¹²⁾	<p>井戸スクリーンの内部に、上下にパッカーを設けた長さ1mの採取管スクリーン井戸内に挿入し、小型ポンプもしくは採水チューブ等で採水する。パージ後にpH等の安定を確認して採水する。サンプルはある程度攪乱される可能性はあるが、任意の量が採取可能である。</p> <p>文献12)より引用</p>

4.2 観測井戸がない場所での深度別地下水調査方法

観測井戸が存在しない場所で深度別地下水調査を行う方法として、打撃貫入式の地下水サンプラーがある。これは、打撃式ボーリングマシンにより特殊な構造のサンプラー（図-3）を設置することにより、任意の深度で地下水採取が可能な方法である。オールスクリーン観測井戸がない場合、短時間に地下水採取ができることから、広範囲の調査や多数の地点の調査で任意の深度で地下水を採取するのに適しており、効率的、経済的に深度別地下水調査を行うことができる。

打撃貫入式による地下水採取は以下の手順で実施する。

- ① 自走式の打撃式ボーリングマシンにより、ケーシング内にスクリーンが内蔵された特殊サンプラーを目的深度まで打ち込む。
- ② ケーシングを引き上げることでスクリーンが露出する（図-3）。
- ③ スクリーンからサンプラー内に流入した地下水を採水チューブ等やポンプ等により地上で採取する。



図-3 打撃貫入方式による深度別地下水調査ツール¹³⁾（一部加筆）

5. まとめ

本報では、地下水汚染状況を詳細に評価したり、地下水汚染の敷地外への拡散防止を図りながら地下水モニタリング措置への移行を判断したりする場合に、深度別地下水調査を行う重要性和その実施方法について報告した。深度別の観測井戸が設置されていない場合でも、既存のオールスクリーン観測井戸を活用して深度別の採水を行う方法や、井戸を設置せずに打撃貫入方式で深度別地下水調査を行うツールを用いる方法についても詳述した。深度別地下水調査では、一般的に行われているスクリーン区間の中間深度からの採水と異なり、地下水汚染の深度方向の濃度差を把握することができる。これにより、汚染プルームのライフサイクルがどのステージにあるかをより精度良く評価でき、地下水モニタリング措置への移行の可否の判断が行い易くなる。

国内には汚染プルームが縮小しているのかかわらず、敷地内の一部で地下水基準値を超過していることを理由に長期にわたって揚水による汚染地下水の拡大防止等の能動的な対策を継続している事業所がある。このような場合には地下水モニタリング措置へ移行することが可能であると考えており、手引案を活用して受動的な措置に移行するための評価を行う過程で、観測井戸における深度別調査が役立つと期待している。

参考文献

- 1) 奥田信康・高畑陽・穴吹太陽・佐藤徹朗・舟川将史・地下水汚染のサイト評価手法の活用検討部会(2022) : 地下水調査を中心としたサイト評価と地下水汚染の拡散防止措置の手順に関する提案, 第 27 回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp. 335-340.
- 2) 高畑陽・古屋光啓・舟川将史・佐藤徹朗・CSM・モニタリングを活用した土壌・地下水汚染の管理手法検討部会(2019) : 土壌・地下水汚染に対する地下水モニタリング措置の検討, 第 25 回 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp. 516-520.
- 3) 環境省 水・大気環境局 土壌環境課(2022) : 土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン (改訂第 3.1 版).
- 4) American Petroleum Institute,(1989) : Hydrogeologic Data Base for Groundwater Modeling API Publication No.4476, API, Washington, DC. The database is available on diskette (Lotus or Microsoft Excel); contact the API Information Specialist at ehs@api.org.
- 5) Newell, C.J., L.P. Hopkins, and P.B. Bedient,(1990) : “A Hydrogeologic Database for Groundwater Modelling,” Ground Water, Vol.28, No.5, Sept./Oct. 1990. pp.703-714.
- 6) Brian Looney, Carol Eddy-Dilek and Miles E(2018) : Denham: Sustainable Remediation Approaches Using a Common-Sense Approach to Enhanced Attenuation. Savannah River National Laboratory, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/01/f58/5-Looney.pdf>.
- 7) Thomas E. Imbriotta and Philip T. Harte(2020) : Passive Sampling of Groundwater Wells for Determination of Water Chemistry – Techniques and Methods 1-D8, Book 1. Collection of Water Data by Direct Measurement, U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey.
- 8) ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council)(2007) : Protocol for Use of Five Passive Samplers to Sample for a Variety of Contaminants in Groundwater. DSP-5. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Diffusion/Passive Sampler Team.
- 9) QED Environmental Systems 社 ホームページ : <https://www.qedenv.com/en-us/products/snap-sampler/> 閲覧日 2023 年 1 月.
- 10) 瀬野光太・井上章・伊藤哲緒・佐藤徹朗(2013): 既設観測井戸における深度別不攪乱採水の有効性について, 第 19 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.131-133.
- 11) 佐藤徹朗・稲田ゆかり・佐藤秀之・佐藤幸孝・設楽和彦・技術標準化部会(2014) : 既設観測井戸からの地下水採取について, 第 20 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp.493-498.
- 12) 関陽児, 内藤一樹, 鈴木庸平, 伊藤一誠, 渡部芳夫 (2012) : ボーリング孔での原位置地下水試料の採取法と留意点, 資源地質 62(3), pp235-247.
- 13) Geoprobe Systems 社ホームページ : <https://geoprobe.com/tooling/sp16-groundwater-sampler>. 閲覧日 2023 年 1 月.