

(S2-27) 土壌汚染状況調査における「詳細な土壌ガス調査」の意義
 -土壌ガス絞込み調査について-

○青木 鉦二¹

¹興亜開発株式会社

1. はじめに

土壌汚染対策法(平成15年2月施行：以下、土対法)の第一種特定有害物質(以下、VOC)を対象とする土壌汚染状況調査は、所定の土壌ガス調査を行い、検出範囲ごとに周囲8つの単位区画と比較して土壌ガス濃度が高い単位区画の代表地点でボーリングによる土壌溶出量調査を行う。土壌ガス調査の地点は、地歴調査によりVOCの使用等履歴、貯蔵等履歴及び埋設等履歴がある場所(以下、使用等履歴場所)が判明しているときは区画内で最も汚染のおそれが多いと考えられる位置、地歴調査の結果、使用等履歴場所が不明であるときは区画の中心とされており、代表地点におけるボーリング位置は土壌ガス調査を行った位置と同一とすることが多い。

「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」(以下、ガイドライン)改訂第3.1版には、代表地点を含む単位区画内において、さらに追加の土壌ガス調査を行い、当該単位区画内で土壌ガス濃度が最も高くなる地点を求めることもできるとされているが、実施されていないケースが多く確認されている。

近年、土壌溶出量基準に適合したが地下水基準の超過が確認されたケースや、地中深い深度での土壌溶出量基準超過と地下水基準超過が確認され、対策の立案に苦慮するケースが散見されている。

土対法施行前は、単位区画の概念はなく、段階的にメッシュを細かくした土壌ガス調査を行い高濃度範囲を絞込み、その結果推定された汚染源でボーリング調査を行うことが一般的であった。

そこで、近年、行われることが少なくなった追加の詳細な土壌ガス調査(以下、土壌ガス絞込み調査)を実施することの意義について考察した。

なお、一部対象区画で検出された場合の単位区画ごとの土壌ガス調査は土対法施行規則(以下、規則)で規定された土壌汚染状況調査の一部であり、ここでいう土壌ガス絞込み調査とは、単位区画内で汚染源を特定するために行う「詳細な土壌ガス調査」をいう。

2. VOCの挙動と土壌ガス調査の原理

VOCが地中に浸透した場合、ベンゼンを除き、水より比重が重いこと、粘性が低く浸透性が高いことから、土質にもよるが鉛直方向に浸透しやすい。また、VOCは揮発性が高く、不飽和帯の土壌空隙に気体(土壌ガス)として存在する(図-1参照)。

この性質を利用し、土壌空隙に存在する気体VOCの有無を確認するとともに濃度分布を把握して汚染源を特定するスクリーニング調査が土壌ガス調査である。

VOCは地下水に達すると、ベンゼン(水より比重が軽い難水溶性液体：LNAPL)は地下水位付近の深度で平面方向に拡散する。ベンゼン以外(水より比重が重い難水溶性液体：DNAPL)は一旦地下水面で滞留した後、地下水に侵入する。帯水層底面の難透水層に到達して汚染溜りを形成することがある(図-1参照)。

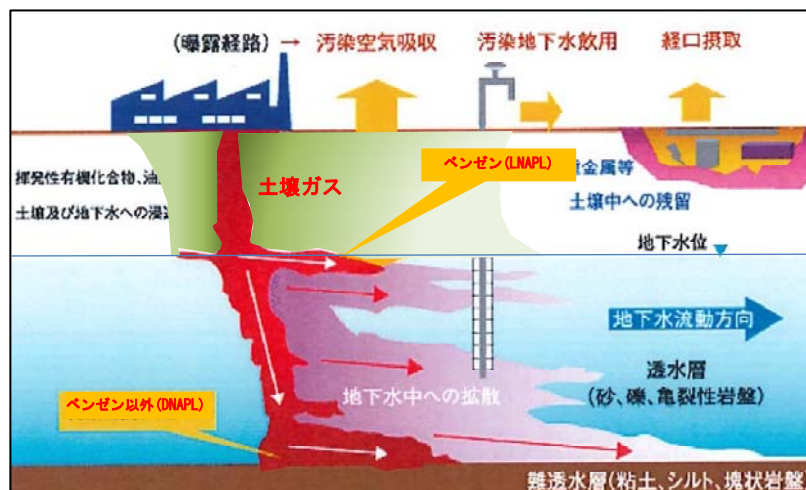


図-1 土壌地下水汚染機構模式図²⁾に加工

Significance of Detailed Soil Gas Survey in Soil Contamination Investigation

— concerning the soil gas survey for narrowing down to identify the source of contamination —

Seiji Aoki¹ (¹Koa Kaihatsu Co., Ltd.)

連絡先： 〒135-0007 東京都江東区新大橋1丁目8-2 新大橋リバーサイドビル101 4階 興亜開発株式会社
 TEL 03-3633-7351 FAX 03-3633-7359 E-mail Webmaster@koa-kaihatsu.co.jp

一般的に、土壌ガスが高濃度で存在する範囲は、地表から浅い深度においては浸透のあった場所付近に限定され、汚染源から距離が離れば低濃度になる。浅田らによれば「土壌ガス濃度は距離に対して指数関数的に急激に減少し、その程度は 10 m 離れると約 1/1,000 に、100 m 離れると約 1/1,000,000 になる」とされる。³⁾。換言すれば、土壌ガス濃度が高い地点は、そこから VOC が侵入した可能性が高く、この性質を利用して、VOC の高濃度範囲を絞込み、汚染源を特定する作業が土壌ガス絞込み調査である。

3. 土対法施行前と土対法施行後の土壌ガス調査の比較

土対法施行前は、段階的にメッシュを細かくした土壌ガス調査を行って高濃度範囲を絞込んでいたが、土対法施行後は、10m メッシュ相当の単位区画より細かく絞込むことが少なくなった。ここでは、土対法施行前と土対法施行後の土壌ガス調査方法の変化について述べる。なお、土対法施行前は資料等調査、土対法施行後は地歴調査が実施されていることを前提としている。

3.1 土対法施行前の土壌ガス調査

3.1.1 君津式表層汚染調査法

君津式表層汚染調査法は、1988 年(昭和 63 年)に千葉県君津市内箕輪の地質汚染(トリクロロエチレン)現場において、君津市環境部(当時)の鈴木、千葉県水質保全研究所(当時)の楡井らによって開発された手法で⁴⁾、その方法は以下のとおりとされている。

まず調査地域全体に 4m 四方の作業格子を展開し、ボーリングバーと検知管を用いて地下空気汚染調査を行う。隣り合ったサンプル点間に著しい地下空気汚染濃度差があった場合は、作業格子を半分(2 m)、1/4(1 m)、1/8(0.5 m)と詰めていき、高濃度部を追い込んでいく。⁵⁾

君津式表層汚染調査法は現在も活用されており、「地質汚染現場における汚染機構解明調査の手順」(令和 5 年 千葉県環境研究センター)にも採用されている。⁶⁾

3.1.2 暫定指針の調査

「重金属等に係る土壌汚染調査・対策指針及び有機塩素系化合物等に係る土壌・地下水汚染調査・対策暫定指針」(平成 6 年 11 月環境庁水質保全局：以下、暫定指針)では、VOC を対象とする調査方法は以下のとおりとされていた。

土壌ガス調査の概況調査では、対象地全域をメッシュ(低感度手法は 5 m 程度、中感度手法は 20 m 程度、高感度手法は 50 m 程度)に区切って調査する。土壌ガス調査の詳細調査では、概況調査で比較的高濃度の土壌ガスが検出された地点周囲をメッシュ状に細かく区切って(最終的には 1~2 m 間隔)さらに詳細な調査を実施し、土壌ガスの等濃度線を作成することにより最高濃度地点及び土壌汚染の平面分布等を把握する調査を行う。土壌ガスが比較的高濃度で検出された地点における調査であるため、低感度の手法を用いてよい。ボーリング調査は、土壌ガス調査において高濃度に対象物質が検出された地点等を選定して行う。⁷⁾

3.1.3 旧指針の調査

「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針および運用基準」(平成 11 年 1 月環境庁水質保全局：以下、旧指針)は暫定指針の改定版である。VOC を対象とする土壌ガス調査方法は暫定指針と概ね同様であるが、「汚染のおそれのある範囲が概ね明らかである場合等には、最初の段階から密度を高める。メッシュが概ね 5 m 以下となる場合には、調査効率を上げるため、低感度手法を用いてもよい。」とされた⁸⁾。

なお、土対法施行時に、旧指針のうち土壌汚染に関する部分が廃止されたが、地下水汚染に関する部分は現在も有効である。

3.2 土対法施行後の調査

3.2.1 土対法の規定の調査

土対法では、対象地を 10 m 区画及び 30 m 格子で区切る。使用等履歴場所を含む区画は全部対象区画として 10m 区画(単位区画)ごと、直接履歴はないが関連する場所は一部対象区画とし、原則として 30 m 格子ごとにその中心(中央の単位区画)で土壌ガス調査を行う。30 m 格子中央区画で土壌ガスが検出された場合は、当該 30 m 格子内の全ての一部対象区画で土壌ガス調査を行う。全部対象区画では、区画内で汚染のおそれが多い場所に調査地点を設定するが、不明の場合は区画中心に設定する。ボーリング調査は、検出範囲ごとに、周囲 8 区画と比較して土壌ガス濃度が高い区画(代表地点)で行う。土壌ガス調査は中感度法に相当する方法(平成 15 年環境省告示第 16 号 以下、告示 16 号)で行う。^{1), 9)~12)}。ここまでは規則に規定されており、ガイドラインで解説されている。

3.2.2 詳細な土壌ガス調査(土壌ガス絞込み調査)

「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」(平成 15 年：以下、技術解説)からガイドライ

ン改訂第 3.1 版には、VOC の土壤汚染状況調査の手順(試料採取等区画の選定以降の手順)に、任意に実施する調査として「必要に応じ補完的な土壤ガス調査による高濃度地点の絞込み」が、記載されている。^{1), 9)~12)}「技術解説」には、以下の方法等が記載されていた。

汚染土壤が存在するおそれが最も多い地点をより正確に把握するためには、相対的に土壤ガスの濃度が高い地点を含む単位区画の範囲においてさらに土壤ガス調査による絞込みを行い、当該単位区画内で土壤ガス濃度が最も高くなる地点を求めることが望ましい。土壤汚染状況調査の結果に基づき、相対的に土壤ガス濃度が高い単位区画を中心に 2~5 m 間隔で詳細な土壤ガス調査を行う。検知管等の適切な簡易手法を用いることができる。⁹⁾ ガイドライン改訂版(平成 23 年)及びガイドライン改訂第 2 版(平成 24 年)も同様である。^{10), 11)}

ガイドライン改訂第 3 版(平成 31 年)及びガイドライン改訂第 3.1 版(令和 4 年)では、当該単位区画内で土壤ガス濃度が最も高くなる地点を求めることができるとされ、「相対的に土壤ガス濃度が高い単位区画を中心に 2~5 m 間隔で詳細な土壤ガス調査を行う。」という方法が記載されなくなった^{1), 12)}。

また、平成 15 年 2 月 4 日環水土第 20 号施行通知(以下、平成 15 年通知)の記の第 3 の 1 の(6)⑧及び平成 22 年 3 月 5 日環水大土発第 1003050002 号施行通知(以下、平成 22 年通知)の記の第 3 の 1 の(6)⑧の「なお、当該地点と同一の単位区画内において、検知管等の簡易的調査手法を用いること等により、より高濃度の土壤汚染が存在するおそれが多いと認められる地点があった場合には、当該地点において試料採取等を行うことができる」^{13), 14)}という文言が、平成 31 年 3 月 1 日環水大土発第 1903015 号施行通知(以下、平成 31 年通知)の該当箇所(記の第 3 の 1 の(6)⑥)には記載されていない¹⁵⁾。平成 15 年通知及び平成 22 年通知の記の第 3 の 1 の(6)冒頭部の「なお、この方法よりも詳細な方法で調査を行うことも認められる。」^{13)~15)}は、平成 31 年通知でも記の第 3 の 1 の(5)冒頭部に、引き続き記載されている。

4. 近年の調査結果

以下に、筆者が土対法施行後に、ガイドライン^{9)~11)}に準じて実施した土壤ガス絞込み調査の事例(事例 1 から 4)と、土壤ガス絞込み調査を実施しなかった事例(事例 5)を記す。土壤ガス絞込み調査の分析方法は、検知管を用いず、全て告示 16 号で実施した。

4.1 事例 1

図-2 に本事例の土壤ガス調査地点とボーリング調査地点を示す。土壤汚染状況調査において A 区画は特別管理産業廃棄物倉庫、B 区画は特定施設で土壤ガス調査を行い、VOC が検出された。

土壤ガス絞込み調査の結果、ボーリング地点は当初の土壤ガス調査地点と同地点となった。

4.2 事例 2

図-3 に本事例の土壤ガス調査地点とボーリング調査地点を示す。土壤汚染状況調査において A 区画と C 区画は分析室跡、B 区画と E 区画は区画中心、D 区画はトリクロロエチレン(以下、TCE)洗浄装置で土壤ガス調査を行い、TCE が検出された。B 区画には TCE 洗浄装置の他に分析室跡も含まれていたが、TCE 洗浄装置の方を選定した。

土壤ガス絞込み調査の結果、D 区画の分析室跡で TCE 洗浄装置の 40 倍の値(最高濃度)が検出され、当該地点でボーリング調査を行った。

4.3 事例 3

図-4 に本事例の土壤ガス調査地点とボーリング調査地点を示す。地歴調査において、過去にドライクリーニング店が存在したことは判明しているが、使用等履歴場所は不明であった。そのため、土壤汚染状況調査では統合後の区画中心で土壤ガス調査を行い、テトラクロロエチレン(以下、PCE)が検出された。

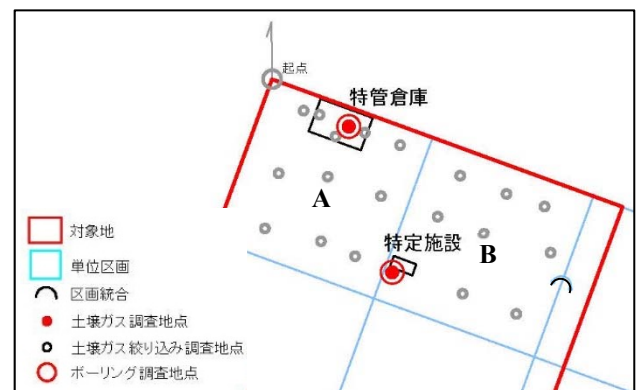


図-2 土壤ガス調査地点とボーリング調査地点(1)

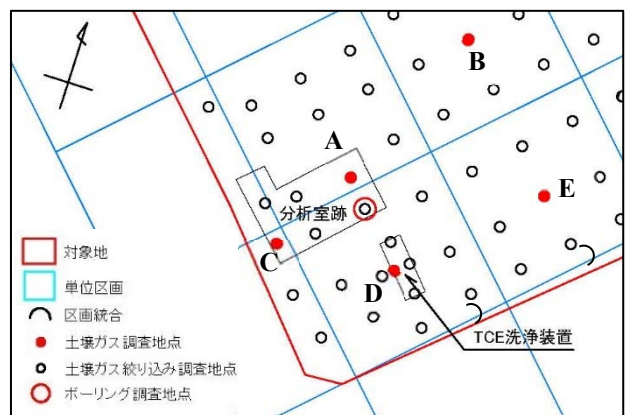


図-3 土壤ガス調査地点とボーリング調査地点(2)

土壌ガス絞込み調査の結果、南東側の地点でPCEが区画中心の53倍の値で検出され、ボーリング調査地点とした。

4.4 事例4

図-5に本事例の土壌ガス調査地点とボーリング調査地点を示す。過去にVOCを使用等した履歴がある建物又は部屋を含む区画を全部対象区画とし、それ以外は全て一部対象区画とした。一部対象区画の調査地点(30m格子中央区画)でVOCが検出された場合は格子内の全ての一部対象区画で調査を行った。代表地点4区画で行った土壌ガス絞込み調査の結果、もともと全部対象区画であったA区画、B区画、D区画では、当初の土壌ガス調査地点がボーリング地点となった。A区画、B区画、D区画では使用等履歴場所が区画の端に限定されており、そこに当初の土壌ガス調査地点を設定していた。一部対象区画であるC区画では、北側の土壌ガス絞込み調査地点がボーリング調査地点となった。

4.5 事例5

対象地が狭小な1区画であり、対象地内の使用等履歴が不明であったため、区画中心で土壌ガス調査を実施し、土壌ガスからTCEが検出された。土壌ガス絞込み調査を行う余地はなく、土壌ガス調査地点でボーリング調査を実施した結果、GL-8m以深の土壌と地下水で分解生成物のみの基準超過が確認された。対象地は工場跡地の端が分筆された土地であり、分析結果より拡散域であることは明らかである。工場跡地の大半は隣地となっており、汚染源を探して対策を講じるための追加調査は不能であった。

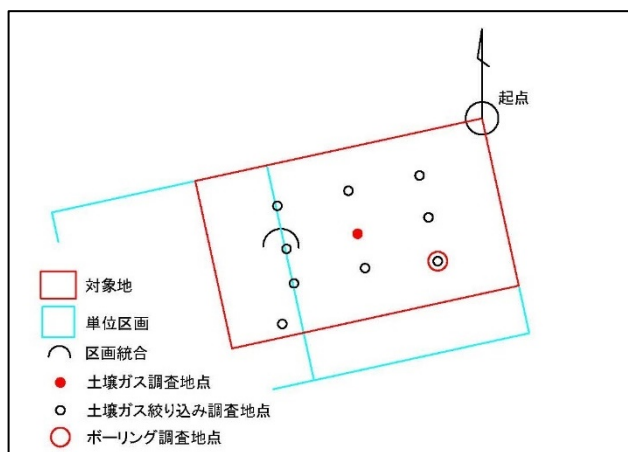


図-4 土壌ガス調査地点とボーリング調査地点(3)

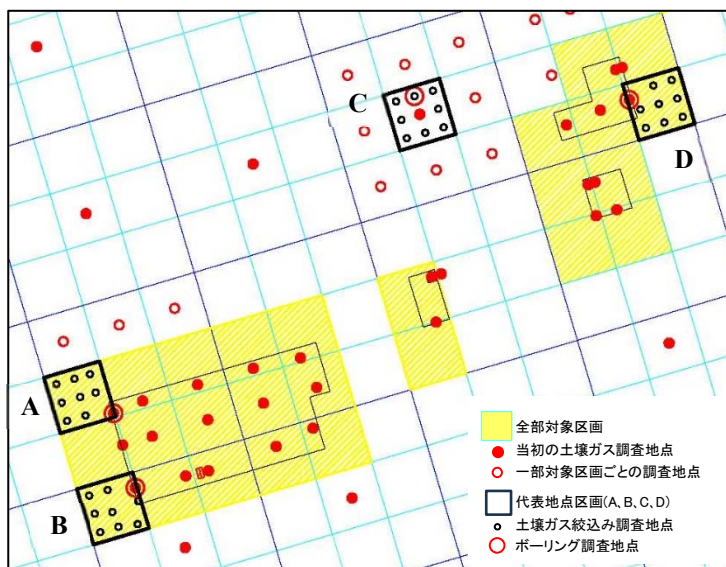


図-5 土壌ガス調査地点とボーリング調査地点(4)

5. 土壌ガス絞込み調査の意義

5.1 土壌ガス絞込み調査の有効性

3で述べたように、君津式表層汚染調査から旧指針まで、土壌ガス調査は高濃度範囲を絞込むところまで行うこととされていた。土対法では、単位区画ごとの調査、即ち10mメッシュ相当までが規定されており、さらに詳細に高濃度範囲を絞込む土壌ガス絞込み調査は任意とされている。

ここで、土壌ガス調査地点間に汚染源があると想定すれば、10m区画中心で調査を実施した場合、調査地点と汚染源が最大 $5\sqrt{2}$ m(約7m)離れていることになる。2で述べた浅田らの報告³⁾によれば、土壌ガス濃度は汚染源からの距離の3乗分の1になることから、例えば0.1ppmの検出は最大約350倍(35ppm)の汚染源が存在する可能性を示唆することになる。筆者が土対法施行前にしばしば用いた2mまで絞り込んだ場合は、汚染源との距離は最大 $1\sqrt{2}$ m(約1.4m)で最大約3倍の濃度となり、土対法施行後に用いている3.3mまで絞り込んだ場合は、汚染源との距離は最大 $1.65\sqrt{2}$ m(約2.3m)で最大約13倍の濃度となる。即ち、10mメッシュ相当の土壌ガス調査により決定した地点でボーリング調査を行った場合、その結果が軽微な汚染であっても、実際にはより高濃度な土壌汚染や地下水汚染がある場合が考えられる。

したがって、土壌汚染状況を的確に把握するためには、土対法の規定の調査である10m区画ごとの土壌ガス調査でVOCが検出された区画、特に代表地点となる区画では、土壌ガス絞込み調査が有効であると考えられる。

事故等によりVOCが浸透した場所が明確な場合や、事例1や事例4のA、B、D区画のように使用等履歴場所が区画の一部に限定される場合には、土壌ガス絞込み調査を行う必要がない場合も考えられる。しかし、事例3のように、使用等履歴場所が不明であることから区画中心で土壌ガス調査を行った場合や、事例2のよ

うに同一区画内に調査地点とは別の使用等場所がある場合は、汚染源を見逃す可能性がある。このような場合は、土壌ガス絞込み調査を行うことが有効である。

また、適切な措置を実施するためにも、土壌ガス絞込み調査が有効であると考えられる。ガイドラインでは、詳細調査の頁に、以下の記述^{1),10)~12)}がある。

詳細な土壌ガス調査の結果から推定される特定有害物質の浸透地点(土壌ガス濃度の高まりがみられる地点)を深度調査地点の基本とすることが望ましい。この主たる理由は、以下のとおりである。

- ① 第一種特定有害物質は比較的狭い範囲から浸透する事例が多いため、汚染の深さを的確に把握するためには浸透地点の特定が重要である(特に法第4条や法第5条による調査では、過去における第一種特定有害物質使用地点が不明な場合があることから重要となる。)
- ② 第一種特定有害物質による地下水汚染事例が多いため、第二種特定有害物質及び第三種特定有害物質と比べてより精度の高い調査が必要である。
- ③ 過去の実績から土壌ガス濃度が高い地点で深層に高濃度の汚染がみられることが多い。

5.2 土壌ガス絞込み調査の重要性

土壌ガス絞込み調査は、土壌汚染状況調査を適切に実施するために重要であるだけでなく、浄化を行う場合に効率よく吸引や注入、揚水等を行う地点を設定するため、対策時に実施することもある。狭小でない土地で事例5と類似したボーリング調査結果が得られた場合は、区画内又は敷地内に汚染源がある可能性が高い。結果的に、汚染源が敷地内でない「もらい汚染」が判明する可能性もあり得るが、適切な対策を講じるためには、改めて土壌ガス絞込み調査を行い、求めた高濃度地点で再度ボーリング調査を行うことが必要となり、より多くの費用と期間を要することになる(図-6参照)。

そこで、土壌汚染状況調査時に土壌ガス絞込み調査を実施しておけば、より適切な調査結果を得ることができるだけでなく、その後の対策も立てやすい。特に原位置浄化の場合に重要であるが、掘削除去の場合でも5.1①③にもあるとおり掘削深度、範囲を適切に設定し、汚染の取り残しによる地下水濃度のリバウンドを防ぐ効果も期待できる。

土対法の土壌汚染状況調査については、ガイドラインにも「特に法第4条や法第5条による調査では使用等地点が不明な場合があることから重要である」^{1)10)~12)}とされているとおりであるが、法第3条調査で使用等場所が明確な場合であっても、同一区画内に複数の使用等場所がある場合には、各使用等場所でも土壌ガス調査を行い、最高濃度地点を確認することが重要である。

また、土対法第5条や水質汚濁防止法第14条の3(浄化措置命令)の命令が発出された場合だけでなく、VOCによる地下水汚染が発見され、原因事業場の敷地で地下水汚染の汚染源を求める調査を実施する場合にも、土壌ガス絞込み調査が重要となる。

さらに自主調査も含め、不動産取引の場合では、売主側の調査で汚染が見つからず、買主側の調査で汚染が見つかった場合に発生する諸問題を極力回避するため、売主側の調査でも重要となる。

若手技術者や、土対法施行後に土壌汚染調査・対策業務に参画した技術者等は、土壌ガス絞込み調査の経験がないことや聞き及んでいないことも多い。土対法施行前から行われてきた有効な技術を、必要な状況下で使用できるよう、継承していくことも重要であると考えられる。

5.3 土壌ガス絞込み調査の限界

5.3.1 地中の存在状況について

地表で実施する土壌ガス絞込み調査は汚染源の平面探査であるため、改変によって地表付近の土壌がかく乱されている場合、土質により地中へ浸透後に水平方向へ移動した場合、拡散域で地表付近に粘性土が分布している場合等、地中の存在状況を表しているとは限らない場合もあることにも留意が必要である。

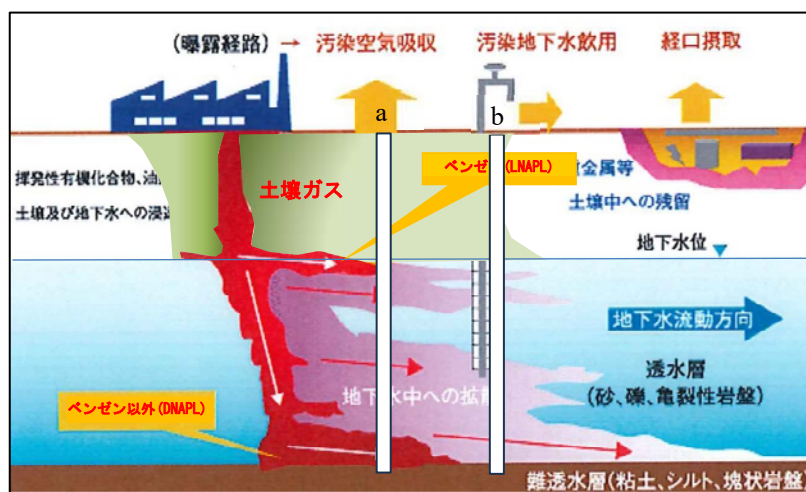


図-6 汚染源を外したボーリング調査の例²⁾に加筆加工
a地点は深層の土壌汚染と地下水汚染、b地点は地下水汚染のみ

5.3.2 地下水汚染の濃度分布について

地下水汚染の濃度分布は、土壌ガスの濃度分布と一致しないことも珍しくない。筆者が土対法施行前に調査を実施した扇状地に位置する調査対象地では、旧指針⁸⁾に準じた土壌ガス絞込み調査及びボーリング調査により汚染源を発見したが、汚染源における地下水濃度は低濃度であり、高濃度地下水が敷地内の下流側へ移動した後であることが後日判明した。

浄化を行う場合に、効率よく吸引や注入、揚水等を行う地点を設定するためには、土壌ガス絞込み調査による表層のVOCの分布状況、汚染源の把握は必須であるが、汚染の拡散状況、段階等によってはそれだけでは足りず、別途、地下水及び地中のVOCの分布状況の把握が必要となる。

6. おわりに

土壌ガス絞込み調査は、土壌汚染状況調査を適切に実施するために重要であるだけでなく、適切な対策を講じるためにも重要であり、土壌汚染状況調査時に行うことが肝要である。

特に、土対法第4条調査その他調査でVOCの使用履歴等がある場所が不明な場合や、土対法第5条調査その他地下水汚染源を見つける必要がある調査、土対法第3条調査その他調査で同一区画内に複数の使用等場所がある場合には、汚染源を見落とさないために重要である。

また、土対法施行前から行われてきた有効な技術を、必要な状況下で使用できるよう、若手技術者等へ継承していくことも重要である。

なお、土壌ガス絞込み調査を行う場合の実施方法は、地質汚染現場における汚染機構解明調査の手順⁶⁾、旧指針⁸⁾、ガイドライン(改訂第2版まで)^{9)~11)}等を参考とされたい。

参考文献

- 1) 環境省水・大気環境局(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
- 2) 興亜開発(2024)：詳細調査 <https://www.koa-kaihatsu.co.jp/contamination/detail.html> (参照 2024/2/11)
- 3) 浅田憲子・勝野豊・平田健正(1995)：土壌ガス濃度の距離減衰からみた測点間隔，地下水・土壌汚染の現状と対策，pp.94-100.
- 4) ガステック(2024)：君津式表層汚染調査法について <https://www.gastec.co.jp/technology/knowledge/kimitsu/> (参照 2024/2/6)
- 5) 岩本広志(1998)：地質汚染機構解明調査法，資源環境対策1998年12月号，pp.21~26.
- 6) 千葉県環境生活部環境研究センター地質環境研究室(2023)：地質汚染現場における汚染機構解明調査の手順—地下水汚染の浄化対策として—
- 7) 環境庁水質保全局(1994)：重金属等に係る土壌汚染調査・対策指針及び有機塩素系化合物等に係る土壌・地下水汚染調査・対策暫定指針(平成6年11月11日環水管第205号・環水土第207号)
- 8) 環境庁水質保全局(1999)：土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針および運用基準(平成11年1月29日環水企第30号、環水土第12号)
- 9) (社)土壌環境センター，環境省監修(2003)：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
- 10) 環境省水・大気環境局(2011)：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版
- 11) 環境省水・大気環境局(2012)：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2版
- 12) 環境省水・大気環境局(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版
- 13) 環境省環境管理局水環境部長(2003)：土壌汚染対策法の施行について(平成15年2月4日環水土第20号)
- 14) 環境省水・大気環境局長(2010)：土壌汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壌汚染対策法の施行について(平成22年3月5日環水大土発第1003050002号)
- 15) 環境省水・大気環境局長(2019)：土壌汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壌汚染対策法の施行について(平成31年3月1日環水大土発第1903015号)