

自走式バイブドリルマシンで高速施工可能な 注入管および観測井の開発

高 畑 陽

有害物質で汚染された土壌や地下水を非掘削で浄化する技術（原位置浄化技術）を行う場合、空気や浄化材を含む液体を汚染地盤まで供給するための注入管や、浄化状況を確認するための観測井は、浄化を行うために必要不可欠な設備である。本稿では、機動性が高く狭隘な場所でも作業可能な自走式バイブドリルマシンを用いて注入管や観測井を迅速に設置する方法について、浄化工事への適用例を含めて紹介する。これらの注入管や観測井は掘削時にほとんど汚染土が発生しないため安全性が高く、引き抜きが容易で管材を繰り返し使用できるため、リサイクルの視点からも環境負荷が低い技術である。

キーワード：土壌・地下水浄化、原位置浄化技術、自走式バイブドリルマシン、打ち込み式注入管、電極兼用注入管、打ち込み式簡易観測井

1. はじめに

国内における有害物質による土壌および地下水汚染は1990年代に顕在化し、2003年に土壌汚染対策法が施行されると土壌汚染に対する調査や対策件数は飛躍的に増加した。また、同年に宅地建物取引業法の不動産鑑定評価基準が改正され、土壌汚染の有無を重要事項として記載する義務が課せられるようになった。そのため、土壌汚染調査は法の対象になる場合だけでなく、土地取引等を行う場合に普遍的に行われており、土壌や地下水汚染が確認された場合には適切な措置が必要となっている。

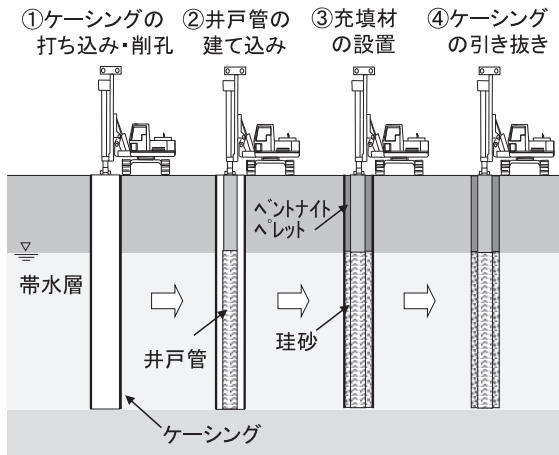
土壌汚染調査を目的とした試料採取では、掘削時に採取試料が二次汚染することを防ぐために無水で掘削作業を進める必要がある。また、比較的狭隘な場所で複数の地点を調査する機会が多いため、移動が容易な機械を用いて短時間で試料を採取できる方法が求められている。そこで、ロータリー方式と比較して機動性が高い自走式バイブドリルマシン（以下、バイブドリル）が開発され、多くの土壌汚染調査や観測井の設置に使用されている。

近年、有害物質で汚染された地中深くに存在する土壌・地下水汚染の浄化対策として、コストや環境負荷の小さい原位置浄化技術を適用する事例が増えている。環境省は区域内措置優良化ガイドブックの中で土壌汚染対策を行う場合の標準的な原位置浄化技術を提示しているが、その多くは地盤に様々な浄化用井戸を

設置して行う技術である（表-1）。浄化用井戸には、汚染地下水や地盤中のガスを回収するための揚水井戸や吸引井戸、浄化に必要な空気や浄化材（化学的な分解剤、または浄化菌を活性化させるための栄養剤を含む溶液）を供給するための注入井戸（注入管）が多く使われているが、浄化用井戸は地下水を採取するための観測井（以下、従来型観測井）と同様の施工方法で設置される事例が多かった。従来型観測井は、1) ケーシング削孔、2) 開口部（スクリーン）を持つ井戸管の建て込み、3) 井戸管周りの珪砂やベントナイトペレットの充填、4) ケーシング回収、の複数の工程が

表-1 浄化用井戸を用いる原位置浄化技術

原位置浄化技術	浄化用井戸	地上施設
土壌ガス吸引法	吸引井戸	吸引フロア ガス処理装置
地下水揚水	揚水井戸	揚水ポンプ 水処理装置
エアースパーキング	スパーキング井戸 吸引井戸	コンプレッサ 吸引フロア ガス処理装置
加熱脱着	加熱井戸（電極） 吸引・揚水井戸	吸引装置 水／ガス処理装置
化学処理 （薬剤注入）	注入井戸	送液ポンプ
生物処理	注入井戸	送液ポンプ
原位置土壌洗浄	揚水井戸 注水井戸	送液ポンプ 揚水ポンプ 水処理装置



図一 従来型観測井の設置手順

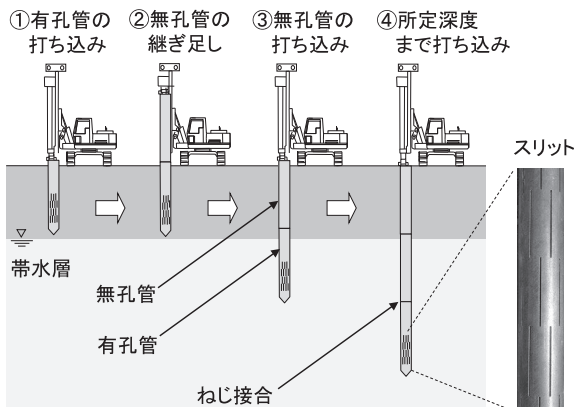
必要であり（図一1）、集水機能に優れている一方で、設置時間が長くなる課題があった。

汚染地盤を確実に浄化するためには、単位面積当たりにはできるだけ多くの浄化用井戸を設置する必要がある。そこで、パイプロドリルを用いて従来よりも短時間で設置可能な浄化用井戸および簡易観測井を開発した。本稿では、打ち込みにより設置する注入管および簡易観測井について概説すると共に、浄化工事および実規模試験への適用事例について紹介する。

2. 打ち込み式注入管

(1) 打ち込み式注入管の概要

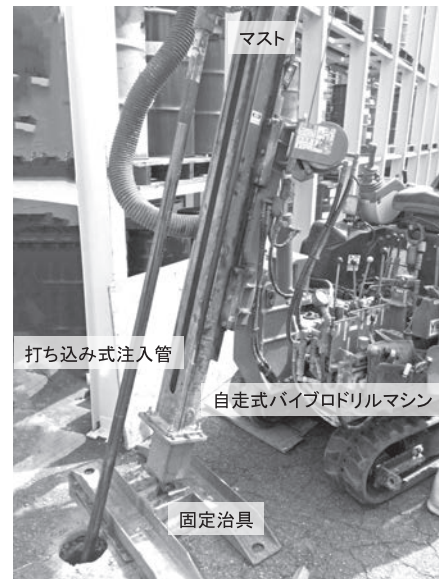
打ち込み式注入管の先端は、コーンとフリクションカットを備えた長さ約1mの規格品のガス配管用鋼管であり、打設とねじ接合を繰り返しながら所定の深度まで到達させる（図一2）。浄化に必要な空気や浄化材の供給量に応じて設計されたスリットを持つ有孔管を使用し、適切な深度に配置する。スリットは管内への土砂の侵入を防ぐ加工をしているため、排土・洗浄作業が不要で、設置直後から注入管を使用できる。



図二 打ち込み式注入管の設置手順

打ち込み式注入管は空気供給を行うバイオスパーキングによる原位置浄化工事¹⁾を中心にこれまでに5,000本以上の実績がある。

打ち込み式注入管はパイプロドリルのマストの角度を自由に調整できる機能を利用して、斜め方向への打設が可能である。建屋直下の汚染地盤に対して、斜め方向に打ち込み式注入管を設置して浄化材を注入する浄化工事を過去に実施している²⁾（写真一1）。



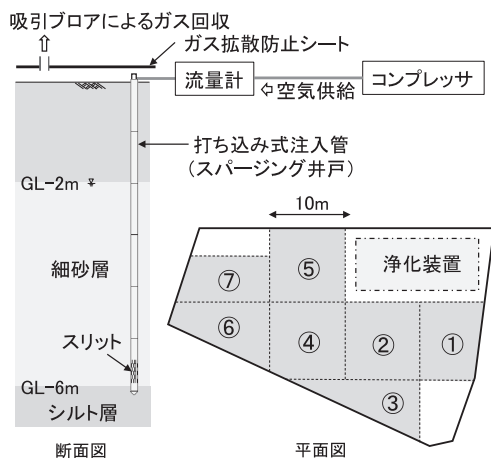
写真一1 打ち込み式注入管の斜め方向への設置状況

(2) 打ち込み式注入管を用いるガソリンスタンド跡地の浄化事例

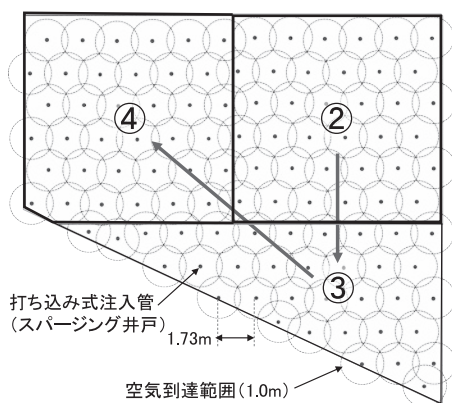
ベンゼンおよび油による帯水層汚染が生じているガソリンスタンド跡地に対して打ち込み式注入管を用いるバイオスパーキング（帯水層に空気を供給して、汚染地盤に存在する好気性浄化菌を活性化させることによりベンゼンや油を分解する浄化技術）を行った。土壌汚染対策法に準じた調査を実施した結果、図一3に示す約100m²の①～⑦の7区画にベンゼンおよび油による汚染が存在することを確認した。土壌中のベンゼン溶出量および油分濃度はそれぞれ最大で0.13mg/L、8,100mg/kg（いずれもGL-2.0mの深度）であり、地下水中のベンゼン濃度は最大で5.1mg/Lであった。過去に実施したバイオスパーキングでは注入管（スパージング井戸）として従来型観測井を用いたため、設置本数をできるだけ少なくできるように注入管の間隔を約5m、スパージング風量を100～150L/minとして浄化を実施した³⁾。しかしながら、この条件では帯水層に大量の空気を供給する必要があるため、敷地外に空気が拡散しないように遮断措置として鋼矢板などを設置する必要があった。

短時間で設置できる打ち込み式注入管の特長を活かすため、帯水層の最下層に位置にスリットを設けた打ち込み式注入管(図一3)を1.73m間隔で設置した(図一4)。注入管からの空気到達範囲が1.0mとなる空気供給量は、1本あたり5L/minで十分であることを原位置試験により確認した。また、本浄化エリアは早急な浄化が不要な土地であったため、図一3に示す7つの区画を1区画ずつ浄化し、打ち込み式注入管の打設と引き抜きを繰り返しながら浄化を行った。②区画から④区画にかけて実際に打設した注入管の配置を図一4に示す。本サイトでは、注入管の引き抜きおよび次の区画への設置を3日間で行えた。また、単位面積あたりの空気供給量を従来技術より1/3以下に減らせたことにより、本サイトでは0.45kWの汎用性の高い小型のコンプレッサ6台を用いることで空気供給が可能となり、遮断措置も不要となった。

微生物浄化に必要な栄養塩(窒素、リン)を含む浄化材を浄化開始前に各注入管から供給後、約3ヶ月を目安に各注入管から空気供給を行った。土壤のベンゼン溶出量および地下水中のベンゼン濃度が環境基準値(0.01mg/L)以下となり、土壤の油臭・油膜が無くなっ



図一3 汚染サイトの平面図および断面図



図一4 打ち込み式注入管の平面配置

ていることを確認後、次の区画に浄化装置を移設して順次浄化を行った。いずれの区画でも、浄化達成までの期間は3~4ヶ月間となり、計画した期間内に浄化を完了した。

(3) 打ち込み式注入管を用いたトリクロロエチレン汚染地下水の浄化事例

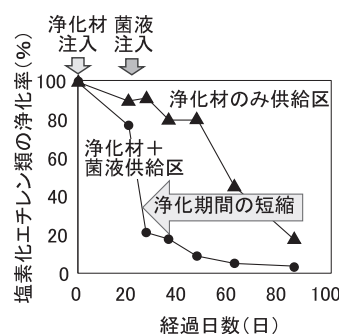
汚染帯水層に有機物を主成分とする浄化材を供給してトリクロロエチレンなどの塩素化エチレン類で汚染された地下水を浄化する技術が広く普及している⁴⁾。本浄化技術では浄化材を供給するための注入管を帯水層に設置し、地上から送液ポンプ等を利用して溶液の浄化材を供給する。打ち込み式注入管のスリットの開口率は1~2%程度であり、従来型観測井(約10%)と比較して小さいため、注入管を多く設置して複数の注入管から同時に浄化材を供給することにより浄化の効率化を図っている。

近年、浄化期間を短縮するため、浄化材に加えて有用な浄化菌を含む菌液を汚染帯水層に供給する技術が着目されている。筆者らが単離した浄化菌(UCH007株⁵⁾)は嫌気性細菌であるため、菌液は約20L容の密閉性の高い耐圧容器で培養したものを浄化サイトまで輸送し、酸素に触れないように窒素ガスを用いて地盤に供給する方法を開発した⁶⁾。トリクロロエチレンで汚染された帯水層に耐圧容器1本あたり約10分(約2L/min)でUCH007株を含む菌液を供給した結果、菌液を供給した汚染帯水層では同一サイトでの浄化材のみを供給した帯水層と比較して、地下水の浄化期間が約2ヶ月短縮できることを確認した⁷⁾(図一5)。

3. 電極兼用注入管

(1) 電気発熱法の概要

揮発性有機化合物(以下、VOCs)が地盤に漏洩した場合、汚染物質が地盤内に長期間滞留することによりVOCsがシルト層や粘土層などの難透水層に含浸

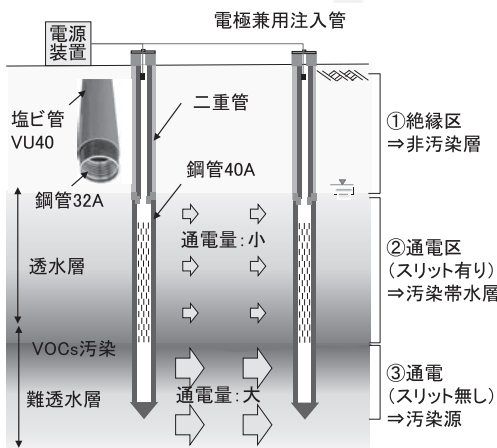


図一5 実汚染サイトでの浄化菌液の供給状況と浄化効果

する場合がある。難透水層に含浸した VOCs は長期間地盤に滞留して地下水への長期的な汚染源となる。そのため、砂層などで構成される帯水層だけでなく、その周囲の難透水層に存在する VOCs を浄化することが、浄化措置後に地下水中の汚染物質濃度が再上昇する現象（リバウンド現象）を防止するために重要である。

難透水層に存在する VOCs に対して機械混合や噴射攪拌を行わずに原位置浄化を適用する方法として加熱脱着（表—1）があり、その中でも電気発熱法⁸⁾が着目されている。電気発熱法は汚染物質が存在する地盤に電極を設置して地盤に電流を流すことにより土壌を抵抗体として発熱させる方法である。砂層のような透水層よりもシルトや粘性層などの難透水層の方が電流が流れやすく温まりやすいという性質を利用し、難透水層の土粒子間に強く吸着した VOCs の透水層への溶出や気化を促進することで、透水層だけでなく難透水層に存在する VOCs を同時に浄化することが可能な技術である。

加熱脱着法は透水層に溶脱した VOCs を抽出もしくは分解できる原位置浄化技術と組み合わせて浄化を行うが、特に生物処理（微生物浄化）と組み合わせることによりコストや電気使用量を小さくすることができる。微生物浄化を行うには透水層へ空気や浄化材を供給する必要があるため、打ち込み式注入管の技術を応用して図—6 に示す電極兼用注入管を開発した。地上付近の汚染が存在せず浄化が不要な土層には鋼管の周囲に塩ビ管を被せた二重管を配置して絶縁し、空気や浄化材を供給する必要がある汚染帯水層にはスリットを持つ有孔管、難透水層には無孔管をそれぞれ浄化対象とする地盤の汚染状況に合わせて配置することで、これまで別々に設置されていた電極と注入管を1本の浄化用井戸で行うことが可能である。二重管部



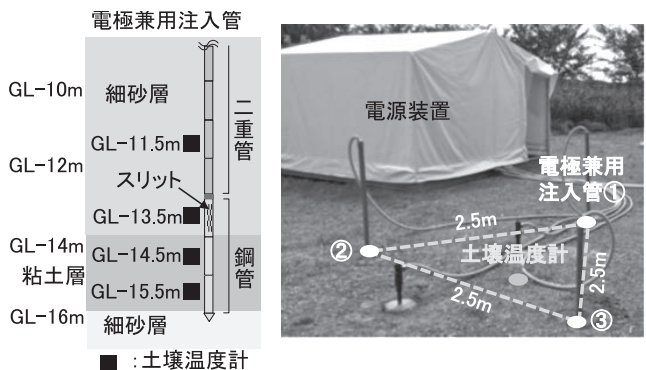
図—6 電極兼用注入管の概念図

と鋼管部はほぼ同一の外径であり、図—2 で示した工程とほぼ同様に施工できる。本管を用いることにより、必要な深度のみに電流を流して地盤を発熱することが可能である。

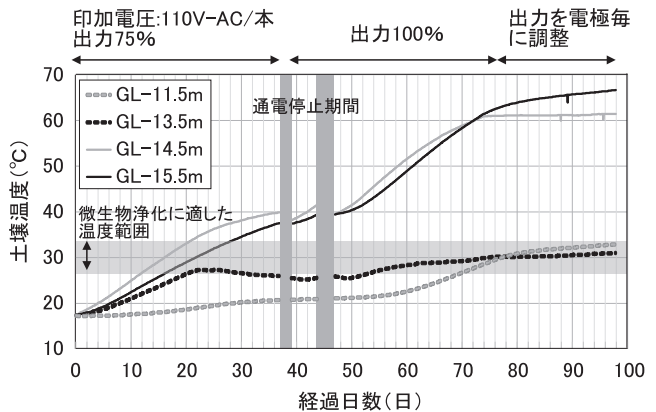
(2) 電極兼用注入管を用いた地盤の加熱試験

加熱試験を実施した地盤の土質柱状図、温度計設置位置、電極兼用注入管および温度計の平面配置を図—7 に示す。GL-14 m ~ GL-16 m の粘土層を VOCs が含浸した汚染源、GL-10 m ~ GL-14 m の砂層を VOCs 汚染帯水層と想定し、GL-13 m ~ GL-16 m の3 m を通電区間、地上部から GL-13 m までは絶縁区間とした。電極兼用注入管は一辺 2.5 m の正三角形の頂点にあたる3箇所に設置し、正三角形の重心の直下にあたる砂層と粘土層に対して2深度ずつ土壌温度計を設置した。

3相交流、200 V、50 A の電流を電極兼用注入管から流して土壌温度を測定した結果を図—8 に示す。通電前の土壌温度は17℃~18℃であったが通電後に粘土層の温度は砂層より大きく上昇し、砂層の温度を30℃前後の微生物分解に適した温度に管理した状態で粘土層の温度は60℃以上に上昇した。このような温度管理を行うことで、粘土層から砂層への VOCs の



図—7 加熱試験実施サイトの断面図および地上部の全景



図—8 各深度における土壌温度の推移

溶脱を促進させると共に、帯水層に溶脱した VOCs は浄化菌によって速やかに浄化可能である。

4. 打ち込み式簡易観測井

(1) 打ち込み式簡易観測井の概要

観測井は地下水の汚染状況や地下水流向などの管理に必要な不可欠な観測ツールであり、よりの確な調査や浄化措置を行うためには観測井をできるだけ多く配置して管理を行うことが望ましい。土壤汚染対策法ガイドラインには長期的に観測を行う観測井に求められる条件として、1) スクリーンは適切な開孔率を有すること、2) 汚染物質と反応しない材質を使用すること、3) 内径を 25 ～ 50 mm 程度とすること、4) 雨水等の侵入を防止するために観測井上部に適切なシールを施すこと、と定めている。

打ち込み式簡易観測井は、鋼製のコーンを先端に配置した井戸管の外側に鋼管を挿入し、バイプロドリルを用いて鋼管と井戸管が一体化した二重管を所定の深度まで打設後、井戸管を地盤に保持したまま外側の鋼管を順次引き抜いて観測井を残置させる方法である(図-9)。

観測井は VP25 と小孔径であるが、井戸管のスクリーンの集水機能を損うこと無く施工が可能であるため井戸洗浄が不要である。鋼管の回収後に井戸管と地盤に約 4 mm の小さな隙間ができるが、時間と共に周囲の土砂によって隙間が埋められる。そのため、管頭部において適切な雨水の浸透防止対策を行えば、従来型観測井とほぼ同様の水質データを取得できる。また、グラベルパッキングが無い小孔径の観測井であるため、従来井戸より寿命は短くなる可能性があるが、地下水採取時のパージ量を減らすことができる。

(2) 打ち込み式観測井の適用事例

地下水が酸性化したサイトの中和対策として、地下水流向に対してほぼ垂直方向に総延長約 250 m のトレンチを帯水層上面(地下水位: GL-1 m 程度)まで削孔して構築し、個々のトレンチから pH 中和用の

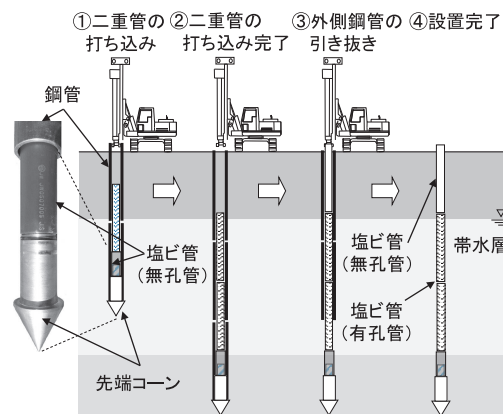


図-9 打ち込み式簡易観測井の設置手順

薬液を供給した。中和作業の効果を詳細に把握するため、図-10 に示す地点に打ち込み式簡易観測井を 26 箇所設置した。全ての観測井の設置作業は 2 日間で完了し、打設直後から井戸洗浄を行うことなく個々の観測井から地下水を採取して pH 等の測定を行うことにより、詳細な中和状況の管理を行うことが可能となった。

これまでに本サイトを含めて地盤条件の異なる 3 つのサイトで打ち込み式簡易観測井の施工実績があり、いずれのサイトでも地下水観測が長期的に実施可能であることを確認している。

5. おわりに

本稿では、土壤および地下水汚染に対する原位置浄化工事に用いる注入管、電極、観測井をバイプロドリルの振動貫入による打ち込みを利用して地盤に設置する技術について紹介した。本施工技術の共通の特長を以下に示す。

- ・小型のバイプロドリルで施工でき、騒音や振動の発生が比較的小さく、都市部や稼働中の工場内などの狭隘な場所でも施工できる。
- ・従来技術と比較して約 1/10 の短時間で注入管や観測井を設置できる。
- ・鋼管や井戸管の引き抜き作業が容易であり、破損が無ければ繰り返し使用できる。

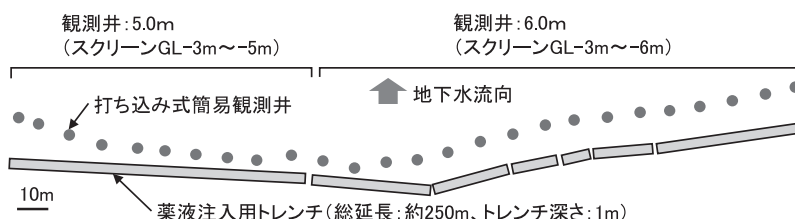


図-10 酸性地下水の中和作業の管理に用いる打ち込み式簡易観測井の配置状況

・施工時に汚染土壌や地下水が地上部においてほとんど発生しない。

今回紹介した技術が原位置浄化を行う場合の工期短縮と品質管理の向上に役立つことを期待する。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) 高畑陽, 伊藤雅子, 太田綾子, 大石力, 高橋由布子, 松尾寿峰: 都市部における土壌・地下水浄化対策の工期短縮への取り組み, 大成建設技術センター報第48号, No.4, pp.1-6, 2015.
- 2) 高畑陽, 伊藤雅子: 帯水層に対する高比重微粉末樹脂の注入試験, 第73回土木学会年次学術講演会概要集(Ⅶ部門), pp.183-184, 2018.
- 3) 桐山久, 高畑陽, 大石雅也, 有山元茂, 今村聰, 佐藤健: ベンゼン汚染帯水層に対する揚水循環併用バイオスパーキング工法の適用と効果の検証, 土木学会論文集F, Vol.66, No.4, pp.612-622, 2010.
- 4) 高畑陽: 有機化合物による環境汚染の現状とその対策-4 バイオレメディエーションの実際: 揮発性有機塩素化合物による土壌・地下水汚染と対策技術, 化学と生物, Vol.49, No.4, pp.256-260, 2011.
- 5) Uchino, Y., Miura, T., Hosoyama, A., Ohji, S., Yamazoe, A.,

Ito, M., Takahata, Y., Suzuki, K. and Fujita, N.: Complete genome sequencing of *Dehalococcoides* sp. strain UCH007 using a differential reads picking method, Standards in Genomic Sciences, Vol.10, 102, 2015.

- 6) 高畑陽, 伊藤雅子, 内野佳仁, 山副敦司: *Dehalococcoides* 属細菌 UCH007 株の汚染帯水層への導入方法の検討, 令和2年度第75回土木学会年次学術講演会, Ⅶ-77, 2020.
- 7) 伊藤雅子, 高畑陽, 内野佳仁, 山副敦司: *Dehalococcoides* 属細菌 UCH007 株を用いる塩素化エチレン類汚染地下水の浄化実証, 令和2年度第75回土木学会年次学術講演会, Ⅶ-78, 2020.
- 8) 佐藤徹郎, 長曾哲夫: 電気発熱法を用いたハイブリッド原位置浄化, 環境浄化技術, Vol.14, No.5, pp.51-55, 2015.

【筆者紹介】

高畑 陽 (たかはた よう)
大成建設(株) 技術センター
主幹研究員

