

エンバイロジェット工法による土壌・地下水汚染の 原位置浄化

川 端 淳 一・大 島 博・浦 満 彦

高圧噴射攪拌工法を土壌・地下水浄化工事の原位置浄化工法に適用したエンバイロジェット工法の概要について紹介する。エンバイロジェット工法は高濃度の汚染源部を部分的に除去置換するジェットリプレイス工法と、地下水浄化効果のある還元鉄粉を必要な部分に必要な量混合攪拌するジェットブレンド工法があり、有機塩素化合物による土壌・地下水の浄化に有用である。本工法を広範囲の汚染現場に適用し短期間に地下水環境基準を満足する結果を得た。

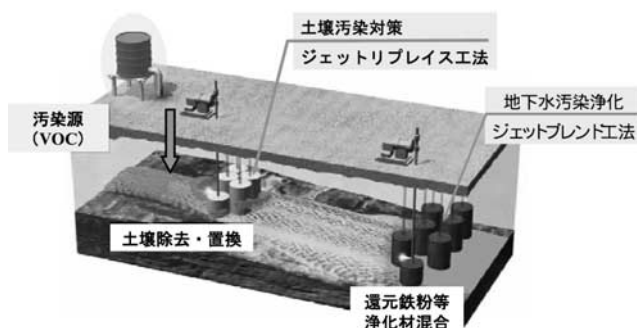
キーワード：土壌浄化，地下水浄化，深層混合，高圧噴射攪拌，テトラクロロエチレン，環境基準，還元鉄粉，スライム処理

1. はじめに

有機塩素系化合物（以下 C-VOC）は、原液の状態では地中に浸透して地下水に入ると、その水に溶解しにくく、かつ比重が大きいので、帯水層下部の難透水層上面に達する。その後はそこに長期にわたって滞留して地下水へ徐々に汚染を供給し続ける。原液の浸透状況や浸透後の分布は地中の不均質性に左右されるため、汚染分布を精細に予測することは極めて難しい。このような汚染形態を持つ C-VOC 汚染に対して効率的、効果的な原位置浄化を行うために開発した、エンバイロジェット工法（高圧噴射工法を利用して原位置浄化を行う工法）について、原理と施工事例を紹介する。

2. エンバイロジェット工法の原理

図一1に本事例で用いたエンバイロジェット工法



図一1 エンバイロジェット工法概念図

の適用イメージを示す。本工法の原位置浄化工法としての長所を以下に示す。

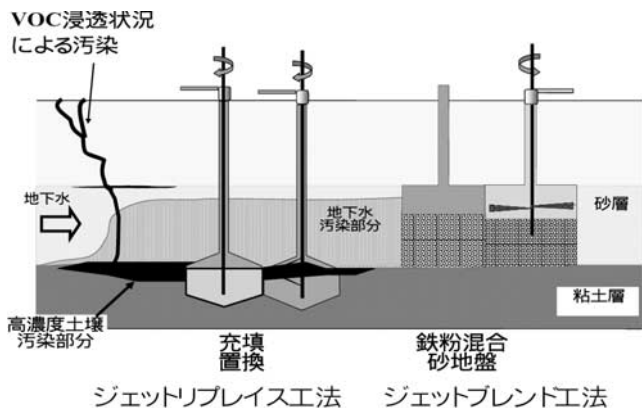
- ・注入工法等を利用した原位置浄化工法に対して改良範囲が明確であり、原位置浄化工法としては浄化予測がしやすい工法である。
- ・大深度汚染に対して必要深度のみ部分的に浄化を行うことが可能であり、地中深く浸透したのち平面方向に拡散する有機塩素化合物のような VOC 汚染の形態に合致し、コストメリットを発揮する。
- ・部分置換、浄化剤の混合等、多くの用途に応用が可能である。

これに対して、本工法の課題としてはスライム処理が必要であることが挙げられる。

エンバイロジェット工法には、汚染された箇所を部分的に除去し、粘土、セメント、加重材を配合した無害な置換体で置き換えることを可能にした「ジェットリプレイス工法」と、還元鉄粉等のように有機汚染物質に対して生化学的な汚染物質分解作用を持つ浄化材料を、部分的に原地盤と混合する「ジェットブレンド工法」の二つのタイプがあり、今回はこれらの工法についての特徴を述べると同時に、施工事例を紹介する。

3. VOC 汚染の形態と エンバイロジェット工法

有機塩素化合物は図一2のように、地中に浸透すると水よりも比重が重いので鉛直浸透後、帯水層下端の粘性土表層部に滞留し、半永久的に地下水汚染の汚



図一2 VOCの汚染形態とエンバイロジェット工法の適用概念

染源となる。このような汚染を浄化するためには、原理的には、①汚染源となっている粘性土上部汚染源の浄化、②広範囲に拡がる地下水汚染の浄化、という二つ観点から浄化を考える必要がある。このうち、汚染源を除去する方法には汚染の濃度、量に応じて様々な種類があるが、粘性土に大量の原液が浸透しているような場合には、浄化剤の注入・攪拌のみでは浄化は難しい場合も多く、ジェットリプレイス工法のような置換・除去工法が確実である。

一方、広範囲に広がった地下水汚染対策に対しても多くの方法があるが、揚水処理のような物理的方法では地盤の不均質性、把握しきれない汚染源の存在などにより早期の浄化は難しい。これを解決するために、各種の生・化学的分解工法が提案されているが、還元鉄粉による分解浄化方法は比較的高濃度の汚染にも対応可能であると同時に、効果の持続性が高い方法であり、分解浄化方法としては確実性の高い工法であると言える(表一1)。ジェットブレンド工法は還元鉄粉のような細粒状の浄化剤を、施工範囲外へ拡散させることなく、高精度に地盤内の特定深度において原地盤と攪拌・混合した造成体をつくることのできる方法であり、造成体の本数や施工位置を調整することにより、現場のスペック(浄化目標、浄化期間)に見合った設計を行うことが原理的に可能となる。すなわち深部に浸透する傾向のあるVOCの原位置浄化方法としては、注入工法を利用して浄化剤を地盤中に入れる工法に比べてより確実であり、地盤の特定深度のみを乱し

て浄化材料を攪拌混合できるという点で、機械攪拌に比べて優れた特徴を持つ技術であると言える。

4. エンバイロジェット工法の概要

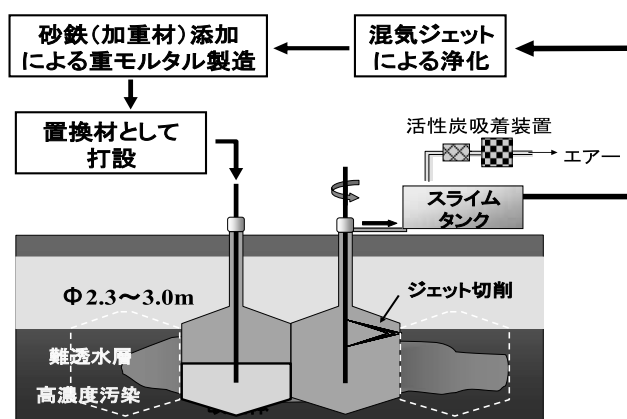
(1) ジェットリプレイス工法

(a) 概要

ジェットリプレイス工法は原汚染地盤中の特定深度で約30MPaの高圧ウォータージェットにより切削した後、高比重のモルタルを注入して汚染地盤を部分的に除去・置換する技術である。置換体の強度はモルタル中の固化材量を調整して決定することができるため、地盤沈下等の地盤変状や跡地の建物利用に支障を生じることなく浄化を完了することができる。また、この工法を用いることにより、粘性土に浸透して地下水汚染の汚染源となったVOCその他の地中の汚染物質を部分的に除去することが可能であり、浄化を極めて短期間に終わらせることが可能となる(図一3)。置換効果の確認方法については、施工中には設計充填量どおり充填材が注入されたかどうか、また、施工後はコアサンプリングによる置換率、土壌溶出量値の測定により、浄化効果の確認を行うことができる¹⁾。

(b) 施工方法及びスライム処理方法

図一3にジェットリプレイス工法の施工概要図を示す。施工にはいくつかの方法があるがここでは三重管を用いた方法を説明する。ボーリング孔にウォータ



図一3 ジェットリプレイス工法の概念図

表一1 各種分解浄化方法の原理と特徴

| 分解浄化方法の種類 | | 使用薬剤 | 特徴 |
|-----------|------|---------------|--------------------|
| 化学的分解法 | 酸化分解 | 過酸化水素など | 高濃度可。薬剤の効果持続性短い |
| | 還元分解 | 還元鉄粉など | 比較的高濃度可。薬剤の効果持続性長い |
| 微生物分解 | 好気分解 | メタン, 酸素, 栄養塩等 | 低濃度向。薬剤の効果持続性短い。 |
| | 嫌気分解 | 水素徐放剤, 栄養塩等 | 低濃度向。薬剤の効果持続性やや長い |

ージェット（空気・水）を噴射する経路と置換材料を注入する経路がそれぞれ独立した構造をもった三重管を高濃度汚染深度まで挿入する。次に三重管を回転させ、ウォータージェット交差噴流による地盤切削を行って対象改良範囲を泥水状にする。最後に三重管の下部から固化材や粘土等によって泥水より高比重に調整された重モルタルを低圧注入して、泥水を置換しながら円柱状の置換改良体を造成し終了する。

施工時の汚染されたスライムは、切削時の圧縮空気のエアリフト効果と重モルタルの置換により、ガイドパイプを通して地上のばっ気用タンクまで配管によって運搬される。そこでジェットポンプ等によりばっ気浄化され³⁾、さらに分級浄化され泥水は脱水された後、再度同じ現場において粘土として、置換用の重モルタルや埋め戻し土として再利用することが可能である。

(2) ジェットブレンド工法

(a) 概要と特徴

ジェットブレンド工法は、還元鉄粉水等の浄化材料との混合水を高圧で噴射しながら原地盤の帯水層と混合し、円柱状の混合体を造成するものである(図-4)。地中深い帯水層内に、予め設計した鉄粉混合率を高精度に確保しながら地盤中に還元鉄粉を攪拌・混合することが可能であることが実証されている⁴⁾。使用するウォータージェットの種類によって、混合体の直径は異なるが現在もっとも実績が多い例としては直径3m程度の造成体であり、一度に鉄粉を混合できる平面範囲としては最大規模である。

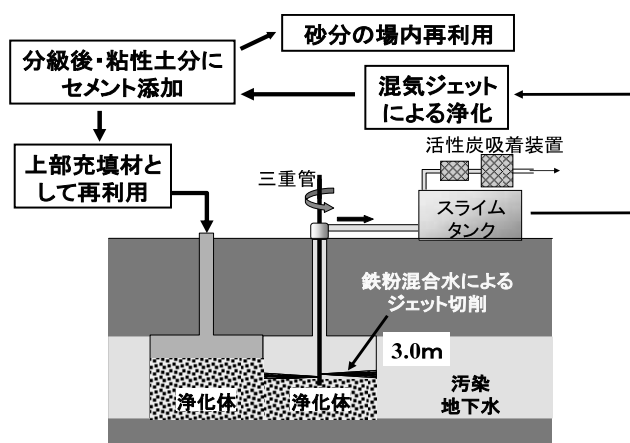


図-4 ジェットブレンド工法概念図

(b) 施工法及びスライム処理方法

ジェットブレンド工法の概要を図-4に示す。ジェットリプレイス工法と同様に施工対象深度まで管を建て込んだ後、予め所定の濃度に調合した鉄粉混合水

をウォータージェットとして地盤中に高圧噴射する。高圧噴射攪拌後は原地盤の砂と鉄粉との円柱状混合地盤を造成する。鉄粉混合率は鉄粉水濃度と管の引き上げ速度により決定される。鉄粉を効率よく送るためには鉄粉の十分な混合、スムーズな高圧噴射を確保するために特殊な鉄粉混合液を調合することが必要である。ウォータージェットによる切削中には原地盤中の土粒子の一部がスライムとして、地中に上がってくるが、その分の体積減少分（改良体積の1割程度）については、施工後造成体上部に充填材を注入して地盤変状を防止することが可能である。過去の実績から、鉄粉の攪拌による透水性の低下は起きておらず、むしろ攪拌により透水性は比較的高めとなる。直径3mを確保できるか否かについては、施工後に造成体と想定される場所内で採取したボーリングサンプル（鉄粉混合土）を使った分解実験により、想定される浄化効果が発揮できるかどうかで確かめることができる⁴⁾。

図-4中に示されるように、汚染スライムは、ジェットリプレイス工法と同様に、エアリフトとジェットポンプによりばっ気浄化され、分級された後、砂については充填材の配合や現場の埋め戻し土として、また粘土については、ジェットリプレイスの配合材料や改良して現場埋め戻し土として使用されることが可能となる。

5. 施工事例

(1) 汚染状況と地盤条件

当現場はテトラクロロエチレンによる汚染現場であり、施工開始後1年以内に全域で地下水汚染を環境基準以下とすることが求められた。地盤状況と地下水汚染の状況を図-5、図-6に示す。また施工時の状況写真(写真-1)も掲載した。汚染形態は典型的なVOCの汚染状況となっており、汚染物質が漏洩した汚染源においては表層から帯水層下面（粘土層上面）GL-10mまで高濃度の土壤汚染が存在し、汚染源の地下水下流側においては、帯水層の底面に高濃度の土壤

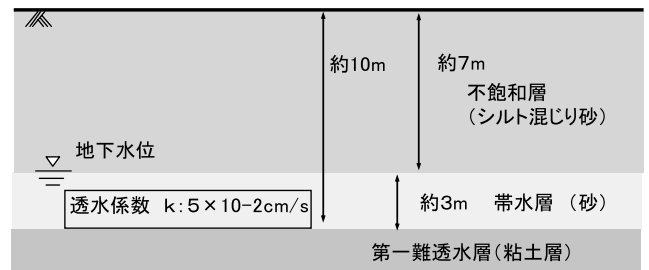
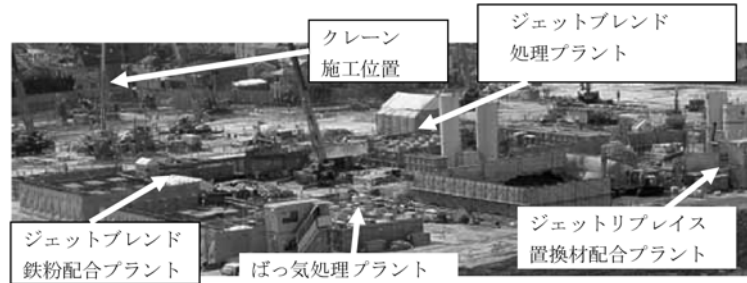
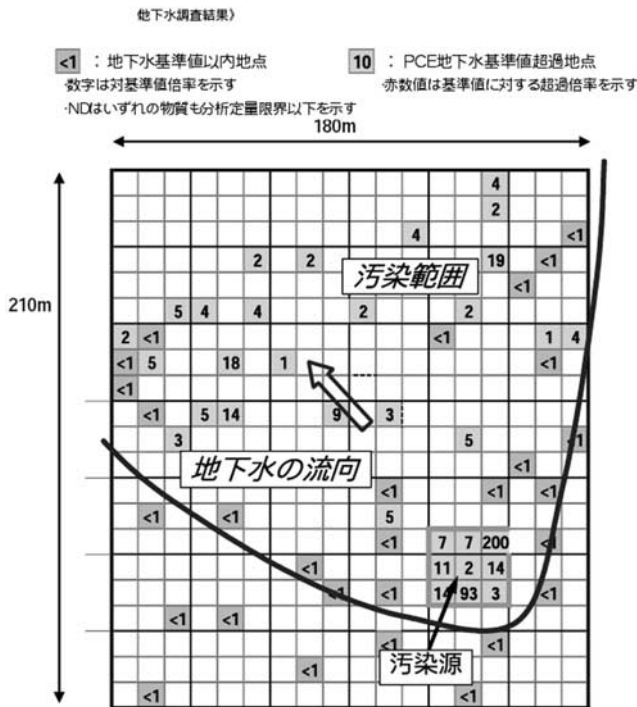


図-5 地盤状況



写真一 施工状況



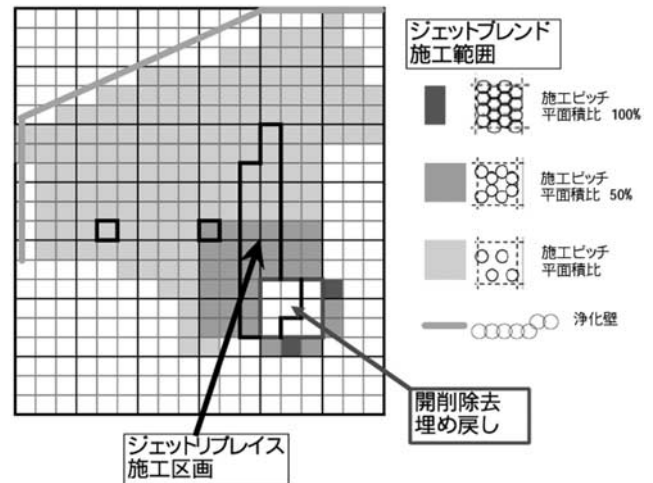
図一六 汚染状況平面図

汚染があり滞留している。これに伴って地下水汚染は、図中のほぼ全面に広がっており、汚染源付近では環境基準の100倍以上であり、下流にいくにしたがって地下水濃度は低くなっている。また帯水層は中砂～粗砂できており、透水係数は 10^{-2} cm/s オーダであった。

(2) 対策方法と結果

対策立案にあたっては10 m 区画に1箇所ずつ帯水層上面粘性土の土壌サンプリングを行ってその土壌溶出量を把握し、それを基に以下のような対策計画を立案した。

- ・汚染漏洩箇所：GL-10 m までの全面掘削（図一六「汚染源」と示された30 m 四方の箇所）。
- ・帯水層上部の粘性土の高濃度土壌汚染箇所：高さ1 m のジェットリプレイス工法（図一七太枠内）
- ・地下水対策：濃度に応じた施工ピッチでジェットブレンド工法を施工。



図一七 汚染対策の概要図

下流側敷地境界ではジェットブレンド工法による透水性浄化壁を構築する。

ジェットブレンドのピッチについては現地の地下水流速，地下水汚染濃度，造成体の浄化性能，環境基準以下とするまでの目標工期を勘案して設計した。

(3) 浄化の状況及び品質管理方法

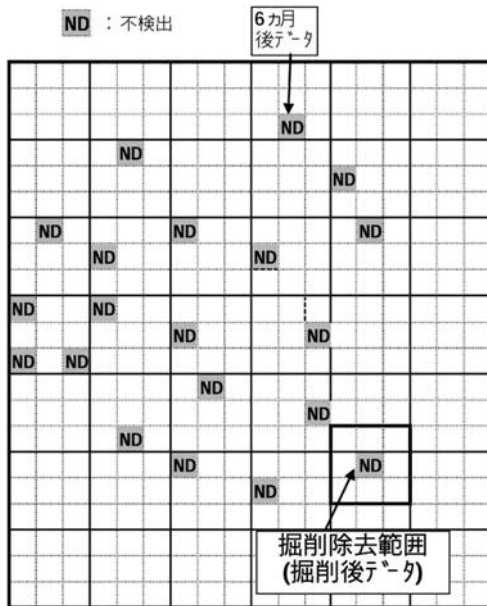
ジェットリプレイス工法，ジェットブレンド工法ともに現場実験を事前に実施し精度を確保するための施工スペックを決定した。表一2には実施工時の品質管理項目を示す。これらの品質管理項目を満足できなかった場合には，再施工等の方策をとるものとして施工を実施した。施工はほぼ3ヶ月にわたって実施され，その後のモニタリングにより，8ヵ月後には当該区域内の地下水濃度が環境基準値以下であることが確認された。図一8はそのデータの一部を示すものである。

6. おわりに

エンバイロジェット工法は，広範囲に広がった地下水汚染を短期間で浄化したり，透水性浄化壁を深部帯水層に対して部分的に構築することができるなどの長

表一 2 エンバイロジェット工法施工時の品質管理項目

| | 施工時 | 施工後 |
|-------------|--|---|
| ジェットリブレイス工法 | <ul style="list-style-type: none"> ・汚染スライムの性状 ・モルタル充填量 | <ul style="list-style-type: none"> ・コアサンプリングによる重量置換率 ・コアサンプリング土壌溶出値による浄化確認 |
| ジェットブレード工法 | <ul style="list-style-type: none"> ・施工速度 ・鉄粉濃度と噴出量 ・地盤中の鉄粉残置量 | <ul style="list-style-type: none"> ・コアサンプリングを用いた室内分解実験による有効鉄粉含有量の測定 ・観測井戸における濃度モニタリング |



図一 8 施工終了後 6 ヶ月経過時点の浄化状況

《参考文献》

- 1) 川端淳一・伊藤圭二郎・河合達司・上沢 進：「ウォータージェットを用いた汚染地盤の修復技術について」, 土と基礎, **50** [10], pp.25-27 (2002).
- 2) 伊藤圭二郎・川端淳一・河合達司・浜村 憲・上沢 進：「ジェットブレード工法による鉄粉のPCE汚染地盤への混合とその浄化効果について」, 第40回地盤工学研究発表会報文集 (2005).
- 3) 福浦 清・今田勝也・伊藤圭二郎・今立文雄・川端淳一：「混気ジェットポンプを用いたスラリー中のVOC処理」, 第9回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会講演集 (2003).
- 4) 川端淳一・伊藤圭二郎：「ウォータージェット工法を用いた地盤汚染浄化技術-エンバイロジェット工法-」, 基礎工 **33** [384] (2005).

[筆者紹介]



川端 淳一 (かわばた じゅんいち)
 鹿島建設株式会社 技術研究所
 土質・地盤環境グループ
 地盤環境チーム チーフ
 首席研究員



大島 博 (おおしま ひろし)
 鹿島建設株式会社 名古屋支店
 愛知南営業所 副所長



浦 満彦 (うら みつひろ)
 鹿島建設株式会社
 環境本部 次長

所と、汚染スライムの処理等の課題を持つ工法であるが、本報告においてはそれらの長所を生かし、課題を克服して現場適用する方法と事例を示した。今後はこの工法を用いる場合の設計方法、施工方法を標準化等を通じて、当該分野の社会的課題である原位置浄化によるコストダウンにさらに貢献したいと考えている。

J|C|MA