

(U8/13) 廃棄物不法投棄岩手県側サイトにおける VOC 複合汚染土壌の減圧ガス吸引法による浄化実証試験

○尾崎哲二¹・高橋裕幸¹・高橋慶吉¹・岡野英樹²・片桐章²・木幡剛¹
¹アサヒテクノ・²アステック東京

1. はじめに

岩手県二戸市の青森県田子町に接する県境部の不法投棄現場では、地上部の産業廃棄物の撤去が先行して進められ、続いて VOC（第一種特定有害物質）等により汚染された土壌の浄化工事が行われている。

今回、N地区東側のO地区に接する場所（図1参照）で減圧ガス吸引法（すっからかーん工法、以下SKK工法）によるVOC複合汚染土壌の浄化実証試験を実施した。90日間の浄化運転の結果、完全浄化には至らなかったものの良好な結果を示した。本稿は岩手県県境不法投棄現場において土壌汚染除去業務の一部として実施した上記試験業務の報告書を取りまとめたものである。

2. 対象地の概要

対象地は凝灰岩を基盤とし、十和田火山噴出物が厚く堆積する丘陵地である。試験を行った場所はN地区東側のO地区に接する丘陵頭部（標高EL450m）にあり、これより東側（O地区）に向かい緩やかに傾斜する。地層は地表から埋土、続いてローム、軽石、スコリアからなる火山噴出物、風化凝灰岩、凝灰岩の順に構成される。自然の地下水面は深度8m近傍に見られ、地下水は傾斜に沿い北東から南西に向かい流れていることが推定される。

対象地では多量のドラム缶が投棄されていたため、試験直前にそれらの撤去が行われた。ドラム缶の中には内容物のVOCが漏洩しているものがあり土壌、地下水が汚染されていた。ドラム缶撤去後の埋戻し土にはN地区同様の高濃度汚染の浄化傾向を確認する目的でその掘削汚染土を使用した。

ドラム缶の撤去にともなう汚染状況を踏まえ、試験対象地の面積は当初予定の20m×20m（4区画）からやや範囲を広げ東西22.4m×南北22.8m（面積510.7m²）とした。平面図を図2に、断面図を図3に示す。

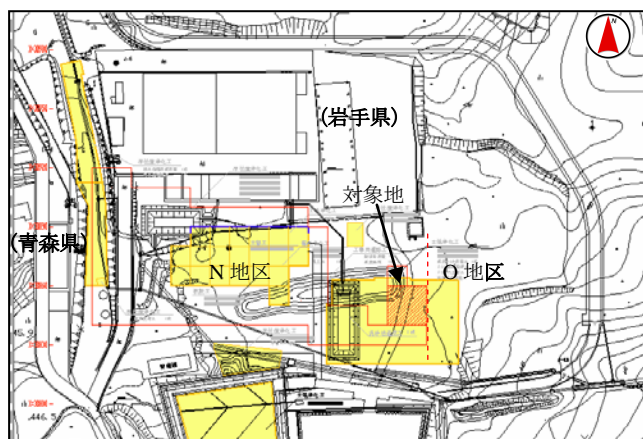


図1 実証試験の位置図

3. 汚染状況

ドラム缶の撤去、埋め戻し作業により汚染状況に変化が生じたため、浄化前に再度、土壌調査を行った。その結果について基準を超えた地下水、土壌溶出量の最高濃度を表1に示す。

汚染はVOCによるものであり4区画のすべてで確認された。土壌ではGL-1mからGL-12mまで汚染され、特に地下水面直下のGL-9m、-10mで顕著であり、全般に東側の区画SB11、MD6で高い濃度を示した。地下水汚染ではMD10において濃度が高かった。

表1 土壌調査の結果（最高濃度）mg/L

項目 (基準)	地下水濃度 (観測井戸)	土壌溶出量 (区画、深度)
ジクロロメタン DCM (0.02)	60 (MD10)	5.3 (SB11, GL-10m)
四塩化炭素 (0.002)	7.5 (MD2)	0.27 (MD-6, GL-10m)
1,2-ジクロロエタン (0.004)	0.76 (MD10)	0.037 (SB-11, GL-9m)
1,2-ジクロロエチレン (0.04)	0.085 (MD3)	
トリクロロエチレン TCE (0.03)	0.93 (MD8)	10 (SB-11, GL-10m)
テトラクロロエチレン PCE (0.01)	0.66 (MD8)	3.2 (SB-11, GL-10m)
ベンゼン Bz (0.01)	2.7 (MD10)	0.66 (SB-11, GL-10m)

4. SKK工法

4.1 工法の概要

SKK工法はVOC汚染土壌の原位置浄化工法であり、地下水を揚水して水面を下げ、水面上の地下空気を吸

Soil purification test at the voc contaminated area by SKK method in illegal disposal site of Iwate prefecture
 Tetsuji Ozaki¹, Hiroyuki Takahashi¹, Noriyoshi Takahashi¹, Hideki Okano², Akira Katagiri², Tsuyoshi Kohata¹

¹ASAHITECHNO CORP., ²ASTEC TOKYO Co., Ltd

連絡先: 〒132-0035 東京都江戸川区平井 5-11-8 サンヨーハイツ 401 (有) アサヒテクノ 東京営業所
 TEL 03-6913-9137 FAX 03-6913-9138 E-mail asahi_tokyo@apace.ocn.ne.jp / <http://www.asahitechno.jp/>

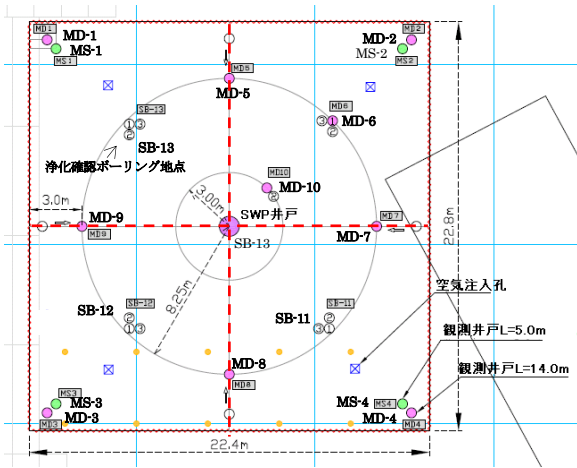


図2 実証試験の平面図

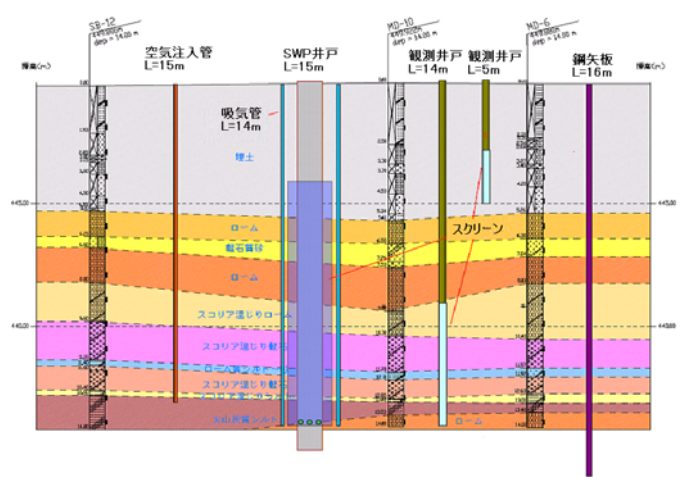


図3 地層および浄化設備模式断面図

引する工法である。これにより汚染地下水の回収とともに土壌中の汚染物質を揮発させ回収する¹⁾。

地下水の揚水には高い揚水能力を発揮する SWP 工法を用い、水位低下後の地下空気の回収には SWP 工法に装備の真空ポンプおよび新たに設置するブロアーを用いる。VOC は一般に蒸気圧が水より大きく揮発しやすい (25°C の場合、水 ; 3.2KPa、ジクロロメタン ; 58KPa、トリクロロエチレン ; 9.9kPa、テトラクロロエチレン ; 2.5KPa、ベンゼン ; 12.6KPa)²⁾。SKK 工法では地中の空気を吸引して減圧 (負圧) するため土壌中の VOC はさらに揮発しやすくなる。

4.2 浄化設備および観測井戸

対象地の中心部に SWP 井戸を設置した。井戸の口径は $\phi 550\text{mm}$ であり、パーカションボーリングマシンにより掘削した。井戸管の口径は $\phi 400\text{mm}$ ($t=7.9\text{mm}$) であり、井戸長は $L=15\text{m}$ 、スクリーンは分離型で $L=10\text{m}$ (GL-4m~GL-14m) とした。井戸管脇に $\phi 30\text{mm}$ の吸気管 ($L=14\text{m}$) を 2 本設置し、ブロアーに接続した。水中ポンプ、真空ポンプは 11kw のものを、ブロアーは当初 3.7kw のものを用いたが、のち 11kw に変更した。

現地プラントを対象地の近傍に設置した。現地プラントは回収する排ガスの処理と地下水の濁りの低減を目的に設置したもので、汚染地下水は濁りを低減させたのち既存の水処理プラントで処理した。真空ポンプの運転に必要な清浄水には既存の水処理プラントの処理水を用いた。

対象地への外部からの汚染水の流入を防止し、減圧の効果を高めるため周辺を鋼矢板 (Ⅲ型、深度 16m) で囲った。また、地中への空気侵入を防止するため地表部をシートで覆った。

地下水位、地下空気圧、地下水採水および地下空気採取を目的に観測井戸を設置した。井戸径を $\phi 50\text{mm}$ とし、深い井戸 ($L=14\text{m}$) を 10 本、浅い井戸 ($L=5\text{m}$) を 5 本設けた。

5. 浄化運転

浄化設備の設置後、洗浄工につづき浄化運転を行った。

洗浄工では SWP 井戸から洗浄水 (約 $10\text{m}^3/\text{回}$) を注入したのち圧縮空気を注入し、その後揚水する。この作業を 1 日数回繰り返す、計 20 日間行った。この洗浄作業により井戸周辺の浮遊するシルトなどの小さな粒子を除去し通水性をよくした。同時に井戸周辺の高濃度の VOC を除去した。

浄化運転では揚水して地下水面を低下させたのち真空ポンプに加えてブロアーを稼働させ地下空気を回収した。浄化運転は中間の浄化確認のボーリング作業を挟み 2 期間 (浄化 1、浄化 2) に分けた。浄化 1、浄化 2 とともに浄化期間は 45 日間 (浄化確認ボーリング期間含む) であり、全体で 90 日間であった。

今回、浄化運転開始後、地下空気の圧力 (減圧) が予想よりも小さい (後述) ことが確認された。そこで、地表部の空気遮断効果を高める措置を講じた。鋼矢板の内側と地山との隙間には凹部を設け高分子ポリマーに水を含ませ充填した。SWP 井戸周辺部には井戸を中心とする $3\text{m} \times 3\text{m} \times 0.3\text{m}$ (深さ) の範囲にコンクリートを打設した。シートの重ね箇所や観測井戸周りの隙間に対してはシート上に水を張り、空気侵入の防止を図った。また、すべての観測井戸の頭部より地下空気を 3.7kw のブロアーにより吸引し、井戸管脇の吸気管から吸引するブロアーを 3.7kw から 11.0kw に変更し減圧の効果を高めた。

その他、各区画にそれぞれ 1 本 (計 4 本) の空気注入管を設置した。これはボーリング用のロッド ($\phi 43\text{mm}$) を用いたもので、GL-13m まで打ち込み下端を開放し圧縮空気を注入した。コンプレッサーは 190HP のものを使用した。この作業を浄化 2 の期間の昼間だけ実施した。

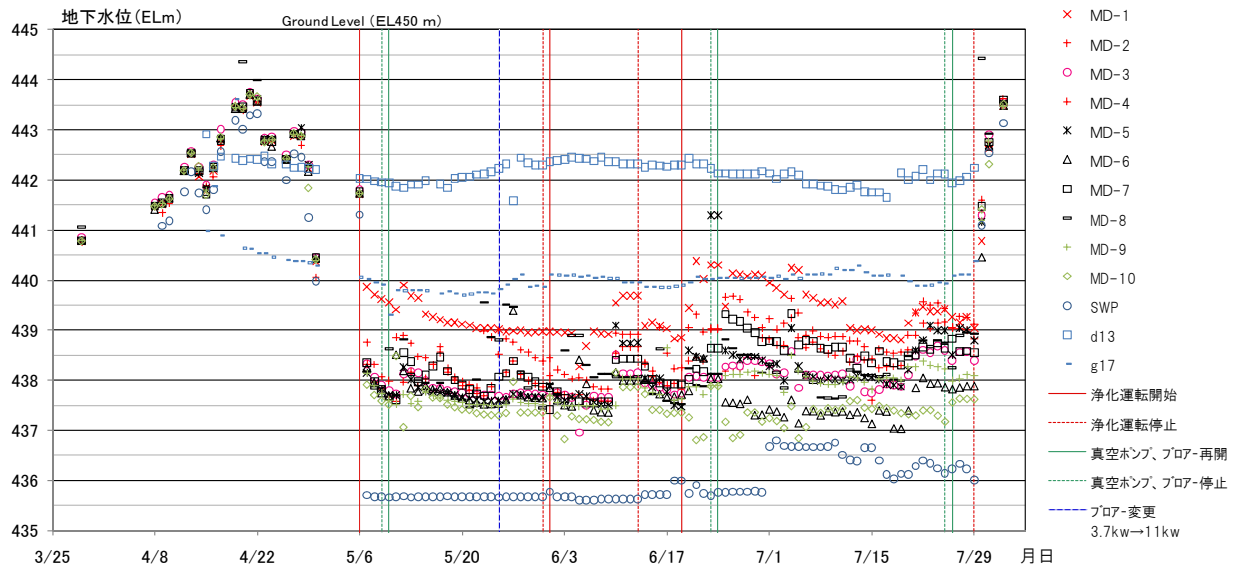


図4 地下水位

6. モニタリング

6.1 モニタリング項目

モニタリングでは地下水、地下空気に係る物理量および濃度を測定した。

物理量では揚水量（量水計）、真空ポンプおよびブロアーによる回収空気量（マスフロー型流量計）、地下水位（手計り）および地下空気圧（差圧計）を1回/作業日の頻度で測定した。

濃度については、揚水する地下水のVOC11項目をPIDにより分析した（13回）。同時にpH、DO、COD、導電率およびSSを測定した（12～13回）。真空ポンプにより回収する空気についてはPIDによりVOC11項目の分析（14回）を、検知管によりBz、DCM、TCEおよびPCEを測定（27回）し、ブロアーにより回収する空気においてはBz、DCM、TCEおよびPCEを検知管により測定（30回）した。

観測井戸（深井戸）の地下水ではPIDによりVOC11項目の分析（5回）を、地下空気では同様にPIDによりVOC11項目の分析を深井戸（4回）および浅井戸（3回）で分析した。また、対象地外の観測井戸（10本）の地下水をPIDによりVOC11項目を分析（1～2回）した。

活性炭槽から排出される処理ガスについてはBz、DCM、TCEおよびPCEを検知管により測定（40回）した。処理プラントの処理水についてはSSおよびCODをPIDにより分析（1回）した。

6.2 モニタリング結果

1) 物理量

(1)地下水位

地下水位のグラフを図4に示す。図4の3月29日の水位は観測井戸設置時の洗浄後のものであり自然水位と考えられる。同様に対象地北側に設置のd-13では442.5m、南側に設置のg-17では441.0mが自然水位と判断される。4月8日から揚水を開始した5月6日までの期間は洗浄期間であり、5月6日の水位は洗浄の影響を受け自然水位よりやや高くなっている。

揚水開始後、地下水位は急速に低下する。しかし外部のd-13では大きな変化がなく、g-17では当初1m程の低下があるが、その後に大きな変化がない。鋼矢板外の水位が大きく低下しない現象は本工法の特徴である。

MD-1～MD-10の地下水位は概ね目標値であったEL439m（GL-11m）以下まで低下している。このうち比較的水位の高い観測井戸はMD-1である。運転を開始してから6月10日までは低下しつづけEL439mに至る。しかし、6月9日から11日までの観測井戸の洗浄や6月23日からの圧縮空気注入の影響を受け、水位は変動してEL439mを超える日が多い。この原因としてこの井戸近傍の鋼矢板からの地下水の流入が考えられる。

(2)地下空気圧

空気圧は毎朝、差圧計により深い井戸（10本）および浅い井戸（4本）で測定した。当初、減圧が予想よりも小さかったためブロアーを3.7kwから11kwのものに変更し、地表部の空気遮断措置を講じた。その結果、深い井戸では-2.5～-4.5KPaまで、浅い井戸では-1.0～-2.0KPa（MS-4では-4KPa）までの減圧が進んだ。

対象地では自然地下水位がGL-8m近傍にあり不飽和層が厚い。その不飽和層部の鋼矢板のセクションから多量の空気が入り込み、空気圧の低下の支障になった可能性が高い。

(3) 揚水量

地下水の揚水量は毎朝、量水計（揚水配管に設置）の累積量を読み取った。

図5に揚水量のグラフを示す。

最終的な累積揚水量は1690.3m³であった。シートに水を張った期間が70日間、毎日3m³程の水が地盤に浸透していたと推定されるから計210m³であり、これを差し引くと1480.3m³である。これを運転期間80日間で割ると日平均揚水量として18.5m³が算出される。

地下水位がEL441.7mからEL438mまで3.7m低下したとすれば、その深度分の帯水層の体積は1889.6m³である（面積510.7m²）。有功間隙率を0.1とすれば189m³が地下水量となる。累積揚水量1480.3m³はこの量の7.8倍である。有功間隙率が0.2であれば3.9倍である。この数値は鋼矢板内部の地下水の少なくとも2倍以上の地下水が外部から浸透したことを示している。浸透した主要な場所としてMD-1の観測井戸近傍の鋼矢板が考えられる。この地下水の浸透が地下水位低下に支障を与えた可能性も考えられるが、本工法がそれにもかかわらず水位低下を図ったとも言える。

(4) 回収空気量

回収空気量は毎朝、マスフロー型の流量計により測定した。測定される1分間の流量を1440倍（60分/時間×24時間）して、その日の日空気吸引量とした。

図6にブローアにより回収した日空気回収量と累積の空気回収量のグラフを示す。5月25日の前後の変化はブローアを3.7kwから11kwに変更したことや各種の作業を実施した時期であり地表からの空気侵入が増加したことによるものと考えられる。

真空ポンプの場合、当初の回収空気量は1440m³/日（1.0m³/min）であったがブローアの機種変更にとまない3850m³/日（2.6m³/min）となり、その後もこのレベルで推移した。

2)濃度

(1)地下水の濃度

井戸（MD1～MD10）で基準を超えた項目のすべてで濃度は低下し、MD-1～MD-4 およびMD-9の5本では最終的に11項目すべてにおいて基準を満足した。しかしMD-5、6、7、8および10の5本では一部の項目で基準を超えた。ここではすべての項目で最終的に基準以下になったMD-4と3項目が基準を超えたMD-10のVOC4項目の濃度変化を図7、図8に示す。

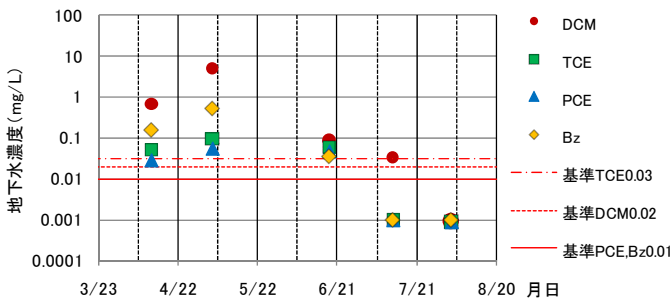


図7 地下水濃度 (MD-4)

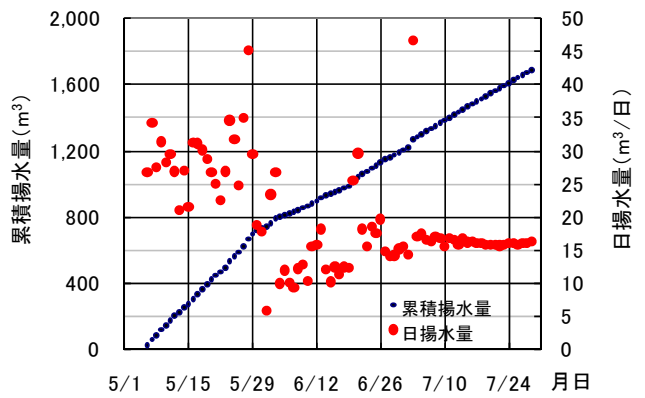


図5 揚水量

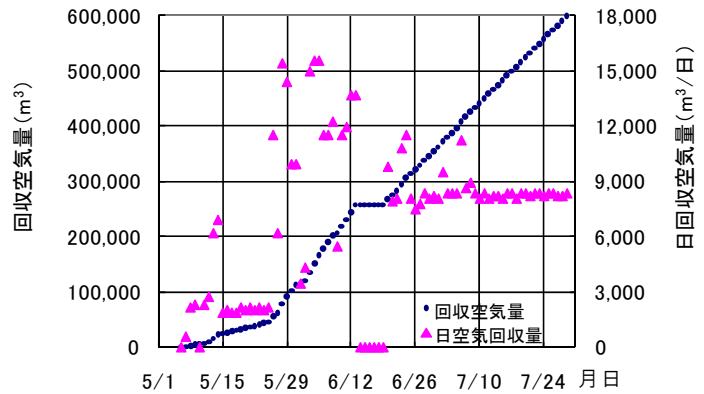


図6 回収空気量 (ブローア)

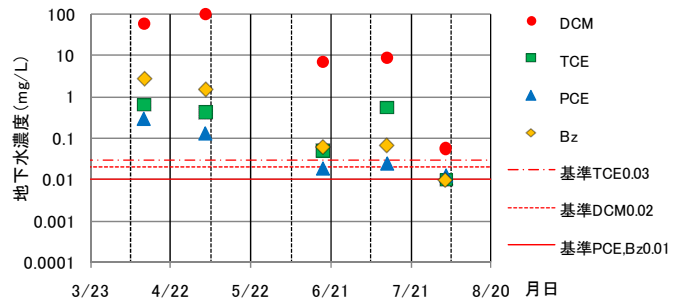


図8 地下水濃度(MD-10)

(2)回収空気の濃度

真空ポンプおよびブロアーで回収した空気の濃度（4項目）を検知管で測定した。このうちブロアーのものを図9に示す。ただし、圧縮空気の注入期間中には、この作業前に測定している。

図9より6月30日にDCMの濃度が大きく上昇している。これは6月23日から圧縮空気を注入した影響が考えられる。この影響はTCE、PCEの濃度にもあった可能性がある。

5月8日から5月24日までの初期の期間には高濃度のデータとともにDCM、PCEでは低濃度の0.3ppmのデータがある。6月3日以降、2ppmを超える高濃度ばかりの空気が回収される。しかし7月16日をさかいにまた濃度は次第に低下しPCEでは7月26日から1ppmに低下する。この濃度の変化は次のように考察される。

もともと汚染にはバラツキがあり、本件においても同様に考えられる。そのため運転初期には汚染されていない空気を吸引する可能性がある。DCM、PCEの0.3ppmのデータはそのような空気と考えられる。しかし、時間の経過とともに井戸周辺に汚染物質が濃縮するため低濃度の空気は吸引されにくくなる。2ppmを超える高濃度の空気がそれを示している。しかし、汚染物質の回収が進めば井戸周辺の汚染物質の濃度が低下し、回収する空気の濃度も低下する。これがPCEの1ppmのデータと考えられる。以上のメカニズムは容易に考えられるものであり、7月16日以降の濃度低下は浄化が最終局面にあったことを示している。

真空ポンプの濃度の変化も基本的にはブロアーと同様であった。ただし、真空ポンプでは井戸管内の地下水から揮発するVOCも吸引しており、ブロアーに比べ濃度の変化が大きかった。

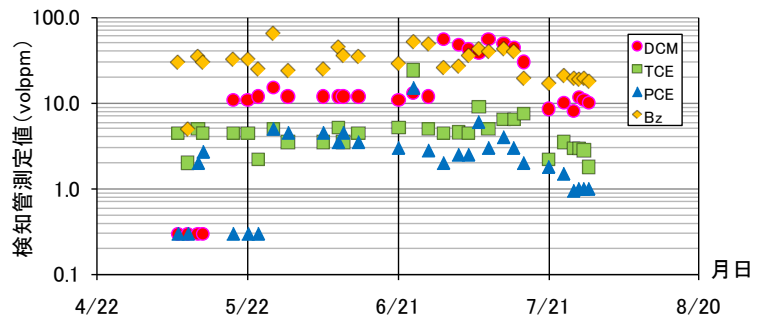


図9 回収空気の濃度（ブロアー）

7. 浄化確認

4区画の各中心部をボーリングして1mピッチに土壌を採取し、PIDにより土壌溶出量を分析した（一部公定法）。ボーリングの深度は14mであり、土壌採取は浄化前、浄化中、浄化後の3回実施した。表2に浄化後に基準を超えた深度、項目および濃度を示す。このうち、SB-11のジクロロメタン、SB-13のベンゼンの土壌溶出量を図10、図11に示す。

表2より、いずれも不飽和層の軽微な汚染である。このうちSB-11、SB-12ではテトラクロロエチレンのみが基準を超えている。この原因としてテトラクロロエチレンの蒸気圧が2.5Kpa（25℃）と水（3.2KPa）より小さく、比較的揮発しにくい物質であることが考えられる。

表2 浄化確認結果

項目	深度；濃度（基準）	単位 mg/L
MD6	汚染なし	
SB-11	深度-2m；テトラクロエチレン 0.032（0.01）	
SB-12	深度-4m；テトラクロエチレン 0.043（0.01） 深度-6m；テトラクロエチレン 0.031(0.01)	
SB-13	深度-5m；1,2-ジクロロエタン 0.008（0.004） 深度-7m；ベンゼン 0.021（0.01）	

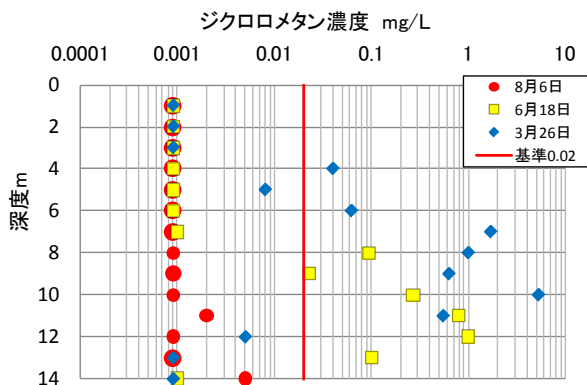


図10 土壌溶出量 SB-11

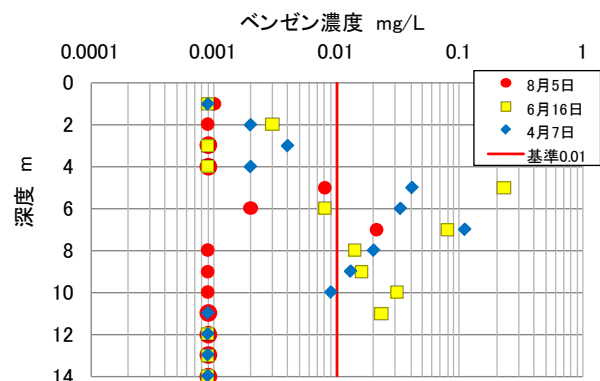


図11 土壌溶出量 SB-13

SWP 井戸近傍の観測井戸 MD10 でも浄化前および浄化後に土壌を採取して土壌溶出量を分析した。基準を超えた項目、深度および濃度を表 3 に示す。また、ジクロロメタンおよびベンゼンの深度毎の濃度変化を図 1 2、図 1 3 に示す。

表 3 基準超過地点 (MD-10)

項目 (基準)	深度 ; 濃度	単位 mg/L
ジクロロメタン (0.02mg/L)	深度-6m ; 0.064mg/L、-8m ; 0.095mg/L、-11m ; 0.096 mg/L	
四塩化炭素 (0.002 mg/L)	深度-8m 0.01mg/L、-9m 0.008mg/L	
1,2-ジクロロエタン (0.004 mg/L)	深度-6m 0.009mg/L、-8m 0.01mg/L、-11m 0.01mg/L、-13m 0.005mg/L	
トリクロロエチレン (0.03 mg/L)	深度-6m 0.032mg/L	
テトラクロロエチレン (0.01 mg/L)	深度-6m 0.021mg/L、-8m 0.051mg/L、-9m 0.02mg/L	
ベンゼン (0.01 mg/L)	深度-6m 0.013mg/L、-8m 0.017mg/L	

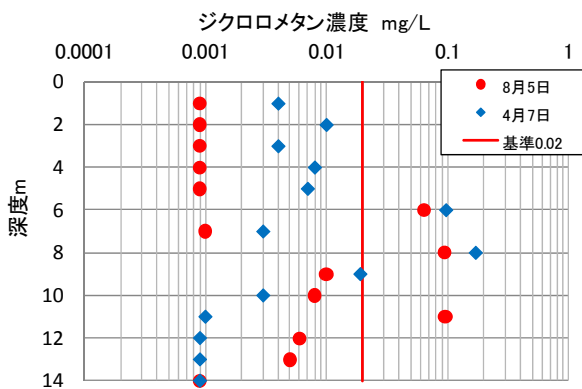


図 12 土壌溶出量 (MD-10)

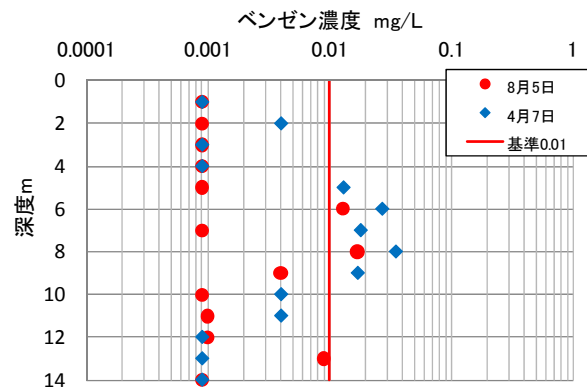


図 13 土壌溶出量 (MD-10)

表 3、図 12、13 より MD-10 では GL-9m より浅い深度で濃度は低下したが GL-10mより深い深度では濃度が上昇し、GL-6mより深い深度でのみ基準超過があったとまとめられる。

この状況は前述した浄化確認の地点と異なり飽和帯に近い不飽和帯と飽和帯において汚染が残ったもので、特に当初NDであった深い飽和帯での汚染はSWP井戸に向かって流れ込む汚染した地下水によって汚染されたものと推察される。しかし、これは一時的な状況であり、もともと汚染された飽和帯の土壌が浄化されたことと同様に浄化の継続(45日間程度)により汚染物質は回収されたものと考えられる。

不飽和帯においては初期の汚染は浄化された、あるいは浄化傾向にあったと考察されるが、飽和帯と同様に浄化運転の継続により浄化は可能だったと考えられる。

8. まとめ

① 浄化すなわち汚染物質の回収は十分なスピードをもって進んだ。ただし、地下水および不飽和帯の一部に軽微な汚染が残り、SWP井戸近傍のMD-10では飽和帯を中心に土壌汚染が残留した。

この工法では地中の汚染物質を地下水と地下空気によりSWP井戸から回収する仕組みである。したがって浄化中、一時的にSWP井戸近傍で濃度が高まることあり得る。今回の汚染の残留はその一時的なものであり、残留する汚染は浄化運転の継続によって浄化できたものと考えられる。

② 鋼矢板外からの地下水の浸透量と地下空気の侵入量が大きかった。地下水では特にMD-1近傍の鋼矢板からの浸透が考えられた。空気侵入については不飽和層の空気が鋼矢板を介して侵入したことが推定された。前者では地下水位低下に支障のあった可能性が、後者では減圧不足により浄化能力が低下した可能性が考えられる。

謝辞：岩手県環境生活部の菊池恭志主査、ライト工業・東興ジオテック特定共同企業体の高橋照人所長には実証試験の全般にわたりお世話になりました。また、(株)アステックの宮西賢一氏、(有)アサヒテクノ盛岡営業所の松村八重子氏には本稿の作成に協力していただきました。ここに記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 尾崎哲二、高橋裕幸、高田史朗、内海太陽、丸山悠、小西正郎 (2009) : 地下水揚水および地下空気吸引による油汚染サイトの浄化事例、第15回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会、pp81-86
- 2) 環境省ホームページ、化学物質の環境リスク評価 第2巻 (平成15年3月 環境リスク評価室) より