土壌汚染現場で行われた原位置浄化対策の地下水モニタリングによる効果検証

椎根 大　髙橋 真子*　星 純也　吉川 光英**　上野 孝司
(*非常勤研究員　**東京都福祉保健局)

要　旨

平成 21 年に、土壌汚染対策法の改正が行われたことから、汚染土壌を区域外にて処理するいわゆる「掘削除去」の代わりに、土壌の掘削を伴わない原位置浄化や土壌の掘削を伴うオンサイト浄化等の「区域内措置」の採用が進むことが推察された。そこで、ジクロロメタン（DCM）による土壌汚染が確認された現場において、飽和帯に空気を注入して地下水から DCM の揮発を促進させるエアースパージング法と上部において揮散ガス捕集する土壌ガス吸引法を組み合わせた原位置抽出工法を適用し、長期間の地下水モニタリングを行い浄化の進行状態を確認することを試みた。初期実証試験（平成 22 年 12 月～平成 23 年 2 月）の設備を用いて浄化施工を行った期間（平成 23 年 3 月～平成 24 年 3 月）は、地下水の DCM 濃度が下げ止まり、浄化効果が限定的であった。その後、スパージング井戸を追加して浄化施工を行った（平成 24 年 7 月～平成 25 年 3 月）ところ、所定の区画における地下水の DCM 度が継続して環境基準以下となることを確認した。また、浄化が効果的に行われているかどうかを判断するには、汚染物質の濃度推移だけではなく、地下水位、温度、pH、導電率等の汚染物質以外の環境指標をモニタリングして総合的に検討することが大事であることが示唆された。原位置浄化は長期間を要するが、浄化施工とセットで地下水モニタリングによる監視を適切に行うことにより、汚染物質を着実に取り除くことが可能であることが判明した。

キーワード：土壌汚染、土壌汚染対策法、ジクロロメタン、原位置浄化

1　はじめに

東京都内で行われている土壌汚染対策は、汚染除去等の措置内容として掘削除去を選択するものが多く、その割合は実に 90%以上（平成 15 年 4 月 1 日から平成 21 年 3 月 31 日までの区部における条例第 116・117 条の届出数）に及んでいた [1)]。また全国における汚染の除去等の措置の内容で掘削除去が選択された事例の割合も、80%弱（平成 15 年 2 月 15 日から平成 21 年 3 月 31 日までの累計件数）となっていた [2)]。掘削除去が偏重された結果、汚染土壌の搬出経路や処理方法等が不明となるケースが多く発生し、不適正な処理の事例も各自治体に報告された [3)]。つまり措置を行うことにより、汚染している場所の増加に繋がるリスクが大きくなる可能性があった。そこで環境省は、「掘削除去の撲滅 [4)]」を狙い、平成 21 年に土壌汚染対策法（土対法）の法改正を行った。土対法の改正を受け、掘削除去の代わりに、原位置浄化や、オンサイト浄化等の「区域内措置」が採用されるケースが増えると考えられた。

一方、区域内措置は事例数が少なく、様々な工法の開発が乱立している様子も見られたため、東京都において区域内措置の普及を促進させるには、原位置浄化工法等の適用可能性を詳細に把握することが必要であると考えられた。そこで平成 22 年度には、原位置浄化工法による対策の適用性について初期実証試験が行われた [5)]。

今回の報告は、初期実証試験に引き続き、汚染対策が継続して実施された事例に関するものである。調査では、長期間に渡って現場地下水のモニタリングを行うことにより、浄化の度合いを確認することを試みた。

2　汚染対策の状況

(1)　汚染対策の初期実証試験

対象サイトは、都臨海域の昭和 40 年代後半に造成された正規型の埋立造成地 [6)]に位置している。平成 20 年 2 月に行った土対法に則した調査の結果、3 箇所の単位区画においてジクロロメタン（DCM：土壌溶出量基準・地下水環境基準、共に 0.02mg/L 以下）の土壌溶出量基

準超過があった[7]。DCM の土壌溶出量超過は、表面の覆土層及び湾内浚渫によって生じた浚渫土（粘性土・砂質土混合）で構成された層内（GL-7m まで）に留まっており、GL-10m 前後[6]に位置する下位の最上沖積層上部には達していなかった。また、区域の指定を受けなかった単位区画の地下水においても 0.026mg/L（平成 21 年 12 月採取）の DCM 濃度を示した場所があり、地下水が環境基準を超過している平面範囲は、土壌の環境基準超過範囲よりも広い可能性があった。

土壌溶出量基準超過があった、単位区画 3 箇所における土壌汚染の部分を浄化の対象（対策範囲）とし、平成 22 年に原位置浄化工法の選定が行われた。費用・効果・浄化設備設置の要件（建屋を倉庫として継続利用すること）等の条件を組み合わせた検討の結果、エアースパージングと土壌ガス吸引法を組み合わせた原位置抽出工法が選定され、初期実証試験（平成 22 年 12 月～平成 23 年 2 月）が行われた。エアースパージングとは、地下（土壌中あるいは地下水中）に圧力をかけた空気を注入して VOC の気化を促し、土壌の浄化を促進する技術である。初期工事としてエアースパージング兼用土壌ガス吸引井戸 5 カ所（S1~S5）・土壌ガス吸引井戸 6 カ所（V1~V6）を設置した。各井戸の配置は図 1 に示した。約 2 ヶ月間エアースパージングを継続した結果、吸引ガス中の DCM 濃度の上昇が見られると同時に、浄化開始 2.5 ヶ月後にボーリング調査を行った結果において、DCM の土壌溶出量に変化が見られたことから、汚染物質の回収が進んだと判断された[7]。

(2)　浄化対策の経過

初期実証試験により、地盤から DCM の回収が促進されたことが確認されたため、設備を継続使用した浄化対策を行うこととした（平成 23 年 3 月～平成 24 年 3 月：第 1 期対策期間）。平成 24 年 3 月に対策を一旦停止し、浄化促進を図るためのエアースパージンング井戸 3 箇所（SA1, SA2, SB1）とモニタリング井戸 2 箇所（MWA, MWB）を増設し、エアースパージングを計 8 箇所から行う設計と変更した（平成 24 年 7 月～平成 25 年 3 月：第 2 期対策期間）。追加井戸の配置は、図 1 に示した。

(3)　モニタリング

本工法による浄化の効果を把握するため、浄化対策と併せて地下水のモニタリングを実施した。地下水の採水は、第 1 期対策期間は既設のモニタリング井 4 カ所（MW1, MW2, MW3, MW4）から、第 2 期対策期間は新設したモニタリング井 2 カ所（MWA, MWB）を加えた計 6 カ所から行った。モニタリングの項目は DCM 濃度・地下水温・pH・導電率・地下水位の 5 項目とした。地下水の採取に際しては、土対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）「Appendix-7. 地下水試料採取方法」に則り、前日にエアースパージングを停止し、採水直前に井戸管内の地下水の 4 倍量をパージした。パージ及びサンプリングにはベーラーを用いた。採取した地下水は、ガラス製容器を満水にして保管し、保冷しながら実験室に持ち帰った。DCM の分析は、環境省告示第 17 号に則り、当日中にヘッドスペースガスクロマトグラフ質量分析計（Agilent Technologies 社）により行った。pH・地下水温・導電率・地下水位の測定は、サイトにて地下水から DCM 測定用サンプルを分取する際の余剰水に対して、簡易測定器を用いて行った。

３　結果と考察

(1)　地下水モニタリング結果

本サイトの汚染物質である、地下水の DCM 濃度の推移を図 2 に示す。モニタリングの結果、対策範囲内に位置する、MW1, MW2 における地下水 DCM 濃度は、第 1 期対策開始後すぐに DCM 地下水基準である 0.02mg/L 以下に減少したが、その後濃度が上昇した。また、平成 23 年 6 月から 10 月にかけては、ゆっくりと減少する様子も見られた。平成 23 年 11 月以降は、再度上昇し DCM 地下水基準を超過する状況となり、対策の効果が顕著に現れにくい状態に陥った。一方、対策範囲外に位置する MW3 井戸の地下水 DCM 濃度は、対策開始後すぐに上昇し、その最大値は平成 23 年 5 月における 0.422mg/L であった。また、MW4 井戸の地下水 DCM 濃度は、対策直後から濃度が高い状況が続き、平成 23 年 3 月で 0.350 mg/L、平成 23 年 11 月で 0.375mg/L であった。平成 23 年 12 月以降は両井戸とも減少に転ずる傾向が見られたが、その後 3 月には対策前の値に近い状況にまで上昇した。平成 24 年 7 月のモニタリング時には、DCM 濃度は全ての既存井戸において第一期終了後に比べて大きく上昇した。また、新設の MWA, MWB においても、既存井戸とほぼ同じ値（約 0.1-0.4mg/L）であった。

第 2 期対策期間開始後は、対策範囲内に位置する全井戸の地下水 DCM 濃度に低下傾向が顕著に表れ、平成 24

年9月以降指定区域となっている3箇所の単位区画に存在するモニタリング井戸の地下水DCM濃度は、基準値を満足する状態が続いている。また、対策範囲外に位置するMW3井戸の地下水DCM濃度は、平成24年12月に大きく減少する様子が見られた。平成25年1月以降は、濃度の上昇が起きている。一方、MW4では平成24年9月と12月に大きく減少する様子が見られたが、以後は上下を繰り返している。

次に、対策の指標項目である地下水位・地下水温・pH・導電率を図3 に示す。水位の値は、各井戸水面までの深度を、MWBの管頭を基準にした深度に補正した。地下水位は、第1期対策期間ではMW1とMW2において乱高下が目立ち、特にMW2で激しく変動した。MW3とMW4には大きな変動は現れていない。

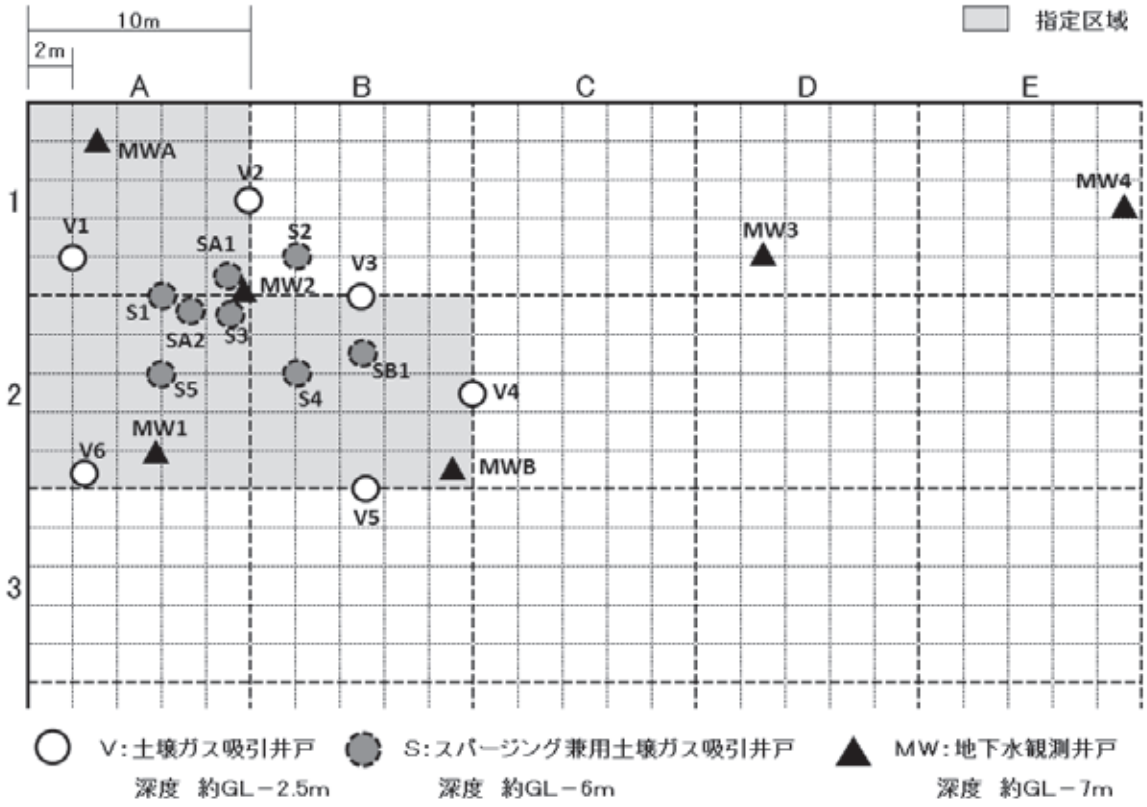

図1 サイト井戸位置図

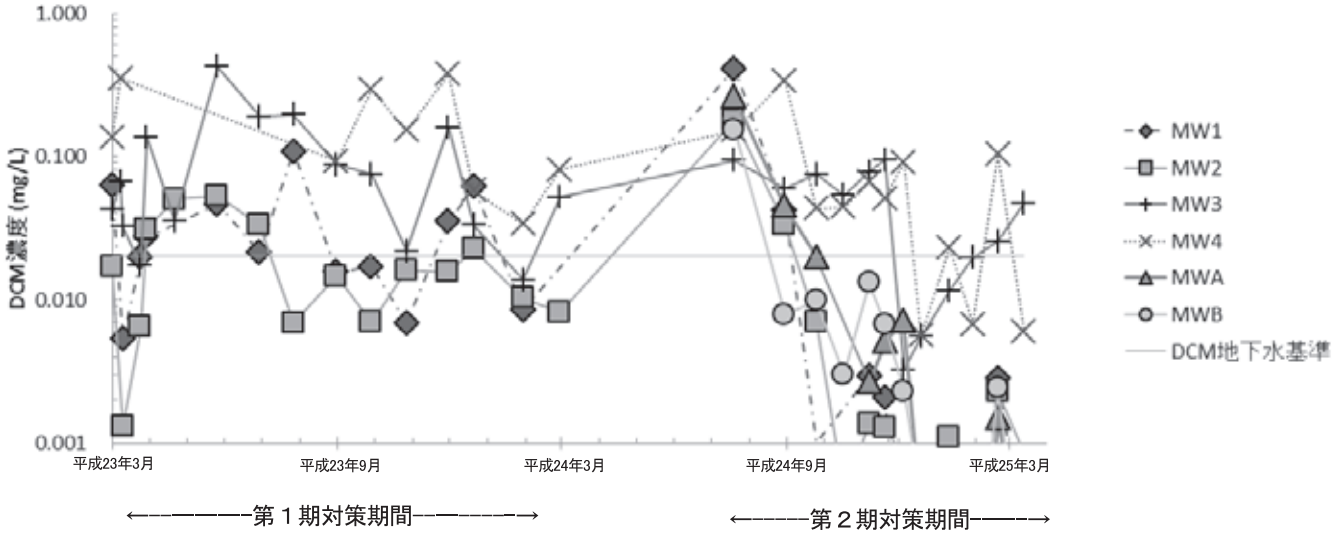

図2 サイト地下水のDCM濃度推移

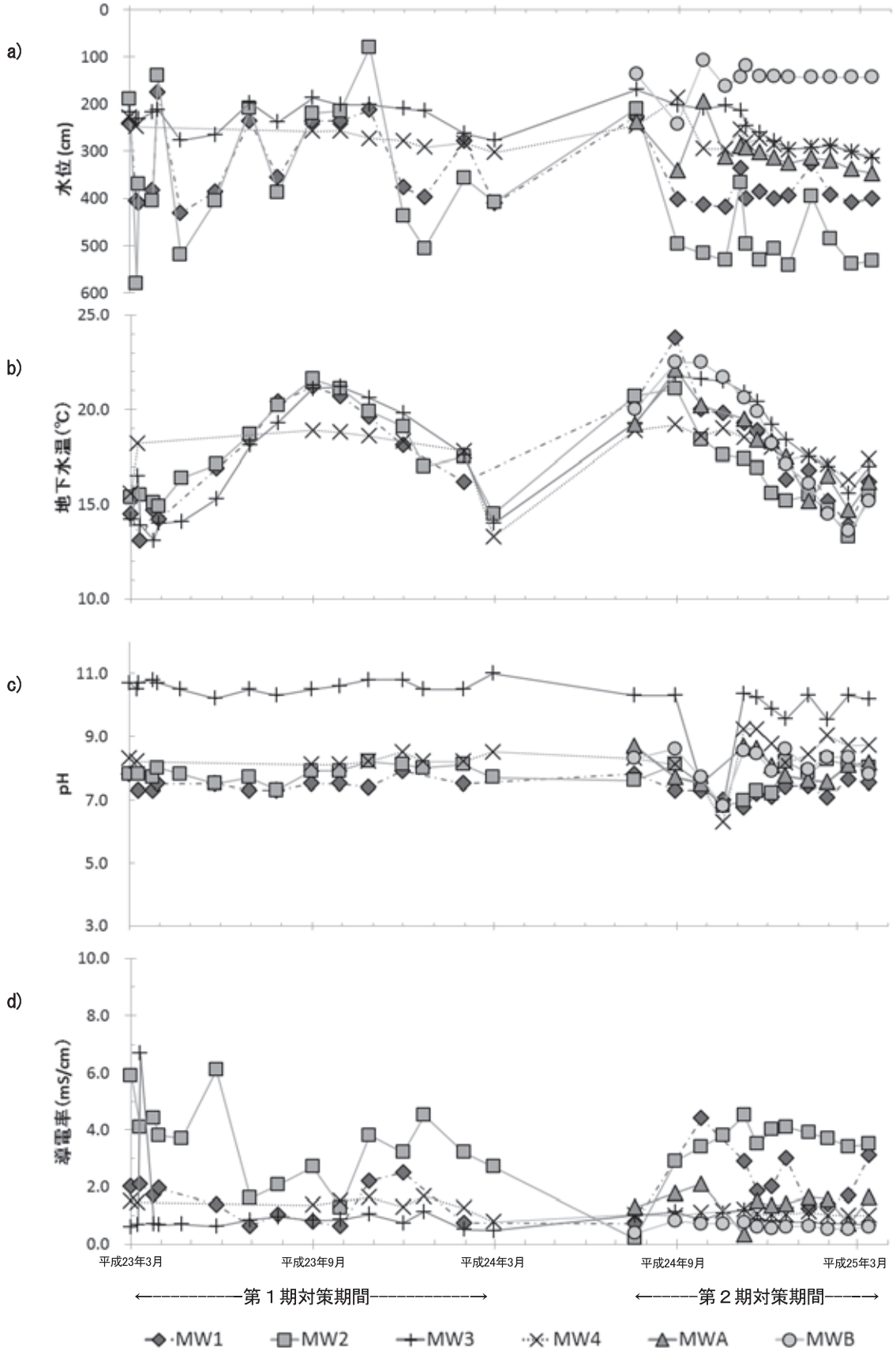

図３　サイト地下水の環境指標項目の推移

a)地下水位、b)地下水温、c)pH、d)導電率

第 2 期対策期間開始後の水位は、MW1 よりも、MW2 の値が一段と低くなっており、それぞれ低い水準を維持して同じような変動をしていた。採水時にも MW1, MW2 や MWA で水位が低くパージや採水自体が困難な時があった。一方、MW3 と MW4 はほぼ同じ値となっており、その変動は MWA とも同様であった。MWB は他の井戸から独立した形で最高水位を保ったままであった。

地下水温は、夏に高く冬に低くなるといった変動が全ての井戸で見られた。3 月に最低値、9 月に最高値を取っており、その差は 10℃ほどであった。

地下水の pH は、MW3 を除く全ての井戸が、全期間を通して 8 前後の値を保っていた。一方、MW3 は 11 弱の値を推移し、平成 24 年の 10・11 月のみ、他の井戸と同様な値となった。

地下水の導電率は MW1, MW2 で値が大きく変動する様子が見られ、MW2 でより高い値を示した。第 2 期開始後の MW2 は、約 4mS/cm を維持する結果となった。他の井戸は全期間を通してほぼ 1.5mS/cm 前後の値であった。

(2) モニタリング結果の考察

地下水温の変動は、外気の影響を受けた季節変動によるものとみられる。よって、モニタリングしている地下水は表層付近に存在する宙水であると考えられた。また、当サイトのような狭隘な範囲においても、井戸によって地下水温度に 1~2℃の差が常に同じ井戸で示されることから、太陽熱その他の熱源影響の特徴が井戸ごとに出ていると考えられた。このことは、全体的に地盤の均質性が低く地下水の流動が少ない、埋立地の状況を示しており、不均一な地層のためにエアースパージングによる空気の均一な吹込みを行うことが難しいと思われた。同じく平成 23 年の 8 月から第 1 期終了時までの MW1, MW2 井戸で、DCM 濃度の低下傾向が現れにくい状況になっていたが、これは、不均一な地盤にエアースパージングを連続運転し続けることにより、注入した空気の選択的通り道が地層中にできてしまい、付近の地層を乱し、吸引井や観測井内に砂を押し出して、汚染物質の回収効率が低下するといった状況[7]が起きたことによると考えられた。

pH は、MW3 の地下水が他に比べて高い値を示していたが、このことは WM3 の付近に pH を高くさせる構造物または影響物が存在している可能性が考えられた。平成 24 年 12 月以降に MW4 の pH が pH9 前後に上がり、MW3 付近の地下水が拡散した可能性が懸念された。平成 24 年 10 月頃に見られる MW3 の下向きの一時的な上昇は、その前後に行われた井戸洗浄に用いた水道水の影響を示したものと考えられた。

導電率の値は、一般的な海水の値（50 mS/cm 程度）に比べて低いものであるため、得られた地下水は、ほぼ雨水由来の表層水であると思われた。埋立地であるが、表層部は、海水流入等の影響も小さいと思われた。導電率の小さな変化はスパージングによる地下水の擾乱を示していると考えられた。

MW1, MW2 に観られた地下水面の低下は、エアースパージングの圧力によって、地下水が押し出された結果によって起きていると考えられた。一方、MW3, MW4 と MWA の水位変動は、離れた位置で同じような変化が見て取れたため、サイトの平均地下水位変動を表しており、その理由は季節変動等が原因であると考えられた。よって、モニタリング井戸は MW1, MW2（エアースパージングの圧力が水位の変動に直接的な影響を及ぼした）グループと MW3, MW4, MWA と MWB（エアースパージングが水位の変動に影響を及ぼさない）グループの 2 つのグループに分けることができ、スパージングの直接的な影響範囲もガス吸引井に囲まれた範囲に限定されていたと見ることができる。一方、第 1 期対策期間では、MW1, MW2 の地下水位が下がった時期に MW3, MW4 の地下水 DCM 濃度が上下している様子も見られた。これは対策の対象範囲から押し流された地下水が、周囲に影響を及ぼしたと考えられた。エアースパージングを行うと、一般的にはスパージング箇所付近の地下水面が上昇する可能性があると考えられている[9]が、本施工においては逆の現象が起きており、エアースパージングの圧力によって、エアースパージング井戸付近の地下水が周囲に押し流され、ガス吸引井に囲まれた範囲外に位置する井戸の地下水 DCM 濃度に影響を及ぼしたのではないかと考えられた。第 1 期対策期間と第 2 期間対策期間に起きた DCM 濃度の上昇や、平成 24 年 12 月以降の MW3, MW4 に見られる DCM 濃度の上昇は、いわゆる「リバウンド[10]」状態であり、初期の調査で土壌の溶出量値が環境基準以下であったため、その原因は付近の土壌からの再溶出によるものでは無く、汚染が残ったま

まの周囲の地下水が再度戻ってきたためと考えられた。さらに第2期対策期間の開始前に起きたDCM濃度上昇では、全てのDCM濃度モニタリング井戸の数値が類似しており、地下水中の濃度が平準化されたと推定された。

第2期対策期間開始後は、MW1とMW2の地下水位が低く保たれており、地下水DCM濃度も低下した。この理由としては、第2期対策期間にはエアースパージングの井戸を追加したことにより、圧力が届く範囲が第1期対策期間よりも増加し、地下水がさらに押しのけられた結果、不飽和帯の深度が広がった状況が継続したことにより、地下ガス中に移行（揮発）するDCMの量が増加したためではないかと思われた。

今回の行った原位置浄化対策の効果検証により、エアースパージングによって引き起こされる地下水の攪乱を防ぐためには、事前の地盤性状調査をより詳細に行う必要があること、さらに、モニタリングの結果から周辺環境への影響が見られる場合には、適切な拡散防止対策を施す必要があることが示唆された。

平成24年9月以降、指定区域となっている3箇所の単位区画の地下水DCM濃度は、基準値を満足している状態が続いている。本サイトにおいては、環境基準値を満足する状態が継続するまでには2年半弱の期間を要した。他方、本サイトにおいては、対策を行うことで指定区域から汚染物質であるDCMの拡散とみられる現象が認められた。また、対策行為を停止すると今後もリバウンドが起きる可能性があるため、エアースパージングを停止した後もモニタリングを継続し、状況を都度確認する必要があると言える。

4　まとめ

DCMによる実際の土壌汚染現場の原位置浄化に際し、地下水モニタリングを詳細に行うことによって、当初の検討や初期実証試験時には想定外であった状況変化等が存在することが明らかとなった。また、汚染物質の濃度以外の環境指標を継続してモニタリングすることで、地盤に対する施工の影響や浄化の状況を判断できることが判った。原位置浄化の適用性を評価するには、初期の実証試験を行うだけでなく、施工中も長期に渡って詳細なモニタリングを続けることにより、常に浄化の過程を把握することが重要であると思われた。

謝　辞

本研究の一部は、成和リニューアルワークス株式会社24年度受託研究「兼松日産農林株式会社汚染土壌浄化モニタリング調査」で実施したものである。

参考文献

1) 名取雄太 (2012)：東京都における土壌汚染対策について, 第27回土壌環境保全士リフレッシュ講習会資料, pp.37-60

2) 環境省水・大気環境局土壌環境課 (2011) 平成21年度 土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果
http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13634

3) 東京都環境局 (2008)：土壌汚染に係る総合支援対策検討委員会報告書,東京都における土壌汚染の課題と対策の方向性について
http://www.kankyo.metro.tokyo.jp/chemical/soil/information/others.html

4) 笠井俊彦 (2010) 改正土壌汚染対策法の施行に当たって, 土壌環境ニュース, 63, 土壌環境センター(編)
http://www.gepc.or.jp/news/news63index.html

5) 吉川光英, 藤波浩美, 執行響子 (2011)：土壌汚染の原位置浄化法に関する適用性調査,環境化学討論会要旨集, 20th, P-172.

6) 清水恵助 (1985)：東京港地区における自然地盤ならびに埋立地盤の地質工学的研究, 東京工業大学博士論文

7) 吉川光英, 藤波浩美, 執行響子, 高橋明宏 (2011)：VOC 土壌汚染地における原位置浄化法の適用性調査, 東京都環境科学研究所年報 2011, pp.23~45

8) 高畑陽, 大石雅也, 有山元茂, 桐山久 (2008)：注水バイオスパージング工法によるベンゼン汚染帯水層の浄化特性, 土木学会第63回年次学術講演会, pp.191-192

9) 笠水上光博 (2009)：エアースパージング・揚水システム, 平田健正 前川統一郎 (監), 土壌・地下水汚染—原位置浄化技術の開発と実用化, シーエムシー出版, pp.145-149

10) 川端淳一 (2009)：土壌汚染対策技術の概要と変遷（土壌汚染対策技術の現状と実例）, 地盤工学会誌, 57