

地下水中への長期間の空気注入による 汚染物質濃度変化について

CHANGE OF CONTAMINANT CONCENTRATION BY LONG TERM AIR INJECTION IN GROUNDWATER

江種伸之¹・平田健正²・福浦清³・松下孝³

Nobuyuki EGUSA, Tatemasa HIRATA, Kiyoshi FUKUURA and Takashi MATSUSHITA

¹正会員 博(工) 和歌山大学助手 システム工学部 (〒640-8510 和歌山県和歌山市栄谷930)

²正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (同上)

³前澤工業株式会社 土壌環境部 (〒332-8556 埼玉県川口市仲町5-11)

The air sparging coupled with the soil vapor extraction as the physical remediation technologies has been applied to a site contaminated with volatile substances like tetrachloroethylene. In order to implement these technologies, it is indispensable to understand the mechanism of air migration injected in groundwater and the change of groundwater concentration. In this paper, we presented the results of full scale field experiment implemented to estimate the change of groundwater concentration caused by long term air injection in groundwater. As a result, it was clarified that the change of groundwater concentration within the radius-of-influence was caused by volatilization into injected air and stirring of groundwater by air injection.

Key Words : *groundwater contamination, volatile substances, remediation technology, air sparging, full-scale field experiment*

1. はじめに

揮発性のトルエンやテトラクロロエチレンなどによって汚染された地下水・土壌環境から汚染物質を除去する技術として、最近ではその揮発性を利用したエアースパージング技術が注目されている¹⁾。エアースパージング技術とは、地下水中に空気を吹き込み、地下水を攪拌することで溶解している物質を注入空気に揮発させ、不飽和帯からガスとして除去するものである。さらに、地下水中に酸素を供給することになるので、微生物分解を促進させる効果も期待されている²⁾。この技術は揮発性物質に対して行う地下水揚水処理と比べると、①汚染された地下水の処理が不要になる、②地上設備の設置が簡単、③費用が安くなる、④実施期間が短くなるなどの利点がある。しかし、空気を吹き込むことで地下水が乱されるため、地下水や

土壌ガス中の物質回収量に影響が生じる。また、汚染物質を周辺へ拡散させる危険性もある。

すなわち、エアースパージング技術を本格的対策として現場で実施していくためには、注入された空気の影響範囲や移動特性、空気通過による物質濃度変化の様子を明らかにしておかねばならない。これまでに、Ji et al.の室内実験³⁾、Unger et al.の数値シミュレーション⁴⁾などの研究例が報告されている。また、著者らも揮発性物質によって地下水が汚染された現場でエアースパージング技術に関する実証実験を行い、地下水中に注入した空気の影響範囲や注入空気中に揮発した物質濃度の算定を行ってきた^{5),6)}。

本稿では、長期間に渡って実施した実スケール野外実験の結果をもとに、地下水中に注入された空気が地下水中の物質濃度変化に及ぼす要因について検討した。

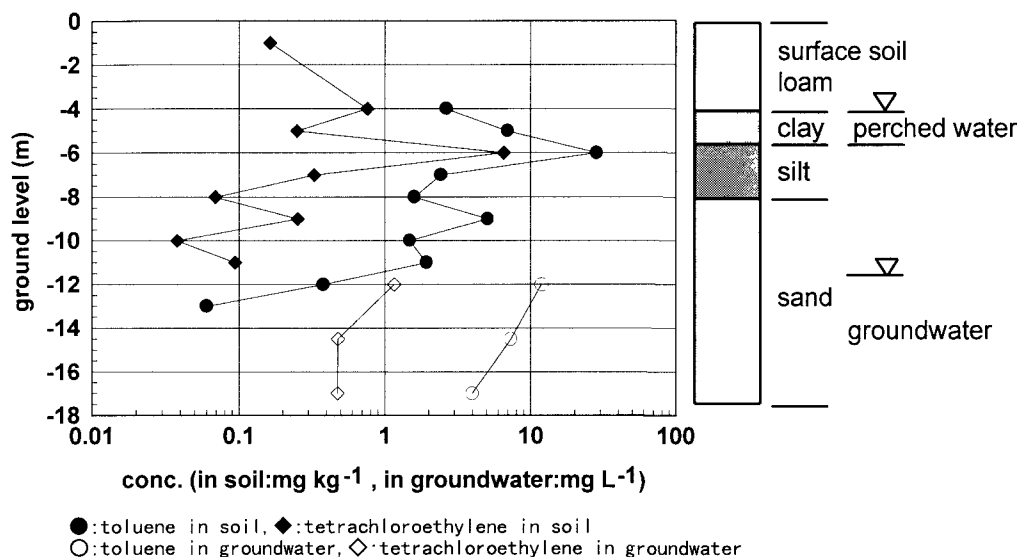


図1 現地地質状況および汚染物質存在量

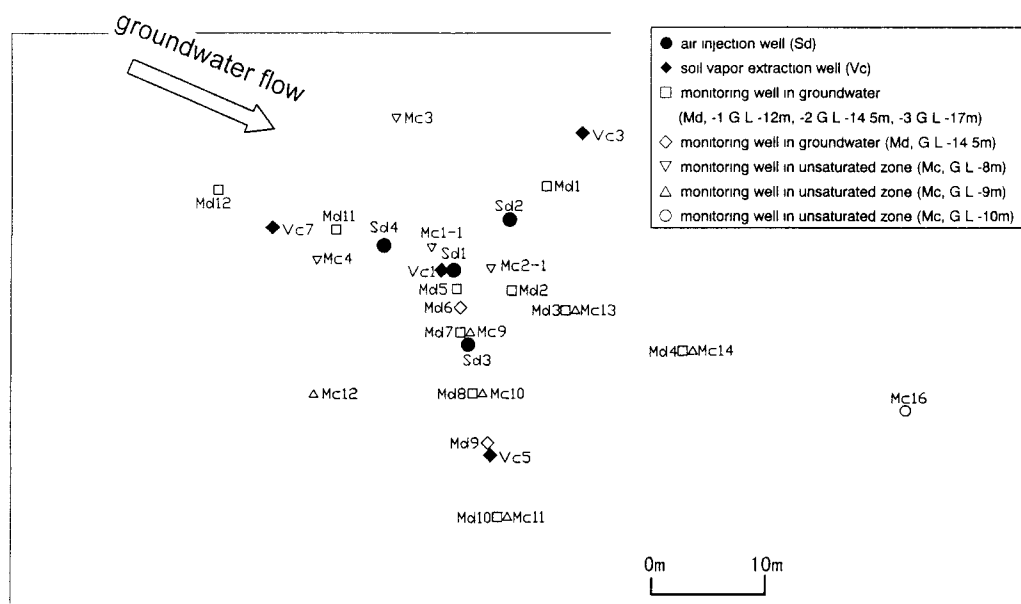


図2 現地井戸配置図

2. 現地概要

実験場所は化学工場で、現在は跡地になっている。現地の地質状況(図1)は、地表面からG.L.-4mまでが表土とローム層、G.L.-5m過ぎまでが凝灰質粘土層で、その下は砂質粘土、砂質シルト、シルト質細砂と移行し、G.L.-8m過ぎから砂層となっている。凝灰質粘土層の上には宙水帯が厚さ1.75m程度で存在しており、その下は不飽和帯を挟んでG.L.-11.5m付近から地下水帯を形成している(実験中に季節変化でG.L.-12mまで低下)。この地下水帯はG.L.-30m以下まで続いているが、G.L.-17.5m付近に固結した砂層があるため、ここを境として地下水帯上部と下部に分かれる。現地の地下水は北東

から南西方向に流れており、流速は30m year⁻¹程度である。

土壌中含有量の分析結果から、地下環境中にはトルエン、テトラクロロエチレンの2物質が多く存在していることが判明した。また、地下水中濃度を測定すると、地下水面直下のG.L.-12m付近で高く、深度とともに低下する傾向を示した(図1)。

3. 野外実験の概要

(1) 井戸配置および構造

現地での抽出井、注入井、および観測井の平面配置を図2に示している。実験対象領域のほぼ中心部

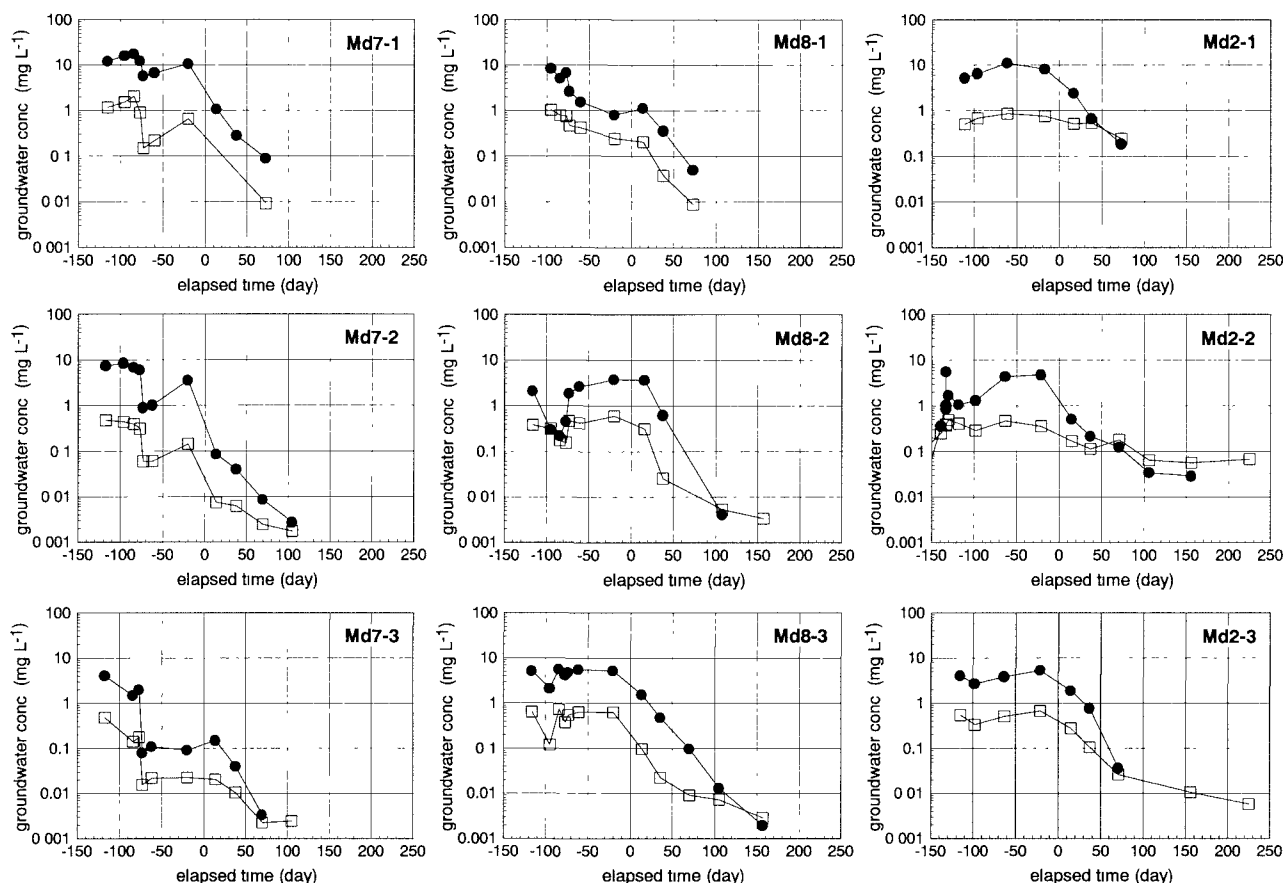


図3 地下水中濃度の時間変化 (●:トルエン, □:テトラクロロエチレン)

(Sd1,Vc1)から注入井(Sd2,Sd3,Sd4)までの距離は6m, 抽出井(Vc3,Vc5,Vc7)までの距離は15mであり, 領域外にガス態の物質が拡散しないように注入井の外側を抽出井が囲む配置にした. なお, 注入井Sd1は事前に行った短期運転のみで使用し⁵⁾, 今回の実験では注入井としてSd2,Sd3, Sd4の3本を使用した. 抽出井は上記の4本すべてを使用した.

注入井は深度G.L.-17.2mで, G.L.-16.7m~17.2m地点にスクリーンを設置した. 抽出井は深度G.L.-11mで, スクリーンをG.L.-7m~11m地点の不飽和帯に設置した. 地下水観測井はG.L.-12m(Md*-1), -14.5m(Md*-2), -17m(Md*-3)の3種類の深さで(Md6,Md9の2本はG.L.14.5mのみ, 図2参照), スクリーンを0.5mの厚さで各井戸底に設置した. 不飽和帯観測井は深度G.L.-9mを基本としたが, 一部-8mや-10mのものもある(図2参照). スクリーンは厚さ0.2mのものを各井戸底に設置した.

(2) 運転方法

今回の実験では, 不飽和帯でガス抽出を行いながら地下水中に空気を注入し, 運転の経過に伴う

地下水および土壌ガス中の物質濃度変化を観測した.

運転はまず土壌ガス抽出のみ開始した. 空気注入は予備実験等のために短時間行っていたが, 本格的な運転は土壌ガス抽出を始めてから約120日後に開始し, 本稿ではこの時を起点とした経過日数を使って時間を表す. 空気注入は3本の注入井(Sd2,Sd3,Sd4)を1本ずつ順番に120Lmin⁻¹の流量で1時間動かし, その間他の2本は休止させる間欠運転で行った. 一方, 土壌ガス抽出は井戸1本当たり120Lmin⁻¹の流量で4本同時(Vc1,Vc3,Vc5,Vc7)に連続運転を行った. 注入運転に関しては, 間欠運転を4~6週間続けた後に1週間の停止期間を設けた. これは注入運転停止中に土壌ガスおよび地下水のサンプリングを行うためである. ただし, サンプリング中も抽出運転は継続した.

4. 結果と考察

(1) 長期間の空気注入による物質濃度変化

図3に注入空気の影響範囲内^{5),6)}地下水中濃度の低下が顕著な観測井Md7,Md8およびMd2における

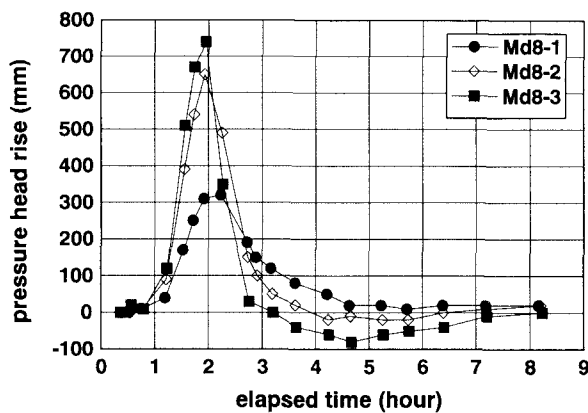


図4 空気注入による地下水頭の上昇
(マウンディング試験結果)

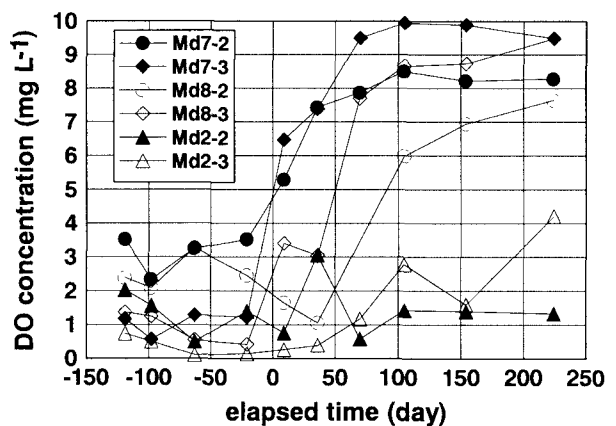


図5 溶存酸素濃度の時間変化

地下水中濃度の時間変化を示している。図中の-83日目から-74日目に濃度が低下しているのは、短期運転によるものである⁹⁾。長期運転を開始すると、Md7とMd8では両物質とも濃度が大きく低下し始め、100日目から150日目には検出限界以下(トルエン: 0.002mg L^{-1} , テトラクロロエチレン: 0.003mg L^{-1})になる。ただし、G.L.-12mの70日目以降の値がないのは、周辺地下水位の低下により採水ができなくなったためである。また、Md2においても、Md7やMd8ほどではないが、空気注入を開始すると地下水中濃度の低下が見られる。すなわち、長期運転では、短期運転で影響の見られなかったMd8-2,-3、および短期運転では観測井がなく空気注入の影響が確認できなかった距離に位置するMd2でも濃度が低下しており、注入空気の影響が地下水面からの深さに関係なく、水平距離で5.5m地点まで及ぶことになる。

図4にマウンディング試験中のMd8における地下水頭上昇高さの時間変化を示している。マウンディング試験とは、空気注入によって変化する地下水頭を観測し、水頭上昇の程度から注入空気の影響範囲を調べる予備試験である。ここで、空気は1時から2時の間に注入されているが、注入運転中は下部の観測井ほど地下水頭の上昇が大きく、下から上に向かった動水勾配が発生している。一方、空気注入を停止すると下部の観測井で地下水頭の回復が速く、上部ほど地下水頭が高い状態になる。すなわち、上から下に向かった動水勾配が発生している。以上から、Md8地点では空気注入期間中は地下水が上向きに流れ、注入停止後は下向きに流れている。この地下水の動きは、空気の注

入によって地下水が攪拌されている状態を示している。今回の空気注入方法は、3本の注入井のうちの1本を1時間ずつ動かす間欠運転であることから、長期運転でもマウンディング試験中と同様な地下水の動き(攪拌)が生じる。したがって、注入空気への揮発だけではなく、地下水の攪拌による低濃度地下水との混合も地下水中濃度の低下に影響を与えていると思われる。観測井Md7およびMd8において、注入開始前に存在する観測井間の濃度差が、注入運転を開始すると次第になくなり(平均化され)、同じような低下傾向を示しているのが、攪拌による地下水の混合の効果と見ることができる。

図5には、観測井Md7,Md8およびMd2における溶存酸素濃度の時間変化を示している。ただし、G.L.-12m地点の値はベラーで採水している影響なのか、溶存酸素濃度に変化が生じていないため、図中には載せていない。しかし、事前に両者の分析値を比較したところ、汚染物質の濃度には有意な差は見られなかった。Md7とMd8-3では、空気注入開始とともに溶存酸素濃度が大きく上昇する。Md8-2では、運転初期には溶存酸素濃度が低い、その後は直ちにMd7やMd8-3と同じ程度にまで上昇している。短期運転では、Md8-2および-3付近にも量は少ないものの注入空気の流れが確認されており⁹⁾、長期運転中も空気通過の影響で溶存酸素濃度が上昇していると思われる。ただし、前述したように、注入空気の影響範囲内では空気注入により地下水が攪拌されるため、溶存酸素濃度の上昇には攪拌の影響も含まれている。一方、Md2-2では30日目に溶存酸素濃度が上昇するが、再び低下して50日目以降は 1.5mg L^{-1} 程度で推移する。Jiほかの実験によると、均一粒径

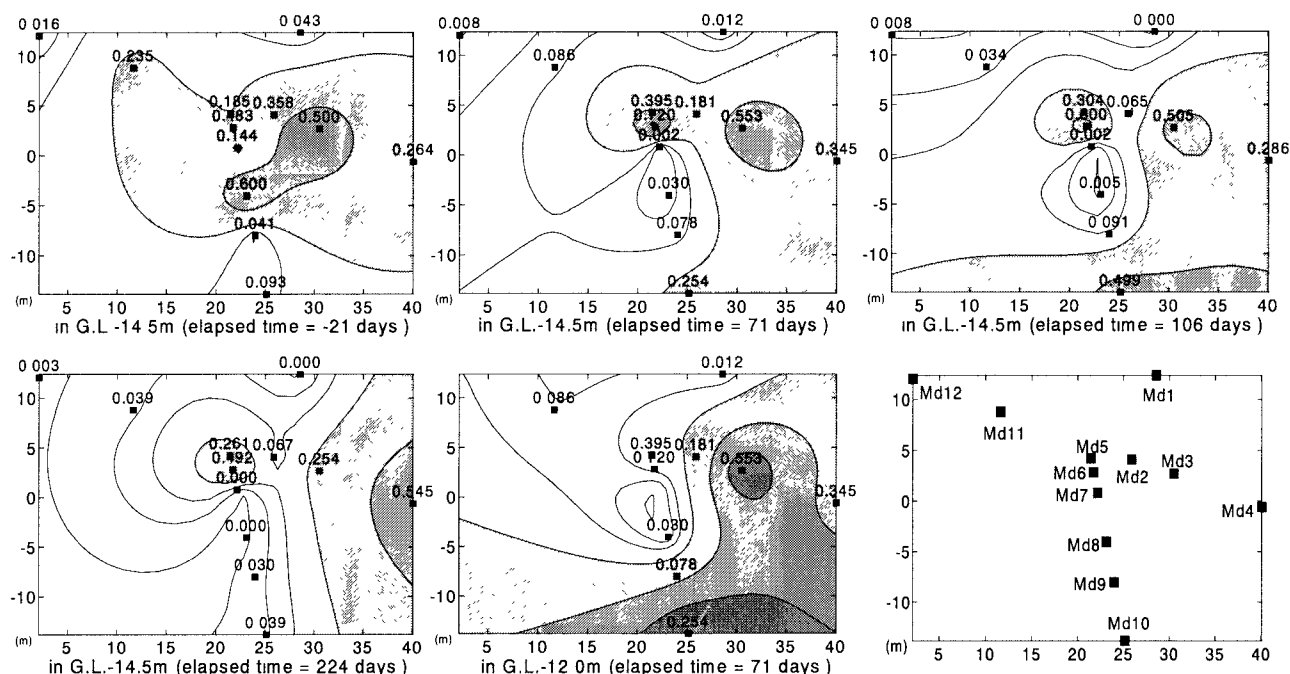


図6 地下水中テトラクロロエチレン濃度の平面分布

の飽和多孔体中では注入された空気の流路形成に異方性は生じないが、複数の粒径の粒子が混在している多孔体では粒径の違いによる透過性の変化によって局所的な異方性が生じることが確認されている³⁾。自然土壌は通常粒径の異なる土粒子が混在しているので、そこに注入された空気の流れには局所的な異方性が生じていると考えられる。すなわち、注入空気の影響範囲内でも空気が流れていない場所が存在する。Md2-2では溶存酸素濃度が運転中ほとんど上昇しないので、注入空気の主な流路になっていない可能性が強い。一方、Md2-3では30日目までは溶存酸素濃度が低い状態にあるが、50日目を過ぎたあたりから徐々に上昇していることから、小さいながらも注入空気の影響を受けている。仮にMd2で地下水の攪拌が十分行われているならば、Md2-2と-3の溶存酸素濃度は同程度になり、観測井間では汚染物質や溶存酸素濃度がMd7やMd8のように平均化されているはずである。すなわち、Md8よりも注入井から水平距離でさらに1.5m注入井から離れているMd2では、注入空気の流量がMd7やMd8よりも少なく、また地下水の攪拌も小さくなる。その結果、観測井毎の地下水中濃度およびその低下傾向に差が生じていると思われる。土壌の局所的な異方性のため注入空気の影響が小さいと考えられるMd2-2では、特に地下水中濃度の低

下が小さい。

注入空気の影響範囲内(注入井から5.5m以内)の観測井では、注入空気への揮発や地下水の攪拌による低濃度地下水との混合によってトルエン、テトラクロロエチレンとも注入運転中に濃度が低下していた。特に、空気通過量が多い場所では、運転開始100日から150日程度で検出限界以下になった。ただし、注入空気の影響範囲内であっても、土壌中に空気が流れにくい場所が発生し、その近辺では濃度の低下が小さくなる。注入空気の通過や地下水の攪拌の影響は、溶存酸素濃度や汚染物質濃度の変化の傾向および観測井間で平均化されているかどうかである程度判断することができる。ただし、今後の課題として、地下水の攪拌による汚染の拡散を評価するために、地下水中濃度の低下に及ぼす揮発や攪拌の効果を正確に算定する必要がある。

(2) 注入空気の影響範囲外での物質濃度変化

G.L.-14.5m地点および空気注入運転開始から71日目のG.L.-12m地点における地下水中テトラクロロエチレン濃度の平面分布を図6に示している。実験対象領域の大部分では、空気注入運転の進捗とともに濃度が低下している。特に空気注入井から5.5m以内の観測井(Md1,Md2,Md7,Md8,Md11)で顕著に表れている。これらは注入空気の影響範囲内に位置してお

り、注入空気への揮発や地下水の攪拌の影響と考えられる。ただし、同じ影響範囲内のMd5,Md6では濃度の低下が小さい。これは、前節で述べたMd2-2と同様、土壌を構成している土粒子の局所的な粒径の違い(透過性の違い)によって空気流路の形成に異方性が生じ、観測井周辺で空気の通過量が少なくなっているためと思われる。一方、最寄りの注入井から水平距離で10m以上離れている観測井(Md3,Md4,Md10)は、注入空気の影響範囲外と考えられ、濃度低下の様子が表れていない。

現地における地下水の流向から、Md3とMd4は実験対象領域の下流部に位置している。すなわち、ここには空気注入によって地下水中濃度が低下した上流の影響が次第に及ぶと考えられる。地下水の流速はおおよそ 30m year^{-1} なので、Md3には5m上流に位置するMd2の影響が約60日で及ぶ。Md2-2では濃度が 0.36mg L^{-1} から、 0.18mg L^{-1} (71日目)、 0.06mg L^{-1} (106日目)と実験期間中徐々に低下しているので、Md2-2の濃度低下の影響がMd3-2に及んでいるはずである。しかし、実際には106日目まで 0.5mg L^{-1} 付近で推移しており、Md2-2の影響が見られない。したがって、Md3-2で濃度が低下しない原因が他に存在する。周辺地下水位は、季節変動によって注入開始から100日で約35cm低下している。江種ほかは、地下水位が低下すると地下水面近傍の溶存態物質が地下水中深くに浸入していく現象を数値シミュレーションによって明らかにしている⁷⁾。このことから、Md3-2で濃度が低下しない原因の一つに、Md3-1における高濃度地下水(0.76mg L^{-1})の下部への侵入が考えられる。それ以降の地下水位が安定している2,3カ月の間は、上部からよりも低濃度の上流の影響が支配的になるため、224日目には濃度が低下している。同様な傾向が最下流部のMd4や紙面の都合で載せていないがMd3-3およびトルエンでも見ることができる。詳細は省くが、Md4-2の224日目の濃度(約 0.5mg L^{-1})には、地下水の流れによって上流部(Md3方向)の影響が及んでいるものと考えられる。Md10に関しても、地下水位の低下によって上部の影響を受け、Md10-2とも71日目、106日目には濃度が上昇している。

今回の野外実験で、注入空気の影響範囲外の一部で実験中に濃度の上昇が見られた。しかし、これは空気注入による汚染の拡散ではなく、地下水

の流れや地下水位の季節変動による影響が大きいと思われる。ただし、注入空気の影響範囲外にも直接ではないが空気注入の影響が及ぶことが確認されたので、これまでも指摘されているように、エアースパージング技術の効果次第では汚染の拡散の可能性があり、十分注意する必要がある。

5. おわりに

本稿では、エアースパージング技術に関する長期間の実スケール野外実験を行い、地下水中に注入された空気が物質濃度変化に及ぼす要因を検討した。その結果、注入空気の影響範囲内では、空気への揮発だけでなく、空気注入による地下水の攪拌も物質濃度変化に影響を及ぼしている。土壌中では注入空気の流れに局所的な異方性が生じ、空気の流れにくい場所が存在するため、地下水中濃度の低下に差が出ていることが推察できた。また、注入空気の影響範囲外の濃度変化には、空気注入による汚染物質の拡散は見られなかった。

今後の課題としては、注入空気の影響範囲を定量的に評価すること、濃度低下に対する揮発と攪拌の効果を判別すること、および物質毎の濃度低下の違いを明らかにすることであり、野外実験以外にも、室内実験や数値シミュレーションを実施して解明していく予定である。

参考文献

- 1)例えばLundegard, P.D. and D. LaBrecue : Air sparging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, U.S.A.): Actual and apparent radius of influence, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol.19, pp.1-27, 1995.
- 2)ウィリアムC.アンダーソン編(軽部征夫監修): バイオレメディエーション, Springer, Tokyo, 263p., 1997.
- 3)Ji, W. et al. : Laboratory study of air sparging: air flow visualization, *Groundwater Monitoring and Remediation*, Fall 1993, pp.115-126, 1993.
- 4)Unger, A.J.A, E.A. Sudicky and P.A. Forsyth : Mechanisms controlling vacuum extraction coupled with air sparging for remediation of heterogeneous formations contaminated by dense nonaqueous phase liquids, *Water Resources Research*, Vol.31, No.8, pp.1913-1925, 1995.
- 5)江種伸之ほか: 地下水中に注入された空気の移動特性および汚染物質の濃度変化について, 水工学論文集, Vol.42, pp.349-354, 1998.
- 6)江種伸之ほか: 地下水中に注入された空気による水質回復の効果について, 地下水学会誌, Vol.40, No.40, 印刷中, 1998.
- 7)江種伸之ほか: トリクロロエチレンの自然河床区間から地下水系への浸透特性について, 水工学論文集, Vol.36, pp.391-386, 1992.

(1998. 9. 30 受付)