地下水へ注入された空気による水質回復の効果について

江種伸之*・平田健正*・福浦 清**・松下 孝**

Effect of Air Migration on Recovery of Contaminant Concentration in Groundwater

Nobuyuki EGUSA*, Tatemasa HIRATA*,
Kiyoshi FUKUURA** and Takashi MATSUSHITA**

Abstract

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. The air sparging technology facilitates the contaminant volatilization with air injected into saturated zone and the soil vapor extraction technology extracts the contaminant in soil gas and injected air. Therefore, 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 recovery of water quality by air injected in groundwater. The summary was follows. It was clarified that injected air spread sufficiently in an experimental site when the pulsed operation for air injection was carried out. The concentration in injected air, which was calculated by the observed data like extracted gas concentration, showed the possibility that there would be the denser-than-water non-aqueous phase liquid in an aquifer. And also, it has been removed with the substances dissolved in groundwater by air injection.

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

* 和歌山大学 システム工学部 環境システム学科(

e-mail:

)

** 前澤工業株式会社 土壌環境部

要 旨

テトラクロロエチレンなどの揮発性物質によって汚染された地下環境の修復技術として、その揮発性に注目したエアースパージング技術が適用されることが多くなってきている。エアースパージング技術は地下水中に空気を吹き込み、地下水の流れを攪拌することで溶解している物質を揮発させ、不飽和帯でガスとして除去する。すなわち、この方法を適用するためには、注入空気の動きや地下水中の物質濃度変化などを明らかにする必要がある。本稿では、実際に揮発性物質で地下水が汚染された現場にエアースパージング技術を適用し、空気の注入によって地下水水質が回復していく様子を検討した。その結果、空気注入を断続的に行う間欠運転によって、注入空気が実験対象となる地下水帯を十分拡げることが明らかになった。また、抽出ガス濃度などの観測データから注入空気に揮発したガス濃度を算定することで、地下水中に溶解している物質の揮発だけでなく、現地帯水層中に原液が存在している。その原液が注入空気へ揮発することで地下環境中から除去されつつある状況が推察された。

キーワード：地下水汚染、揮発性物質、浄化対策技術、エアースパージング技術、実スケール野外実験

1. はじめに

地下水・土壌汚染の浄化対策技術は、地下水や土壌環境から汚染物質を除去し、無害化するものであるが、大きくは①汚染物質の拡散防止技術と②汚染物質の分解・除去技術に分けられる。その中で有機塩素化合物などの揮発性物質による地下水・土壌汚染に対しては、最近では特にその揮発性に注目した土壌ガス吸引技術やエアースパージング技術が多く現場で適用されている(例えば、平田ほか、1996)。土壌ガス吸引技術は、不飽和帯に負圧をかけて土壌ガスの吸引を行い、ガス態の物質を除去する。この方法では地下水の揚水を同時に行う場合が多く(二重抽出法)、地下水中に溶解している物質も除去できる。ただし、揚水した地下水を地上でばっ気処理する必要がある、処理水の処分方法が問題になる。一方、エアースパージング技術は、通常は土壌ガス吸引技術と併用されるが、地下水中に空気を吹き込み、地下水の流れ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、不飽和帯でガスとして除去する。この方法は二重抽出法とは異なり、①汚染さ

れた地下水の処理が不要になる、②土壌ガス吸引技術と同様な地上設備で設置が簡単、③費用が安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の回収量に影響が生じる。また、汚染物質を周辺へ散逸させる危険性もある。すなわち、注入空気の移動特性や空気通過による物質濃度変化の様子を明らかにしておくことが、エアースパージング技術の効果を上げるためには重要である。

Ji et al.(1993)は室内実験を行い、自然の飽和土壌中に注入された空気は気泡ではなく、細い流路を形成して流れることを示した。Unger et al.(1995a, 1995b)は汚染された地下環境が回復する様子を数値シミュレーションによって検討し、エアースパージング技術の有効性を示した。Lundgard and LaBrecue(1995)は揮発性物質で汚染された現場で予備実験を行い、electrical resistance tomography (ERT)が地下水中に注入された空気の移動をよく表す指標として有効であることを示した。また日本においては、笠水上ほか(1995, 1997)がエアースパージング技術を現地に適用した結果を報告している。

以上のように、エアースパージング技術に関する研究例が数々報告されている。しかし、注入空気の動きや地下水中の物質濃度変化について検討を行ったものは少なく、メカニズムが十分解明されているとは言えないようである。そこで、著者ら(1998)は揮発性物質によって地下水が汚染された現場で短期間の予備実験を行い、エアースパージング技術を適用した場合の注入空気の移動特性や物質輸送過程の解明を行ってきた。本稿では、予備実験に続いて実施された長期実験結果をもとに、地下水・土壌環境の回復状況(帯水層の浄化)について検討した結果を報告する。

2. 現地概要

対象となったのは化学工場で、現在は跡地になっている。現地の地質状況は、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、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が存在しており、その下は不飽和帯を挟んで G.L.-11m 付近から地下水帯を形成している。この地下水帯は深度 G.L.-30m 以下まで続いているが、G.L.-18m 付近に固結した砂層があり、ここを境として地下水帯上部と下部に分かれる。現場周辺での地下水流れの方向は北東から南西であり、流速は 30m year^{-1} 程度である。

宙水帯と地下水帯に挟まれた不飽和帯で透気試験を行ったところ、透気係数はほぼ全域で $10^{-4}\text{cm sec}^{-1}$ のオーダーで、実験対象領域内の地質に水平方向の異方性は見られなかった。ここで、透気試験は土壌ガス吸引期間中の周辺土壌ガス圧力の変化量から透気係数を算定する方法で行った(例えば、長藤ほか、1998)。不飽和帯は上部が宙水帯で地上大気と遮断されているため、土壌ガス抽出によって 40m 以上離れた観測井でも土壌ガス圧力が低下していた。したがって、土壌ガス抽出の影響はかなり広範囲に及んでいると思われる。また、地下水帯上部のボーリングコアサンプルに難透水性の土壌は見られなかった。

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 物質が地下

水帯に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。そこで、本現場では地下水帯の浄化を目的にエアースパージング技術を適用することにした。

現地では、まず注入空気の移動特性や影響半径、そして空気注入による物質濃度変化の様子など、本格的対策の計画・実施に必要な情報を得るための予備実験を行った(江種ほか、1998)。その結果、地下水中に注入された空気は鉛直上方から斜め上方に向かって比較的狭い範囲に拡がっていることが明らかになった。地下水面直下の G.L.-12m では、注入井からの水平距離が 4 m の観測井でも注入空気の影響で濃度が低下していた。しかし、G.L.-14.5m および G.L.-17m 付近では注入井から水平方向に 4 m 離れると濃度が低下しておらず、注入空気が通過していても、その量は濃度を低下させるほど十分なものではなかった。

3. 実スケール野外実験の概要

3.1 井戸配置

現地での抽出井、注入井、および観測井の平面配置を Fig.1 に示している。実験対象領域のほぼ中心部に注入井(Sd1)と抽出井(Vc1)を 1 本ずつ、そこを起点として互いに 120 度開いた 3 本の直線上に注入井と抽出井をそれぞれ 1 本ずつ設置した(Sd2, Sd3, Sd4, Vc3, Vc5, Vc7)。この 3 本の直線は地下水流れの下流方向から時計回りに 60 度、180 度、300 度開いている。起点から注入井までの距離は 6 m、抽出井までの距離は 15 m であり、実験対象領域外にガス態の物質が散逸しないように注入井の外側を抽出井が囲む配置にした。注入井のうち Sd1 は予備実験のみで使用し、今回の実験では 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。

地下水観測井は、上記の 3 直線上および地下水流れの下流方向に 12 点設置した。12 点のうちの 2 点(Md6, Md9)は深度 G.L.-14.5m のみ、他の 10 点は G.L.-12m, -14.5m および -17m の深度に井戸を設けた。起点からの距離は最大 20m で、最寄りの注入井からの距離は最大 14m となっている。このような配置にしたのは、予備実験時には注入井か

Fig. 1 Locations of extraction wells, injection wells and monitoring wells.

ら水平距離で14m 離れると注入空気の流れが観測されなかったためである。不飽和帯観測井は、地下水流れの下流方向から見て0度と60度の直線上に重点的に、起点から最大約80m の距離まで合計13点設置した。ただし、遠方の2つの観測井 Mc17、Mc18は Fig.1には収まっていない。

3.2 井戸構造

注入井は深度 G.L.-17.2m で、内径25mm のスクリーンを G.L.-16.7m~17.2m 地点に設置した。抽出井は深度 G.L.-11m で、内径140mm のスクリーンを 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, -14.5m, -17m の3種類の深さで、内径13mm のスクリーンを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 (G.L.-8m : Mc1-1, Mc2-1, Mc3, Mc4, G.L.-10m : Mc16)。スクリーンは内径10mm、厚さ0.2m のものを各井戸底に設置した。Fig.1中の A-A' ラインに沿った断面における井戸構造の概略図を Fig.2に示している。

3.3 運転方法

今回の実スケール野外実験では、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長期的に観測した。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本の井戸 (Sd2, Sd3, Sd4) のうち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。ただし、一部60Lmin⁻¹での運転もある。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) に連続運転で行った。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。

Fig. 2 Locations of injection wells, extraction wells and monitoring wells along A-A' cross-section in Fig.1.

3.4 観測項目

3.4.1 地下水中濃度

1回目の観測は注入運転開始の約20日前に行い、105日後までは月1回、その後約225日後までは2ヵ月に1回の頻度で観測した。前節でも述べたが、地下水のサンプリングは注入運転を停止してから1週間以内(3~7日後)に行った。深度G.L.-14.5mと-17mの観測井ではポンプ(Solinst社製 WaTerra Pump)を用い、ポリエチレンチューブを通してサンプリングした。深度G.L.-12mの観測井については、ポンプを使用できなかったためペーラーを用いた。なお、井戸管内に滞留している地下水を分析しないように、井戸容積の3倍以上排水した後にサンプリングした。濃度の定量はポータブルGC-PID装置(HNU社製)を用い、標準データの取得はヘッドスペース法により測定日毎に1回以上行った。

3.4.2 ガス濃度

抽出ガス濃度は、注入運転開始から約115日後までは1週間毎に、その後は約225日後まで2~4週間の間隔で観測した。一方、土壌ガス濃度は、地下水中濃度と同様に注入運転開始の約20日前に

1回目の観測を行い、105日後までは月1回、その後約225日後までは2ヵ月に1回の頻度で観測した。土壌ガスのサンプリングは地下水のサンプリングと同様に注入運転を停止してから1週間以内(3~7日後)に行った。抽出および土壌ガスのサンプリングは、密閉容器に入れたテドラーバッグをナイロンチューブで抽出または観測井と接続し、密閉容器内の空気を真空ポンプで排出することでテドラーバッグ内に土壌ガスを取り込む方法を採用した。なお、井戸管内に滞留しているガスを分析しないように、井戸容積の5倍以上の排気を行った後にサンプリングした。濃度の定量には地下水中濃度と同様にポータブルGC-PID装置(HNU社製)を用い、標準データの取得はヘッドスペース法により測定日毎に1回以上行った。

4. 結果と考察

4.1 注入空気の影響範囲

Fig.3に地下水観測井Md7およびMd8における地下水中濃度の経時変化を示している。G.L.-12m地点で70日後以降の値がなくなっているが、これ

は地下水の季節変動によって水位が低下し、地下水がサンプリングできなくなったためである。予備実験中の注入井 Sd3 を用いた運転 (-75 日後) では、観測井 Md7 が注入井から水平距離で 1.5 m しか離れていないため、この近辺を通過する空気量は他の観測井よりも多くなる。すなわち、注入空気への揮発が促進されることになり、その影響で濃度が大きく低下している。一方、Sd3 から水平距離で 4 m 離れた観測井 Md8 では、一番上方の

Md8-1 のみで濃度が低下する。G.L.-14.5 m から G.L.-17 m (観測井 Md8-2 から -3) 近辺には十分な量の空気が流れていないことがマウンディング試験からわかっており、このことが濃度が低下しない原因と考えられる (江種ほか、1998)。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位を観測し、水位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。

空気注入の影響があった観測井でも、予備実験

Fig. 3 Time varied change of groundwater concentrations in Md7 and Md8 wells.

● : toluene, ◆ : tetrachloroethylene.

終了後には濃度が回復している。しかし、長期実験を開始するとMd7の3つの観測井では速やかに濃度が低下し始める。一方、観測井Md8では、予備実験で影響のあったMd8-1だけでなく、Md8-2と-3でも濃度の低下が見られる。この現象は、誌面には載せていないが、最寄りの注入井からの水平距離が4mの観測井Md1、Md11でも確認できた。すなわち、注入井から水平距離で4m離れた地点では、長期運転時には地下水面近傍だ

けでなく、地下水面下の深い場所(G.L.-14mおよびG.L.-17.5m)でも注入空気の影響が現れている。

Fig.4に地下水観測井Md2およびMd3における地下水中濃度の経時変化を示している。注入井Sd2およびSd3から水平距離で5.5m離れたMd2では、空気注入を開始するとテトラクロロエチレン、トルエンとともに濃度が低下し始めており、この地点にも注入空気の影響が現れている。一方、Sd2およびSd3から水平距離で10m離れた観測井Md3

Fig. 4 Time varied change of groundwater concentrations in Md2 and Md3 wells.

● : toluene, ◆ : tetrachloroethylene.

では、テトラクロロエチレン濃度の変化が非常に小さく、注入井から10m 離れると注入空気の影響はほとんど及んでいない。ただし、Md3-2では注入運転開始とともにトルエン濃度が上昇している。100日後以降は低下しているの、はっきりしたことはわからないが、空気注入によって地下水が乱された影響かもしれない。同じような現象がMd10-2でも観測されており、今後の濃度変化に注意するとともに、室内実験や数値シミュレーションなどによって、地下水の攪拌やそれにもなう物質の動きなどを調べることが必要だろう。

長期実験では予備実験中には注入空気の影響が見られなかった観測井Md8-2、-3、およびMd2-1、-2、-3でも濃度の低下が確認できた。すなわち、水平距離で5.5m 離れた観測井の G.L.-14.5m および-17m 付近にまで注入空気が拡がっていることになる。一方、地下水面直下の G.L.-12m では注入空気の拡がりに予備実験との差がなく、影響範囲は共に5～6m 程度である。このように、地下水面近傍では予備実験との差が見られないものの、地下水面下の深い場所では注入空気の影響範囲が拡がっている。長期実験における注入空気の影響範囲の概略を Fig.5 に示す。長期実験では空気の注入を間欠運転で行っているが、これは注入空気の流れが定常になるのを防ぐためである。地下水中の物質の揮発は空気流路近傍でしか生じないため、空気の流れが定常になると濃度の低下する領域が限定され、地下水水質の回復が進まない。したがって、今回の実験で間欠運転を行ったのは、注入空気の流れを定常にすることなく絶えず変化させ、注入空気の影響を広範囲に伝えるためである。実際に地下水面下の深い場所では注入空気の影響範囲が拡がっており、その目標は達成されている。

4.2 空気注入によるガス濃度変化

Fig.6には抽出井 Vc1とその周辺に位置する不飽和帯観測井 Mc1-1、Mc2-1におけるガス濃度の経時変化を示している。抽出井 Vc1では、テトラクロロエチレン、トルエンの両物質とも時間が経過するにつれて濃度が低下している。ただし、注入開始から約70日後など、土壌ガスおよび地下水サンプリングのために空気注入を停止している期間

Fig. 5 Schematic illustration of the radius-of-influence for air injection during long term experiment.

には濃度が回復する。観測井 Mc1-1ではテトラクロロエチレン、トルエン濃度が抽出ガス濃度と同じような傾向で低下している。また、Mc2-1でもテトラクロロエチレンは抽出ガスとほぼ同じ傾向である。ただし、トルエン濃度だけは時間とともに増加しており、抽出ガス濃度の動きと一致しない。テトラクロロエチレン濃度に関して Vc1と Mc2-1を比べた場合、抽出ガス濃度は空気注入期間中は土壌ガス濃度よりも低く、注入停止期間中は土壌ガス濃度とほぼ同じレベルにまで回復している。不飽和帯に達した注入空気は周辺土壌ガスと共に抽出井から回収されており、空気注入期間中の抽出ガス濃度は土壌ガス濃度と注入空気に揮発したガス濃度の平均値になる (Fig.7a)。一方、停止期間中は土壌ガスしか回収されないため、周辺土壌ガス濃度の平均値になる (Fig.7b)。土壌ガス濃度に関しては注入停止期間中に測定しているため、その値に注入空気の影響は表れていない。したがって、Vc1において注入期間中に抽出ガス濃度が低下し、注入を停止すると周辺土壌ガス濃度と同じレベルに回復する現象は、注入空気に揮発したガス濃度が周辺土壌ガス濃度よりも低いことを示している。紙面には載せていないが、抽出井 Vc5と Vc7でも Vc1と同じ現象が見られた。ただし、設置位置の関係から最も近い注入井1本からの空気しか回収しないため、3本の注入井に囲まれている Vc1ほど顕著な変化は出ていない。一方、トルエン濃度に関しては、テトラクロロエチレンのように空気注入による影響が特に見られな

かった。また、Mc2-1のトルエン濃度の増加は、今回の観測ではその原因を説明することができなかった。

Fig.8には抽出井 Vc3におけるガス濃度の経時変化を示している。抽出井 Vc3では、他の抽出井とは異なり、空気注入停止期間中に両物質の濃度が低下する傾向にある。Vc3周辺には観測井がないのではっきりしたことは言えないが、注入空気に

Fig. 6 Time varied change of gas concentrations in extraction well:Vc1, monitoring wells:Mc7 and Mc8.
● : toluene, ◆ : tetrachloroethylene.

揮発したガス濃度が周辺土壌ガス濃度よりも高いことを示している可能性が強い。

以上のことから、注入空気に揮発したガス濃度の平均値は注入期間中における Vc3の抽出ガス濃度よりも高く、Vc1よりも低いと予想される。

4.3 注入空気に揮発したガス濃度

空気注入期間中、抽出井からは土壌ガスと注入空気が回収されており、抽出ガス濃度は土壌ガスと注入空気の平均値になる。一方、停止期間中には土壌ガスしか回収されないため、周辺土壌ガス濃度の平均値になる。したがって、注入期間中に Vc1の抽出ガス濃度が周辺土壌ガス濃度よりも低くなる現象は、注入空気に揮発したガス濃度が周辺土壌ガス濃度よりも低いことを示している。

そこで、この現象を利用して抽出井 Vc1から回収される注入空気に揮発したテトラクロロエチレンガス濃度を算定してみる。今回のように長期的な観測によって得られるデータは、対象領域内の平均的な値を示しているので、計算にあたっては以下の仮定が成り立っているものとする。なお、

Fig. 7 Schematic illustration of gas flow in unsaturated zone.

Fig. 8 Time varied change of gas concentrations in extraction well: Vc3.

● : toluene, ◆ : tetrachloroethylene.

計算にテトラクロロエチレンを用いたのは、抽出ガス、土壌ガスおよび地下水中濃度の変化に空気注入の影響が顕著に見られるためである。

- 仮定：1) 注入空気の流れに異方性はなく、注入井を中心に同心円状に拡がる。
 2) 空気は3本の注入井から同時に40Lmin⁻¹の流量で注入されている。
 3) 抽出の影響半径は6mである。
 4) 注入空気の影響半径は5.5mである。
 5) 対象領域内の土壌ガス濃度、地下水中濃度は一定である。

空気注入は3本の井戸のうち1本ずつ順番に120Lmin⁻¹の流量で1時間動かし、その他の2本は休止させる間欠運転で行っている。1本の注入井で考えると、注入された空気の影響で注入井から抽出井に向かった方向の土壌ガス圧力が上昇し、抽出の影響範囲が変化する(江種ほか、1998)。すなわち、抽出の影響範囲に異方性が生じている。しかし、1時間毎に順次井戸を変えながら空気注入を行っているため、長期的に考えると3本の井戸を同時に動かす運転と同じ効果になると予想される。この場合、単位時間当たりの注入量120Lmin⁻¹が3本の注入井に均等に割り当てられると考えられるので、1本の注入井からは40Lmin⁻¹の流量で空気が注入されているとする。さらに、Vc1は周囲を3本の注入井に囲まれているため、抽出の影響は次第に注入井の外側には及

ばなくなる。そこで、抽出の影響半径は抽出井から注入井までの距離6mとする。注入の影響半径は注入空気による濃度の低下が見られた観測井までの距離5.5mとする。ここで、Vc1から回収される注入空気は、注入と抽出の影響範囲が重なる領域の不飽和帯に出てきたものである(Fig.7(a)参照)。土壌ガス濃度には、Vc1の影響範囲内の平均土壌ガス濃度に相当する抽出ガス濃度、注入停止期間中の35日後と70日後の値を用いる(Fig.6中抽出井Vc1のシンボル■)。一方、抽出ガス濃度には、各時点で空気注入を停止する直前(Fig.6のシンボル■の直前、30日後と65日後)の値を用いる。以上の仮定をもとに、注入空気中のテトラクロロエチレン濃度を次式により計算すると、それぞれ5.06ppmVおよび1.43ppmVになった。得られた値は空気注入期間中のVc3の抽出ガス濃度(35日後で1.80ppmV、70日後で1.20ppmV)より高いが、Vc1より(35日後で6.01ppmV、70日後で4.93ppmV)も低く、これは前節で推測した注入空気中に揮発したガス濃度の範囲であることから、おおよそ妥当な値と思われる。

$$C_a = [C_v \times 120 - C_g \times (120 - Q)] / Q \quad (1)$$

ここに、 C_a ：注入空気中に含まれる濃度[ppmV]、 C_v ：抽出ガス濃度(=5.63ppmV:30日後、3.53ppmV:65日後)、 C_g ：土壌ガス濃度(=6.01ppmV:35日後、4.93ppmV:70日後)、 Q ：抽出の影響範囲内に出てくる注入空気総量(=48Lmin⁻¹)である。注入空気総量 Q は、抽出の影響範囲内に出てくる注入井1本あたりの注入空気量(計算で使用する注入空気量40Lmin⁻¹×抽出と注入の影響範囲の重なった領域の面積/注入の影響範囲全域の面積：Fig.6参照)を3倍して求めている。

一方、この近辺における地下水中のテトラクロロエチレン濃度の平均値は、Vc1の影響範囲内に設置された地下水観測井の中で注入空気の影響が見られる井戸(Fig.3中Md2-1~3およびFig.2中Md7-1~3のシンボル■)を用いて算定すると、35日後が0.155mgL⁻¹、70日後が0.077mgL⁻¹であった。この値とヘンリー定数0.3641(例えば、西村・水上、1995)から気液平衡ガス濃度(mgL⁻¹)を計算し、ppmVの単位に換算すると8.15ppmVおよび4.06

ppmV となった。これらの値は注入空気に揮発したガス濃度の推定値よりも高い。すなわち、現地における地下水と注入空気の界面における物質輸送過程(揮発過程)は平衡には達していないと思われる。江種ら(1994)が行った室内カラム実験によると、含水率が気相率よりも大きい不飽和帯において、液相中のテトラクロロエチレン濃度が 20.0 mgL^{-1} の場合、気液平衡ガス濃度は 7.38 mgL^{-1} であるが、気相中のガス濃度は最大 0.01 mgL^{-1} にしかないことが確認されている。このことは、気液界面の物質輸送過程は平衡状態になりにくい、仮に平衡になるとしても非常に時間がかかることを示している。したがって、カラム実験における(土壌ガス濃度/気液平衡ガス濃度)の値(約700分の1)を参考にとすると、実スケール野外実験中の(注入空気に揮発したガス濃度/気液平衡ガス濃度)の値も同様に小さいと予想できる。しかし、実際には35日後の注入空気に揮発したガスの濃度が気液平衡ガス濃度の5分の3程度になっており、注入空気中のテトラクロロエチレンはすべてが地下水中からの揮発によるものではないと思われる。地下水中からの揮発以外の原因を考えると、残りは原液からの揮発である。すなわち、(注入空気に揮発したガス濃度/気液平衡ガス濃度)の値は、その値が小さい場合には地下水中に溶解している物質の溶解だけが生じ、大きい場合には地下水中に存在している原液からの揮発も生じていることを示していると推察される。

以上のように、抽出ガス濃度、土壌ガス濃度、そして地下水中濃度を用いて注入空気中に含まれているテトラクロロエチレン濃度を算定し、気液平衡ガス濃度と比較することで、抽出井 Vc1 の影響範囲内の地下水中に原液が存在している可能性が認められた。ただし、70日後には注入空気に揮発したガスの濃度が気液平衡ガス濃度の3分の1程度にまで小さくなっていることから、時間が経過するにつれて地下水中に注入された空気への揮発によって原液が大きく減少し、汚染された地下環境が回復しているものと思われる。

5. おわりに

本研究では、揮発性物質が地下水中に注入され

た空気に揮発することで水質が回復していく様子を調べるために、長期間の実スケール野外実験を実施した。その結果、空気注入を断続的に行う間欠運転によって注入空気の影響範囲がほぼ実験対象領域全域に達していることが明らかになった。特に地下水面下深い場所における影響範囲の拡がり大きい。また、抽出ガスと土壌ガス濃度、そして地下水中濃度から間接的ではあるが注入空気に揮発したガス濃度が算定でき、その妥当性も確かめられた。さらに、(注入空気に揮発したガス濃度/気液平衡ガス濃度)の値の時間変化から、地下水中に溶解している物質と共に地下水中に存在している原液も注入空気の影響で減少しつつある状況が推察できた。ただし、物質毎の濃度低下の違いなど、実スケール野外実験だけでは解明できない詳細な現象もあり、今後は室内実験や数値シミュレーションを行い、注入空気の流れがどの程度地下水の攪拌に影響を与えるか、地下水中の濃度や物質毎の揮発性の違いなどが濃度変化にどのような影響を与えるかなどを検討していく予定である。

参考文献

- 江種伸之・神野健二・鷺見栄一(1994)：ガス拡散を考慮した有機塩素化合物の不飽和一飽和領域における輸送特性解析、土木学会論文集、503(II-29)、167-176.
- 江種伸之・平田健正・福浦清・松下孝(1998)：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、42、349-354.
- 笠水上光博・山内仁・前川統一郎・西田道夫・岡田滋(1995)：エアースパージング・揚水システムの効果、地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第4回講演集、339-342.
- 笠水上光博・山内仁・岡田滋(1997)：エアースパージング・揚水システムの効果その2、地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第5回講演集、373-378.
- 長藤哲夫・今村聡・日下部治・平田健正(1998)：揮発性有機塩素化合物の土壌ガス吸引法における浄化影響要因に関する研究、土木学会論文集、594(VII-7)、35-44.

- 西村実・水上春樹(1995)：工業用洗浄剤に汚染された土壌や地下水の浄化、洗浄設計、Autumn、11-19.
- 平田健正・江種伸之・中杉修身・石坂信也(1996)：土壌ガス吸引と地下水揚水を併用した地下環境汚染の修復、環境工学研究論文集、33、47-55.
- Ji, W., A. Dahmani, D.P. Ahlfeld, J.D. Lin, E. Hill III (1993)：Laboratory study of air sparging: air flow visualization, *Groundwater Monitoring and Remediation*, Fall 1993, 115-126.
- Unger, A.J.A, E.A. Sudicky and P.A. Forsyth(1995a)：Efficiency of air sparging for remediation of heterogeneous formations contaminated by dense non aqueous phase liquids, *Groundwater Quality: Remediation and Protection*, IAHS Publisher, **225**, 449-456.
- Unger, A.J.A, E.A. Sudicky and P.A. Forsyth(1995b)：Mechanisms controlling vacuum extraction coupled with air sparging for remediation of heterogeneous formations contaminated by dense nonaqueous phase liquids, *Water Resources Research*, **31**(8), 1913-1925.
- Lundegard, P.D. and D. LaBrecue(1995)：Air sparging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, U.S.A.): Actual and apparent radius of influence, *Journal of Contaminant Hydrology*, **19**, 1-27.
- (受付：1998年7月1日、受理：1998年10月6日)