

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

AIR MIGRATION AND CHANGE OF CONTAMINANT CONCENTRATION IN GROUNDWATER INDUCED BY *IN SITU* AIR SPARGING

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 博士(工学) 和歌山大学助手 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

²正会員 工学博士 和歌山大学教授 システム工学部環境システム学科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

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 *in situ* air sparging technology, devised to facilitate contaminant volatilization with air injected into groundwater, was applied to a site contaminated with volatile organochlorines like tetrachloroethylene, carbon tetrachloride, chloroform etc. These substances were utilized to produce chemicals for many years. This paper examined air migration in groundwater, influence radius of sparging air and change of contaminant concentration due to air sparging technology. In this site, the mounding test was carried out to reveal detailed air migration in groundwater. As a result, the influence radius of sparging air was within 14m and sparging air smoothly flowed in groundwater. And, in the *in situ* air sparging, the contaminant concentrations decreased at some observation wells in the domain of influence radius of sparging air. In particular, carbon tetrachloride, the Henry's constant of which was the highest among substances specified, decreased appreciably.

Key Words : *in situ* air sparging, mounding test, air migration, volatile substances

1. はじめに

トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの揮発性物質で汚染された地下環境の修復技術として、土壌ガス吸引法やエアースパージング法が考案され、現地に適用されつつある^{1),2)}。土壌ガス吸引法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)³⁾、地下水中に溶解している物質も除去できる。ただし、揚水した地下水は地上でばっ気処理を行う必要があり、処理水の処分方法が問題である。一方、エアースパージング法は地下水中に空気を吹き込み、地下水の流れを攪乱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。この方法は二重抽出法と異なり、汚染された地下水の処理が不要になる利点がある。

しかし、空気を吹き込むことで地下水の流れが

乱されるので、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、汚染物質を周辺へ拡散させる危険性もある。すなわち、エアースパージング法を適用するためには、注入空気の移動特性や空気の通過による地下水中の物質濃度変化を明らかにしておくことが重要である。そこで本現場実験では、トルエンやテトラクロロエチレンなどの揮発性物質で汚染された地下水中に空気を注入して、地下水圧力、土壌ガス圧力、物質濃度を計測し、注入空気の移動特性、影響範囲、および地下水浄化効果を検討した。

2. 現地状況

本研究で対象としたのは化学工場で、現在は跡地になっている。現地の地質状況は、地表面から-4mまでが表土とローム層、-5.75mまでが凝灰質粘土層、-8mまでが砂まじりのシルト層、その下がシ

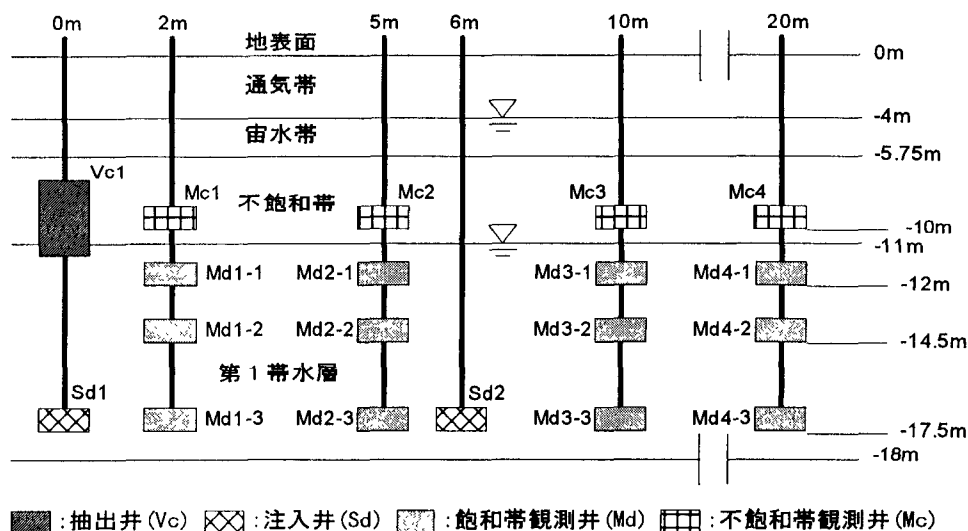


図-1 井戸配置図

ルト質細砂および砂層である。凝灰質粘土層の上には-4mから-5.75mまで宙水帯が存在しており、その下に不飽和帯を挟んで-11m地点から第一帯水層になっている。宙水帯と第一帯水層に挟まれた不飽和帯で行った透気試験結果から、浄化対象地域周辺の地質に異方性は見られなかった。

土壌中含有量試験によると、地下環境中にはトルエン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、四塩化炭素、クロロホルムの計5物質が宙水帯から第一帯水層にかけて多く存在していた。また、地下水中濃度を測定した結果、各物質は深さ12mの第一帯水層中で高濃度を示した。そこで、今回の現場実験では第一帯水層の浄化を目的として空気の入注を行った。

3. 現場実験の概要

今回の現場実験では、注入空気の影響範囲を測定するためのマウンディング試験、および空気注入井の位置を変えた2通りのエアースパーキング法の本運転を行った。図-1に現地での土壤ガス抽出井、空気注入井、および観測井の配置図を示している。今回は鉛直断面内での圧力や濃度変化が観測できるように各井戸を配置した。

マウンディング試験は、注入空気の流れを明らかにして、その影響範囲および本運転時の汚染の拡散がないことを確認するために実施した。空気注入井にはSd2を用い、本運転と同じ流量120L/minで1時間連続注入し、飽和帯観測井で地下水圧力を経時的に測定した。一方、本運転は長期的な実験を行って浄化効果を判断する前段階として、注入空気の移動特性や空気通過の影響による物質濃度

変化を明らかにするために実施した。そこで、運転時間は短時間(1ケース20時間)にし、土壤ガス圧力、物質濃度などをできるだけ多く測定することにした。3月25日から3月27日までは空気注入井と土壤ガス抽出井が深度は異なるが同じ地点に位置した運転で(RUN1)、25日11:00から26日7:00まで(RUN1-1)と26日14:00から27日10:00まで(RUN1-2)の2回空気注入を行った。一方、4月1日から4月3日までは注入井が抽出井から6m離れた場所に位置した場合の運転で(RUN2)、1日11:00から2日7:00まで(RUN2-1)と2日14:00から3日10:00まで(RUN2-2)の2回空気注入を行った。本運転でも注入・抽出流量は一定として連続運転を行っている。空気流量は、注入が120L/min、抽出が180L/minである。なお、抽出井では期間中は常時土壤ガス吸引運転を行っている。

4. 測定結果

(1) 地下水圧力

図-2には、マウンディング試験によって得られた各観測井での地下水圧力上昇幅の経時変化を示している。空気注入期間中(10:00~11:00)はほぼ全ての観測井で圧力の上昇が生じている。また、注入停止後には速やかに圧力が低下し始め、停止から5時間後(16:00)には全ての地点でほぼ初期状態に戻っている。注入井に最も近いMd2-2では、注入期間中の圧力上昇が他の観測井と比べて大きい。また停止後1時間から5時間の間には圧力が初期状態以下になっている。この現象はMd1-3、Md3-3など他の観測井でも見られるが、Md2-2で最も顕著である。一方、Md2-1ではMd2-2のように大きな圧力

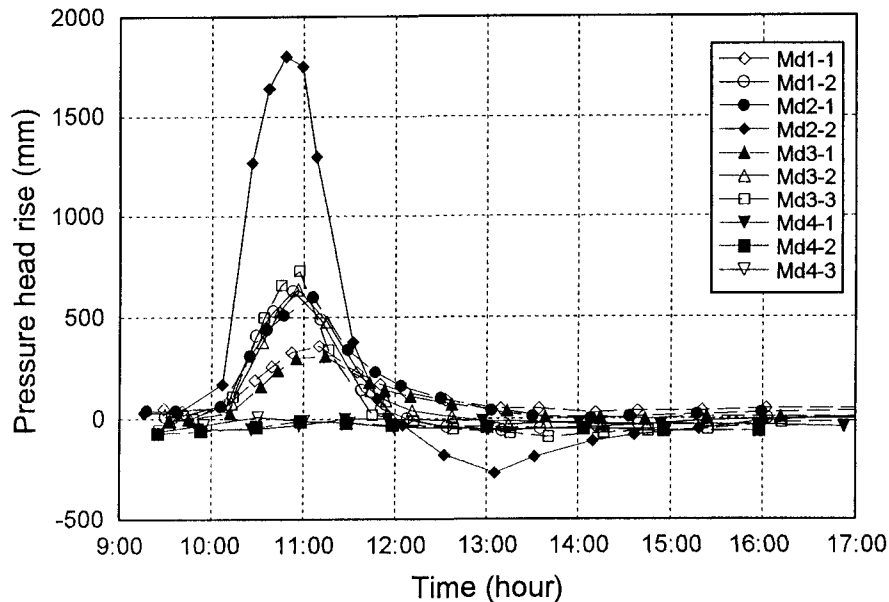


図-2 マウンディングに伴う地下水圧力の経時変化

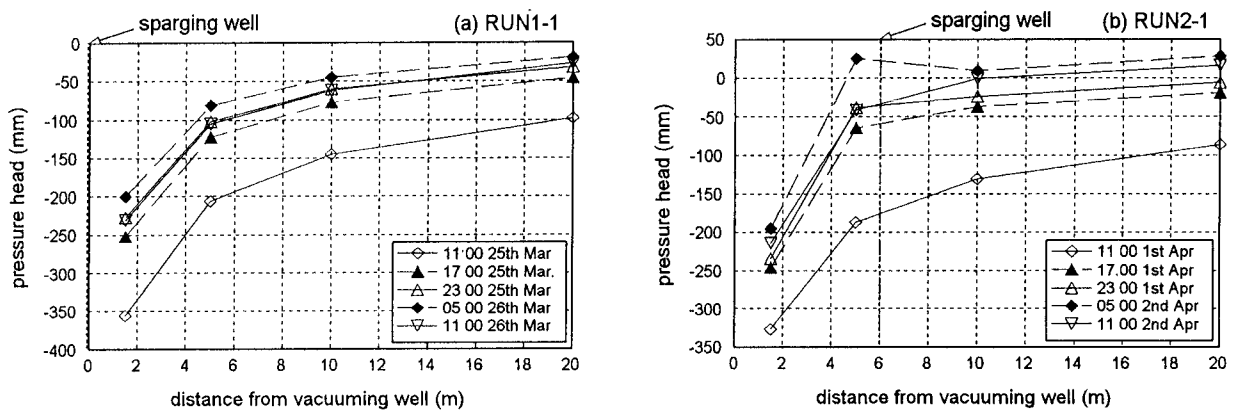


図-3 土壌ガス圧力および圧力勾配

の上昇はない。注入井から4m離れたMd3-1～3では、深い観測井ほど圧力上昇幅が大きくなっている。また、注入井を挟んでMd3-1～3とほぼ対称の位置にあるMd1-1と2でも同程度の圧力上昇が生じている。注入井から14m離れたMd4-1～3では、わずかに圧力の上昇が見られるが、各深度毎の上昇幅の差はほとんど無くなっている。

(2) 土壌ガス圧力

図-3(a)～(b)には、RUN1-1およびRUN2-1運転中の土壌ガス圧力および圧力勾配を抽出井の位置を原点にとり描いている。図-3(a)によると、ガス抽出のみを行っている間は抽出井付近で土壌ガス圧力の低下が生じる(3月25日11:00まで)。しかし、抽出の影響半径付近(10m地点)ではあまり低下しないため、抽出井方向に圧力勾配がつくことになる。空気注入を開始すると抽出井付近で他の地点よりも大きな圧力の上昇が生じ、抽出井を向いた圧力

勾配は小さくなる(3月25日17:00～26日5:00)。注入停止後(26日11:00)には抽出井付近の圧力が低下するが、10m地点ではほとんど変化しないため、圧力勾配は再び大きくなる傾向にある。

図-3(b)では、注入井が抽出井から6m離れた位置にある。この場合も空気注入を開始することで注入井付近(6m地点)の圧力が上昇する(4月1日17:00～4月2日5:00)。しかし、抽出井付近の圧力上昇は小さいため、結果として注入期間中は注入井から抽出井を向いた圧力勾配が大きくなる。注入停止後(4月2日11:00)には注入井付近の圧力の低下が生じ、圧力勾配は再び小さくなっていく。

(3) ガス濃度

図-4には抽出井戸Vc1の抽出ガス濃度の経時変化を示している。RUN1開始前とRUN2終了後の本運転実施前後で、ある程度の濃度の低下が見られる。また、運転中の抽出ガス濃度はいずれの物質も注

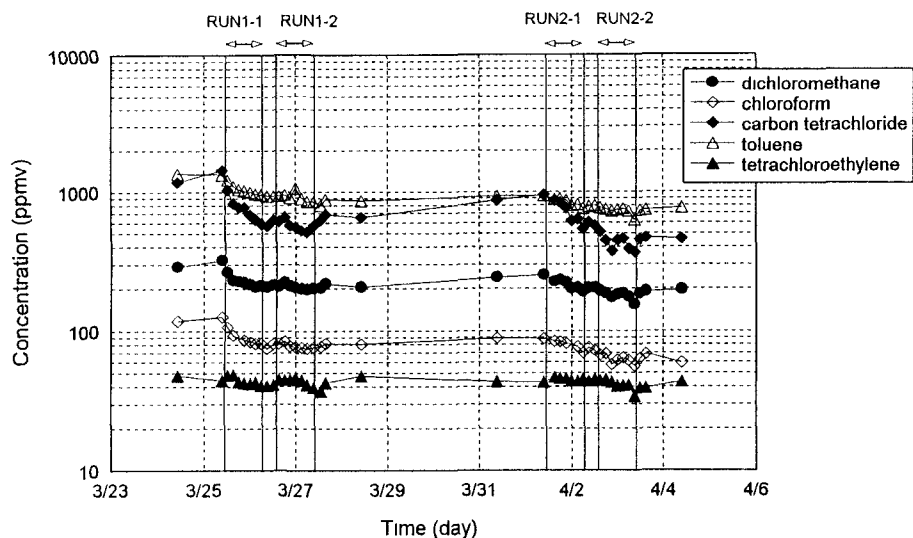
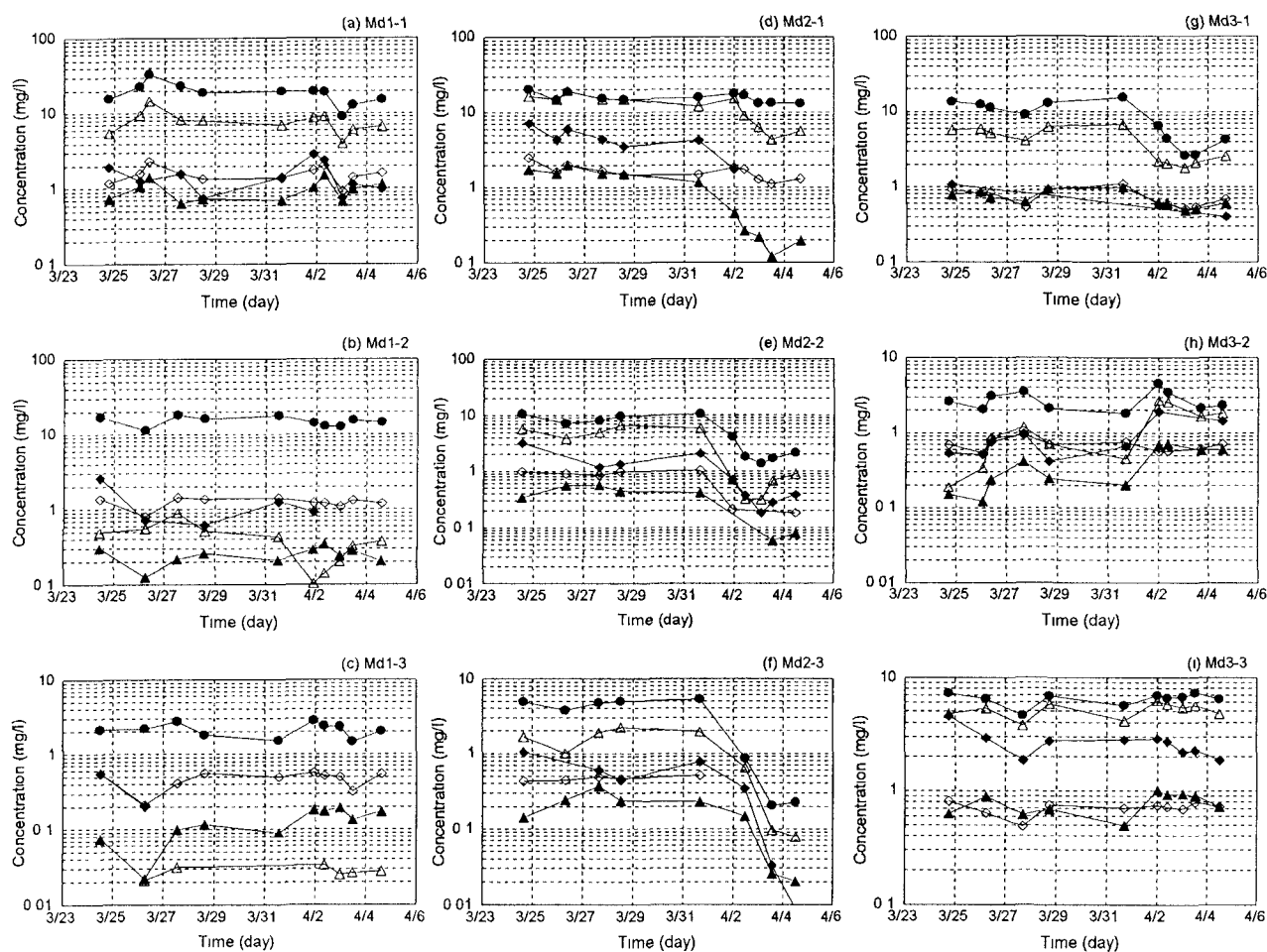


図-4 抽出ガス中の汚染物質濃度



●:dichloromethane, ◇:chloroform, ◆:carbon tetrachloride, △:toluene, ▲:tetrachloroethylene

図-5 地下水中物質濃度

入開始とともに低下し、停止すると元のレベルにまで回復している。特にRUN1にその傾向が強く、RUN2では徐々に濃度が低下していく傾向にある。一方、周辺土壌ガス濃度に関しては、ガス抽出による濃度の低下や空気注入の影響などが見られな

かったので、ここでは割愛する。

(4) 地下水中濃度

図-5(a)-(i)に各物質の地下水中濃度の経時変化を示している。RUN1運転中は特に大きく濃度が変

化している様子は見られない。ただし、Md1-2, Md2-3およびMd3-3では四塩化炭素の濃度低下が他の物質と比べて大きい。また、注入井に近いMd1-1では、RUN1-1運転中の四塩化炭素濃度が他の物質とは異なり低下傾向にある。一方、RUN2運転中には注入井に近いMd2-1～3で各物質濃度が低下しており、またMd3-1でも低下傾向にある。他の地点では全体的に濃度の変動幅が大きくないので低下傾向にあるとは言いがたいが、RUN2-1運転中の四塩化炭素(Md1-1)やトルエン(Md1-2)の変動が他の物質と比べて大きくなっている。

5. 考察

(1) 注入空気の移動特性

図-2のマウンディング試験によって得られた地下水圧力の上昇から、ほとんどの観測井で注入空気の通過の影響を見ることができる。また、注入停止後にはどの観測井でも速やかに圧力が低下し始めていることから、飽和帯中に空気溜りは生じておらず、注入空気がスムーズに流れていると考えられる。ただし、観測井によっては空気が直接通過していなくても圧力の伝達により変化が生じるので、Md4-1～3のような圧力上昇の小さい場所では直接空気が通過していない可能性もある。

一方、空気注入による圧力上昇幅は観測井毎に異なっている。空気注入開始前にはほとんど圧力差がないので、上昇幅の差はそのまま2地点間の動水勾配になる。そこで、空気注入停止時(図-2中の11:00)における飽和帯観測井の地下水圧力上昇幅、および鉛直方向の動水勾配を図-6に示している。地下水の流速はそれぞれの方向の動水勾配に透水係数を乗じたもので表される。すなわち、鉛直方向の動水勾配があればその地点では鉛直方向を向いた地下水の流れがあり、ゼロならば流れがないことになる。以上のことから、圧力上昇が生じ、かつ動水勾配が発生している地点では、注入空気の影響で地下水の流れが乱されている。言い換えれば、注入空気が通過している可能性が強い場所である。

図-6から、Md2-2は注入井から水平距離で1mしか離れていないため、算定できた動水勾配の中では値が最大である。すなわち、空気通過量が非常に多い地点と考えられる。注入井を挟んで対称な場所に位置し、水平距離で4m離れているMd1-2とMd3-2でも同程度の動水勾配が生じており、空気通過の影響による地下水の流れが見られる。ただし、動水勾配がMd2-2の4分の1程度であることから、空気

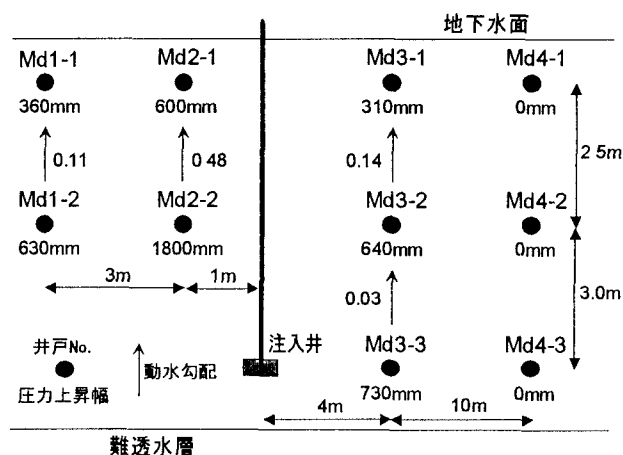


図-6 飽和帯観測井での圧力上昇幅および動水勾配

通過量はMd2-2よりも少なくなっている。一方、Md3-2の下方に位置するMd3-3では、距離的にはMd3-2より注入井に近いが、鉛直方向の動水勾配が4分の1程度である。これは、注入井と同じ深さで水平方向に4m離れた地点(Md3-3周辺)では、注入空気の通過があっても主な流路にはなっていないことを示している。すなわち、注入された空気は注入井直上や斜め上方に向かって流れ、主にMd2-2やMd1-2, Md3-2周辺を通過して不飽和帯に達していると思われる。したがって、飽和帯中の物質濃度もこれらの地点で変化が生じる可能性が強い。注入井から水平方向に14m離れたMd4-1～3では、わずかながら圧力が上昇しているが、上昇幅には差が見られず、鉛直方向の地下水の流れがほとんど発生していない。すなわち、注入空気の通過の影響がほとんどない場所である。このことから、本実験の影響範囲は14m以内と考えられる。

(2) 土壌ガスの移動特性

土壌ガス吸引によって不飽和土壌中のガス態の物質を除去する場合、抽出井における吸引風量が除去できる範囲(影響範囲)を決定する。この影響範囲内では、吸引によって生じる抽出井を向いた移流フラックスが回収量に大きな影響を与える⁴⁾。すなわち、土壌ガスの圧力勾配が重要となる。前章第2節で述べたように、抽出のみを行っている場合には抽出井方向に圧力勾配が生じるため、抽出井に向かう土壌ガスの流れが発生し、周辺のガス態の物質が回収されている。

図-3(a)では、空気注入を開始することで抽出井方向の圧力勾配が抽出だけを行っている場合よりも小さくなっている。これは空気の注入によって抽出井に向かう土壌ガスの流れが小さくなることを意味している。したがって、帯水層の異方性を

考えないなら、RUN1運転中は全方向から抽出井に向かう土壌ガスの流れが小さくなり、周辺土壌ガスの回収量が減る。そして、抽出流量が一定の場合には、周辺からの回収量が減った分だけ不飽和帯中に出てきた注入空気が回収されることになる。このことから、図-4においてRUN1運転中に注入を開始すると抽出ガス濃度が低下している現象は、注入空気中に揮発する物質濃度が周辺ガス濃度よりも低いことを意味している。

一方図-3(b)では、空気注入による注入井付近の土壌ガス圧力の上昇によって、注入井から抽出井を向いた圧力勾配が抽出だけの場合よりも大きくなる。このため、注入井から抽出井に向かう土壌ガスの流れが大きくなり、このライン上の土壌ガス回収量が増える。ただし、今回は注入井を1つしか設置していないので、土壌ガスの回収量が増えるのは抽出井と注入井を結んだライン上のみで、他の方向からの回収量は増えない。また、注入空気も注入井の位置する方向からしか回収されないため、RUN2運転時の注入空気の回収量は全方向から回収されるRUN1よりも少なくなる。したがって、RUN2では注入が始まってもRUN1ほど急激に抽出ガス濃度が低下していない(図-4)。

(3) 地下水中濃度の変化

図-5(a)-(i)によると、RUN1では全体的に濃度の変動が小さいが、Md1-1, 2, Md2-3およびMd3-3では四塩化炭素濃度に低下の傾向が見られた。四塩化炭素は対象となった5物質のうちで一番ヘンリー一定数が大きく、最も揮発し易い物質である。すなわち、これらの地点における四塩化炭素濃度の低下は注入空気中への揮発によって生じた可能性が高い。ただし、Md3-3は注入井と同じ深さで10m離れた場所にあり、第1項の注入空気の移動特性から判断すると、注入空気の通過の影響でない可能性もある。したがって、詳細については今回得られた注入空気の移動特性、影響範囲を考慮しながら、今後の長期運転によって判断する必要がある。

一方、RUN2運転中は注入井に近いMd2-1~3では各物質濃度が低下するが、運転停止後には回復している。これは、注入空気の流路付近でのみ濃度の低下が生じており、今回程度の運転時間では周辺地下水の濃度を低下させるほど空気注入の影響が大きくなかったことを意味している。すなわち、短期間の空気注入の影響で濃度が低下した地点では、運転停止後には周辺地下水の影響を受けて直ちに濃度が回復する。マウンディング試験から得られた注入空気の流路から判断すると、Md3-3と

Md1-3では注入空気の影響が小さいので濃度が低下していない。一方、注入空気が流れていると考えられるMd1-1, 2, Md3-1および2の中では、Md3-1で各物質濃度が低下しており、また、RUN2-1運転中の四塩化炭素(Md1-1)とトルエン(Md1-2)の濃度低下の傾向が他の物質と比べて大きい。Md1-1に関しては、RUN1の場合と同じようにヘンリー一定数の一番大きな四塩化炭素だけが空気注入の影響を強く受けたためと考えられる。Md1-2のトルエンに関しては今回の観測のみでは特に原因はつかめなかった。これは、今回程度の注入時間では濃度を十分低下させるほどの空気流量がなかったためであり、今後長期運転を続けることで注入空気の影響を見ていく必要がある。

6. おわりに

本研究は、地下水中に空気を注入した場合の注入空気の移動特性、影響範囲、および注入空気による汚染物質の濃度変化の様子を明らかにするために現地実験を実施し、短時間の集中観測を行った。その結果、マウンディング試験から注入空気の飽和帯中での挙動がおおよそ明らかになった。空気注入による地下水中の濃度変化は、今回の本実験が短時間だったために明瞭には表れていないが、注入空気の通過の影響がある地点のいくつかで低下の傾向が見られた。また、注入井と抽出井の位置がガス回収量に大きく影響するため、井戸の配置の仕方が浄化効率を上げるためには重要であることも明らかになった。

今後は、空気注入による汚染地下水修復を長期間継続するとともに、この資料を基に数値シミュレーションによる注入空気の移動特性や物質濃度変化などの詳細な現象解析を行って、浄化効果を確認していく予定である。

参考文献

- 1) 笠水上光博ほか：エアースパージング・揚水システムの効果、第4回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.339-342，1995。
- 2) 笠水上光博・山内仁・岡田滋：エアースパージング・揚水システムの効果その2，第5回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集，pp.373-378，1997。
- 3) 平田健正ほか：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，Vol. 13，pp. 47-55，1996。
- 4) 江種伸之・神野健二：土壌ガス吸引時における有機塩素化合物ガスの挙動について，地下水学会誌，Vol. 37，No. 4，pp. 245-254，1995。

(1997. 9. 30受付)