鈴木喜計*・原田泰雄**・村田順一***・佐藤賢司****・楡井 久****
: 揮発性有機塩素化合物による汚染地下空気の吸引法

Yoshikazu Suzuki*, Yasuo Harada**, Jyun-ichi Murata***, Kenzi Satoh**** and Hisashi Nirei**** :
New absorbing method for the contaminated ground air by volatile organic compounds

Key words : vadose zone, ground air pollution, ground air absorbing well, volatile organic compounds, Kimitsu City

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揮発性有機塩素化合物による地下水汚染の調査が全国的に進むにつれ, 調査対象井戸の 2~5% が新たな地下水汚染井戸として毎年発見され, 問題が深刻化している(環境庁, 1990).

筆者らは, 千葉県君津市のトリクロロエチレン汚染現場において, 1988 年から地下水汚染機構解明調査を行ってきた. その過程で, 地質圏(楡井ほか, 1991)における汚染物質の挙動を明らかにする目的から, 汚染源や汚染範囲などを特定した. さらに, 地質環境の保全を目的として汚染物質の除去対策を展開してきている.

小論では, 通気帯へ気化した揮発性有機塩素化合物の吸引除去(鈴木ほか, 1989b; 鈴木・矢野, 1989)の実験例を紹介して, 減圧による地下空気吸引の可否や影響圏, 吸引量と地下空気汚染濃度の関係, 地下空気汚染と地層汚染との関係解明などの成果をもとに, 地下空気汚染吸引法の有効性を述べる.

地下空気汚染の発生機構

地下水汚染とは, 地質圏に浸透した人為的物質(汚染物質)やその溶出で, 地層中の間隙水が汚染されることである. また, 汚染物質や汚染水が地層中を移動する過程での, 地層を構成する土(堆積物)+土壌への吸着や変質で地層汚染となる. 一方, 汚染物質・地層汚染物質・地下水汚染物質の 3 者から, 地質圏の気相へ気化して

地下空気汚染となる. これらの地層汚染・地下水汚染・地下空気汚染を総称して, 地質汚染(楡井, 1989)と呼んでいる.

揮発性有機塩素化合物による地下空気汚染の発生機構は, 純物質に近似される汚染物質や地層汚染物質からの気相への揮発であり, 理想状態では物質固有の飽和蒸気圧で平衡になる.

また, 溶液である汚染地下水の場合は, 汚染物質が気相と気液平衡で分配し, 理論的には $C_G = H \cdot C_L$ なる関係が成立する(ただし, C_G : 気相の濃度 [$\mu\text{g/l}$], C_L : 液相の濃度 [$\mu\text{g/l}$], H : ヘンリー定数 [無次元]).

この場合にも, 気・液 2 相間の平衡状態で保持されることから, 地下空気汚染濃度は, 汚染物質の種類・濃度・量・気相の圧力(外圧)・温度・容積に依存する.

第 1 図. 実験現場ならびに地下空気汚染吸引井・地下空気汚染観測井群の配置図とトリクロロエチレン表層汚染濃度分布.

GAAW: 地下空気汚染吸引井, OW-1~OW-9: 地下空気汚染観測井, No. 3, No. 37: オールコア地質ボーリング孔位置. 等濃度線図は, 君津式表層汚染調査法によるトリクロロエチレン表層汚染濃度分布を示す.

1992 年 1 月 13 日受付. 1992 年 5 月 1 日受理.

* 君津市環境部. Department of Environmental Protection, Kimitsu City, 2-13-1, Kubo, Kimitsu City 299-11, Japan.

** 東芝コンポーネンツ(株). TOSCOM Co., Ltd. 70, Uchiminowa, Kimitsu City 299-11, Japan.

*** 関東建設(株)開発部. Kanto Construction Co., Ltd. 661, Mobara City 297, Japan.

**** 千葉県地質環境研究室. Research Institute of Environmental Geology, Chiba, 3-5-1, Inagekaigan, Mihamaku, Chiba City 261, Japan.

第2図. トリクロロエチレン地層汚染断面図.

これらは閉鎖系の理想状態における相平衡であり、現場で地下空気汚染を取扱う場合には、特に、通気帯を構成する各通気層の広がり・層厚・層相・通気性・地中温度・地下空気圧・地層汚染濃度分布に関しての階層構造の見極めが重要となってくる。

実験現場と地質環境

実験は、君津市内に立地する半導体製造工場の No. 3 汚染現場で実施した(第1図)。

本地点は1972年から1976年までの5年間にわたり、工場内で発生したトリクロロエチレン廃液の集荷・積み替え場所として利用され、漏出やこぼれなどで廃液を地下浸透させた場所である。第1図にみられる等濃度線図は、君津式表層汚染調査法(鈴木ほか, 1989 a)によるトリクロロエチレン表層汚染分布を示し、現在も地下空気汚染が継続していることを示す。

本地点の地下地質は、中部更新統の下総層群上部を関東ローム層が被覆する構造をなす。下総層群上部の地層は、砂層とシルト層の互層からなる。地層汚染調査から、下位より、第2シルト層、第2砂層、第1シルト層、第1砂層の順で堆積していることが明らかになった(第2図)。なお、ここでは、実験に直接関係する第1シルト層と第1砂層の層相の詳細を以下に述べる。

第1シルト層: 本層の層相はシルトおよび砂質シルトである。本層は、北西方向35mにあるNo. 37地質ボーリング地点方向に向かって急激に層厚を減じ尖滅する。

第1砂層: 主に細粒砂と中粒砂により構成される。下部には貝殻混じりの中粒～細粒砂層、上部には細礫混じりの中粒～粗粒砂層をそれぞれ挟む。また、本層には5～10cm程度のシルト薄層が多く挟在する。なお、本

第3図. 地下空気汚染の吸引実験施設系統図.

地点周辺は、多数のオールコア地質ボーリングによって、地下地質と地層汚染分布が明らかにされているとともに、各帯水層に対応させた地下水汚染観測井が配置され、水文地質構造が詳細に解明されている。

地下水面は、地表面下約16mに存在し、これより上位は通気帯で、そこには複数の層準に宙水帯が存在し、これらの宙水帯には汚染物質が貯留されている。

さらに、この地点周辺では、地下水汚染対策のための連続揚水が行われ、第1砂層の地下水面は同層基底付近まで低下して、通気帯の層厚が増した。そのため回春が期待される被汚染砂層の実効層厚が増している。

実験施設

実験施設の構成は次の2系列からなる。その1つは、地下空気汚染吸引井(吸引井)、バキュームゲージ、気液分離器、調整バルブ、真空ポンプ装置、流量・流速計、排ガス処理装置からなり、各装置間は硬質塩化ビニル管で配管した(第3図)。他は、周辺に配置した地下空気汚染観測井(本文では、以後観測井と呼ぶか、または、観測井を区別するときはOW-1～OW-9のナンバーを使用する)である。

第1表. 実験施設の運転時と静止時における地下空気汚染吸引井・地下空気汚染観測井のトリクロロエチレン・ガスの管内濃度。

井戸名称	静止時 [ppm]	運転時 [ppm]	運転/静止 [倍]
吸引井	230	1,680	7.3
OW-1	80	80	1.0
OW-2	80	200	2.5
OW-3	110	145	1.3
OW-4	60	80	1.3
OW-5	10	45	4.5
OW-6	10	25	2.5
OW-7	40	50	1.3
OW-8	10	20	2.0
OW-9	0	痕跡	-

OW-1 から OW-9 は地下空気汚染観測井。管内濃度測定深度は各井の管頭下5m。地下空気汚染濃度測定には拡散式ガス濃度検知管を使用。

第 5 図. 吸引井における地下空気吸引量と排ガス中のトリクロロエチレン濃度.

第 4 図. 吸引井付近のトリクロロエチレン地層汚染濃度と吸引時における吸引井内の地下空気汚染濃度の変化. A: 地層汚染濃度分布と地下空気汚染吸引井の構造. B: 地下空気汚染吸引井の静止時と吸引時における管内地下空気汚染濃度の垂直分布.

吸引井は 1 井設置した. その構造は, 管頭下 3~21 m までストレーナを設置し, 管頭から 3 m までを無孔管にした. 孔壁と管壁間における大気流入を防止するため, 井戸元から半径 0.5 m の範囲を 1.8 m の深度までセメンチングした(第 4 図). 真空ポンプ装置は, 排気速度 590 l/min, 到達圧力 29 kPa, 駆動電動機 1.5 kw の回転翼形オイルレス真空ポンプである. 排ガス処理装置は, 本実験で吸引したトリクロロエチレン排ガスを処理するもので, 工場の系外排出ガス対策に用いられる有機溶剤回収装置を利用した.

観測井は, 吸引井を中心に, 3 方向に 120 度の離角をとった 3 直線上に配置した. そして, 3 直線上の各観測井は吸引井から, 2, 4, 8 m の各地点に設けられた. すなわち, この実験施設には合計 9 井(OW-1~OW-9)の観測井が設置されている(第 1 図). 各観測井の構造は, ハンドオーガーで掘削した裸孔であるが, 地表大気から密閉遮気構造とする目的で, 地表面下 1 m までケーシングし, ケーシング管壁と孔壁の間はモルタル充填仕上げとした. 観測井深度は, すべて管頭下 10 m である.

一方, 吸引井や観測井における地下空気汚染の定量分析には, 暴露時間内の平均濃度を変色層長から直読する拡散式ガス濃度検知管を用いた. また, 排出ガスは四弗化ビニル製の空気補集袋に補集して検知管式ガス測定器を用いて分析した. なお, 検知管測定値の比較検定のため, ガスクロマトグラフィーも用いた. また, 観測井の

管内圧力の測定は, 水 U 字管マンメータを使用した.

実験結果と考察

(1) 実験施設の地下空気吸引効果確認 実験装置を連続運転して, その際に各井の管内圧力を測定した.

吸引井内は減圧状態が維持され, OW-1 から OW-9 までの 9 井すべての管内圧力は大気圧より低下した. この現象は, 真空ポンプ装置による吸引井内地下空気吸引効果によるものである. その効果は, 少なくとも吸引井から半径 8 m に及んでいる.

(2) 吸引井内の地下空気汚染濃度変化 装置運転前の静止時と運転時について, 各井の管頭下 5 m の深度に拡散式ガス濃度検知管を 60 分間吊り下げ暴露し, 装置運転による定深度における管内濃度を比較測定した.

運転時には, 吸引井内で大幅な濃度上昇が認められ, 観測井内でも無変化から 4.5 倍までのバラツキはあるが, 濃度上昇が認められた(第 1 表). これは, 地質汚染物質の吸引井への移流を示すものである.

(3) 装置運転による各観測井内の地下空気汚染濃度変化 運転時における観測井内の地下空気汚染濃度とその設置場所との関係は, 吸引井から北西方向に線状配置した OW-1, OW-2, OW-3 の各観測井内地下空気汚染濃度が, 東方に線状配置した OW-4, OW-5, OW-6 の濃度や, 南西方に線状配置した OW-7, OW-8, OW-9 の濃度に比べ高い値を示した. これは表層汚染濃度分布(第 1 図)に対応する結果であり, 地下空気汚染分布と表層汚染分布との高い相関関係が裏づけられた.

一方、静止時と運転時における各観測井内の地下空気汚染濃度変化量と吸引井から各観測井までの距離との関係は、吸引井から 2 m 地点にある OW-1, OW-4, OW-7 では 1.0~1.3 倍, 4 m 地点にある OW-2, OW-5, OW-8 では 2.0~4.5 倍, 8 m 地点にある OW-3, OW-6, OW-9 では 1.3~2.5 倍であった。

吸引井から 4 m 地点にある各観測井での地下空気汚染濃度変化量が 2 m, 8 m 地点でのそれに比べて大きい。一般に至近距離ほど濃度変化量が大いものと推定されるが、この実験施設では吸引井に最も近い 2 m 地点にある観測井内地下空気汚染濃度変化量が小さかった。この現象は、吸引井周辺での地表からの大気供給による希釈作用と考えられる。このことは、吸引井周辺における地表面下数 10 cm の地下空気圧が、大気圧より低下して観測されていることから裏づけられている。

(4) 吸引井内における地下空気汚染濃度の垂直分布 装置の静止時と運転時において、吸引井の管頭下 1 m から地下水面付近までに 1 m 間隔で、15 個の拡散式ガス濃度検知管を吊り下げ暴露して、地下空気汚染濃度の垂直分布を比較測定した(第 4 図)。

静止時には、深度を増すにつれて濃度が高くなる。これは、汚染物質であるトリクロロエチレン・ガスの対空気比重が大いからである。運転時には、各深度の汚染濃度が静止時に比べ数十倍の高濃度になるとともに、その分布には 4 つの極大値がみられた。これは、第 4 図 A に示された地層汚染濃度分布と第 4 図 B に示した運転時の地下空気汚染濃度の分布を対比すると、層相からみた地層の単元や、地層汚染濃度の垂直分布と符合することが分かる。つまり、地下空気汚染濃度は、地層汚染の度合や地層の通気性に依存することが明らかになった。

また、14~15 m での地下空気汚染濃度の極大値は、第 1 砂層の汚染した地下水面からの分配が加わったものと考えられる。

なお、吸引井は管頭下 3 m まで無孔管のため、地下空気の直接的管内流入が無い。したがって、管頭下 3 m までは、装置静止時における地下空気汚染濃度はほとんど検知できなかった。また、運転時には、管頭下 3 m を境界として地下空気汚染濃度が半減している。これは管内に挿入した風速計が管頭下 3 m で 0.5 m/sec といった管内では特に大きな値を観測したことから、吸引井周辺の地表が裸地のため、大気が関東ローム層を通り、ストレーナ最上部から流入して吸引され、その結果として、管頭下 3 m 以深の管内汚染地下空気が希釈された

と推定される。

(5) 実験施設での地下空気汚染吸引効果 吸引井に直列する調整バルブ開度を各吸引量に設定し、バキュームゲージで吸引井の管内圧力をモニターするとともに、真空ポンプ装置からの排出ガスを捕集袋に捕集し、検知管式ガス測定器で濃度測定し、吸引量と吸引井管内減圧量・地下空気汚染濃度変化の関係を調べた。

吸引量を増加させると、吸引井管内圧力が低下して排出ガス濃度が上昇した(第 5 図)。これは、地下空気圧を低下させたことによって、トリクロロエチレンの気化が促進され、同物質による地下空気汚染の濃度が上昇したことを示す。

まとめと今後の課題

トリクロロエチレンで汚染された通気帯を真空ポンプで減圧すると、地下空気圧が低減し、通気帯内での同物質の揮発と分配が促進され、同物質による高濃度の汚染地下空気が連続的に吸引され、揮発性有機塩素化合物に対しての地下空気汚染修復手法としての有効性が確認された。また、地下空気汚染吸引量は、地質環境に大きく支配されている。

一方、実験に用いた真空ポンプ装置の能力不足と、吸引井のストレーナ位置が通気性の良好な砂層であったことなどから、条件設定範囲が狭く、吸引量・減圧・地下空気汚染濃度の限界点を見いだせなかった。また、地層の層相単元と地下空気汚染に関する定量化などについては、今後の課題としたい。

謝辞 本研究にあたり、関東建設(株)岩本広志氏と(株)ガステック松延邦明氏にお世話になった。記して感謝申し上げる。

文 献

- 環境庁, 1990 編, 平成 2 年度版環境白書各論. 139p.
- 楡井 久, 1989, 環境資源としての地下水—21 世紀への贈り物—。日本地質学会・同関東支部シンポジウム「地層汚染と地下水汚染」演旨集, 1-24.
- ・佐藤賢司・古野邦雄・鈴木喜計・中村正直, 1991, 地下水汚染の発生する背景とその解決への一里塚。地下水汚染論(地下水問題研究会編), 共立出版, 東京, 2-20.
- 鈴木喜計・磯部光一・渡辺達男・矢野 勝・村田順一・佐藤賢司・楡井 久, 1989a, 有機塩素化合物による地質汚染簡易調査法。公害と対策, no. 15, 17-24.
- ・佐藤賢司・楡井 久, 1989b, 君津市における有機塩素化合物による地層汚染・地下水汚染調査研究と対策。日本地質学会・同関東支部シンポジウム「地層汚染と地下水汚染」演旨集, 54-66.
- ・矢野 勝, 1989, 地下水汚染機構解明調査汚染対策。生活と環境, no. 10, 33-41.