

有機塩素系化合物汚染に対する土壌ガス吸引法の浄化効果

奥村興平・大洞輝雄

Remediation Effect of Soil Gas Extraction Method for Soil Contamination with Organo-Chloro Compounds

Kohei Okumura and Teruo Ohora

Abstract

Extensive pollution of soil and groundwater by the organo-chloro compounds, which is a carcinogenic substance, is spreading progressively. The techniques of the investigation and the measure which is suitable to Japan where the hydrogeological condition is complicated have been developed.

We examined pollution mechanism and the remediation effect of soil gas extraction method to organo-chloro compounds pollution at a site on Shimousa plateau.

90 % of the tetrachloroethylene (PCE) was found in the unsaturated zone over an area of about 45m×30m around factory site.

By considering air permeability of each formation we tried the opening of the circumference wells to improve the remediation efficiency. By operating these wells in Joso clay, it was possible to improve by 50 % in the suction efficiency. In the 1st sand formation, suction influence range was expanded twice in volume and improved by 33 % of the suction efficiency when conducting simultaneous extraction in 3 wells.

In the application of the soil gas extraction method this time, the following problems were arisen.

- 1) In Kanto loam formation, influence range became narrow by suction of air.
- 2) In Joso clay, air permeability was low and the extraction efficiency was low.

We propose the improvement measures; firstly, cut off gas suction from the ground surface by placing a sheet over the surface, and secondly, extraction from wells while sending the compressed air.

To develop the technique as the system of low cost, is our urgent task.

要 旨

発ガン性の恐れのある有機塩素系化合物による土壌と地下水の汚染が広範に進行しており、地形・地質が変化に富み水理地質状況が複雑な日本の実態にあった調査・対策技術が開発されている。

今回下総台地で発生した汚染機構の解明と不飽和帯の汚染に対する土壌ガス吸引法による浄化対策の効果について検討した。

汚染物質であるテトラクロロエチレン (PCE) の約90%が工場敷地を中心とした約40m×35mの範囲の地表面下の不飽和帯に分布することが明らかとなった。

地層別の吸引特性から、常総粘土層では周辺井戸開放を行い、吸引効率は50%向上できた。また、第1砂層では、3地点同時吸引により、吸引影響範囲が2倍に拡大し、吸引効率は、33%向上できた。

しかし、今回の土壌ガス吸引法では次の点が課題として残された。

- 1) 関東ローム層では、地表からの吸い込みによる吸引影響範囲が狭くなった。
- 2) 常総粘土層は、透気性が悪く、吸引効率が低かった。

改善策として、関東ローム層については地表のシート被覆、常総粘土層については吸引井周辺井戸へ圧縮空気を送りながらのガス吸引が有効であろう。

今後、コストミニマムなシステム技術の開発・構築が急務と考えている。

1 まえがき

1981年に米国のシリコンバレーで半導体工場の地下貯蔵タンクから漏出した有機塩素系化合物が原因と見られる土壌と地下水の汚染が発生し、工場周辺住民に多くの健康障害が生じたため、大きな社会問題を惹起した¹⁾。我が国でも実態の重大さを知った環境庁は、1982年に政令指定都市と地方の代表都市併せて15都市で1360井戸について地下水汚染実態調査²⁾を実施した。その結果、世界保健機構(WHO)のガイドラインを上回る飲用不可の井戸が、都市により差異はあるものの、2~4%認められた。その後の調査でも、全国各市区町村の地下水から1984年に定められた暫定的な水道法水質基準を上回る有機塩素系化合物が検出されている。

こうした地盤環境の悪化に憂慮した政府は、地下水の水質を保全し汚染を未然に防止するとともに汚染された地下水の浄化を推進させるため、1989年に水質汚濁防止法と水道法の水質基準を改正し、さらに、1994年には水質や土壌の環境基準(表-1)を強化した。

このような法規制の強化とあいまって1980年代後半から有機塩素系化合物による地盤環境汚染³⁾(土壌と地下水の汚染)の調査および対策に関わる技術開発と実証実験が、官、民、学の環境保全部門を中心に進められてき

た。調査技術については、汚染の実態把握および機構解明を目的とした表層土壌ガス調査やボーリングによる土壌と地下水の採取、試験、分析等の基本技術はほぼ確立されたといえる。

一方、浄化対策技術については、欧米からの導入技術や独自開発技術を含めて、ここ5~6年の間に土壌ガス吸引法、地下水揚水法、土壌掘削法が主に実施されるようになってきた。とくに、土壌ガス吸引法は、土地建物等現況を大幅に改変することなく揮発した汚染物質の除去が出来ることから、広く用いられるようになった。

一般に、地形・地質が変化に富み、地層構成や水理地質構造が複雑であり、さらに都市部での土地改変等が進行している我が国では、地層の特性や汚染の分布と汚染物質の挙動に応じた調査・対策技術を適用する必要がある。本報文では、複雑な汚染現象の解明と浄化対策に焦点を置き、下総台地での事例研究の成果をもとに以下の2点を中心に述べる。

- ① 下総台地(標高20~25m)で発生した有機塩素系化合物による土壌と地下水の汚染の実態把握と機構解明
- ② 多層地盤にわたる不飽和帯の汚染に対する改良型土壌ガス吸引法による浄化方法の効果

表-1 土壌及び水質の環境基準値

Table 1 Environmental quality standards for soil and water pollution

項目	対象	土壌(溶出量値)	水質	項目	対象	土壌(溶出量値)	水質
		平成3年8月環告第46号 改正:平成7年3月環告第19号	昭和46年12月環告59号 改正:平成7年3月環告第17号			平成3年8月環告第46号 改正:平成7年3月環告第19号	昭和46年12月環告59号 改正:平成7年3月環告第17号
重金類	カドミウム	0.01以下 かつ1mg/kg(株)未満	0.01以下	有機塩素系化合物等	ジクロロメタン	0.02以下	0.02以下
	全シアン	検出されないこと	検出されないこと		四塩化炭素	0.002以下	0.002以下
	有機リン	検出されないこと	—		1,2-ジクロロエタン	0.004以下	0.004以下
	鉛	0.01以下	0.01以下		1,1-ジクロロエタン	0.02以下	0.02以下
	六価クロム	0.05以下	0.05以下		シス-1,2-ジクロロエタン	0.04以下	0.04以下
	砒素	0.01以下 かつ15mg/kg(仕働)未満	0.01以下		1,1,1-トリクロロエタン	1以下	1以下
	総水銀	0.0005以下	0.0005以下		1,1,2-トリクロロエタン	0.006以下	0.006以下
	アルキル水銀	検出されないこと	検出されないこと		トリクロロエチレン	0.03以下	0.03以下
	PCB	検出されないこと	検出されないこと		テトラクロロエチレン	0.01以下	0.01以下
	銅	125mg/kg(仕働)未満	—		ベンゼン	0.01以下	0.01以下
等	セレン	0.01以下	0.01以下	1,3-ジクロロプロパン	0.002以下	0.002以下	
				チウラム	0.006以下	0.006以下	
				シマジン	0.003以下	0.003以下	
			チオベンカルブ	0.02以下	0.02以下		

単位: mg/l

表-2 有機塩素系化合物の物性

Table 2 Physical and chemical properties of organo-chloro compounds

物質名	トリクロロエチレン	テトラクロロエチレン	1,1,1-トリクロロエタン	水	海水(塩分度3.4%)	備考
示性式	CHCl=C Cl ₂	C Cl ₂ =C·Cl ₂	CH ₃ ·C Cl ₃	H ₂ O	—	
密度(g/ml)	1.46	1.62	1.32	1.00	1.02	20°C
動粘性係数(mm ² /s)	0.40	0.54	0.65	1.01	1.1	20°C
溶解度(mg/l)	1,070	160	1,700	—	34,000	10°C
沸点(°C)	87.2	121.2	74.0	100.0	—	760mmHg

Schwille(1981): Quality of Groundwater, Elsevier, pp.451~463

2 有機塩素系化合物汚染対応技術の現状

2・1 有機塩素系化合物による汚染

有機塩素系化合物は脱脂洗浄力にすぐれていることから、有機溶剤として金属部分や電子部品の洗浄、ドライクリーニング等種々の分野において広く使用されている。この有機塩素系化合物による土壌と地下水の汚染問題は、重金属や農薬による汚染問題が限られた地域で発生する局所的なものであるのに対して、全国各所で発生する多発的かつ広域的なものであるのが大きな特徴である。

有機塩素系化合物は無色透明で揮発性が高く不燃性であり、表-2¹⁾に示すとおり水より低粘性で重く、水に溶けにくいという性質がある。さらに、この化合物は炭素と水素にハロゲン族元素の塩素が結合しているために、分解が極めて起こりにくく安定で、地盤中において化学的作用等によっても浄化されにくい物質である。

地盤は土粒子(固相)と間隙からなり、間隙は水(液相)と気体(気相)で占められている。有機塩素系化合物が主に液状で地盤中に侵入すると、有機塩素系化合物の性状に応じて、

- ① 土粒子に吸着
- ② 間隙水に溶解
- ③ 間隙中に揮発(以下土壌ガスと記す)
- ④ 間隙中に原液状態(大量に侵入した場合)

の形で存在する。

動きの遅い地下環境では、間隙中に有機塩素系化合物が原液状態で存在すると、図-1⁴⁾に示すとおり土粒子の物性に応じた吸着、間隙水には飽和溶解度までの溶解、間隙水と気体にはヘンリーの法則に基づく飽和濃度までの揮発という関係(分配平衡)が成り立っているものと考えられる。

2・2 有機塩素系化合物汚染の調査・対策の考え方と技術の現状

有機塩素系化合物による土壌と地下水の汚染調査および対策に係る技術は、「有機塩素系化合物等に係る土壌・地下水汚染調査・対策暫定指針」(1994年11月、環水管第205号、環水土第207号環境庁水質保全局長通知)に概説されている。本指針は、国内外の汚染調査や対策に関する技術を調べ学識経験者や関連企業の専門家がとりまとめた提案をもとに作成されたものである。

汚染の調査と浄化対策の検討には、汚染状況や対策の緊急度等にもよるが、図-2⁵⁾のように段階的に進めることが効率的である。

第1段階では的確な調査対象範囲の設定のため、現地

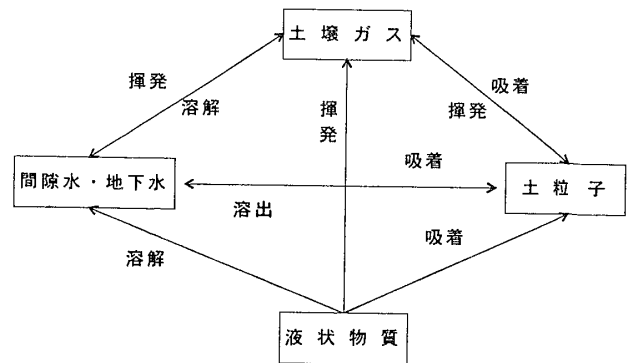


図-1 地層中での揮発性有機塩素系化合物の分配
Figure 1 Distribution of volatile organo-chloro compounds in underground condition

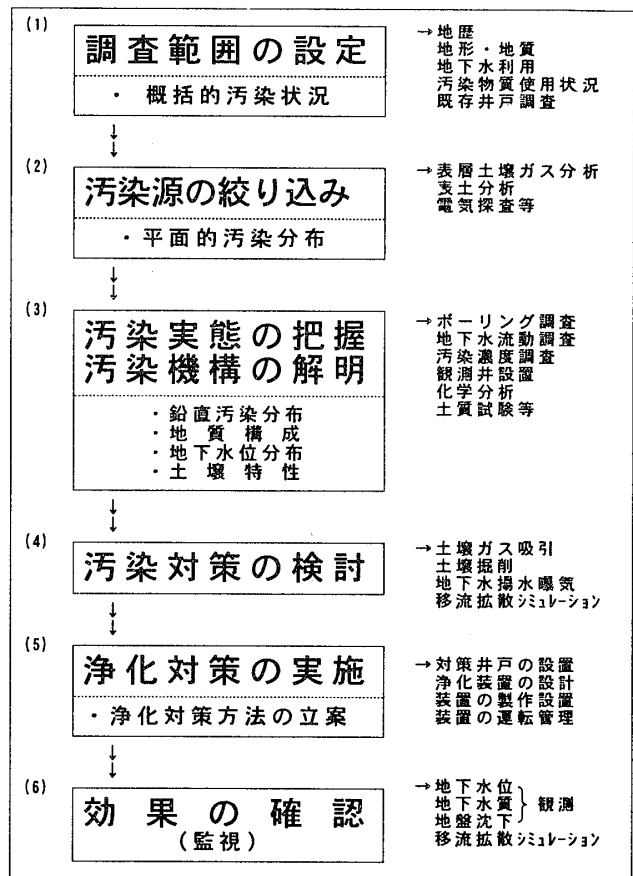


図-2 土壌・地下水汚染の調査・対策フロー
Figure 2 Flowchart of investigations and remediations to soil and groundwater pollutions

の状況を確認し、既設井戸調査を含め既存資料調査から汚染概況を把握する。具体的には、地層の構成(帯水層分布の確認)、地下水の流動、汚染物質使用履歴、汚染物質の濃度分布を整理して、概略の汚染範囲と地下水の汚染深度を推定する。

第2段階では、第1段階で推定した汚染範囲内で、表層土壌ガス調査を行い汚染源を特定する。

第3段階では、推定された汚染範囲内でボーリングを行い詳細な地層の構成、地下水分布とその流動状況、土壌および地下水の鉛直方向の汚染状況を明らかにし、汚染機構を解明する。

有機塩素系化合物により汚染された地盤の浄化対策の方法を確立する目的で、汚染状況と水理地質状況に応じて各種の室内試験研究や現地実験などが行われている。浄化対策技術は、大きくは(1)拡散防止技術、(2)無害化処理技術、(3)物理的な回収技術、に分けることができる⁶⁾。現状、技術開発が比較的進み実用化されつつあるのは、(3)物理的な回収技術に分類される次の3法である。

- ① 汚染土壌の除去
- ② 汚染地下水の汲上げ
- ③ 揮発汚染物質を含む土壌ガスの吸引除去^{7)~10)}

3 有機塩素系化合物汚染分布の確認

—下総台地での汚染事例—

3・1 多層地盤における汚染の実態と問題点

全国の市区町村で地下水汚染調査が進められた結果、清澄と信じられていた地下水の汚染が意外に広範であり、とりわけ、生活用水を地下水に依存している割合の高い自治体では事態を深刻に受け止め、条例や指針を策定し

浄化対策まで実施するに至っている。

本報文で述べる汚染事例においても、自治体による広域の概況調査でまず汚染が発見された。その後の汚染井戸周辺調査によって図-3¹¹⁾に示すとおり、汚染範囲が200m×100mで、深さ約50mの地下水までもが汚染されていることが分った。また、地下水流動方向が南南東から北北西に向かっており、高濃度汚染井戸がテトラクロロエチレン(tetrachloroethylene; 一般的にPCEと略称されるため本報文でもPCEと記す)を使用するドライクリーニング工場の西側に近接していることから、当工場が汚染源と推定された。

本地域は標高20~25mの洪積台地にあり、洪積層とそれを覆う厚さ2~3mの関東ローム層(下末吉ローム層)からなる(表-3)。洪積層は下総層群の砂層を主体とし、厚さ0.2~2mのシルト層を挟み、最上部には厚さ1~2mの常総粘土層が分布する。

PCEは、関東ローム層、常総粘土層中を浸透し、下総層群の砂層に胚胎する地下水に至っている。したがって、各地層中のPCE汚染範囲と量および存在形態、さらに詳細な水理地質状況などを把握することが適切な浄化対策を検討するために重要である。

そこで、地中への侵入源と平面的な汚染分布を明らかにするための表層土壌ガス調査と地層構成と鉛直方向の

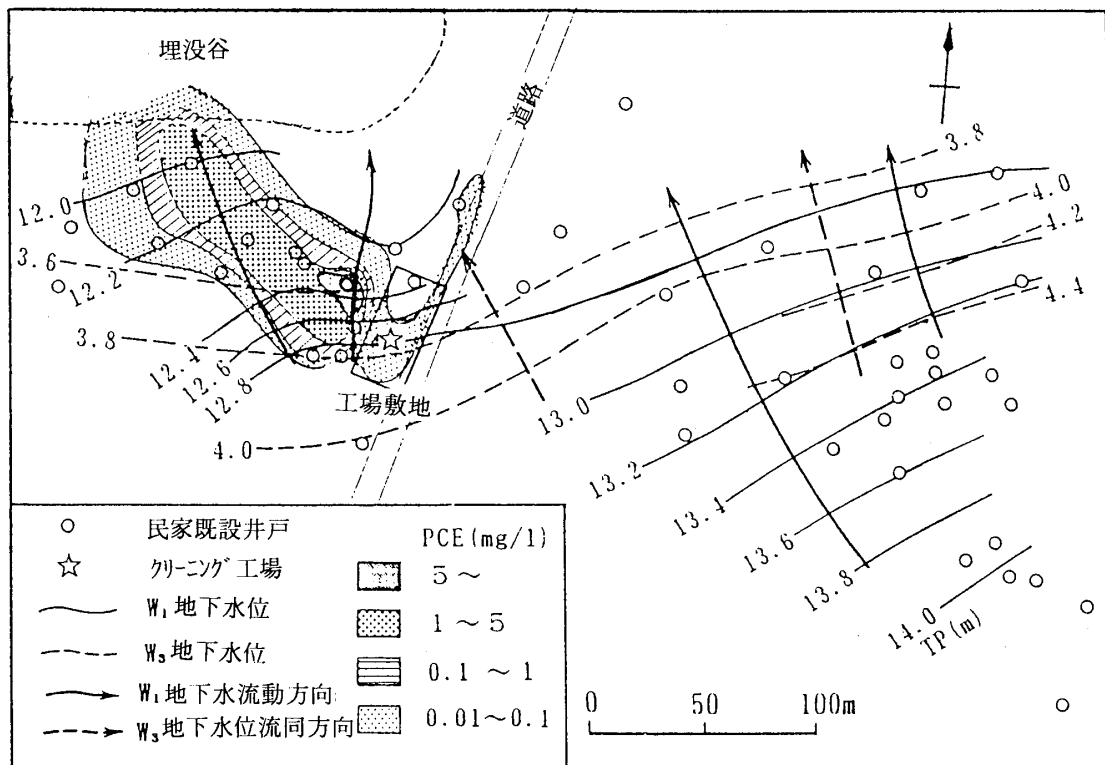


図-3 帯水層別地下水水位等高線と地下水PCE濃度分布図
Figure 3 Contour map of water tables and PCE concentrations in each aquifer

汚染分布を明らかにするためのボーリング調査を主体に進めた。

3・2 汚染の実態把握

(1) 汚染の平面的な分布

表-3 地質構成表

Table 3 Geological structure of investigated area

時代	地層	記号	層厚(m)	記 事
更新世	埋土	Bs	0.3~1.2	細砂の埋土。色調は、黄褐色を呈する。一部、ロームを混入する。
	関東ローム層	La	2.1~2.5	暗褐色~褐色のローム。多孔質である。上部程表土化しており、植物根を混入する。下部は、ややしまっており、軽石φ0.5mm以下を多く混入する。
	常総粘土層	Tc	1.5~2.0	黄褐色の粘土質ロームが主であるが、下部は、灰白色の凝灰質粘土からなる。粘土質ロームは、多孔質であり、所々黒色物や軽石を混入し、一部砂質となる。凝灰質粘土は、粘性強く、植物根の溶解孔や、クラックが多く見られる。
第四紀	第1砂層	Dss1	9.0~9.3	細砂~微細砂からなり、色調は、灰黄褐色~よい黄色を呈する。マンガンパッチが多く、所々、中砂を混入する。下位の中砂とは漸移する。No. B-4, B-5では、最上部にヒメスナが見られる。
		Dss2	7.1~8.1	主に、中砂からなるが、所々細砂を混入する。色調は、黄褐色~オリーブ褐色を呈する。上部は、マンガンパッチが点在し、黒色のバンド(砂鉄)が多く見られる。最下部には、シルトレーベンが見られる。
		Dss3	3.6~4.5	細砂からなり、色調は灰褐色~灰黄色を呈する。シルトレーベン、サンドバイプレーベン(周囲シルト)が多く見られる。下部は、シルト混じりあるいはシルト質で、貝殻片を少量混入する。
紀世	第1シル層	Dcl	1.9	固結したシルトからなり、色調は、黄褐色~明黄褐色を呈する。層厚は、既往ボーリングNo.2地点において1.9m程度確認されている。既往調査により、本層は、微細砂及び細砂の薄層を挟むが、連続性があり、層厚も最大で9m程度と厚くなることから、難透水層に区分されている。

平面的な汚染分布の把握およびPCE侵入源の絞り込みのため、ドライクリーニング工場敷地内とその周辺の表層土壌ガス濃度を2mメッシュの交点で測定した。測定方法は、ボーリングバー(φ12mm)で深さ85cmまで穿孔後、孔底付近まで挿入したガス検知管(酸化剤により塩化水素を生成し、指示薬により紫色を呈する。検出限界値1ppm)に土壌ガスを吸引してPCE濃度測定を行った。

図-4の表層土壌ガスPCE濃度平面分布図に示すように、洗浄機が置かれていた①付近で最高濃度の12,000ppmが認められ、侵入源と判断した。平面汚染範囲は、工場敷地全域および隣接した駐車場まで広がり、さらに排水溝に沿って約80m先まで及んでいた。なお、数箇所濃度の高まりが認められるが、いずれも過去に洗い場やゴミの廃棄場所として使用していた所であった(図中の②及び③)。

(2) 汚染の鉛直方向の分布

a) ボーリング地点の選定

水理地質状況および土壌と地下水の鉛直方向の汚染分布を把握するため、平面的な汚染分布と前述の汚染地下水流動状況から、次の3つの点を考慮し選定した図-4の7地点においてボーリング調査を実施した。

- ① 表層土壌ガス最高濃度地点
- ② 井戸水高濃度汚染箇所近傍地点
- ③ 表層土壌ガス高濃度汚染箇所の地下水下流側地点

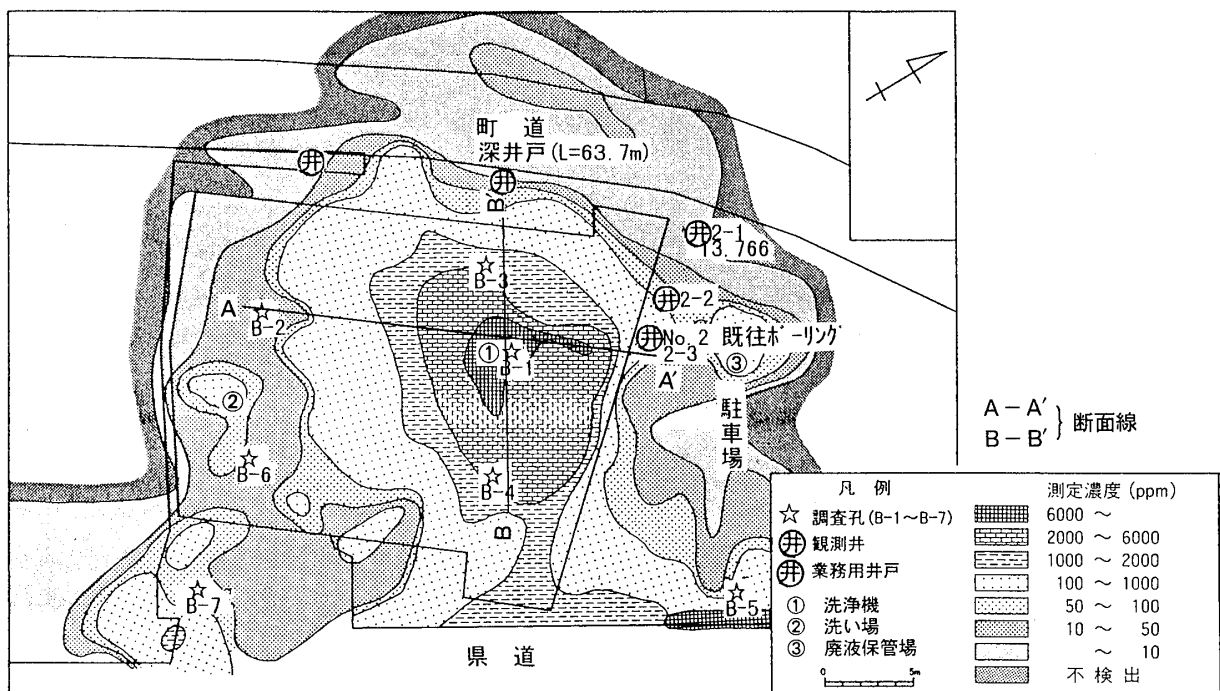


図-4 表層土壌ガスPCE濃度平面分布図

Figure 4 PCE concentration contour in soil gas

ボーリングは、揮発性に富むPCEの正確な分析と詳細な地質観察を行うため、コアパッキングによるオールコアボーリングとした。ボーリング実施後は、φ10mmの丸穴（開口率約5%）で60メッシュの防虫網巻きのストレーナ管（口径50mm塩ビ製）を設置して、不圧地下水用の観測井とした。

b) 地層別の土質特性

汚染された各地層別の透水性とPCE量の推定を行うため、工場敷地内で行ったボーリングによって採取した代表試料（7地点のうち3地点での各地層から）について表-4に示す粒度、土粒子の密度、自然含水比、湿潤密度の4項目の土質試験を行った。

クレーガー法による20%粒径(D₂₀)からの推定透水係数は、Dss1層は約8×10⁻⁵cm/sec、Dss2層は約4×10⁻³cm/secであった。

表-4 土質試験結果一覧表
Table 4 Soil properties of each formation

地層区分		Lm	Tc	Dss1	Dss2	Dss3
試験項目						
湿潤密度 ρ _w g/cm ³		1.50	1.43	1.74	2.03	1.80
乾燥密度 ρ _s g/cm ³		0.95	0.79	1.29	1.60	1.29
土粒子の密度 ρ _s g/cm ³		2.76	2.72	2.69	2.69	2.69
自然含水比 ω _n %		59	80	35	27	39
粒度分布 (%)	砂分 (2000~75μm)	9	4	67	95	75
	シルト分 (75~5μm)	30	32	25	4	15
	粘土分 (5μm未満)	61	64	8	1	9

Lm: 関東ローム層 Tc: 常総粘土層 Dss1: 第1砂層上部
Dss2: 第1砂層中部 Dss3: 第1砂層下部

3 試料 (3 地点) の平均値を示す。

c) 鉛直方向の汚染分布の把握

検知管による土壌の簡易分析結果（表-5）をもとに推定した地層別のPCE濃度の平面分布（図-5）と鉛直分布（図-6、図-7 推定地質断面併記）から、地層別の土壌汚染実態は以下のとおりであると判断した。

- ① 埋土層(Bs)、関東ローム層(Lm)、常総粘土層(Tc)においては、洗浄機があったB-1地点付近で極めて高濃度（最高2045mg/kg湿土）を示した。
- ② 排水溝と側溝およびB-5地点の下位に分布する常総粘土層(Tc)にも10mg/kg湿土以上の汚染が認められた。
- ③ 第1砂層上部の細砂(Dss1)中では、1~10mg/kg湿土の汚染が敷地内全域に広がっており、とくに、B-1地点に次いで北西方向のB-3地点が高濃度であった。
- ④ 第1砂層中部の中砂(Dss2)中では、0.1~1mg/kg

湿土の汚染がB-1地点から西方に広がっていた。

- ⑤ 第1砂層下部の細砂(Dss3)中では、土壌のPCE濃度はほとんど0.1mg/kg湿土以下でB-1地点の0.31mg/kg湿土が最も高かった。

表-5 地層別土壌簡易分析結果
Table 5 Results of chemical analysis about each formation

地点	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
盛土 関東ローム層 (Bs~Lm)	7.5-205	ND-3.4	0.5-7.0	1.3-10	0.05-2.7	ND-0.80	ND-0.13
常総粘土層 (Tc)	250-275	4.7-6.6	5.4-14	6.4-10	6.9-16	0.13-3.4	ND-0.08
第1砂層上部 (Dss1)	2.2-1470	0.12-6.6	2.4-14	0.96-16	0.11-6.7	0.22-6.0	0.04-1.8
第1砂層中部 (Dss2)	0.14-2.5	ND-0.33	ND-1.7	ND-1.9	ND-0.17	0.06-0.29	ND-0.07
第1砂層下部 (Dss3)	ND-0.31	ND	ND-0.1	ND-0.1	ND	ND-0.07	ND

各地点・各地層の土壌濃度 mg/kg湿土 を示す。

3.3 汚染土壌中のPCE量

汚染の3次元分布と併せて、浄化対策の検討および効果の評価を行うため、図-5~7に示した地層別の土壌中PCE濃度の平面および鉛直分布と表-4に示した地層別の湿潤密度から、下記の算定式を用いて地層中の汚染PCE量を推算した。

$$W = A \times D \times r_t \times C \quad \dots (1)$$

ここで、

W ; 汚染PCE量 [kg]

A ; 地層別濃度区分毎の面積 [m²]

D ; 地層別濃度区分毎の層厚 [m]

r_t ; 地層別湿潤密度 [10³kg/m³]

C ; 適用濃度区分の上限値 [PCEkg/10³kg湿土]

である。

なお、PCEの水への飽和溶解度が160mg/lであることから、PCEの全てが間隙水に溶解するものとする湿土の飽和濃度は含水比53%の関東ロームは55mg/kg湿土、含水比83%の常総粘土層は73mg/kg湿土、含水比35%の第1砂層上部は47mg/kg湿土である。

飽和濃度を超過原液そのものが分布すると推定される汚染土壌は、関東ローム層、常総粘土層ともに約100m³を越え、分布面積はそれぞれ約30m²と50m²と推定される。また、地表下5~14mに分布する第1砂層上部までも原液が至っていることが分った。

このようにPCEが原液状態で存在することから、地層中のPCE量の算定に際して、土壌濃度は設定濃度区分の上限値を用いた。

以上のことから、表-6に示すとおり地層中の汚染PCE量の合計は約435kgであり、その大部分は深度GL-14m [第1砂層(Dss1)]以浅に存在し、具体的には、地下水位(GL-11m付近)以浅の不飽和帯に約396kg、その下部の飽和帯に約39kg存在すると判断した。

4 多層地盤における土壌ガス吸引法の適用と効果

4・1 有機塩素系化合物汚染と浄化対策

浄化対策に大きな影響を与える地層条件や地下水位の位置等の諸要因は汚染現場毎に異なるのが一般的である。それぞれの汚染現場に対して、どのような調査および浄化対策を採るかは難しい問題であるが、浄化対策の選定に伴って、事前の調査内容や手法も変化させていかなければならない。既に述べた各種の浄化対策のうち、土壌ガス吸引法は米国においてはかなりの実績があり、米国EPA(環境保護局)でも有機塩素系化合物の除去に有効な方法であると高く評価されている。

この方法は有機塩素系化合物により汚染された土壌の原位置浄化システムであり、浄化効率、地層の透気性(土の種類と飽和度)と汚染濃度によることはもとより、汚染物質の種類と存在形態により大きく異なる。

当該汚染地は、前章で述べたとおり不圧地下水面までの関東ローム層、常総粘土層および下総層群の第1砂層がPCEにより汚染されており、土地改変や建物設備を撤去できないという制約から、土壌ガス吸引法による浄化対策を実施した。

4・2 浄化対策法の検討

土壌ガス吸引法による浄化法検討の一般的な流れを図-8に示す。まず、汚染源と汚染の3次元分布と水理地質状況をもとに、土壌ガス吸引井および吸引装置を設置した。次に、一連の吸引試験を行い地層の透気性と吸引影響範囲を把握して、PCE等の除去効果および最適浄化対策条件を検討した。

4・3 改良型土壌ガス吸引法の特徴

なるべく早く土地・建物を活用したいとの要望を受け、広い範囲から低い吸引圧で多くの汚染土壌ガスを吸引できる効率的な土壌ガス吸引法を検討した。そこで、吸引圧および吸引風量の計測管理と連続運転が出来る次の機能と特徴を備えた改良型土壌ガス吸引装置を製作し使用した(図-9の装置模式図)。

(1) 装置の構成

- ① 真空ポンプおよび活性炭吸着塔を有する『バキューム装置』
- ② バキュームを4本の吸引井に分岐する『分岐スタンド』

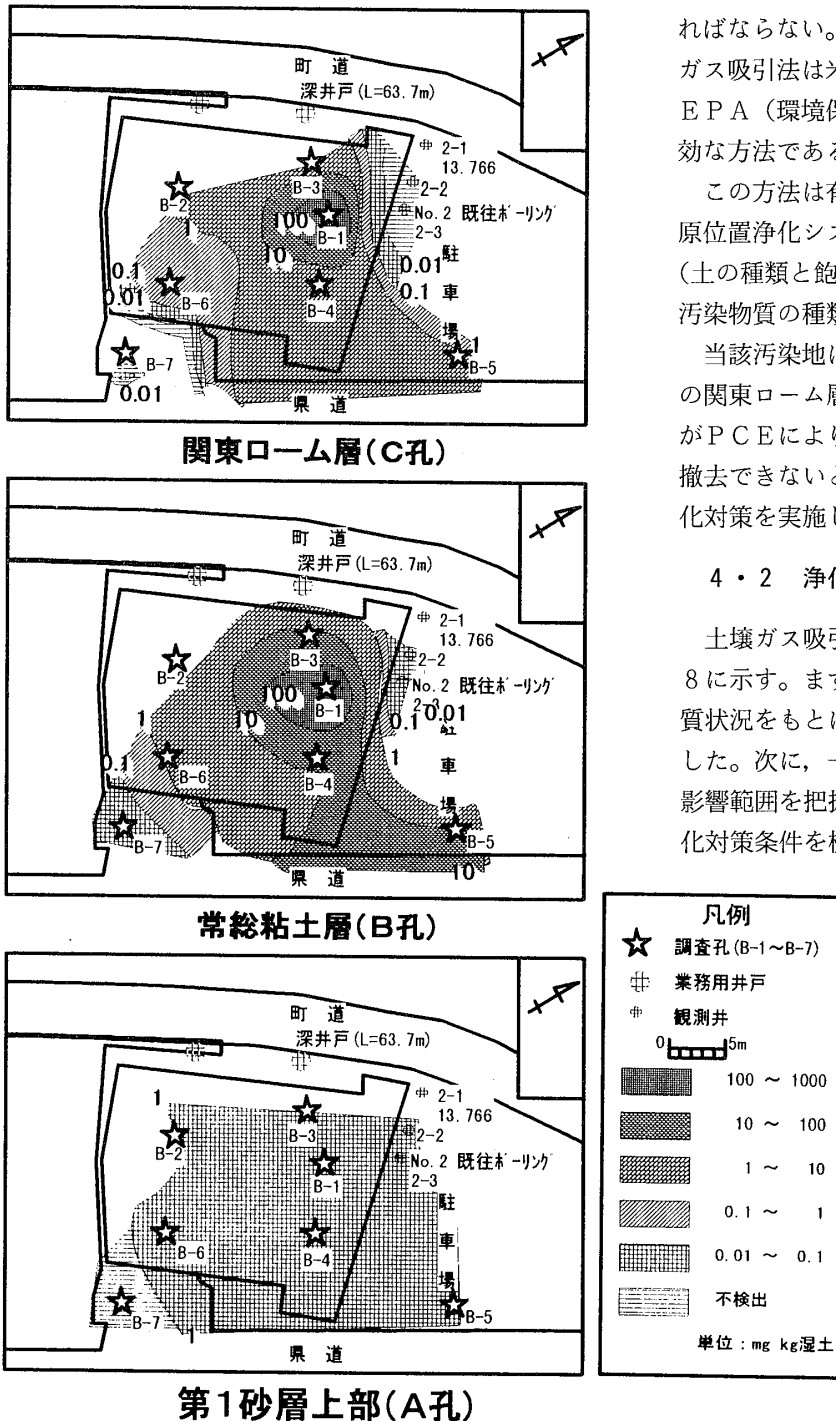


図-5 地層別PCE濃度平面分布図
Figure 5 PCE concentration contour in each borehole

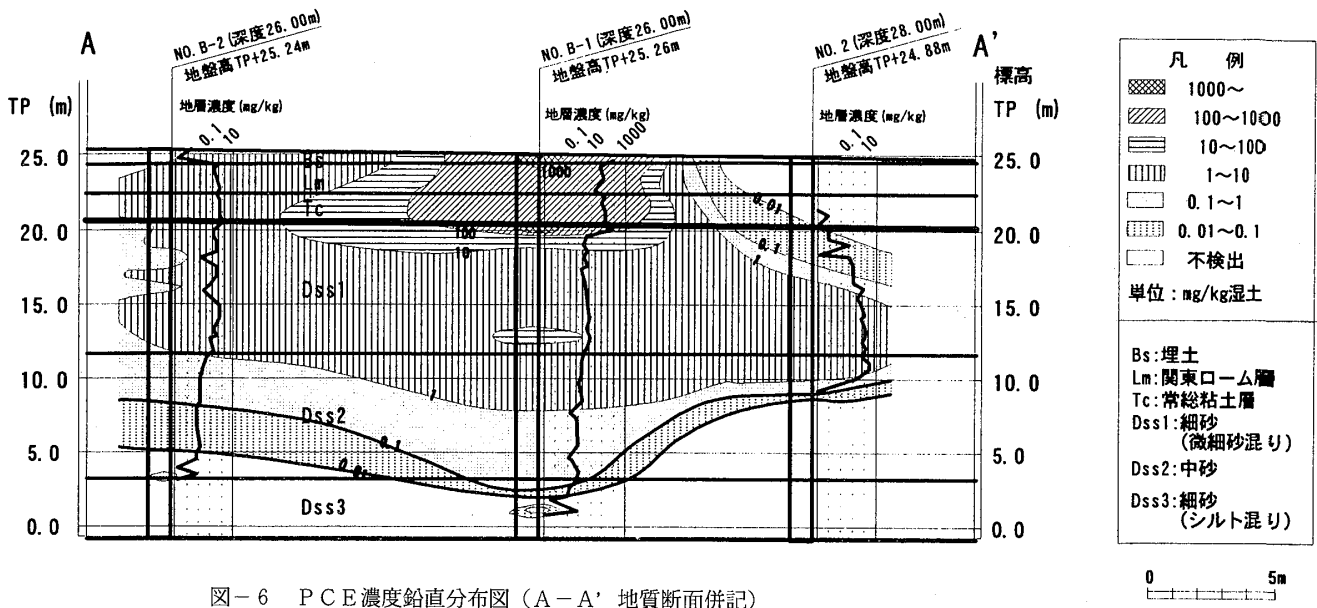


図-6 PCE濃度鉛直分布図 (A-A' 地質断面併記)

Figure 6 Cross section of PCE concentrations with geological structure (A-A' Section)

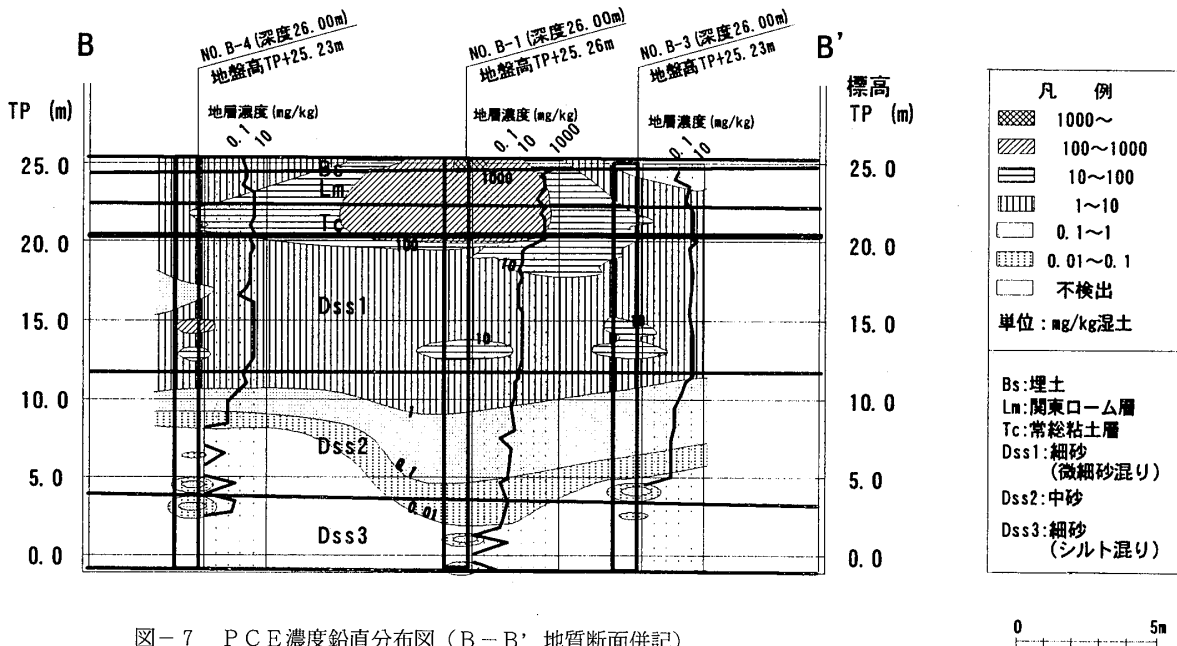


図-7 PCE濃度鉛直分布図 (B-B' 地質断面併記)

Figure 7 Cross section of PCE concentrations with geological structure (B-B' Section)

③ 吸引風量, 吸引圧等を自動計測記録する『計測ボックス』

(2) 装置の特徴

- ① 吸引圧を分岐させて最大4孔から同時に吸引することを可能とした。
- ② 8チャンネルのレコーダにより吸引圧, 吸引風量の自動計測を可能とした。
- ③ 真空ポンプによる吸引とは別にコンプレッサーを接続し, 圧気することも可能とした。

4・4 改良型土壌ガス吸引法による浄化法

(1) 吸引井の立案

核となるNo.1吸引井を調査用ボーリング地点B-1孔の直近に設置した。それはクリーニング工場敷地およびその周辺における表層土壌ガス中のPCE濃度が12,000ppmと最も高く, 図-5~7に示したB-1孔での地層別の土壌PCE濃度の3次元分布から, 関東ローム層と常総粘土層の土壌がそれぞれ2,045と275mg/kg湿土と最高濃度を示したことにともづいている。

表-6 地層別汚染土壌量, PCE濃度およびPCE量の推定計算結果
Table 6 Amounts of contaminated soil and PCE with calculated PCE concentration

地層区分	平均湿潤密度 (g/cm ³)	平均層厚 (m)	区 分	PCE濃度区分 (mg/kg湿土)						PCE量 (kg)
				1000以上	1000-100	100-10	10-1	1-0.1	0.1-0.01	
盛土 + 関東ローム層 (Bs~Lm)	1.50	3	汚染土壌体積 (%)	1.06	84.4	103.8	920.7	325.2	74.4	159.73
			汚染湿土壌重量 (t)	1.59	126.60	155.70	1381.05	487.80	111.60	
			最高PCE濃度 (mg/kg)	2045	1000	100	10	1	0.1	
			PCE量 (kg)	3.252	126.6	15.57	13.81	0.488	0.011	
常総粘土層 (Tc)	1.43	2	汚染土壌体積 (%)		72.6	336.4	495.0	82.96	84.4	159.13
			汚染湿土壌重量 (t)		103.82	481.05	707.85	118.63	120.69	
			最高PCE濃度 (mg/kg)		1000	100	10	1	0.1	
			PCE量 (kg)		103.82	48.105	7.078	0.119	0.012	
第1砂層上部 (Dss1)	1.74	9	汚染土壌体積 (%)	0.68		36.5	5964.75	358.2		112.50 不飽和帯 76.79 飽和帯 35.71
			汚染湿土壌重量 (t)	1.18		63.51	10378.67	623.27		
			最高PCE濃度 (mg/kg)	1466		100	10	1		
			PCE量 (kg)	1.735		6.351	103.787	0.623		
第1砂層中部 (Dss2)	2.03	8	汚染土壌体積 (%)					1220	2800	3.04
			汚染湿土壌重量 (t)					2476.6	5684	
			最高PCE濃度 (mg/kg)					1	0.1	
			PCE量 (kg)					2.477	0.568	
第1砂層下部 (Dss3)	1.80	3	汚染土壌体積 (%)					7.56	27.38	0.02
			汚染湿土壌重量 (t)					13.61	49.28	
			最高PCE濃度 (mg/kg)					1	0.1	
			PCE量 (kg)					0.014	0.005	
合 計									434.42	

表層ガス, 既設井戸, ボーリング調査
《汚染源, 汚染三次元分布, 水理地質状況の把握》

↓
《吸引井配置の検討及び汚染物質量の推定》

↓
土壌ガス吸引井の設置

↓
土壌ガス吸引装置の設置

↓
段階吸引試験《地点・地層別透気性の握》

↓
連続吸引試験《地点別吸引影響範囲の把握》

↓
開放吸引試験《風量・吸引圧力変化の確認》

↓
多地点同時吸引試験《吸引影響範囲の確認》

↓
《対策範囲の推定, 除去効果の確認》

↓
《最適対策条件の検討》

吸
引
試
験

解
析

図-8 土壌ガス吸引法の除去効果の確認
Figure 8 Flowchart of soil gas extraction method

次に, 関東ローム層の土壌PCE濃度が10mg/kg湿土を越える範囲(No.1吸引井を中心とする半径6m内)にNo.5~8の4地点の吸引井を配置した。

さらに, 常総粘土層の土壌PCE濃度がB-1地点からの拡散移動により10mg/kg湿土を越える境界にNo.3とNo.4の2地点の吸引井を配置した。

残りのNo.2吸引井は, 同一地層内で土壌PCE濃度が相対的に高い地点(No.1吸引井の西方向12m)に配置した。

以上8地点の吸引井の平面配置を図-10に示した。

No.1~8の各地点毎に, 汚染土壌ガス吸引用として図-11に示したようにA孔[第1砂層上部(Dss1);深度10m], B孔[常総粘土層(Tc);深度5m], C孔[関東ローム層(Lm);深度2.5m]を設置した。

なお, A孔, B孔, C孔には透気性の確保および土粒子の目詰まり防止のためVワイヤータイプのスクリーン鋼管(φ48mm, 開口率33%, スロットサイズ1mm)を使用した。

(2) 土壌ガス吸引特性

「段階吸引試験」および「連続吸引試験」は, 各地点の地層別の吸引圧と吸引風量および負圧伝播との関係から透気性と吸引影響範囲を把握するために行った。

a) 透気性(段階吸引試験)

No.1~4地点において, 各地点の地層別の透気性を把握するため, 吸引圧を段階的に変え各段階における吸

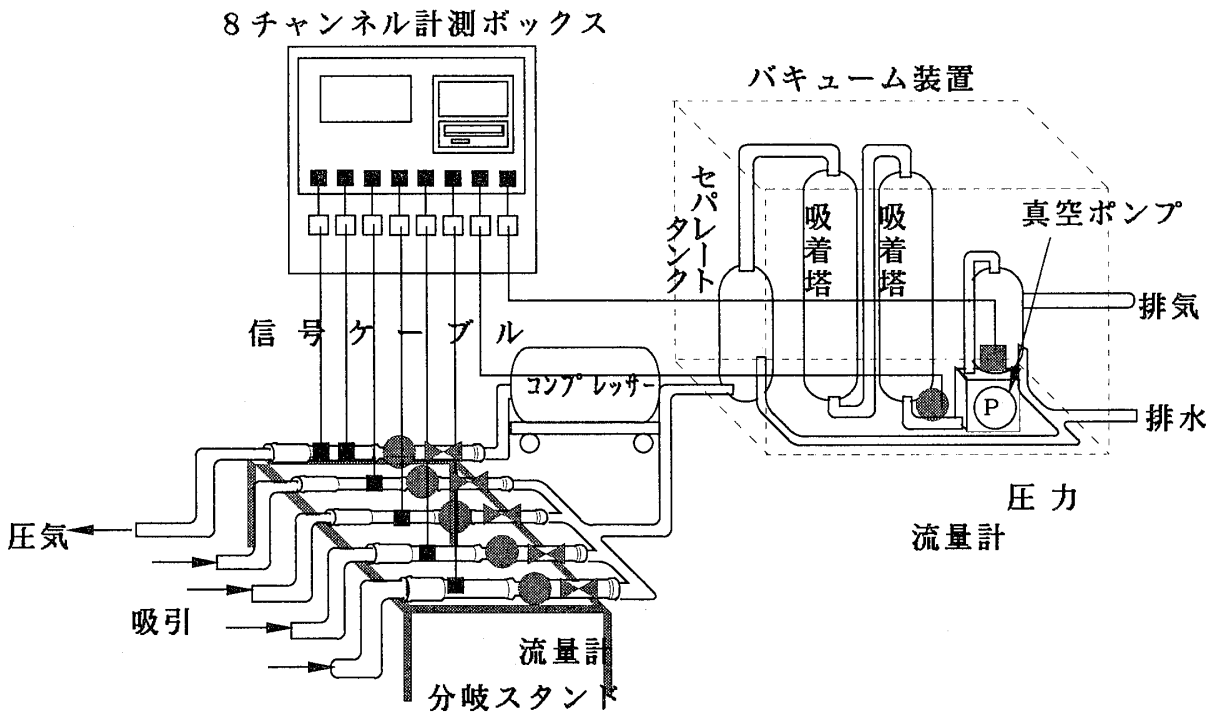


図-9 土壤ガス吸引装置模式図
Figure 9 Schematic diagram of soil gas extraction apparatus

引風量を測定した。

図-12に示した地層別の吸引風量と吸引圧の関係から地層別の透気性を比較する。吸引圧が $-100\text{cmH}_2\text{O}$ と $-50\text{cmH}_2\text{O}$ における吸引風量 (l/min) と吸引効率 (l/min $\cdot\text{cmH}_2\text{O}$; 吸引風量を吸引圧で除した値) は表-7のとおりである。

これから、次の4点のことが明らかとなった。

- ① 関東ローム層では、小さい吸引圧で多くの吸引風量が得られる。
- ② 常総粘土層においては、吸引圧は大きくなるが吸

引風量は少ない。

- ③ 第1砂層上部は、同一吸引圧で比較すると常総粘土層に比べて30~50%吸引風量が多い。
 - ④ 吸引効率は各地層ともに吸引圧が小さい方が高い。
- b) 吸引影響範囲 (連続吸引試験)
No. 1~4 地点において、地層別の吸引影響範囲を把

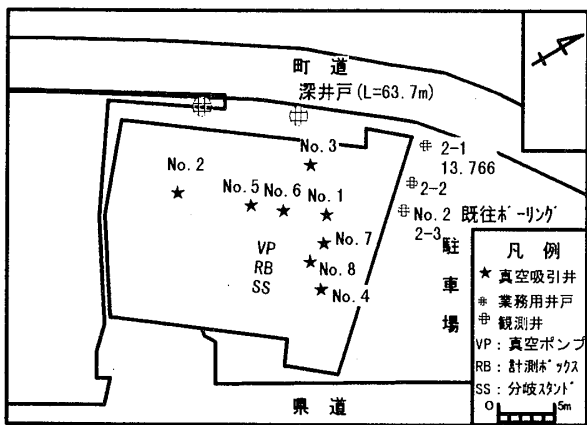


図-10 吸引井及び吸引装置配置図
Figure 10 Location of extraction wells and apparatus

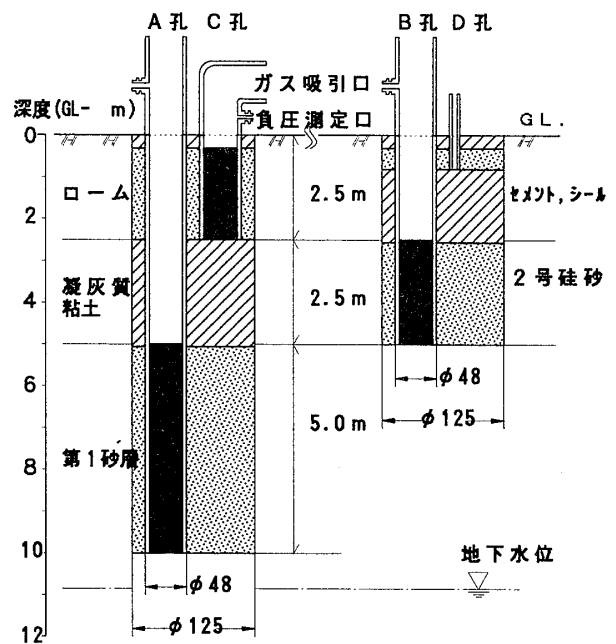


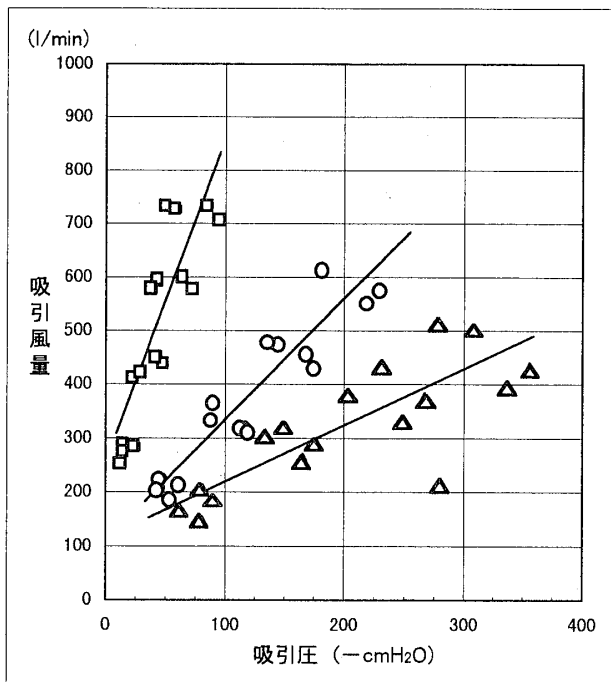
図-11 吸引井構造図
Figure 11 Structure of extraction well

握するため吸引圧，吸引風量がおおむね安定するまで連続吸引を行い，周辺観測井への負圧伝播状況を測定した。吸引影響範囲は地層の透気性と吸引圧により支配されるもので，吸引井配置を検討する場合に必要である。

図-13に示した連続吸引試験時の観測井負圧と吸引井からの距離の関係（片対数グラフ）をもとに吸引影響範囲を推定した。つまり，負圧が0 cmH₂Oとなる距離（吸引井からの半径）を吸引影響範囲として，地層別に比較する。観測井負圧の大きい第1砂層上部（A孔）の吸引影響範囲は約50mであり，観測井負圧の小さい関東ローム層（C孔）と常総粘土層（B孔）の吸引影響範囲は12~13mであった。

前述の透気性と併せて次のことが分った。

- ① 関東ローム層は地表からの吸い込みの影響を受け吸引影響範囲が狭いこと
- ② 常総粘土層は高い吸引圧を示すが，透気性が悪いため吸引風量も少なく吸引影響範囲が狭いこと



地層相関係数
 第1砂層上部 : $Y=2.2492X+109.37$ $r=0.919$ ($n=16$)
 常総粘土層 : $Y=1.0617X+119.26$ $r=0.889$ ($n=16$)
 関東ローム層 : $Y=6.1195X+224.88$ $r=0.855$ ($n=16$)

式中で、Xは吸引圧(-cmH₂Oを)、Yは吸引風量(l/min)を示す

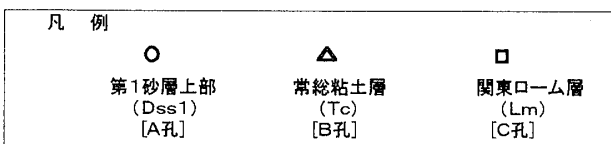


図-12 吸引圧と吸引風量の関係図

Figure 12 Relationship between vacuum pressure and gas flow rate

- ③ 第1砂層上部は透気性の悪い常総粘土層で被覆されているため吸引影響範囲が広いこと

4・5 改良型土壌ガス吸引法の適用性と効果

図-12の吸引圧と吸引風量との関係から，3つの地層とも低い吸引圧の方が多くの吸引風量が得られ吸引効率が良くなることが判った。そこで，吸引井戸の吸引圧を低くすることとし，吸引効率を向上させる方法として

- (1) 吸引井周辺の井戸口元を開放する方法
- (2) 複数井戸から同時吸引する方法

についてその適用性と効果の検討を行った。

(1) 開放吸引の効果

表-7 地層別の吸引圧と吸引風量の比較

Table 7 Comparison between vacuum pressure and gas flow rate about each formation

地層名	-100cmH ₂ O		-50cmH ₂ O	
	吸引風量 l/min	吸引効率 l/min・cmH ₂ O	吸引風量 l/min	吸引効率 l/min・cmH ₂ O
関東ローム層	836	8.4	531	10.6
常総粘土層	225	2.3	172	3.4
第1砂層上部	335	3.4	221	4.4

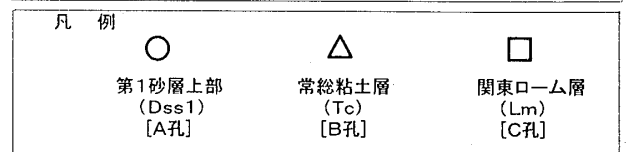
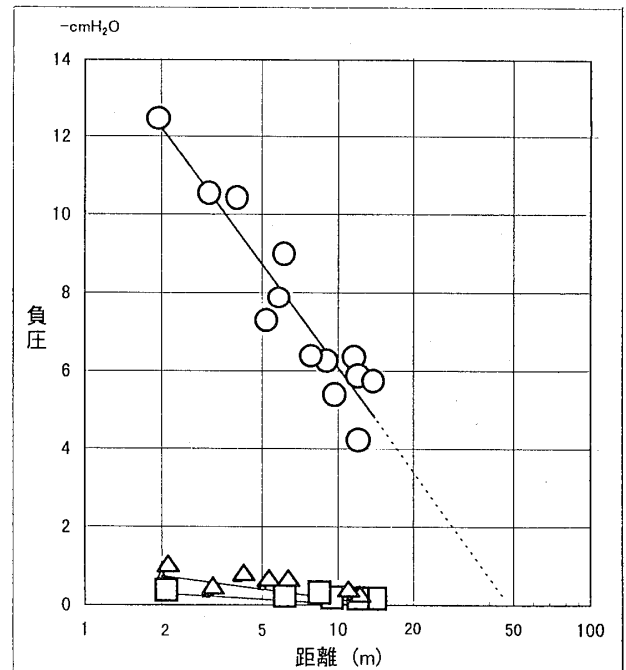


図-13 吸引影響範囲推定図

Figure 13 Estimation of region extracted

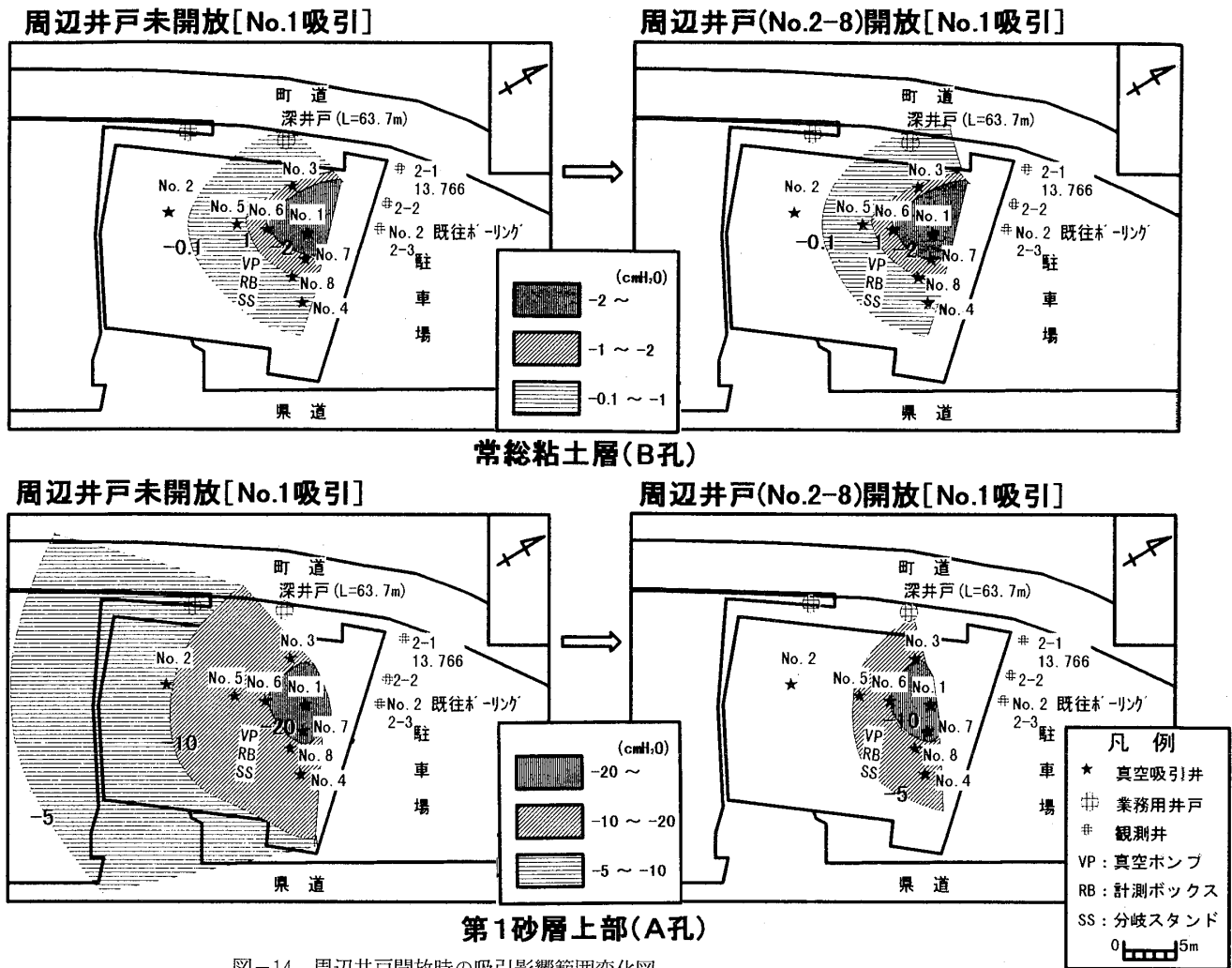


図-14 周辺井戸開放時の吸引影響範囲変化図

Figure 14 Changes of influence region after opening of surrounding boreholes

周辺井戸口元バルブを開放して大気の吸い込みを促すことによる吸引風量の増加を確認するため、No. 1地点の第1砂層上部 (A孔) と常総粘土層 (B孔) を吸引井として土壌ガス吸引試験を行った。表-8にNo. 1地点単独吸引 (ここでは未開放時と記す) と周辺井戸開放時との比較を示したように、常総粘土層では未開放時の吸引圧が-160cmH₂Oに対して約30% (-48cmH₂O) 低

くなり、吸引風量は未開放時527l/minに対して約10% (51~57l/min) 増加した。第1砂層上部では未開放時の吸引圧が-164cmH₂Oに対し約8% (-13cmH₂O) 低くなり、吸引風量は未開放時546l/minに対して約3% (15l/min) と僅かな増加であった。

このことから、周辺井戸開放によって常総粘土層の吸引効率、未開放時の3.3l/min・cmH₂Oに対して約60

表-8 周辺井戸開放によるNo. 1吸引井の吸引圧, 吸引風量, PCE濃度の変化

Table 8 Changes in vacuum pressure, gas flow rate and PCE concentration, according to opening of surrounding boreholes

地層区分	吸引条件	吸引圧 (cmH ₂ O)	吸引風量 (l/min)	吸引効率 (l/min・cmH ₂ O)	PCE濃度 (ppm)
常総粘土層 (T _c) [B孔]	未開放	-161	527	3.28	1800
	開放 (No. 2~8)	-112	584	5.22	2900
第1砂層上部 (D _{ss1}) [A孔]	未開放	-164	546	3.32	980
	開放 (No. 2~8)	-151	566	3.74	1500

表-9 3地点同時吸引による吸引圧, 吸引風量, PCE濃度の変化

Table 9 Changes in vacuum pressure, gas flow rate and PCE concentration in three point vacuuming

地層区分	吸引条件	吸引圧 (cmH ₂ O)	吸引風量 (l/min)	吸引効率 (l/min・cmH ₂ O)	PCE濃度 (ppm)
関東口一△層 (L _m) [C孔]	No. 1地点単独	-55.8	664	11.9	500
	3地点同時	-55.6	800	14.4	560
常総粘土層 (T _c) [B孔]	No. 1地点単独	-161	527	3.28	1800
	3地点同時	-219	759	3.47	2100
第1砂層上部 (D _{ss1}) [A孔]	No. 1地点単独	-164	546	3.32	980
	3地点同時	-177	774	4.37	1400

%も向上して約5 l/min・cmH₂Oとなった。一方、第1砂層上部は未開放時の3.3l/min・cmH₂Oに対して約10%向上するのみであった。図-14に示した周辺井戸開放による吸引影響範囲の変化から、第1砂層上部の吸引影響範囲が明らかに減少(負圧-10cmH₂Oの範囲が、半径12mから3~4mとなる)するが、常総粘土層ではほとんど変化がなかった。さらに、鉛直方向の負圧の伝播は、第1砂層上部での吸引時は上位の常総粘土層に僅か

に及ぶのみであるが、常総粘土層での吸引時は上位の関東ローム層および下位の第1砂層上部に明らかに及んでおり、上下の地層からも土壌ガスを吸引していることが確認された。

吸引井周辺井戸の開放によって、吸引風量の増加と吸引効率の向上に加えて、表-8に示すとおり吸引ガス中のPCE濃度も未開放時に比べて約50% (常総粘土層1,800→2,900ppm, 第1砂層上部980→1,500ppm) 高

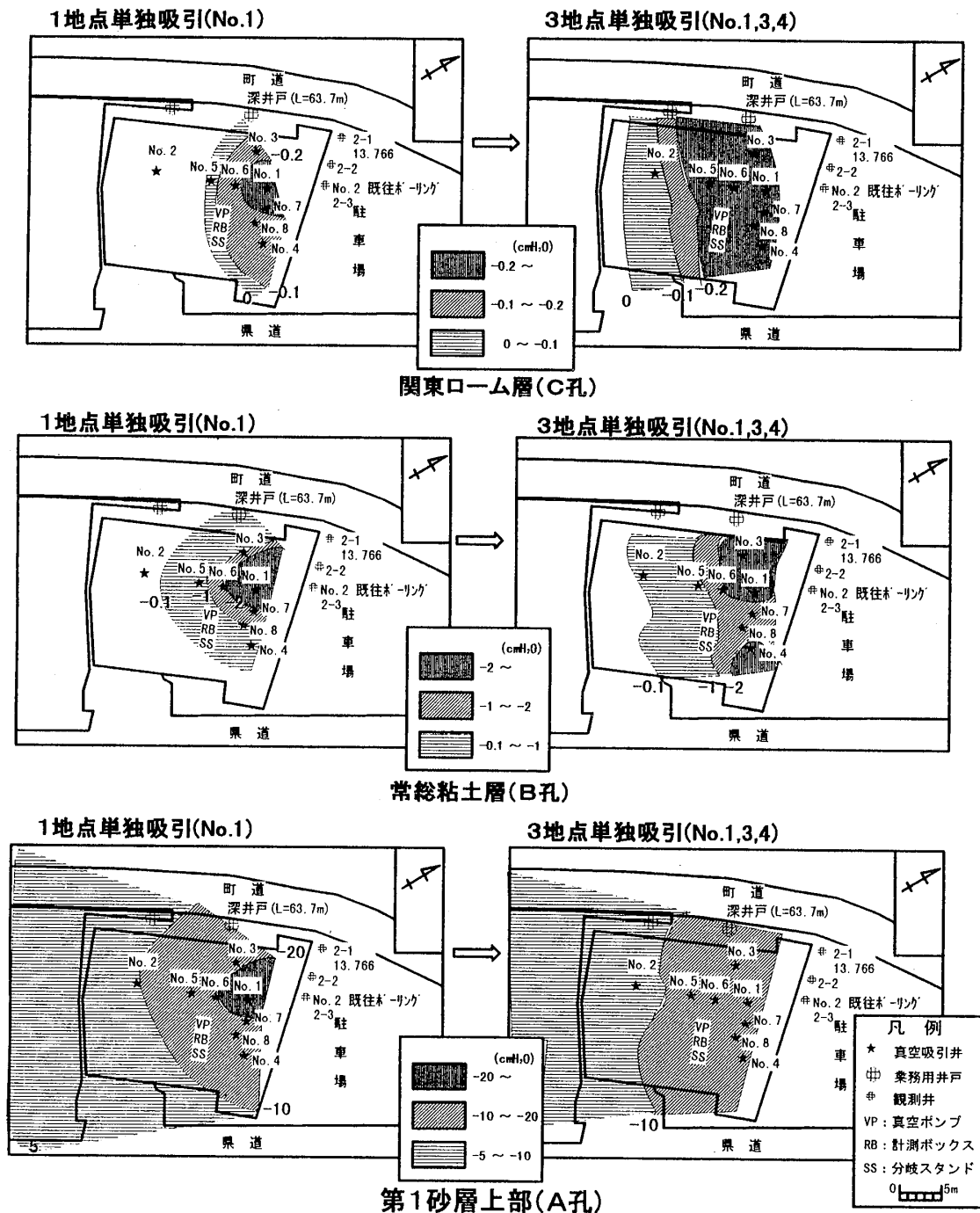


図-15 3地点同時吸引による吸引影響範囲変化図

Figure 15 Changes of influence region with three point extraction

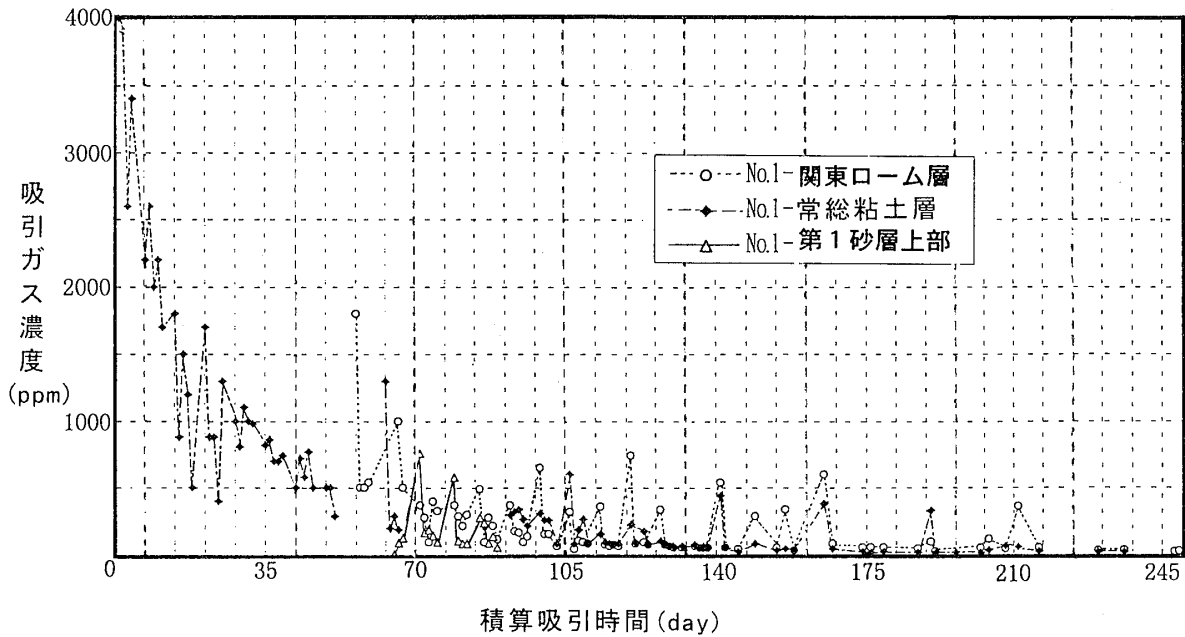


図-16 吸引ガスPCE濃度経時変化図
Figure 16 Transient changes of PCE concentrations in extracted gases

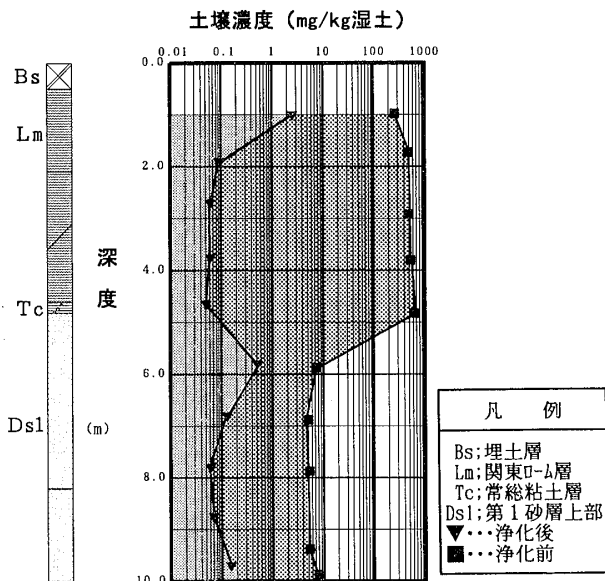


図-17 浄化前後の土壌PCE濃度鉛直分布
Figure 17 Vertical profile of PCE concentration before/after extraction

くなっている。このことから、PCEを含む土壌ガスの移動が促進され、浄化効果が向上することが確認された。

(2) 同時吸引の効果

吸引影響範囲を拡大し、PCEを含む土壌ガスの移動を促進する条件を検討するため、No.1, No.3, No.4地点を選定し3地点の同一地層から同時吸引する試験を行った。

表-9に同時吸引の結果とNo.1地点単独吸引との比

較結果を示した。図-15の吸引影響範囲変化から分るように、第1砂層上部では、 $-20\text{cmH}_2\text{O}$ の範囲はなくなるが、 $-10\text{cmH}_2\text{O}$ の範囲は約2倍に拡大した。同時に、常総粘土層および関東ローム層のいずれも吸引影響範囲は、同じ負圧と比較するとNo.1地点単独吸引時に比べて2~3倍広がった。

さらに、表-9から3地点同時吸引を行うとNo.1地点単独吸引時に比べて吸引風量の増加(関東ローム層20%, 常総粘土層44%, 第1砂層上部42%)と吸引効率の向上(関東ローム層20%, 常総粘土層5%, 第1砂層上部33%)および3地点合流吸引ガスのPCE濃度の上昇(関東ローム層500→560ppm, 常総粘土層1,800→2,100ppm, 第1砂層上部980→1,400ppm)が3地層ともに認められ、浄化効果が大きく向上することが分った。

4・6 吸引浄化対策の効果と適用性

効果的な吸引方法を検討するため事前に土壌ガス吸引試験を行い、各地層の透気性と吸引影響範囲を把握し、低い吸引圧で広い範囲から多くのPCE汚染土壌ガスを吸引できる条件を検討し、

- ① 3地点(同一地層)から同時吸引する。
- ② 吸引対象(3孔)以外の吸引井の口元を開放することが有効であると判断した。

優先して吸引する井戸は、土壌と表層土壌ガスのPCE濃度を考慮して、汚染の中心部およびそのつぎに濃度の高い2地点を選定した。吸引井の孔中ガス濃度を1回/

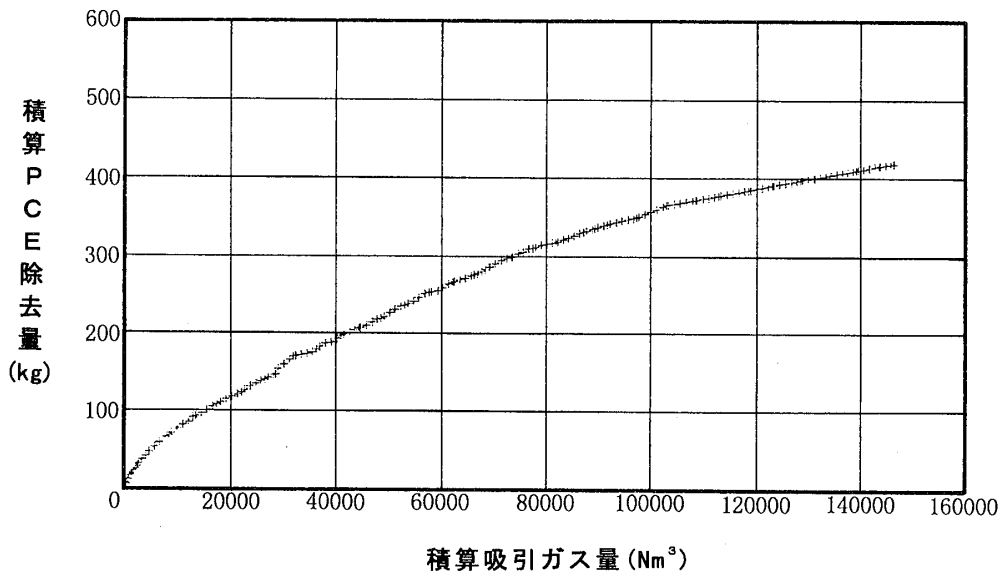


図-18 土壌ガス吸引による積算PCE除去量

Figure 18 Accumulated PCE quantities with extraction

1週間の頻度で測定し、高濃度の地点および地層から順に移動して吸引を行い、孔中ガス濃度の低下を確認したのち他の高濃度地点に移動し吸引を継続した。

約8ヶ月間にわたり、延べ3,174時間で合計146,445 Nm³のPCE汚染土壌ガスの吸引を行った。その結果、汚染源であるNo.1地点に設置した吸引井からの吸引ガス中のPCE濃度経時変化を示した図-16から分かります。各地層とも吸引ガス中のPCE濃度は、土壌ガス吸引法による浄化対策前の10%以下にまで低下した。

3,174時間に及ぶ土壌ガス吸引による平面および鉛直方向の浄化効果を確認する目的で、チェックボーリングおよび表層土壌ガスのPCE濃度測定を行った。表層土壌ガスPCE濃度は、汚染の中心であるNo.1地点付近で1/10程度まで低下し、その周囲では10~100ppmオーダーから不検出~10ppm未満へと大幅に低下したことが分かった。

さらに、No.1地点で行ったチェックボーリングの結果を示した図-17から、土壌のPCE濃度は地表下約1m(関東ローム層)の2mg/kg湿土と地表下約6m(第1砂層上部)の0.5mg/kg湿土を除けば、おおむね浄化目標とした0.1mg/kg湿土程度まで低下したことが確認できた。

これらのことから、吸引井周辺の井戸口元開放と3地点同一地層からの同時吸引によって、最終的にPCEが約420kg回収することができ不飽和帯の浄化対策はほぼ完了したものと判断した(図-18)。

5 結論

クリーニング工場が汚染源であるテトラクロロエチレン(略称PCE)汚染現場で調査から対策まで実施した。地下水以浅に分布する3地層(関東ローム層、常総粘土層、下総層群の第1砂層)を汚染しているPCEを土壌ガス吸引法にて効率良く浄化する手法について工夫検討し、以下の知見を得た。

(1) PCEの揮発性を利用した表層土壌ガス調査と土壌と地下水の採取、試験、分析等を行うボーリング調査により、本汚染地のPCEによる土壌と地下水の汚染の3次元的分布と水理地質等は下記のような状況であることを明らかにした。

① 表層土壌ガス調査で12,000ppmのPCEが認められた工場敷地内の洗浄機近傍を汚染源と判断した。

また、平面的に汚染は工場敷地と隣接する駐車場まで及んでおりその範囲は約40m×35mであった。

② ボーリング調査により、汚染は上位から関東ローム層(層厚約3m)、常総粘土層(層厚約2m)および地下水が胚胎する第1砂層に及んでいることが分かった。特に、各地層とも水溶解度から原液状態のPCEが存在すると推定され、地下水にまで至っていることが分かった。

③ 各地層の汚染濃度分布と単位体積重量から、汚染土量は約14,000m³(関東ローム層1,500m³、常総粘土層1,100m³、第1砂層上部11,400m³)で汚染PCE量は、435kg(関東ローム層160kg、常総粘

土層159kg, 第1砂層上部116kg)と推定した。

- (2) 調査結果から汚染物質であるPCE435kgのうち, 約90%が不飽和帯に分布すること, 土地利用, 施工面の制約から浄化対策として土壤ガス吸引法を採用することとした。

土壤ガス吸引法の実施に際して重要である地層の透気性と吸引影響範囲を調べるため, 複数井戸の吸引圧と吸引風量の自動モニタリングを可能とした改良型土壤ガス吸引装置を製作し, 土壤ガス吸引試験を行い本浄化対策に向けて下記に示す有用な結果を得た。

- ① 関東ローム層では, 低い吸引圧で多くの土壤ガスを吸引でき, 吸引効率が8.4~10.6l/min・cmH₂Oと最も良かった。しかし, 地表からの吸込みのため吸引影響範囲は約13mと狭かった。
 - ② 常総粘土層では, 吸引圧は大きくなるが土壤ガスの吸引量は少なく, 吸引効率が2.3~3.4l/min・cmH₂Oと最も悪く, 吸引影響範囲は約12mと狭かった。
 - ③ 第1砂層上部では, 吸引圧が高く吸引効率は透気性の悪い常総粘土層の被覆効果も加わって3.4~4.4l/min・cmH₂Oで, 吸引影響範囲は約50mと広がった。
 - ④ 各地層とも吸引圧の低い方が高い吸引効率となること, つまり吸引圧-50cmH₂Oの方が吸引圧-100cmH₂Oと比べて吸引効率が30~50%向上した。
 - ⑤ 地層別の吸引特性から, 浄化効果向上方法として, 透気性の改善と吸引影響範囲の拡大が重要であると考へて, 周辺井戸開放と3地点同時吸引を行った。その結果, 両法ともに未開放および単孔吸引に比べいずれも吸引効率が良くなり, さらに汚染土壤ガスの移動が促進されるため吸引ガスのPCE濃度が高くなり浄化効率を向上させることができた。特に, 常総粘土層では周辺井戸開放により, 吸引影響範囲が縮小することなく吸引効率は3.3から5l/min・cmH₂Oまで向上できた。第1砂層上部では3地点同時吸引により, 負圧-10cmH₂Oの吸引影響範囲が2倍に拡大し吸引効率は3.3から4.4l/min・cmH₂Oまで向上できた。
- (3) これらの調査と土壤ガス吸引試験結果をもとに, 周辺井戸開放と3地点同時吸引により吸引効率の向上を図る方法を取り入れ, 延べ3,200時間合計150,000Nm³の土壤ガス吸引を行い約420kgのPCEを除去することができ, 土壤ガス吸引法の有効性を明確にすることができた。

6 あとがき

下総台地における土壤と地下水の有機塩素系化合物汚染事例について複雑な汚染機構の解明と土壤ガス吸引法による浄化対策の効果について検討した。

土壤ガス吸引法では, 低い吸引圧(低いエネルギー)で汚染地層の広い範囲から, 汚染物質を含む土壤ガスを如何に多く吸引するかが重要である。そこで結論で要約したように, 本汚染地では透気性の異なる地層別に吸引井を設置し, 吸引井周辺井戸の口元開放および3地点同時吸引を併せて行うことにより, 1地点ずつ順次吸引するよりも吸引効率を約25%向上することを可能にした。

しかし, 今回の土壤ガス吸引法では次の点が課題として残された。それは, 関東ローム層吸引時に地表からの吸込みによる吸引影響範囲が狭くなったことと常総粘土層は透気性が悪く吸引効率が低いことである。改善策として, 関東ローム層については地表のシート被覆等による断気, 常総粘土層については吸引井周辺井戸の口元開放により吸引効率が良くなることから圧縮空気の送気併用が有効と考へている。

これまでの成果をさらに発展させるには, 今後, 次のような技術の開発を行い, コストミニマムなシステム技術として構築していくことが急務と考へている。

- ① 低濃度で広く拡散移流した汚染地下水の水理地質状況に応じた浄化対策技術の開発
- ② 汚染の実態把握および機構解明に適用可能な物理探査技術や迅速簡便で高精度な原位置分析技術の開発
- ③ 浄化対策選定と効果確認に有用な予測解析(シミュレーション)手法の開発

謝 辞

本事例研究の実施にあたっては, 関係自治体の各位から有益なご教示を頂いた。ここに記して, 深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 藤縄克之(1988): 地下水資源をめぐって-地下水の汚染, アーバンクボタNo.27, pp.30~31.
- 2) 杉戸大作(1974): 地下水汚染対策の考へ方, 第4回日本水質汚濁研究協会セミナー講演資料集, pp.53~63.
- 3) 嘉門雅史(1994): 地盤環境汚染の現状とその対策

- 「1. 講座を始めるにあたって」, 土と基礎, 第42巻, 第4号, pp.93~94.
- 4) 中杉修身 (1994): 地盤環境汚染の現状とその対策「4. 汚染物質の土中・地下水中における存在形態」, 土と基礎, 第42巻, 第6号, pp.63~70.
 - 5) 細見正明, 奥村興平 (1994): 地盤環境汚染の現状とその対策, 「5. 地盤環境汚染の調査とモニタリングとその問題点」, 土と基礎, 第42巻, 第7号, pp.73~80.
 - 6) 環境庁水質保全局 (1994): 有機塩素系化合物等に係る土壌・地下水汚染調査対策暫定指針, pp.84~93.
 - 7) 鈴木喜計, 原田泰雄, 村田順一, 佐藤賢司, 楡井久 (1992): 地質汚染現場における地下空気汚染吸引法の有効性, 第2回環境地質学シンポジウム講演論文集, pp.65~70.
 - 8) 鞍谷保之, 村岡浩爾 (1993): 真空抽出法による有機塩素化合物の土壌浄化対策, 地下水技術, 第35巻, 第4号, pp.20~27.
 - 9) John Morse, 長野郁男 (1992): SVE試験の現場応用例, シンポジウム地層汚染・地下水汚染-汚染の治療法を探る-講演要旨集, pp.65~74.
 - 10) 今村聡, 末岡徹, 名倉克博 (1992): 真空抽出工法による汚染浄化の予測手法について, シンポジウム地層汚染・地下水汚染-汚染の治療法を探る-, pp.105~118.
 - 11) 浜田成久, 谷本彰, 若佐秀雄 (1991): 下総台地の有機塩素系化合物による地下水汚染例, 第1回環境地質学シンポジウム講演論文集, pp.65~70.

