

## (6) 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

### Subsurface remediation using soil venting and groundwater extraction

平田健正\*・江種伸之\*・中杉修身\*\*・石坂信也\*\*\*

Tatemasa HIRATA\*・Nobuyuki EGUSA\*・Osami NAKASUGI\*\*・Shinya ISHIZAKA\*\*\*

**ABSTRACT:** The remediation technologies of soil venting and groundwater extraction were applied to repair the volcano ash contaminated with trichloroethylene. At first taking account of the areal distribution of vaporized trichloroethylene obtained in surface soil gas of a firm, fourteen borings were achieved, and revealed that the maximum concentration in soil reached 138 mg/kg at the depth of 46m, and the groundwater concentration of 294 mg/l at the same location. In particular the highly residual part of trichloroethylene is standing over both in vadose and groundwater zones, hence the soil venting was employed for the vadose zone remediation with pumping the groundwater up. The remediation operation resulted in removing the trichloroethylene amounts of 472 kg by soil venting and 1764 kg by groundwater extraction during the period of 27700 hours (1154 days). In addition it appears that at the initial stage of the remediation, the soil venting is much prominent in the removal rate of trichloroethylene at one order as high as the groundwater extraction, however, the remediation progression is going to reverse the removal rates of both technologies. This is because the existing form of trichloroethylene has changed with the time passage of the remediation. It is of great importance to keep the flexible operation in changing the remediation technologies, corresponding to the transformation of the contaminant existing form in subsurface environment.

**KEYWORDS:** soil and groundwater pollution, trichloroethylene, remediation technology, soil venting, groundwater extraction, cost efficiency

#### 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有機塩素化合物による土壌や地下水の汚染が全国各地で発見されている。トリクロロエチレンなどは水には溶けにくく、微生物分解も受けにくい物質である。しかも土壌や地下水中での水移動は表流水に比べてきわめて遅く、こうした地下環境が難分解性の有害物質で汚染されると汚染は長期化するばかりでなく、地下から汚染物質を除去しない限り、地下水はかなりの期間にわたって水資源としての価値を失う恐れがある。全ての生活用水を地下水に依存している地域も多く、汚染された土壌・地下水の修復は緊急の課題となっている。

浄化技術として、トリクロロエチレンなどは高揮発性の物質であり、この特性を利用した土壌ガス吸引技

---

\* 和歌山大学システム工学部環境システム学科

(Department of Environmental Systems, Wakayama University)

\*\* 国立環境研究所環境化学部

(Environmental Chemistry Division, National Institute for Environmental Studies)

\*\*\* 熊本市都市開発部

(Urban Development Division, Kumamoto City Government)

術<sup>1)</sup>、これとは逆に空気を地下環境中に注入し汚染物質の気化を促進するエアースパーキング技術<sup>2)</sup>などが開発され、汚染現地に適用されている。わが国でも土壌ガス吸引技術は、揮発性有機塩素化合物に汚染された不飽和土壌を浄化する技術として、有効性が実証されつつある。一方、汚染された地下水については、微生物分解を利用した無害化試験が現地規模でも進められている<sup>3)</sup>。嫌気の状態では水飽和溶解度のテトラクロロエチレン (150mg/l) を分解する微生物も見つかっているが<sup>4)</sup>、還元的脱塩素反応ではテトラクロロエチレンからトリクロロエチレン、ジクロロエチレンを経て塩化ビニルの生成することが知られている<sup>5)</sup>。さらに、揮発性有機塩素化合物による汚染の顕在化したのは主に浅い地下水であり、この地下水は好気状態にある。もちろん、好気状態でもトリクロロエチレンの微生物分解は期待できるが、分解できる濃度に限界があり、実用化にはまだクリアすべき課題が残されている。このようにみると、汚染された地下水の浄化は地下水揚水に頼らざるを得ないのが現状であろう。

土壌ガス吸引技術にしても、汚染された地下水までは修復できず、地下水が汚染されていれば地下水を揚水・ばつ気処理する必要がある。さらに、いずれの技術を用いるにしても、浄化対策の進捗とともに地下環境中での汚染物質濃度が減少し、汚染物質の除去効率は次第に低下する。あらゆる汚染形態に適用できる技術はなく、しかも汚染された土壌・地下水の修復には多額の経費がかかるため、効率よく対策を実施する必要があるが、それには個々の浄化技術の適性を知ることが重要となる。こうした背景から、本研究ではトリクロロエチレンで汚染された火砕流堆積地域で、土壌ガス吸引技術と地下水揚水技術を適用してトリクロロエチレンの除去対策を実施し、それぞれの技術の特性、汚染物質の除去効率や費用効果などを検討した。

## 2. 地下水汚染地域と調査の概要

### 2.1 対象地域の地形・地質特性

対象地域は、図1に示すように標高80m程度で北東から続く台地とその北側と南側に分布する標高20~30mの沖積低地から構成されている。台地部では、地表面から2~3m深までは黒ぼくと赤ぼくのローム層、その下位には火砕流堆積物 (Aso-4) が50m以上の厚さで分布している。このAso-4は空隙の多いほぼ均質な地層であり、不圧地下水が形成されている。

Aso-4の下位には花房層 (Aso-3/4間層ローム)、さらにAso-3と続き、粘土質の花房層が難透水層として不圧地下水 (Aso-4) と被圧地下水 (Aso-3) を分けている。図1には一斉測水で得られた不圧地下水の水位分布も描いているが、地下水はおおむね北西から南東に向かって流れていることが読み取れる。また台地部の地下水面は地表面下約40m (GL-40m) の深さにあることが分かる。

### 2.2 地下水汚染の経緯とボーリング調査

本研究で対象とする地下水汚染は、1987年7月に民家の井戸水 (図1中のNo58) から0.655mg/lのトリクロロエチレンが検出されたことに始まる。汚染源探査の一環として、No58地点周辺の既存井戸58本の水質調査を実施したところ (1990年7月)、13検体からトリクロロエチレンが検出され、その内5検体

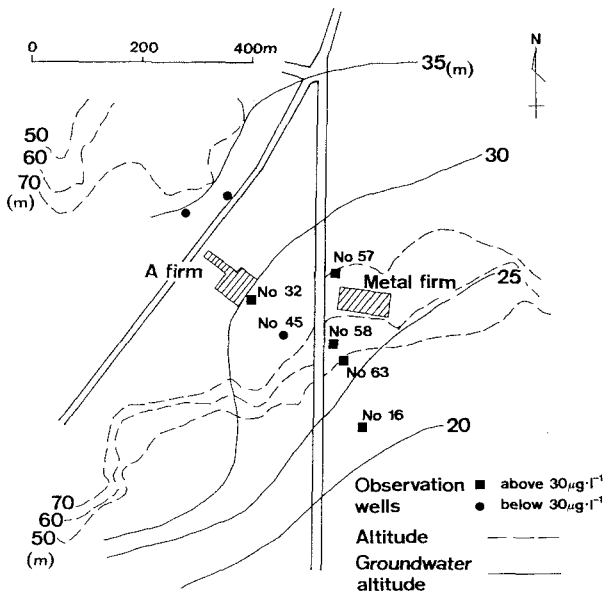


Fig.1 Geographical map and investigation wells in the study site

が水道水質基準値（0.03mg/l）を超過していた。これらの井戸の分布は図1に■印で示したとおりである。特に、農業用水を汲み上げていたNo32井戸は電機部品の洗浄にトリクロロエチレンを使用していた事業場（A）に隣接しており、この井戸水から2.7mg/lのトリクロロエチレンが検出されたため、No32井戸とA事業場を含む地域で表層土壌ガス調査を実施することとなった。土壌ガス濃度の高い地点は高濃度土壌汚染部分に対応し、そこから汚染物質が地下浸透した可能性の高い地点でもある。その結果、トリクロロエチレン使用事業場（A）と隣接する事業場の建屋外でそれぞれ1ヶ所づつ、330ppmvと190ppmvの高濃度の土壌ガスが検出された。

この土壌ガス調査結果を参考に、地下でのトリクロロエチレンの存在状況を調べるため、土壌ガス最高濃度地点B-1を含む14地点でオールコアボーリング調査を実施した（図2）。ボーリング深度はAso-3/4間層ロームまでの60mとし、土壌コア採取後のボーリング孔は内径50mmの塩化ビニルパイプを装入して地下水位や地下水濃度を測定するための観測井に仕上げている。

ボーリングは、B-1より順次実施した。この内、B-2とB-3はB-1より南東150m、B-4は西側100mに位置する（B-2、3は図中外）。これ以外の11本のボーリングは、汚染源とみられるA事業場周辺で行った。いずれのボーリングでも、トリクロロエチレン分析用の土壌試料は5m間隔で採取し、エタノール抽出して電子捕獲型検出器付きガスクロマトグラフで定量している。

ボーリング調査より、汚染源事業場の上流側（B-4）と下流側（B-2とB-3）のボーリング試料からは、1mg/kgを超えるトリクロロエチレンは検出されず、高濃度汚染はA事業場と隣接する敷地に限られていた。これらの結果を基に、B-7、5、6、11、1、9に沿った土壌中のトリクロロエチレン濃度の分布を描くと図3のようである。土壌濃度の最大値は、B-6地点のGL-46mで138mg/kgに達し、地下水濃度も同じ地点で294mg/lを観測した。この地域の地下水面は、GL-42mにあったことから、高濃度なトリクロロエチレンは地下水中にまで侵

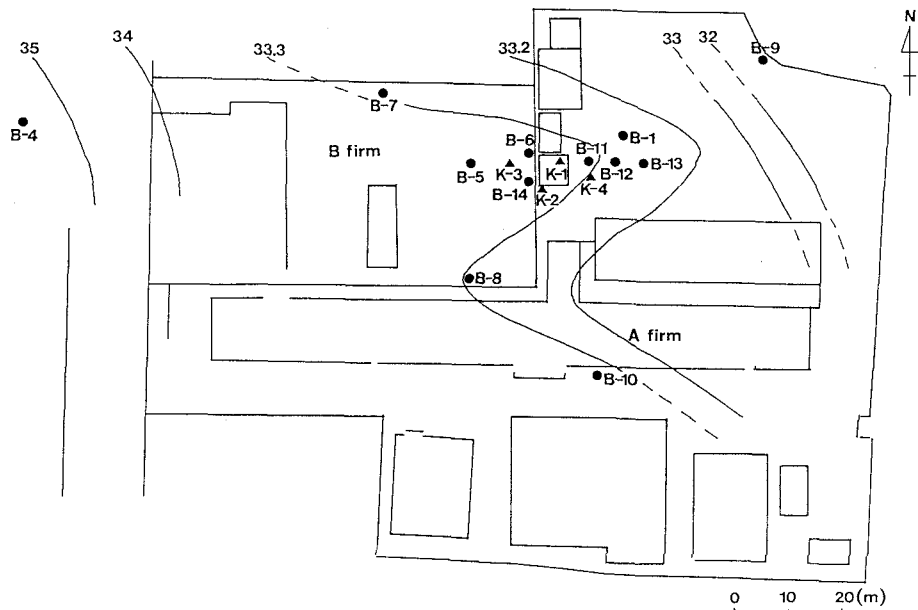


Fig. 2 Locations of borings and boreholes for remediation. The closed circles are the locations for borings and the triangles for the dual extraction wells. The lines in the figure denote the altitude of the groundwater table from sea level.

入していることが分かる。特に注目されるのは、土壤汚染の拡がりであり、10mg/kgの等濃度線でみれば、40m以上トリクロロエチレンが浸透してもその範囲は40m程度に収まっている。100mg/kgの等濃度線では、その範囲は10mとさらに狭くなる。このようにトリクロロエチレンは土壤中をあまり横方向には広がらず、ほとんど真っ直ぐ下に降下浸透している様子がよく分かる<sup>6)</sup>。

### 2.3 対策井の構造と配置

地下から効率よく汚染物質を除去するには、汚染物質の存在状況にあった適切な技術を選定する必要がある。汚染された地下水浄化については、地下水の汲み上げ以外に適切な技術がないのが現状であり、この汚染現地でも地下水揚水を実施することになった。不飽和土壤の浄化については、本研究で対象とした汚染現地は、地下40～50mといった深層の土壤まで高濃度に汚染されているため、汚染土壤の掘削除去は難しく、土壤ガス吸引技術を採用することとなった。

土壤ガス吸引による土壤浄化は、当時まだわが国では実施事例はなかったため、吸引井の掘削方法や井戸構造を検討することもあって、1991年12月から翌年1月にかけて吸引井K-1とK-2を建設した。最初に建設した吸引井K-1は、不飽和土壤中はエアーハンマー方式、地下水中はパーカッション方式で掘削した。ここで、エアーハンマー方式は高圧空気を水と混合して土壤に吹き付け削孔する技術、パーカッション方式は錘を落下させて削孔する井戸建設技術である。K-1の井戸孔径は10cmとし、地下水面はGL-42mにあることを考え、スクリーンはGL-31m～-59.5mに設けた。地下水面下にもスクリーンを切ったのは、土壤ガスも地下水も1本の井戸から同時に抜き取れるよう設計したためである。またスクリーンには開孔率18%の水平連続Vスロットを採用している。K-2については、全長にわたってパーカッション方式で掘削して、開孔率5%のスリットスクリーンをGL-31m～GL-59.5mの区間に設けた。K-2の井戸孔径は20cmであり、K-1の2倍としている。

これらの吸引井に加えて、1992年8月にはさらに2本の吸引井K-3とK-4をパーカッション方式で掘削した。4本の吸引井の建設位置は図2中の▲印で示しており、井戸諸元は掘削方法も含めて表1にまとめている。土壤濃度と観測井の位置関係は図3に見るように、K-1とK-2はほぼ汚染源中心付近に、K-3は汚染源中心の上流側、K-4は下流側に掘削されている。

吸引井から土壤ガスを吸引したとき、土壤ガスの流動範囲は汚染浄化の範囲の目安となる。そこで吸引井K-2から0.6気圧で土壤ガスを吸引したときの土壤ガス圧の低下をB-14とK-3で観測した。結果はK-2から2.8mの位置にあるB-14では0.11気圧、6.8mにあるK-3では0.027気圧の土壤ガス圧の低下が観測され、Johnsonら(1990)<sup>7)</sup>の方法に従うと、影響半径としてそれぞれ10.9m、10.1mが得られる。吸引井K-2からの距離が違っていても、2地点で観測された影響半径はほぼ合致しており、実験対象地域の土壤ガス吸引影響半径は10mと推定

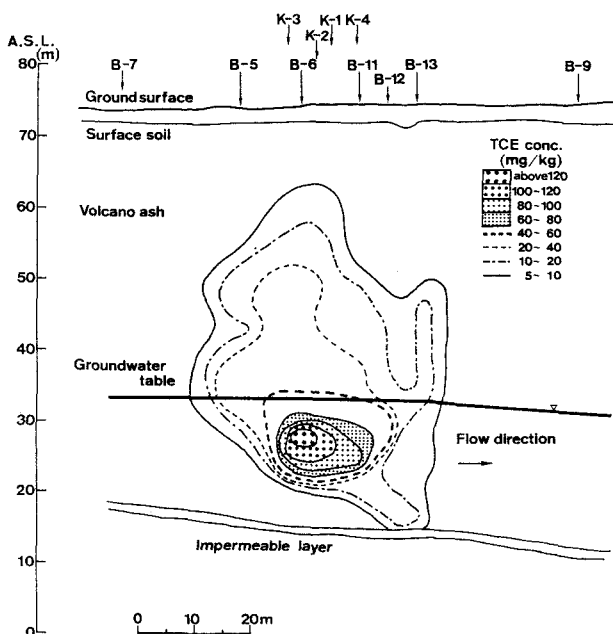


Fig. 3 Soil concentration of trichloroethylene in case of relatively deep soil/groundwater pollution incident

Table 1 Dimension and drilling method for dual extraction wells of K-1 to K-4

|                           |      | K-1                     | K-2        | K-3 & K-4  |
|---------------------------|------|-------------------------|------------|------------|
| Depth                     | (m)  | 59.5                    | 59.5       | 60         |
| Diameter                  | (cm) | 10                      | 20         | 20         |
| Screen depth from surface | (m)  | -31~-59.5               | -31~-59.5  | -32.5~-60  |
| Open space rate           | (%)  | 18                      | 5          | 18         |
| Screen shape              |      | V slot                  | Slit       | V slot     |
| Drilling method           |      | Air hammer & percussion | Percussion | Percussion |

される。K-3とK-4の距離は13.8mであることから、主要な土壌ガス流動範囲は33.8mに及び、また10mg/kgを超える土壌汚染範囲（約40m）の80%以上をカバーしていることが分かる。

## 2.4 浄化システム

土壌ガス吸引の基本装備は、吸引井、気液分離装置、活性炭吸着塔と真空ユニットから成る。これらの装置を塩化ビニルパイプや金属パイプでつなぎ、その間にガス圧力計、ガス流量計、温度計、土壌ガス試料採取孔を取り付けている。対策井から吸引された土壌ガスは、まず気液分離装置に入り、土壌ガスのみ活性炭吸着塔に流入する。この活性炭吸着塔で汚染物質が吸着処理され、清浄な空気が真空ユニットを通して大気へ放出される。

一方、水中ポンプで汲み上げられた地下水は充填塔ばっ気方式でトリクロロエチレンを除去し、排ガスに含まれるトリクロロエチレンは活性炭吸着処理される。当初、トリクロロエチレン濃度で100mg/lを超える汚染地下水の揚水が予想され、この処理水濃度が水道水質基準値（0.03mg/l）をクリアすることを目標に、毎時2m<sup>3</sup>の能力を持つばっ気装置を導入した。

これら一連の対策で、土壌ガス吸引圧、土壌ガス圧、吸引風量、地下水位などの物理量は、圧力センサーや電磁風速計を用いた連続観測を行った。また地下水濃度はヘッドスペース法、土壌ガス濃度は試料を直接PID-ガスクロに打ち込んで定量した。

## 3. 土壌ガス吸引と地下水揚水による汚染物質の除去

### 3.1 土壌ガス吸引風量と地下水揚水量

土壌ガス吸引に伴う影響半径など対策に必要な基本諸量の計測に続いて、1992年9月13日より、4本の吸引井を用いた本格的な対策を開始した。土壌ガスの吸引は、対策全期間を通じて4本の井戸とも吸引圧を0.6気圧（大気圧との差は0.4気圧）としている。土壌ガス吸引を開始すると徐々に吸引風量が減少しながら、約2日間ではほぼ定常状態に達し、その後のガス風量は安定していた。定常状態の吸引ガス風量は、K-1からK-4の順に110,190,60,310 l/minであり、吸引井の孔径が同じでも、場所によって吸引風量に違いが認められた。ただ地下でのガスや水の流動は、オーダで評価されることを考えると、実験対象とした火砕流堆積地域では、0.6気圧の吸引で100 l/min程度の土壌ガスが除去できることが分かった。

一方、地下水の揚水については揚水開始初期には汚染源の中心付近に建設したK-1やK-2の吸引井から100mg/lを超えるトリクロロエチレン汚染地下水の揚水が予想された。そのため、ばっ気処理能力を考慮して対策開始当初は、地下水は4本の吸引井から合計2~3m<sup>3</sup>/hrの汲み上げを行っている。内訳は、460時間まではK-4のみ3m<sup>3</sup>/hr、1850時間まではK-1:0.5、K-4:1.5m<sup>3</sup>/hr、3200時間まではK-2:0.5、K-4:1.5m<sup>3</sup>/hr、7060時間までは4本の吸引井からそれぞれ0.5m<sup>3</sup>/hrである。7060時間以降は水処理能力が改善されたため、10100時間までは

平均的にはK-1:2.5、K-2:0.5、K-3:1.0、K-4:12.5m³/hrの合計16.5m³/hr、さらに全体的に地下水濃度が低下した10100 時間以降はK-1:2、K-2:0.3、K-3:3.4、K-4:23.2 m³/hrの合計28.9m³/hrの揚水を行っている。

### 3.2 土壌ガス吸引風量と吸引ガス濃度の経時変化

図4には吸引土壌ガス中のトリクロロエチレン濃度の経時変化を描いている。いずれの吸引井からも吸引初期には数千ppmvのトリクロロエチレンが除去されており、中でも汚染源中心に最も近く建設されたK-2の土壌ガス濃度が最大で、10000ppmvの値も観測されている。土壌ガス濃度の経時変化については、K-4で吸引初期に上昇することを除いて、いずれの土壌ガス濃度も両対数上で時間に対して直線的に減少していることが分かる。そこで土壌ガス濃度Cと吸引時間tの関係を指数関数に当てはめ、

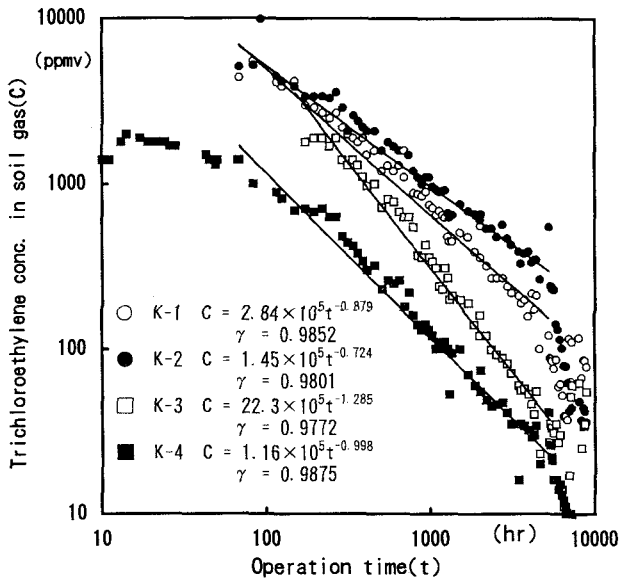


Fig. 4 Time-varied change of trichloroethylene concentration in extracted soil gas for K-1 to K-4 dual extraction wells

$$C=at^b \tag{1}$$

として係数aとbを求め、対数相関係数γとともに図4に記した。  
 この係数を用いて、例えばK-2について土壌ガス濃度が5000ppmvから500ppmvにまで1桁減少するまでに要する時間を求めると2410時間（101日）、さらに500ppmvから50ppmvにまで減少するには58100時間（2420日）となり、吸引初期に除去効果が高くとも急激に除去効率の悪くなることが理解できる。  
 次に吸引風量は、対策開始の2日間程度を除いて安定している。そのため吸引風量に土壌ガス濃度を乗じて得られるトリクロロエチレンの除去速度Rは、土壌ガス濃度の時間変化と同様に

$$R=ct^d \tag{2}$$

で表現することができ、ベキ数dも図4中の値とほぼ等しくなる。つまりベキ数dは-0.72から-1.29と-1に近い値を取っている。これについて、宮本ら(1994)<sup>8)</sup>は土壌単位重量当たりの気化速度を実験的に求め、気化速度は時間に反比例する結果を得ている。室内実験はほぼ均質な状態で実施されており、実際の現場と異なるが、本研究で対象とした火砕流堆積地域は比較的均質に近い地質構造を持ち、土壌ガスの吸引井も汚染源中心付近に建設した結果、トリクロロエチレンの除去速度は対策時間に反比例する結果が得られたものと考えられる。

### 3.3 揚水した地下水濃度の経時変化

本対策では、1本の吸引井から同時に土壌ガスも地下水も除去している。4本の吸引井のうち、相対的に揚

水量の多いK-1とK-4から除去した汚染地下水濃度の経時変化を図5に描いた。K-4では揚水量に変化はあっても、継続して揚水しているのに対して、K-1では460～1850時間と3200時間以降について揚水されている。そのため460時間までのK-1の地下水濃度に大きな変化は認められない。K-4については、時間経過とともにトリクロロエチレン濃度は両対数上で直線的に減少しているが、7000時間を過ぎるあたりから濃度の減少率が大きくなっている。これはK-4の揚水量を7060時間から12.5m³/hr、さらに10100時間から23.2m³/hrにまで強化した結果と考えられる。またK-1については、7060時間以降、揚水量を0.5m³/hrから2.5m³/hrに増

加させたことに加えて、K-4での23.2m³/hrの揚水が相乗して周辺地下水を引き込み、トリクロロエチレン濃度が低下したと考えられる。

揚水した汚染地下水濃度Cについても土壌ガス濃度と同様、(1)式で近似し、関数形を図5中に記した。K-1については10100時間以降、K-4については(1)対策開始から7060時間まで、(2)10100時間以降、の2種類のデータを用いて計算している。

ここでK-4の10100時間以降のデータから(図5中の(2)式)、汚染された地下水濃度が水道水質基準0.03mg/lにまで減少するのに要する時間を求めると、31.3年となる。トリクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物は水には溶けにくく、微量有害化学物質であるため、一度こうした有害化学物質に地下水環境が汚染されると、清浄なもとの姿に戻すにはかなりの時間が必要となる。

### 3.4 土壌ガス吸引と地下水揚水による除去速度の比較

土壌ガス吸引と地下水揚水によるトリクロロエチレン除去速度を図6に比較している。いずれの除去速度も吸引井4本の合計値であり、図中の直線はトリクロロエチレン除去速度Rと対策時間tを(2)式で近似した結果である。図中に(2)式の定数cとdも記しているが、土壌ガス吸引による除去速度は対策開始から7060時間までのデータ、地下水揚水による除去速度は(1)対策開始から7060時間まで、(2)10100時間以降、の2つのデータを使用した。

図に見るように、対策の始まった初期には、土壌ガス吸引技術では毎時1kgのトリクロロエチレンが回収されており、確かに効率的な除去技術であることが分かる。地下水揚水の除去速度を1桁上回っている。ところが、いずれの技術も対策が進むにつれて除去速度が低下し、時間に対するべき数を比較すると、7060時間までは土壌ガス吸引の除去速度低下は地下水揚水の2倍も早い。つまり、浄化対策の進捗に伴い、両者の除去速度は逆転することを表している。2本の直線の交差した時間以降では地下水揚水の方が効率的な汚染物質除去技術となる。実際には7060時間以降、地下水全揚水量は16.5m³/hr、10100時間以降は28.9m³/hrにまで増加

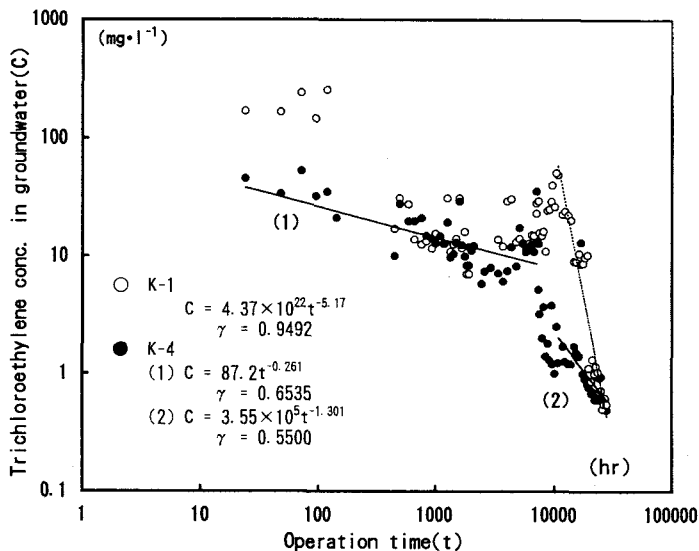


Fig. 5 Time-varied change of trichloroethylene concentration in extracted groundwater for K-1 and K-4 wells

しており、この揚水量増加が大きく寄与して地下水揚水のトリクロロエチレン除去速度は上昇し、土壌ガスの除去速度と逆転している。汚染物質除去技術として土壌ガス吸引と地下水揚水は、それぞれ不飽和土壌、飽和土壌の異なる媒体を対象としているが、汚染された地下環境の修復技術として対策10000時間における除去速度を比較すると、土壌ガス吸引：0.0027kg/hr、地下水揚水：0.209kg/hrであり、地下水揚水の方が77倍効率よい除去技術となっている。

以上の結果は、トリクロロエチレンなどは水には溶けにくいことから、地下水揚水による浄化には時間はかかるが、確実に汚染物質を地下水から除去でき、長年の揚水で土壌ガスの吸引より多量の汚染物質の回収できる可能性のあることを示唆している。

#### 4. 土壌ガス吸引と地下水揚水の費用効果

ここでは、地下水揚水と土壌ガス吸引の費用効果を1kgのトリクロロエチレンを除去するに必要な経費から比較する。土壌ガス吸引と地下水揚水ともに経費には基本装備のリース料、システムの維持管理や分析に関わる人件費、活性炭の交換や処理費、電気料金などが含まれている。

図7に浄化対策開始1ヶ月目に地下水揚水に必要なとされた経費を1とし、その後の土壌ガス吸引と地下水揚水の相対経費の推移を描いている。図6に示したように、時間経過とともにいずれの除去速度も低下するため、8ヶ月目までは相対経費も上昇している。土壌ガス吸引の方が費用効果も高いが、8ヶ月以降13ヶ月まで

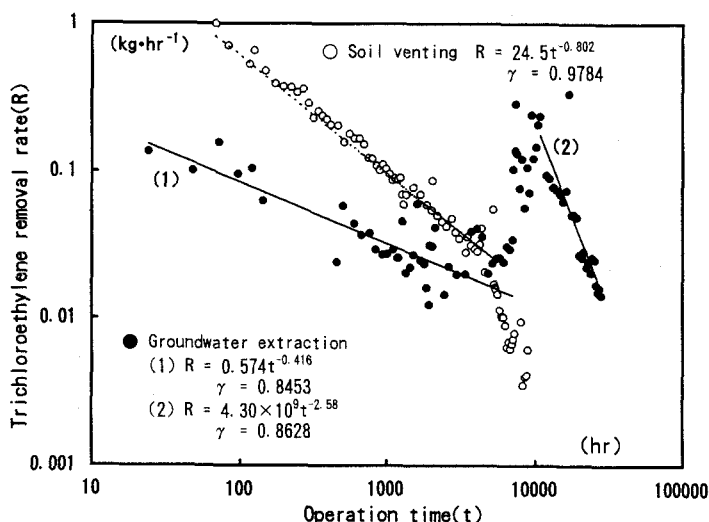


Fig. 6 Comparison of trichloroethylene removal rates between soil venting and groundwater extraction

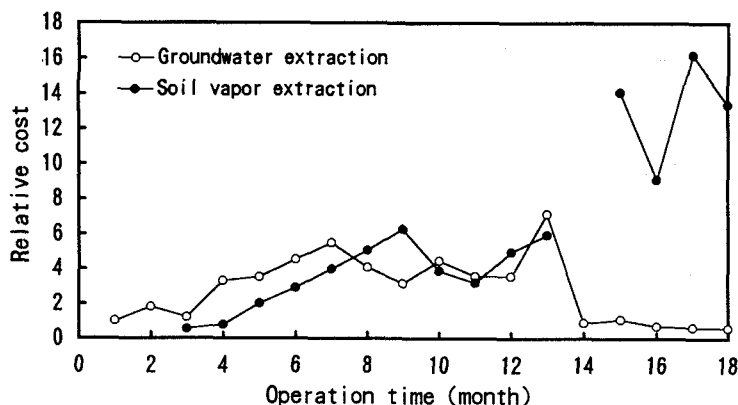


Fig. 7 Monthly change of relative cost efficiency between soil venting and groundwater extraction based on the cost at the first month needed for groundwater extraction

は横ばいで推移し、両者には大きな差はなくなる。ところが、地下水揚水量が大幅に増加した13ヶ月以降では、地下水揚水の相対経費は1以下となるのに対して、土壌ガス吸引の相対経費は依然として増加傾向をたどり、15前後にまで上昇することが分かる。こうした汚染物質の除去速度や相対経費を基に、この汚染現地では土壌ガス吸引を停止し、地下水揚水のみで浄化対策を継続することとした。もちろん不飽和土壌中の汚染物質は完全に除去されたわけではなく、濃度は低いが生じ土壌水分の降下浸透に伴いトリクロロエチレンは地下水中に溶出する。ただ地下水揚水による対策は継続されており、土壌から溶出したトリクロロエチレンは地下水揚水によって除去され、カバーすることができる。

## 5. 浄化対策の効果と結論

本研究では、トリクロロエチレンに汚染された火砕流堆積地域を対象に、土壌ガス吸引と地下水揚水を併用した浄化対策を実施した。その結果、これまで27700時間(1154日)の対策で、土壌ガス吸引により472kg、地下水揚水により1764kgの合計2236kgのトリクロロエチレンが除去されている。吸引井K-2における土壌ガス濃度にしても、吸引開始当初に5000ppmvあったトリクロロエチレン濃度は対策が進むにつれて40ppmvにまで減少している。土壌と土壌ガスとの分配平衡が同じとすれば、土壌濃度は1/125程度にまで低下したと考えられる。

一方、地下水濃度についてK-2のトリクロロエチレン濃度をみると、調査時に294mg/lあったものが27700時間の対策で6.6mg/lにまで減少している。ただし図5で述べたように、揚水除去した地下水濃度が水道水質基準値にまで低下するにはまだ30年も必要とされるのが現状であり、周辺に配置した観測井でも最近になってやっと減少する兆しが見え始めたところである。

さらに土壌ガス吸引と地下水揚水いずれの除去速度も対策時間の経過とともに減少する。除去速度を比較すると、対策初期には土壌ガス吸引技術は確かに効率的ではあるが、対策の進捗とともに両者の除去速度は逆転し、地下水揚水の方が効果的な対策となることが示された。この結果は、対策の進捗とともに地下での汚染物質濃度や存在状況が変化し、浄化対策にはこうした変化に対応してより効率的・低コストな技術に切り替える必要のあることを示唆している。

## 参考文献

- 1)中杉修身・平田健正：トリクロロエチレン等の地下水汚染の防止に関する研究，国立環境研究所特別研究報告，SR-15-94，50p，1994。
- 2)Lundegard, P.D. and D. LaBrecque: Air sparging in a sandy aquifer (Florence, Oregon, USA): actual and apparent radius of influence, J. Contaminant Hydro., Vol.19, pp.1-27, 1995.
- 3)小山田久実ほか：トリクロロエチレン汚染現場への原位置バイオレメディエーションの適用，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.75-78，1995。
- 4)田上四郎ほか：汚染土壌から分離した高濃度テトラクロロエチレンの分解菌，第27回日本水環境学会年会講演集，pp.628-629，1993。
- 5)Vogel, T.M. and P.L. McCarty: Biotransformation of tetrachloroethylene to trichloroethylene, dichloroethylene, vinyl chloride, and carbon dioxide under methanogenic conditions, Appl. Environ. Microbiol., Vol.49, pp.1080-1083, 1985.
- 6)Hirata, T. and K. Muraoka: Vertical migration of chlorinated organic compounds in porous media, Water Research, Vol.22, No.4, pp.481-484, 1988.
- 7)Johnson, P.C., Kemblowski, M.W. and Colthart J. D.: Quantitative analysis for the cleanup of hydrocarbon-contaminated soils by in-situ soil venting, Ground Water, Vol.28, pp.413-429, 1990.
- 8)宮本健一・藤江幸一・浦野紘平：土壌中有機塩素化合物の気化挙動の解析，第3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.171-174，1994。