

34

## URBAN KUBOTA

アーバンクボタ・SEPTEMBER 1995 特集＝地質汚染 (Geo-pollutions)

株式会社 クボタ



名水百選の中でもとくに名高い柿田川湧水群(静岡県駿東郡清水町)。富士山南東の「三島溶岩流」中を流下する地下水は、三島市や柿田川で地表に湧出するが、その最大なのが柿田川湧水群で、水量の豊富なこと、水のきれいなことでよく知られている。また本湧水の周辺には、貴重な水生植物も存在する。財団法人「柿田川ミドロのトラスト」

によると、昭和63年末の調査でトリクロロエチレン(0.00045mg/l)、テトラクロロエチレン(0.0005mg/l)などが検出された。その後、同財団をはじめ周辺地域の住民の努力や行政の企業指導などにより、汚染物質の濃度は低下傾向にあるとされている(楡井)。写真提供：上＝ボンカラー・フォトエイジエンシー 下(左・右)＝カメラ東京サービス

Kubota

# 飲料水源としての地下水

殿界和夫 = 高槻市水道部水質試験係

ライフラインの確保と地下水資源  
水道の水源を種類別にみると、ダム36.9%、河川水33.0%、地下水系は深井戸と浅井戸および伏流水の合計で25.5%である(図1)。また工業用水の34%は地下水に依存している。このうち、ダムの比率は年々増加傾向にあるが、近年では、水資源をめぐる社会的状況に変化の萌芽が見えてきた。

第1に高齢化や出生率の低下による人口動態の変化。第2に米作の減反や用水多消費型工業の構造転換、および経済の低成長による余剰水問題。第3に水の再利用・循環システムの導入と雨水利用など、省エネルギーと節水型社会を指向する政策は、福岡県や東京都などで着実な成果を上げている。

最後に、防災や渇水など水道のリスク管理、ライフライン確保の問題である。1995年1月の阪神大震災で再認識されたのは、地震などに伴う緊急時の消火には、遠くの水源より近くの水源が、単一の水源でなく多元の水源が必要不可欠であるとの教訓であった。その意味で、地下水の存在が改めて注目されるようになった。量的に有限である地下水の長期的な利用を保证するためには、それが公共用水として扱われる必要がある。

水源の水質環境の悪化と水質管理  
(1) WHOなどにより、飲料水基準の見直しが国際的に進むなかで、わが国の水道水質基準も26項目から46項目に増加され、また新たに26項目の監視項目を設けるなど、大幅に改正された(1993年12月施行)。今回の基準改正の目的は、水道水中の塩素副生成物(TOX)など微量化学物質による慢性毒性、とりわけ発がんリスクの低減化にあった。新基準値の根拠

は、WHOなどのデータを参考に $10^{-5} \sim 10^{-6}$ の発がんリスクに定められた(注1)。

(2)現在、水源の水質環境は悪化の一途を辿っている。安全でおいしい水道水をつくるためには、いまの水質環境にどのような障害があるかを表1に示した。この表のうち、この物質は水に溶解性なので、凝集・沈澱・ろ過という従来の浄水処理法では除去できない。これらの物質を除去し、より安全でおいしい水道水をつくるために、オゾン・活性炭による高度浄水処理の導入が全国で進められている。すでに一部では給水が始まっているが、全国の高度浄水処理導入計画の建設費の総額は、5,000億円にも及んでいる。

(3)1994年5月に、原水の水質保全に関わる2つの法律が施行され、次には環境庁からフミン酸の発生源規制がだされる。現在の水道水質には、水道の飲料リスクを考慮した環境保全の対策強化が何よりも急がれている。

地下水源の水道水質は飲料リスクが小さい表2は、水道水中の塩素副生成物(TOX)について水源種別に調べたものである。地下水源の水道水はTOX濃度が最も低く、高度浄水処理水以上に飲料リスクの小さい、安全でおいしい水道水であることがよく分かる。

水質基準値をクリアした水道水であっても、変異原性試験(注2)をすると、水によって水質に差が生じてくる。この理由には、汚濁や汚染度の違いのほか、複合汚染の影響も考えられている。そのため水道水質の客観的な評価法として、変異原性試験など飲料リスクによる水質管理の必要性が指摘されている。こうした方法がとられれば、水道水源としての地下水は、さらに高い評価を得るだろう。

高槻市における地下水汚染とその再生  
高槻市では、人口36万5千人のうち、約30%にあたる11万人の市民に地下水系の水道水を給水している。地下水汚染には、人為に起因するものと自然地質起因の汚染があるが、後者の汚染として高槻市の場合にはヒ素による汚染がみられる(本誌第4章参照)。この物質は、現行の浄水処理により除去できる。人為による汚染が大きな問題として生じたのは、有機塩素系溶剤による地下水汚染であった。この物質による地下水汚染が全国的規模の問題と分かったのは、1981年に厚生省が実施したトリハロメタン(THM)の全国調査がきっかけであった。高槻市の大冠浄水場の地下水汚染もこのときに判明したが、混合原水のトリクロロエチレン(TCE)濃度が0.1mg/lという高濃度であったこと、給水人口が約11万人に及ぶ大規模な汚染という2つの特徴をもっていた。

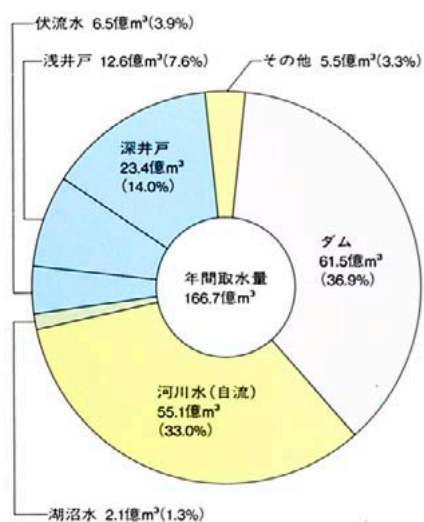
高槻市水道部は苦心の末、1982年9月にエアーストリッピング法によるTCE除去法を開発し、厚生省から実験装置の承諾を受け、1983年7月に本装置を竣工(実処理水量 900m<sup>3</sup>/h)させた。除去装置の稼働は、アメリカのシリコンバレーのそれよりも早かったのである。翌年の1984年2月に、厚生省はTCEの暫定水質基準値0.03mg/l(1993年12月から水質基準)を発表したが、それと同時に、この処理法を公定法として認めた。これにより、本装置は全国で活用されるようになった。

その後、高槻市では、TCEと同じく揮発性で、有害な有機塩素化合物である1,2-ジクロロエタン(1,2-EDC)およびシス-1,2-ジクロロエチレン(cis-1,2-DCE)によって地下水が汚染されていることが判明した。そのため実験塔による除去実験を行い、これらの有機塩素化合物の除去率を向上させるため、処理装置の送風量をアップし、気体/液体の比を60倍から100倍に引上げ、すべての汚染物質を1μg/l以下に除去してきた(図2・図3)。この改良装置は、1989年9月に地下水の高度浄水処理の第1号に厚生省から認可された。右ページの写真は、1990年4月に竣工した新しいエアレーションタワー5基の全景である。

注1 = 発がんリスク $10^{-5}$ とは、基準値の濃度の水道水を一生飲み続けたときの発がんの確率が10万分の1、 $10^{-6}$ の場合は発がんの確率が100万分の1、という意味である。

注2 = 変異原性試験とは、化学物質などが細胞の遺伝子に作用して本来の遺伝的な性質を変えることをいい、変異原性は発がん性と高い相関関係がある。

図1 - 上水道・用水供給事業の水源の種類別取水量(平成5年度)



日本水道協会刊「日本の水道1995」による

表1 - 水源水質と水道水質をめぐる7つの問題

- ①かび臭、藻臭、生ごみ臭などの異臭味問題
- ②水中の有機物と水道の注入塩素が反応して生成される塩素副生成物(TOX)問題
- ③農業による原水の複合汚染
- ④有機塩素系溶剤による汚染
- ⑤ダム・湖水での藻類の異常繁殖による浄水処理への障害
- ⑥大腸菌の多い原水にみられるウイルスの存在
- ⑦アメーバ、線虫などの微生物問題

表2 - 塩素副生成物の水源別生成状況

	地下水系	湖沼水系	河川水系	実施年度
TOC濃度 原水mg/l	0.70	3.35	2.35	S56~
TOC濃度 浄水mg/l	0.55	1.15	1.30	
TOX濃度 浄水mg/l	0.047	0.089	0.138	S57~
総THM mg/l	0.010	0.022	0.025	S56~
MX μg/l	0.0009	0.0064	0.0094	H2
対象浄水場	5ヵ所	5ヵ所	10ヵ所	

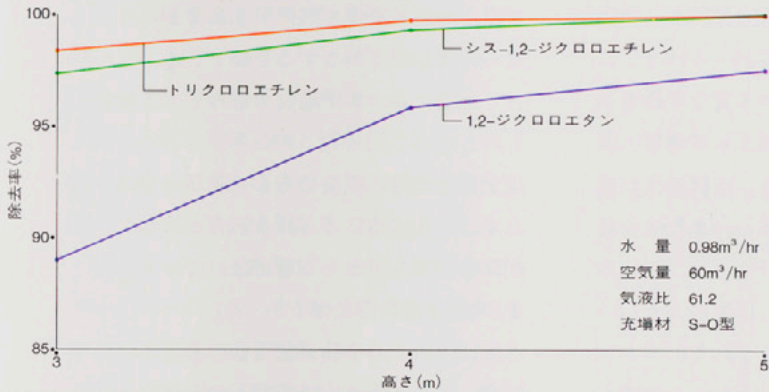
浄水濃度は年平均値、第44回全国水道研究発表会(1995)、大阪府立公衆衛生研究所、鶴川品弘、宮崎啓一ほか、による。TOC=全有機炭素、全ての有機物量を炭素の量で表した有機汚濁の水質指標、TOX=全有機ハロゲン化合物、トリハロメタンやトリクロロエチレンなどが含まれる。TOXは化合物中の塩素量で表す。THM=トリハロメタン、MX=TOXの1物質。発がん性はないが、知られている化学物質中で最も強い変異原性があり、わが国の水道水中のその寄与率がTHM1%に対して、MXは12%というデータがある。



エアレーションタワー全景(高槻市水道部大冠浄水場)

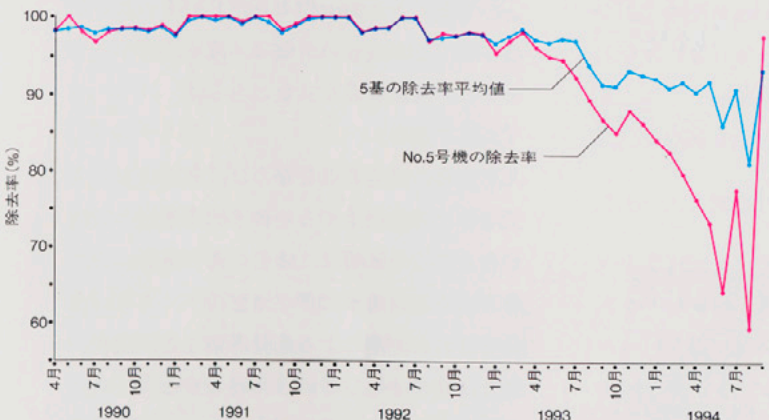
エアレーションタワー仕様		送風機仕様	
型式: 充填塔方式		型式: 片吸込エアホイール型	
処理能力: 1基当り 180m <sup>3</sup> /時		仕様: 300m <sup>3</sup> /分×130mmAq×11kw	
寸法: 直径 2,700mm 高さ 7,000mm		台数: 5基	
充填材高さ 5,000mm			
台数: 5基			
充填材: ポリプロピレン製 テラレットS-O型			

図2 - 実験塔による有機塩素化合物の除去率



実験塔(直径200mm, 高さ6m)による結果。処理水量: 送風量が61.2倍という条件のもとで、充填塔高さ(処理時間)による物質ごとの除去率の上昇を調べた。1,2-ジクロロエタンは、旧装置の高さ3mでは除去率が88%で処理能力が不足し、高さ5mでも気液比を上げなければ、処理目標の1μg/l以下を達成できない。

図3 - エアレーションタワーの稼働と1,2-ジクロロエタンの除去持続特性



改良したエアレーションタワー(写真)による除去率の経年変化。稼働後3年に近づくると除去率が低下傾向を示すので、2年ごとに塔内上部の充填材を取り出し、水で洗浄すると除去率は完全に回復する。

目次

特集 = 地質汚染 (Geo-pollutions)

1	地質環境における新しい単元の形成.....	2
榆井久 + 佐藤賢司 + 鈴木喜計 + 古野邦雄		
2	君津市内箕輪の地質汚染 - 汚染機構の解明から浄化対策まで - 鈴木喜計 + 榆井久 + 品田芳二郎 + 原田泰雄 + 佐藤賢司 有機塩素系溶剤による地質汚染とは.....	10
	汚染の発見から基本計画の策定まで.....	14
	地質汚染機構解明調査.....	17
	浄化対策.....	33
	地質汚染をめぐって.....	42
3	南房総のクリーンな町.....	50
千倉地質汚染調査チーム		
4	高槻地域における地下水質と地質.....	60
三田村宗樹 + 殿界和夫		
5	地下水汚染および土壌汚染に係る環境基準等.....	64
近藤恵美子		

発行所 = 株式会社クボタ 広告宣伝部

大阪市浪速区敷津1丁目2番47号 TEL <06> 6648-2022 (ダイヤルイン)

発行日 = 1995年9月

編集製作 = (有)アーバンクボタ編集室

図版作成 = スタジオ・ツノ

印刷 = 大日本印刷株式会社大阪工場

# 地質環境における新しい単元の形成

- 人工地層と地質汚染を中心に -

楡井 久 = 千葉県水質保全研究所地質環境研究室長・京都大学客員教授

鈴木喜計 = 君津市環境部環境保全課

佐藤賢司 = 千葉県水質保全研究所地質環境研究室主任研究員

古野邦雄 = 千葉県水質保全研究所地質環境研究室主任研究員

はじめに

地球は、地圏・水圏・気圏・生物圏からなるが、これら4圏は、地球の歴史とともに進化発達して現在にいたっている。地質学は、これら4圏の進化・発達を研究対象とするが、これらの地史的過程は主として地圏の中に記録されており、そのため、地質学の主要な研究分野は地圏が対象となる。したがって一般に地質圏という場合、広義には4圏の地史的過程の全内容を含むが、狭義の意味では地圏が地質圏と呼ばれる。

人間は自然の影響下に発達してきたが、それと同時に人間は自然に働きかけ、その影響力を自然に及ぼすことによって発展してきた。人間と地質圏との相互作用の及ぶ範囲が地質環境とされるが、環境地質学は、地質環境の生い立ちやその特徴を明らかにし、それらの持続可能な利用をはかることを中心的な研究テーマとする。

人間は、環境中に排泄物や廃棄物を放出してきたが、近年、人間の生産活動は急激に拡大し、人間による排泄物や廃棄物もまた膨大な量に達している。そしてこれらの大部分は、最終的には地層状の人工地層(人為地層)として固定される。この人工地層の分布は、地球上に拡大し続けている。

また、排泄物や廃棄物中に含まれる汚染物質の質・量も自然の浄化能力を越え、いま地質汚染に悩む地域が増え続けている。

一方、人間は大地を削り、水域を埋め、土地を造成してきたが、それが、地震時の液状化や流動化に対して脆弱であることも、いま明らかになってきた。

このような例は、人間は地質環境をつくりだす過程で、必ずしも人間にとって好ましい方向でのみそれをつくっていないことを示しているが、しかしこれらの地質環境は、すでに廠としてわれわれの前に存在する。したがって、これらの地質環境については、そのプラスの側面を最大限に利用・保全すると同時に、そのマイナス面を克服し、次の世代のためにも、より良い地質環境につくり変えていかね

ばならない。

そのためには、地質環境の生い立ちやその特徴を明らかにし、さらにはそれらの発展法則を把握することが必要である。そこで本稿では、自然地質学の体系で確立されてきた諸法則の中で、最も重要な地層累重の法則や地層単元の階層構造の概念などが、人工地層や地質汚染の形成過程にいかに関わっているか、その点について考察する。

人工地層の地層単元

## 1. 自然地質と人工地質

地質圏は、固体・液体・気体および生命体からなる地史的産物であるが、それはまた、前述したように自然地質と人工地質から構成されている。そこでまず自然地質と人工地質の具体例を簡単に述べる。

《固体》

固体にあたる地層は、礫・砂・泥などの粒子からなり、それらが層状に集まって礫層・砂層・泥層といった地層となる。堆積年代が若ければ、一般に粒子間隙は多い。また生物遺骸からなる石灰岩層や石炭層もあり、これらの地層も、堆積年代が若ければ間隙の多いのが一般的である。固体の部分として、チャート層、溶岩、変成岩、花崗岩といった岩体もあるが、これらは一般的に間隙は少ない。

人工地層には、埋立層や盛土層などがある。これらの地層には、水底をサンドポンプによって浚渫し埋め立てた砂層や人為運搬による山砂層などがあるが、さらには有害物質の入ったドラム缶・ガラス瓶・冷蔵庫・ビニール袋・固体有害物質などからなる廃棄物層(ゴミ層)も加わる。

《液体》

自然地質をつくる液体としては、固体間を充填している地下水・化石海水・石油などがある。人工地質をつくる液体には、排(廃)液があげられる。使用済みのエンジン・オイルや過剰に使用した農薬水溶液、地下浸透させた有機塩素系溶剤などがこれに含まれる。

《気体》

自由地下水面より上位の地層中では、固体粒

子間の間隙は気体によって占められる。自然地質にあつては、それらは、その地域の気と同一の化学組成をもつ地下空気であるが、人工地質の場合には、人工埋積物や排(廃)液から発生するガスが含まれる。それが有毒の場合も多い。なお自然地質にあつては、深部岩体の亀裂や深部地層の間隙には、石油や天然ガスに由来するガス、あるいは温泉や火山に関係するガスなどが含まれる。

《土壌》

地質圏の表層には、さまざまな気候や地形的条件のもと、岩体や未固結堆積物を材料とし、主として生物の働きによる物理的・化学的諸作用が進行して、土壌が生成する。土壌は、独立の自然体としてとらえられるが、それはまた、固体・液体・気体・生命体からなる地質の特殊形態とみなすことができる。したがって土壌にも、自然地質のものと同様のものがある。

以上が地質圏の概説である。近年、地球表面上では、人工地質の占める割合が増加し、それに伴って人工地層も増え続けている。

## 2. 人工地層の層位学

水底に生活する生物が未固結の表層堆積物中を這い回り、堆積状態を擾乱する現象はBio-turbation(生物擾乱構造)と呼ばれるが、人工地層にみられる堆積現象も、これに類似した現象である。この場合には、底棲動物によるものでなく、人間のつくりだしたものであるために、この地層の研究は、環境地質学にとっては非常に重要な課題となる。

《人自不整合》

人工地層の研究で重要なのは、自然地層と人工地層との間に生ずる地質学的不連続の問題である。この問題は、地震に伴う地質災害、地下水の過剰揚水に伴う地盤沈下、あるいは有機塩素系溶剤による地質汚染など、現在、地質環境で生起している問題と重なっているために、現場での混乱が生じないよう地質学会においても真剣に討議された。

この不連続現象には、いわゆる「不整合」と呼ばれる自然の地質現象とは異なり、人間に

よる活動が一方にある。したがって、人間活動と地質圏との相互関係を研究する環境地質学にとっては、この不連続現象は、きわめて重要な現象の1つとなっている。

この不連続の実態は、地球上に出現した人類が地質圏に働きかけた遺跡に始まり、現代人による地下数メートルの地質ボーリングの痕跡や地下施設裏の壁面まで、じつに多種多様であるが、それらはすべて、人類が発展してきた過程で新しく作りだしてきた不連続面でもある。そして、これらの不連続面の時間間隙の長さもまたじつに様々で、それらは数十億年から数秒にまたがっているが、いずれも、人間が地質圏に働きかけた証となる特別な意味をもつ不連続面である。したがってこの不連続面を、自然の地質現象における不整合現象と同一視することは不可能であり、これは「人自不整合」と呼ばれる。

#### 《人工地層の堆積過程と階層構造》

自然地層は、重力場において、自然の営力で浸食・運搬され、地層累重の法則にしたがって堆積する。人工地層は、浸食・運搬・堆積のいずれかに人間の影響が加わるが、自然地層と同じく重力場の現象である。したがって基本的には、地層累重の法則が成立し、地層層位学も成立する。そして人工地層にも、単層・部層・累層・層群といった地層単元の階層構造が認められる。

図1は、利根川下流域における人工地層（湖沼埋立層）の分布状況と人工地層の断面である。以下、図にもとづいて人工地層形成の1例を紹介する。

サンドポンプ工法で水域を埋め立てる場合、ポンプが運転され始めると土砂を含む水が送られ、地層粒子はラミナを形成しながら水底に堆積する。ポンプの運転が止まれば、地層粒子の運搬・堆積も終わり、堆積面ができる。その結果、地層の最小単元である単層ができる。ポンプの吐出口近くには、粗粒砂（礫や化石を含むこともある）などの粗粒物質が堆積し、吐出口から遠く離れるとシルトや粘土からなる細粒物質が堆積する。こうして単層

内には同時異相ができる。そして、ポンプの稼働回数に応じて同じ枚数の単層ができ、単層が累重して部層の地層単元ができる。この場合、堆積の場が水面下であれば、底置層・前置層・頂置層ができる。

ある地点で、水面から一定の高さにまで土砂が堆積すると、埋立効率が低下するのでポンプ吐出口を前進させる。以前の堆積物の上や吐出口の前進方向には、ポンプ吐出口移動後の堆積物が供給され、新しい部層が形成される。それら新旧の部層間には、埋立停止期間の堆積環境に応じた地層が挟在することもある。このように部層が累積し、累層の地層単元ができる。

その後、人間活動により、埋め立てた砂を資源として利用するために、埋立層を掘削することもある。掘削した大きな穴の側面には、削り面ができる。その面は、さらに浸食されることもある。次には、その面に風成の崖す

い性堆積物が堆積する。その堆積層は、自然と人工の両要素が入るので、人自層とも呼ぶべき地層である。

またその穴は、土地利用や廃棄物の投棄のために、土砂やゴミで埋められる場合もある。その過程で、ダンプカーで盛土されたり、ブルドーザーなどで土砂やゴミが押されると新しく地層が形成される。図でいえば、硬マーボ豆腐層、ブル押し層、クサレ栗羊かん層などと名付けた地層がそれである。

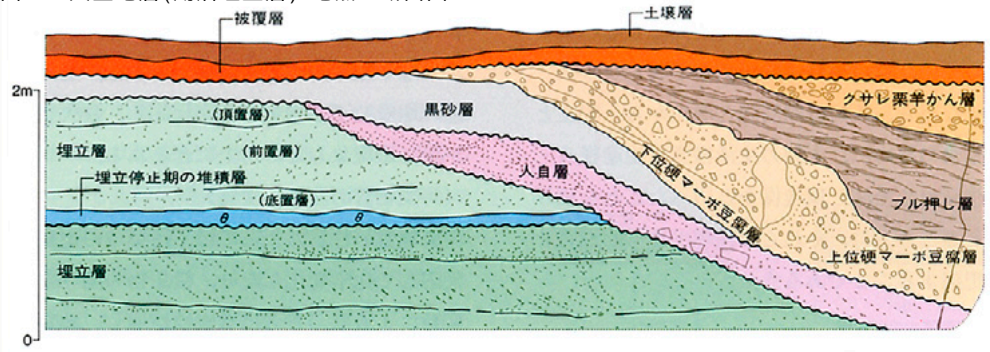
この場合、基本的には、ブルドーザーのひと押しによる運搬・堆積過程で、単層の地層単元が形成されることになる。単層中に、粒子配列、空き缶・生ゴミなどのリニエーション、偏平物質の瓦状構造、土の団粒子の散在といった多くの堆積構造が認められる。

ただここでは、ブルドーザーの轍などが堆積面となり、土やゴミが繰り返し押し出されるごとに削剥と堆積が行われる。堆積作用と圧

図1A - 利根川下流域における人工地層(湖沼埋立層)の分布



図1B - 人工地層(湖沼埋立層)A地点の断面図



縮作用がほぼ同時に行われているのが、この地層の特徴で、層理面を確認することは不可能に近い。そのため、このような造成地の盛土層や廃棄物処分場のゴミ層として扱われてきた地層単元が、地層のどの階層単元に対応するかが問題であった。しかし、上述の事情によって層理面が不明瞭であることを考えると、盛土層やゴミ層の総体は、多くの場合、部層の地層単元にあたると思われる。

(この観点にたつならば、縄文人が、ザル1杯の貝殻を貝塚に投棄した場合、その貝殻からなる堆積層が単層ということになる。そして貝塚層は、部層以上の地層単元にあたる。人工地層が、外見上地層として最初に認識される地層単元は、部層単元であることがほとんどである)。

その後、埋めた穴の跡地利用のために整地が行われる。その際、穴跡周辺の埋立砂層も含めて整地される。この整地に伴って被覆層ができ、後にその1部が土壌となる。これらも部層や累層にあたる。そして、さきに述べた人自不整合から被覆層面、つまり地表面までの地層が、層群の地層単元にあたる。

このように人工地層の層位学でも、地層累重の法則や地層の階層構造の概念が成立する。したがって人工地層は、規模こそ異なるが、前弧海盆や深海底における自然地層と比べても、地層としての共通性を有している。

しかし人工地層の場合には、地層間の時間間隙という大きな問題がある。人工地層にも層理面はあるし、形態的にも不整合現象に類似した削り込み現象も認められる。ただし、この間隙の時間単元は人間活動に支配されていて、自然地質のそれとは全く異なる。むしろここでは、人工地層間の時間間隙と層相についての、環境地質学的解釈が必要となろう。すなわち、その時間間隙と層相から、現在と未来のために、人間の生活様式・生産様式・生産力の増減と環境保全といったことを読みとるとともに、それらの物理・化学的地質を把握することであろう。

## 地質汚染における地質単元

### 1. 地質汚染

地質汚染は、一般的には、地層(土粒子群・土壌粒子群)やその間隙にある地下水および地下空気が、人工物質によって、物理的・化学的・生物的に、人間側に不利に変化する現象である。それは、地層汚染(土粒子群や土壌粒子群の汚染を含む)・地下水汚染・地下空気汚染からなる。土壌は、地層の特殊形態として捉えられるので、土壌汚染は地質汚染の特殊形態とみるべきである。

#### 《地層汚染》

地層汚染は、汚染物質・汚染水(汚染地下水も含む)・汚染地下空気が、地層の間隙中を通る過程で、地層間隙を充填したり、地層の構成物に付着・吸着することや、汚染物質によって地層構成物が変質・変成する現象である。

#### 《地下水汚染》

地下水汚染は、汚染物質または汚染水が、地層中の間隙水に溶解または混合して発生する。特殊な場合として、汚染物質や汚染水が、地層を構成する有害物質を溶かし出し、それが間隙水を汚染することがある。有機塩素化合物による地質汚染の場合、はじめ地層汚染が発生し、それが汚染源となって地下水汚染が発生する。

#### 《地下空気汚染》

地下空気汚染は、地下にある汚染物質(固体有害廃棄物を含む)や、汚染地層・汚染地下水に含まれる汚染物質が気化し、地層間隙・地下空洞・地下構造物内の空気を汚染する現象である。脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素などの揮発性物質が地下浸透した場合には、地下空気汚染が発生しやすい。

また地下水や廃棄物から遊離したメタンガスが、地下空気を汚染する場合もある。還元状態の地層粒子が空気と化学反応し、酸欠空気が生じる現象もこの汚染に含まれる。

#### 《汚染物質の変態・変質》

汚染物質の性質によっては、汚染域の地質と反応して化学変化したり、微生物の関与する変態によって、さらに有害性が増し、地質汚

染が深刻化することもある。放射性物質が地質を汚染することも良く知られている。メタンガスの場合にも、微生物による発熱現象と土壌粒子の変質が知られているが、実際には土壌を含めた地質汚染なので、地質の発熱現象・地層の変質現象と呼ぶのが妥当である。

#### 《汚染機構の形成に関わる諸要素》

地質汚染の仕組み(地質汚染機構)および地質汚染単元(後述)は、汚染物質の性質、汚染域の地質環境に支配される。両者の組合せにより、汚染機構は汚染域ごとに独自の様相を形成し、地質汚染単元の各次元が生成する。以下、それらの諸要素を列挙する。

#### 汚染物質の性質

(a)単一物質か、複数物質の混合か。

(b)単相か、混合相か。

- ・固相なら
  - ・水に溶解しやすいか。
  - ・昇華しやすいか。
- ・液相なら
  - ・密度が水より大か小か。
  - ・粘性が大きいか小さいか。
  - ・地層での透過性はどうか。
  - ・非水相液体の場合、水に対する溶解度はどうか。
  - ・揮発しやすいか。
  - ・地層に付着・吸着しやすいか。
  - ・地層を溶かすか溶かさないか。
- ・気相なら
  - ・密度が空気より大か小か。
  - ・水に溶解しやすいか。
  - ・地層に付着・吸着しやすいか。
  - ・地層を溶かすか溶かさないか。

(c)化学的・生物的に安定か。

- ・地層・地下水・地下空気と反応しやすいか。
- ・微生物やその関与で分解しやすいか。
- ・放射性崩壊をするか。

#### 地質条件

(a)透過層が1枚か、複数枚か。

- ・1枚なら
  - ・透過層の層相・層相変化と堆積環境からみた不均一性はどうか。
  - ・不透層の深度はどうか。
- ・数枚なら
  - ・透過層の層相・層相変化と堆積環境からみた不均一性はどうか。

注 1 = 水に難溶な液体は NAPLs(Non-Aqueous Phase Liquids)；非水液と呼ばれる。それらは水に対する比重の違いにより、水より比重の小さい油類などの LNAPLs(Light NAPLs)；軽非水液と、比重の大きい有機塩素化合物などの DNAPLs(Dense NAPLs)；重非水液に区分される(U.S.EPA.1991)。

うか。

- ・ 難透過層の層相・層相変化と堆積環境からみた不均一性はどうか。
- ・ 不透層の深度はどうか。

(b)地下水面より上(不飽和)か下(飽和)か。

- ・ 上なら
  - ・ 空気の流れが定常流か。
  - ・ 空気の流れが非定常流か。
- ・ 下なら
  - ・ 地下水の流れが定常流か。
  - ・ 地下水の流れが非定常流か。

(c)地下の温度および地下空気の圧力条件が変化するかしないか。

## 2.PCE地質汚染と最小地質汚染単元

### 《有機塩素系溶剤による地質汚染》

有機塩素系溶剤として使用されてきたテトラクロロエチレン(PCE)やトリクロロエチレン(TCE)は、揮発性有機塩素化合物(VOCs: Volatile Organic Compounds)とも呼ばれ、炭化水素化合物のなかでも塩素化脂肪族炭化水素(CAHs: Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons)に属する。これらは一般的に水に難溶解であり、比重が水より大きい重非水液(DNAPLs)である(注1)。そして揮発性を有する。この液体は、一般に表面張力が小さく、水などより動粘性係数が小さいため、水より微小な間隙をも透過可能である。不燃性で、溶剤として優れた性質をもっているが、欠点として発ガン性を有している。

揮発性有機塩素化合物(VOCs)の地質中での挙動は、地下水や地下空気が地層の中を透る難易度(地層の透過性)、地層中における両流体の移動速度、さらには地質中で微生物が関与する分解などに支配される。

地質中で微生物が関与するPCE分解過程では、塩素原子がとれる一連の脱ハロゲン化が行われるので、さらに低分子の物質に変わる。この分解は変態と呼ばれ、より有害な物質に変わることが多い。

VOCsの重非水液(VOCs DNAPL)が地表に排出され、それが地質中を通過する過程に、VOCs地層汚染・VOCs地下水汚染・VOCs地下空気汚染からなるVOCs地質汚染が発生す

る。最初に地層汚染が起こり、それを汚染源として地下水汚染が起こる。汚染地下水の流動につれて地層汚染はさらに拡大する。地下空気汚染は、汚染地層と汚染地下水が汚染源となることが多い。これらの汚染物質の一部は、それぞれの経路を経て、やがて地表に流出する(図2)。

テトラクロロエチレン(PCE)は、エチレンのもつ4つの水素がすべて塩素で置換されている1化学種(分子)で、塩素化脂肪族炭化水素(CAHs)による地質汚染現象にあつては、PCE地質汚染は最も下位の汚染単元に該当する。以下、PCE地質汚染について述べるが、本節では図1・1(13ページ)を参照されたい。

### 《PCE地層汚染》

PCE DNAPLは常温液体であるから、地層中におけるその挙動は、基本的には地層中における水の挙動に類似する。降水は、通気帯では透過性の最も高い部分を重力によって降下する。そして、地下水の宙水や本水になる。地下水帯(通気帯に對置した用語。地下水で飽和されている地下水面より下位の部分)で、地下水の運動を大きく支配しているのは、透水層・難透水層・不透水層といった地下水に対する地層(薄層も含む)の透過性と、位置エネルギーの差である。

同様に、PCE DNAPLの地層中の挙動も、それに対する地層の透過性によって大きく左右される。しかし、PCE DNAPLは水より比重が大きく、地下水のように地層間隙のすべてを飽和することはない。

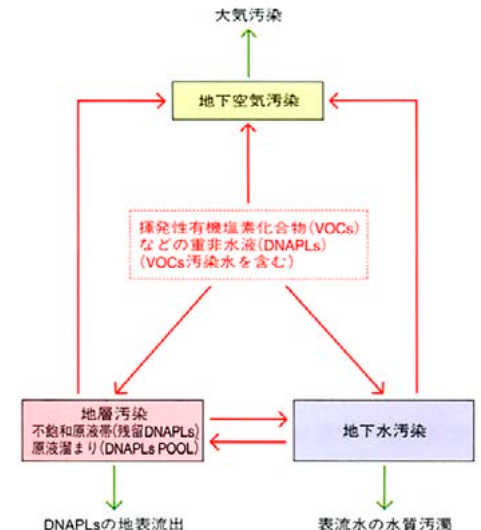
したがって、地表に排出され地下に浸透したPCE DNAPLは、重力と毛管力で、通気帯の透過性と堆積構造に左右されながら降下し、地下水面に到達する。この地下水面が宙水面である場合もある。さらにPCE DNAPLは、宙水層下の難透過層(薄層も含む)の傾斜や地下水の流れに支配されて移動し、難透過層のなかでも比較的透過性の高い部分や尖滅部から、さらに下位の通気帯へ降下する。この通気層での降下も、いま述べた通気帯の場合と同じである。自由地下水面に到達したPCE

DNAPLは、ここでも、地層の透過性・堆積構造・地下水の流動方向に左右されながら、地下水帯中を降下していく。

PCE DNAPLが通気帯や地下水帯中を降下した後、地層粒子に付着し、また粒子間の毛管液として残留するPCE DNAPLが、PCE原液不飽和帯(PCE Residual DNAPL)である。これらの残留PCE DNAPLから、地下水中にPCEが溶け出し、そのPCEが再び地層粒子に付着して地層汚染現象を呈することも多い。地質汚染の現場では、PCE DNAPLの地下浸透箇所が一定して、そこから断続的に浸透しているケースが殆どである。したがって、PCE DNAPLの降下過程で、地質中ではPCE DNAPLとPCE原液不飽和帯の分布域は、交互に変化する。最終的には、地質中の難透過層の上面にPCE原液溜まり(PCE DNAPL Pool)が形成され、PCE DNAPLが降下してきた軌跡としてPCE原液不飽和帯が残る。またPCE DNAPLが地下水流動方向と逆方向に傾斜した難透過層を下降する場合、必ずしも地下水流動方向に従うとは限らない。

以上のような地層中のPCE原液溜まり、PCE原液不飽和帯、PCE付着地層粒子群の存在がCAHs地層汚染のPCE最小地質汚染単元となる。また、汚染単元の具体的立体的分布はプルーム(Plume)と呼ばれるので、PCE最

図2 - 揮発性有機塩素化合物(VOCs)などの重非水液(DNAPLs)による地質汚染モデル





小地層汚染単元の立体的分布は、PCE最小地層汚染ブリューム、またはPCE単一地層汚染ブリュームと呼ぶことができる。

#### 《PCE地下水汚染》

PCE最小地層汚染ブリューム中に存在しているPCEが地下水中に溶け出すと、PCE地下水汚染となる。汚染地下水の地層中の流れも、基本的にはダルシーの法則にしたがって流れる。すなわち、汚染地下水の地層中の挙動は基本的に、汚染地下水の物性と層相との関係から成り立つ透水係数(Kw)に支配される。

$$\text{透水係数 } K_w = \frac{g}{\mu}$$

：地層の層相によって決定される透過度

：浸透汚染水の密度  $g$ ：重力加速度

$\mu$ ：浸透汚染水の動粘性係数

厳密には、PCEが水に100ppm程度溶解しても水より  $g$  が大きくなり、 $\mu$  は小さくなる。したがって  $K_w$  が一定である地層でPCEに汚染された地下水の  $K_w$  は、大きくなることになる。その結果、この汚染地下水は、透過性の低い地層でも水より浸透しやすいことになる。

また、この化合物で汚染された地下水は、水より密度が大きいので地下水帯中を降下するが、その際の挙動は、地層の堆積構造・地下水の流速・PCE汚染濃度に左右されると推定できる。しかし、汚染地下水の地下水帯中における下降や降下する際の角度といったことを支配しているのは、降下PCE DNAPLであるので、現場での正確な観測が必要である。PCEの最小地下水汚染単元の具体的分布が、PCE最小地下水汚染ブリューム(またはPCE単一地層汚染ブリューム)である。

#### 《PCE地下空気汚染》

PCEによる汚染地下空気は、通気帯に存在するPCE原液溜まりやPCE原液不飽和帯から、PCE固有の蒸気圧によって気化するが、PCE汚染地下水からヘンリー定数に従った分配により発生する。

同一地層の透気係数と透水係数を比較すると、空気と水の密度および動粘性係数の違いから透気係数の方が約60倍大きくなる。地層中には、一般に水分が存在するため、実際の透気

係数はこれより小さくなる。

気体としてのPCEは空気より重いので、汚染地下空気は通気帯の下方に移動しやすいと考えられる。PCEは、水に溶けにくく空気には揮発しやすいため、PCE汚染地下空気は、その濃度によって、地下空気との密度差が大きくなる可能性がある。したがって、PCE汚染地下空気の下方向移動は、PCE汚染地下水の場合より発生しやすいと思われる。ただし大気圧が低下する際には、地下空気と同じく、汚染地下空気も容易に地上に移流する。

以上のような挙動をしめすPCEの気体の分布がPCE地下空気汚染最小単元のブリューム(PCE最小地下空気汚染ブリューム、または単一地層汚染ブリューム)である。

#### 3. 地質汚染単元と階層構造

##### 《PCEからVCまで各化学種の時系列的生成》

PCEは、嫌気性で微量のメタンを含むラム中の実験で、図3に示されるように、微生物の関与による脱ハロゲン化が進行し、その過程で分解中間体が順次生成されることが実証されている(Vogel and McCarty, 1985)。

すなわちPCE(テトラクロロエチレン) TCE(トリクロロエチレン) DCE 3異性体(ジクロロエチレン) VC(ビニルクロライド)という分解過程を経るが、わが国では、この現象が地質中で起きていることが発見された(鈴木ほか, 1991)。これら一連の脱ハロゲン化作用は、時系列的で、不可逆的に進行する。

また、微生物や非生物分解によるDCE(ジクロロエチレン)生成順序や地下水の流動に伴うクロマト効果によって、トリクロロエチレン(TCE)からビニルクロライド(VC)までの分散と分離が行われていることが示された(Nirei et al., 1993)。

これらPCEからVCまでの、地質中における各化学種の時系列的変態過程には、地質層位学的概念が適用できる。先に触れたように、地質層位学的基本法則として、1791年にウィリアム・スミスが確立した「地層累重の法則」がある。この法則は、地層区分の最小単元である単層以上の相重なる2つの地層のうち、

本来下位にあった地層が上位の地層より古いということである。この法則で重要なことは、地層の空間的上下関係から、時間的前後関係が読み取れることである。

一方、地層の最小単元である単層の複数から部層の単元が成立し、部層の複数から累層、累層の複数から層群といった上位の単元が成立する。これが地層の階層構造である。

したがって、地質中で、時系列的に生じてくるエチレン系炭化水素の各化学種を地層の単層とみたととき、各化学種の生成とそれらの存在状態には、地層累重の法則における時間概念と、地層単元にみられる階層構造が成り立っていることが分かる。

つまり、各化学種に関する生成の時間的序列として、最下位層準の単層にあたるのがCIによりCが飽和されているPCEであり、最上位層準の単層にあたるのがVCである。そしてPCEからVCまでの一連の複数の化学種群の存在が部層に対応する(表1)。

このように、エチレン系炭化水素の地質汚染単元の成立と存在状態には、歴史的時間軸もあれば階層構造もみられるが、ただ地質汚染物質は成層構造をなさないで、形態的には、地層の階層構造とは全く異なる。

#### 《地層汚染の階層構造》

では、具体的な地層汚染の階層構造からみてみよう。日本における地質汚染の調査・研究から、TCEの脱ハロゲン化過程で各地層汚染最小単元ができ、それらがブリュームとして汚染分帯している事実が明らかにされた(鈴木ほか, 1991)。

図5に示すように、ここではTCEのDNAPLやそれによる汚染地下水が、透過性の高い第1透水層を流下する過程で脱ハロゲン化が行われ、礫層や細粒砂層からなる第1透水層にはTCEとcis-1,2-DCEからなる2つの地層汚染最小単元が、その上下の層準にはtrans-1,2-DCEの地層汚染最小単元が、それぞれブリュームとして分帯している。1,1-DCE地層汚染最小単元のブリュームは、下位のtrans-1,2-DCE地層汚染最小単元ブリュームの下部

図3 - カラム実験によるPCEの脱ハロゲン化過程 (Vogel and McCarty, 1985)

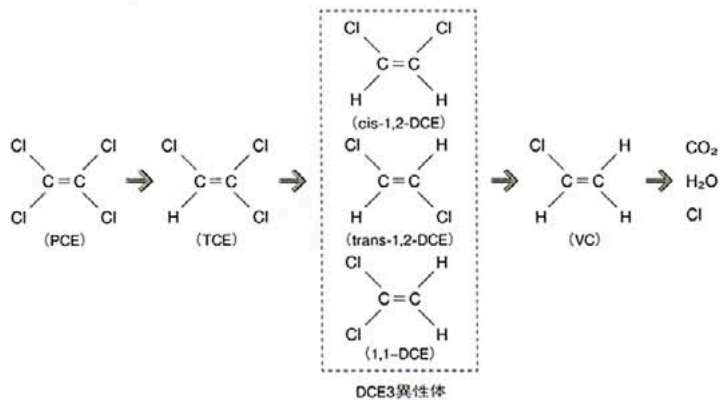


図4 - TCA(1,1,1-トリクロロエタン)から1,1-DCEへの脱ハロゲン化過程 (Vogel et al., 1987)

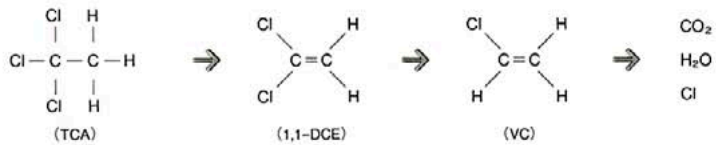
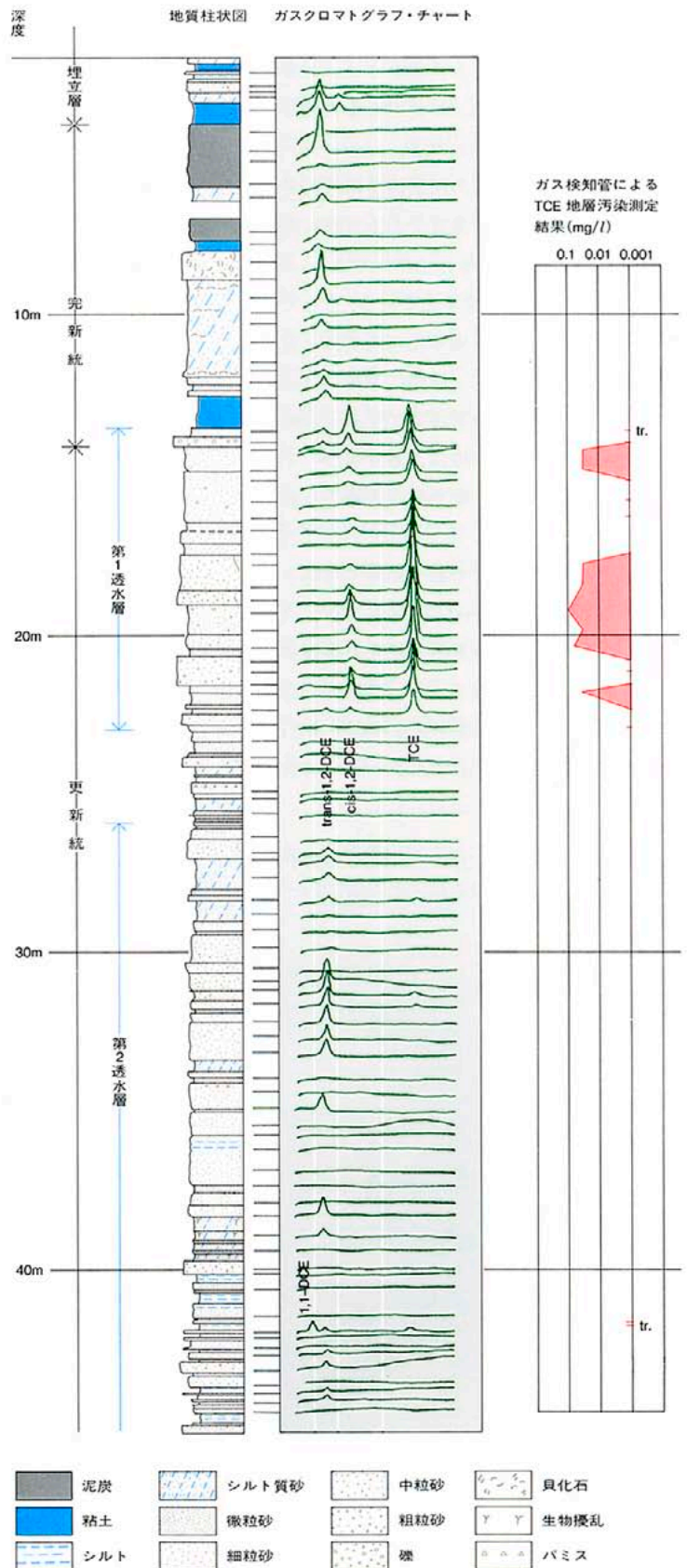


表1 - 地質汚染単元の階層構造を地層単元の階層構造に対比した表

地層単元の階層構造	地質汚染単元の階層構造
単層	最小地質汚染単元 <ul style="list-style-type: none"> <li>最小地層汚染単元</li> <li>最小地下水汚染単元</li> <li>最小地下空気汚染単元</li> </ul> 例：PCE, TCE, TCAなどの単一化学種による地質汚染
部層	複合地質汚染単元 <ul style="list-style-type: none"> <li>複合地層汚染単元</li> <li>複合地下水汚染単元</li> <li>複合地下空気汚染単元</li> </ul> 例：TCE + cis-1,2-DCE + trans-1,2-DCE + 1,1-DCE 地質汚染 : PCE + TCE + cis-1,2-DCE + trans-1,2-DCE + 1,1-DCE + VC 地質汚染 : TCA + 1,1-DCE 地質汚染
累層	統合地質汚染単元 <ul style="list-style-type: none"> <li>統合地層汚染単元</li> <li>統合地下水汚染単元</li> <li>統合地下空気汚染単元</li> </ul> 例：(PCE + TCE + cis-1,2-DCE + trans-1,2-DCE + 1,1-DCE) + (TCA + 1,1-DCE) + (VC) 地質汚染

図5 - TCE・DCE3異性体の4つの最小地層汚染単元の分帯 (鈴木ほか, 1991)

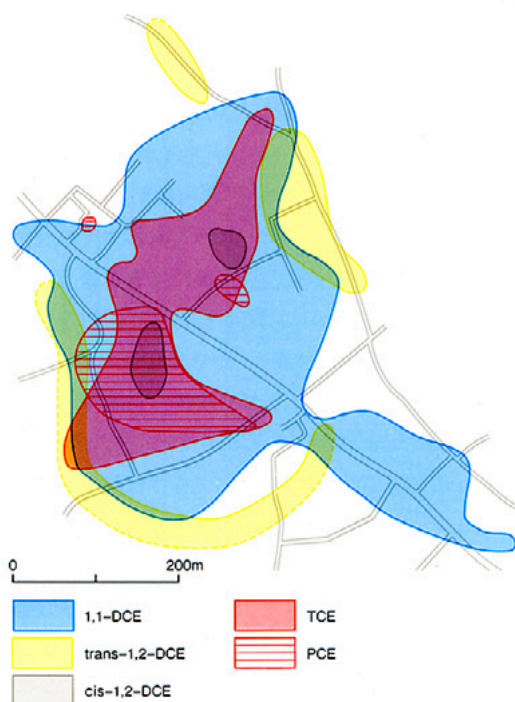


の一部に認められる。これらのことは、地下水中のTCEの一部が微生物の関与による脱ハロゲン化変態過程と地下水流動のクロマト効果で、複数の最小地下水汚染プルームが生まれ、その汚染地下水が付着水として地層粒子を汚染したものと思われる。

また、この現象を地層の階層構造に対応させるならば、地層の最小単位である単層にあたるものがTCE最小地層汚染単位であり、cis-1,2-DCE最小地層汚染単位である。そしてこの場合は、最小地層汚染単位の両者はともに化学種であるから、同一層準に存在できる。つまり、この各最小地層汚染プルームは、地質圏における各化学種による分帯なので、岩石圏の変質分帯や変成分帯に共通する面をもっている。

また、単層の上位階層である部層に対応する現象として、TCE、cis-1,2-DCE、trans-1,2-DCEなどの各最小地層汚染単位が複合することもある。これが複合地層汚染単位である。例えば図5では、TCE最小地層汚染単位とcis-1,2-DCE最小地層汚染単位が、同一透水層で複合している状態が認められる。

図6 - PCE・TCE・DCE3異性体の5つの最小地下水汚染単位からなる複合地下水汚染プルーム



### 《地下水汚染の階層構造》

次に、CHAs地下水汚染にみられる階層構造についてみてみよう。揮発性有機塩素系溶剤として使用されたPCE・TCE・1,1,1-トリクロロエタン(TCA)で汚染された地質汚染現場において、図6および図7のような地下水汚染プルームが明らかにされた。この各プルームは、最小汚染単位にあたる前者3者と、それらからの脱ハロゲン化変態過程の分解中間体としてのDCE3異性体からなる最小汚染単位のものである。PCE及びTCEの脱ハロゲン化変態過程に伴う分子構造は前述したので、TCAから1,1-DCEへの同過程(Vogel et al., 1987)の分子構造を図4に示す。

図6および図7に示したそれぞれの地下水汚染プルーム群は、一連の脱ハロゲン化変態過程で生じるPCE・TCE・cis-1,2-DCE・trans-1,2-DCE・1,1-DCEからなる5つの最小地下水汚染単位が複合したもの(図6)と、やはり一連の脱ハロゲン化変態過程で生じるTCA・1,1-DCEからなる2つの最小地下水汚染単位が複合したもの(図7)である。

図7 - TCA・1,1-DCEの2つの最小地下水汚染単位からなる複合地下水汚染プルーム

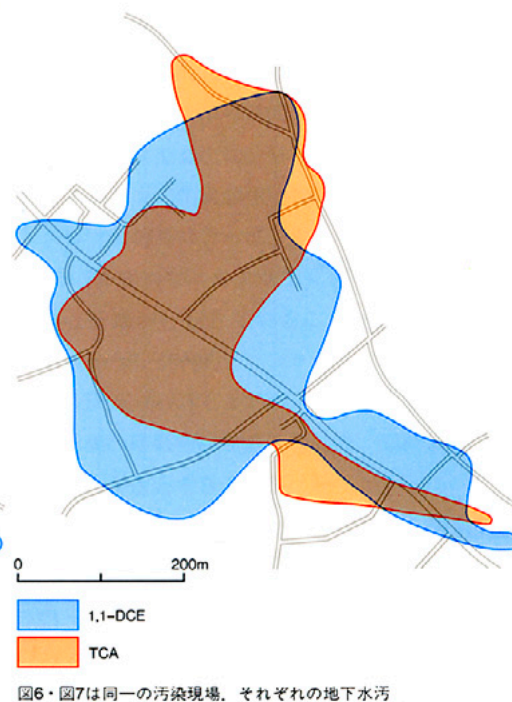


図6・図7は同一の汚染現場。それぞれの地下水汚染プルームは同一透水層中にあり、統合地下水汚染プルームを形成している。

地下水汚染プルーム群は、それぞれ最小地下水汚染単位の上位階層にあたる複合地下水汚染単位(複合地下水汚染プルーム)である。そしてこの現場では、これら2系統の脱ハロゲン化変態過程に伴う複合地下水汚染は、同一透水層中で合わさっており、さらに上位の統合地下水汚染単位(統合地下水汚染プルーム)が形成されている。

### 《地下空気汚染の階層構造》

汚染地層や汚染地下水から気化した汚染物質により、地下空気汚染単位(地下空気汚染プルーム)が形成される場合も、汚染地層や汚染地下水の場合と同様、汚染物質の各最小汚染単位から上位階層の単位が形成される。

図8は、PCE・TCE・DCE3異性体の5つの最小地下空気汚染単位から複合地下空気汚染単位(複合地下空気汚染プルーム)が形成されているケース、図9は、TCA・1,1-DCEの2つの最小地下空気汚染単位から複合地下空気汚染単位(複合地下空気汚染プルーム)が形成されているケースである。この現場でも、2系統の複合地下空気汚染が合わさっており、さらに上位の統合地下空気汚染単位(統合地下空気汚染プルーム)が形成されている。

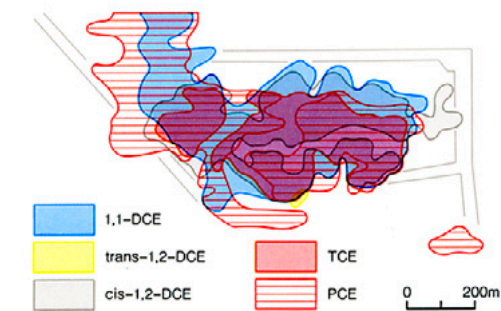


図9 - TCA・1,1-DCEの2つの最小地下空気汚染単位からなる複合地下空気汚染プルーム

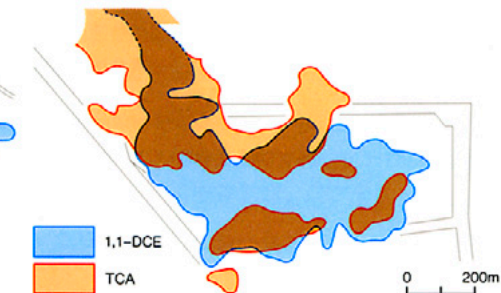


図8・図9は同一の汚染現場。それぞれの地下空気汚染プルームは同一透水層中にあり、統合地下空気汚染プルームを形成している。

下空気汚染ブリューム)が形成されている。

### 地質環境と地質単元

#### 《液状化・流動化の発生機構と階層構造》

冒頭でも触れたように、地質環境問題の1つには、地震時の液状化・流動化災害がある。この現象は、人自不整合を境にして上位にある人工地層で際立って発生する。その発生機構は次のようである。

淘汰の良い砂層(淘汰の良いシルト層の場合もある)の多数の微小部から液状化が発生し、この微小部が連続して、液状化・流動化層となる(図10)。しかし、さらに液状化・流動化が発展すると、単層単元や部層単元の泥層を液状化・流動化層に巻き込み、人自不整合より上位の累層単元または層群単元の人工地層の現象になることが知られている。この現象は、人工地質に関する液状化・流動化の発生機構が、地層累重の法則にしたがって堆積した人工地層の階層構造の単元に支配されている例である。

#### 《地質汚染の階層構造と発ガン性の増幅》

地質汚染もまた、重要な地質環境問題の1つである。その中でも、各国で猛威を奮っている

のがCAHs地質汚染である。CAHsのなかでもPCE・TCEは、有機塩素系溶剤として国内で広く使用されてきた発ガン性の指摘されている有害物質である。わが国の地質汚染問題は、この2物質に限っても深刻である。

ところが、これらの汚染地域では、国内で使用されていない発ガン性の高い物質が地質環境中に新たに生成され、発ガン性を一段と増幅させる現象を呈している。すなわち、地質中においてPCEやTCEなどのCAHsの最小地質汚染単元が時系列的に脱ハロゲン化し、新しい最小地質汚染単元が順次生まれ、複合地質汚染単元・統合地質汚染単元といった上位階層の地質汚染単元を形成し、それに伴って、発ガン性を加算しているのである。

以上述べたように、人工地層の層位に関連する液状化・流動化災害問題であれ、地質汚染問題の場合であれ、これらの地質環境問題に関わる重要な現象が、地層累重の法則や地層の階層性の基本となる地質単元に支配され、生起していることが分かる。

おわりに

地球環境問題がいくら深刻化しても、人類は

これからも、生産力の増加のために自然を改変していく。省エネ・省資源化・再資源化がどんなに進んでも、地質圏への物質の排泄と廃棄が続くのは間違いない。したがって未来の地質圏は、その多くが人工地質に被覆されることになる。地質汚染物質もまた、質・量ともに増加するであろう。

本稿では、このように禍福の伴う地質環境の調査・研究に対して、地質学での地層累重の法則と地層の階層性の概念がどこまで適用できるかを考察し、従来未解決であった地質環境問題の本質に迫ってみた。地球規模において人間と自然の共生が切実に求められている今日、環境地質学もまた、この重い課題に役立ていかねばならない。そのためには、人工地質や地質汚染にまつわる問題の解決において、本来四次元の地質環境問題を、例えば構造物の支持力といった地盤環境を扱う二次元的概念で対処し短絡的に解決してはならない。それには、不均一性と階層性を重視した三次元的把握と、地史的概念を含んだ「地質」を考慮した観点が不可欠となる。

図10 - 千葉県東方沖地震により旧利根川埋立地に発生した噴砂孔の地質断面図 <風岡ほか原図>  
(調査位置は図1AのB地点)

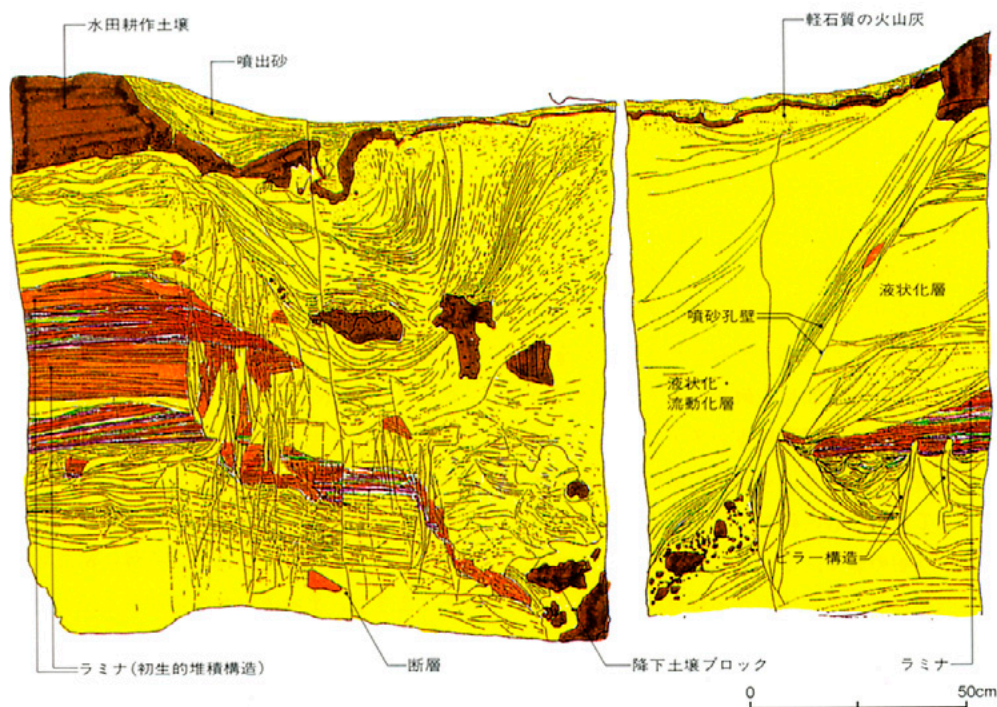


写真 - 旧利根川埋立地に発生した噴砂孔



鈴木喜計 = 君津市環境部環境保全課

楡井 久 = 千葉県水質保全研究所地質環境研究室長

品田芳二郎 = 株式会社テクノアース（元関東建設株式会社）

原田泰雄 = 君津市内箕輪地質汚染調査チーム

佐藤賢司 = 千葉県水質保全研究所地質環境研究室主任研究員

有機塩素系溶剤による地質汚染とは

[1]はじめに

[2]有機塩素系溶剤による地質汚染のしくみ

[3]地質汚染調査チーム

汚染の発見から基本計画の策定まで  
地質汚染機構解明調査

[1]地層汚染診断(地質ボーリング)

[2]地下水汚染とモニタリング

[3]地下空気汚染と君津式表層汚染調査法

[4]内箕輪の地質汚染機構

[5]有機塩素化合物による複合地質汚染  
浄化対策

[1]浄化対策の全体像

[2]汚染地層の掘削除去とその関連技術

[3]地下空気汚染吸引法

[4]バリア井戸システム

[5]市街地での揚水・曝気処理と地下水利用

[6]浄化の効果確認と環境影響のモニタリング  
地質汚染をめぐる

有機塩素系溶剤による地質汚染とは

[1]はじめに

編集 君津市の内箕輪地区では、有機溶剤による汚染を始めて解決し、国内はもちろん海外からも注目されていると聞いております。

本日は、この汚染問題の発生から解決までの経過を、主として現場での体験を中心にお話しいただき、さらには今後の課題などにも触れていただければと思います。では楡井先生からお願いいたします。

楡井 まず始めに、有機塩素系溶剤による地質汚染の概要をかいつままで述べておきます。有機塩素系溶剤のうち代表的なものは、トリクロロエチレン(TCE)とテトラクロロエチレン(PCE)で、これらは洗浄力が強く、揮発性なのですぐに乾燥し、しかも不燃性です。それで1970年代の初め頃から、前者は半導体工場や電気工場などで大量に使われるようになり、また後者は街の小さなクリーニング屋さんなどでも使うようになりました。というのも、これらの溶剤は当時、法律上は有害ではなく、消防庁などは、燃えない安全な洗浄剤として推奨していただいたからです。

ですからこれらの溶剤は、使用後は適切に管理されることもなく、意識的か無意識的かは別として、とにかく廃棄物として捨てられていました。そうすると、これらは難分解の物質ですからいつまでも地中に残るわけで、このことが、後になって大きな問題になってくるのです。

一方、1980年頃からアメリカの半導体工場が密集するサンフランシスコ湾南岸のシリコンバレーで、この溶剤に汚染された地下水を飲んでいた住民の間に心臓病・先天性異常児出産・流産などの健康被害が多く発生して大きな社会問題になり、これらの溶剤は有害物質として規制され、にわかに国際的な関心のものになり始めます。

1984年になるとWHO(世界保健機構)が、これらの溶剤が発ガン性物質であると認め、トリクロロエチレンは30 $\mu$ g/l(0.03mg/l)、テトラク

ロロエチレンは10 $\mu$ g/l(0.01mg/l)というガイドラインを発表します( $\mu$ g/l ppb)。

日本では、1984年に厚生省が水道水の暫定水質基準を定め、環境庁は公共用水域への排出抑制目標をきめるなど、これらの溶剤に対する規制がようやく始まります。一方、これらの溶剤による汚染状況も調べられ始め、日本の各地で高濃度の汚染サイトのあることが分かってきます。ただその正確な実態となると現在でも分かっておりません。推定では汚染サイトは全国で約4,000カ所、あるいは1万カ所以上ともいわれたりしています。

このように有機塩素系溶剤による汚染は、いま全国の大地で猛威を奮っているのですが、この汚染は、目に見えない地下で広がっていることや、また有機塩素系溶剤がもつ非常に厄介な性質もあって、従来の公害対策の手法ではとても対応できません。地下水汚染が発見されると、代替水の確保などに努力が払われ、その場しのぎの解決がなされてきたわけです。そうした状況の中で、君津の場合には、この溶剤による地質汚染の仕組みを初めて明らかにし、浄化対策にも成功したということで、それが本日の話になるわけです。

[2]有機塩素系溶剤による地質汚染のしくみ  
君津の話に入る前に、有機塩素系溶剤による地質汚染とはどのようなものなのか、その概略を予め説明しておく方が話が分かりやすいだろうと思います。

《台地の地下の地質断面》

図1・1は、有機塩素系溶剤による地質汚染の仕組みを描いたものです。まず地質断面の方から説明します。図は、関東地方の丘陵や台地をモデルにして描いた概念的な地質断面図で、ローム層の有る無しを除けば日本の洪積台地の地下というのは、だいたい図のような断面になります。まず一番上には、薄い土壌層があり、その下位には関東ローム層があります。ローム層の下位にはごく薄い粘土層がありますが、その下位からは砂層と粘土層との繰り返しが続く、一番下には基底礫層と基盤岩があります。

こうした地下の地質は、いうまでもなく長い地史的過程の中でつくられたものですが、地質汚染を考える場合には、こうした現在の地下地質を、固体・液体・気体の構成物として捉え、それらがどのような仕組みになっているかを見ておく必要があります。

固体は、説明するまでもなく礫層・砂層・シルト層・泥層あるいはローム層といった地層をつくっているもので、それぞれが礫・砂・シルト・粘土あるいは風化火山灰などの固体粒子からなっています。そして、こうした固体粒子の間隙を占めているのが気体あるいは液体です。固体粒子つまり地層粒子は、大きさによって区分され、大きなものから順に、礫、砂、シルト、粘土となりますが、地層粒子が大きいほど間隙の大きさも大になり、気体や液体を透しやすくなります。

地層粒子間を気体が占めている部分は通気帯と呼ばれ、このうち、空気や気体などが透りやすい地層は透水層、透りにくい地層は難透気層と呼ばれます。一方、地層粒子間を液体が占めている部分は地下水帯と呼ばれ、このうち、水や液体などが透りやすい地層は透水層(注1)、透りにくい地層は難透水層と呼ばれます。

その状態を図1・1で見ますと、一番上の土壌層から地下水面までは、地層粒子の間隙はすべて空気、つまり気体によって占められている通気帯で、この部分は、常に大気圧の影響を受けています。

地下水面から下位は、地層粒子の間隙はすべて水によって占められている地下水帯で、飽和帯ともいいます。この部分は、水が比較的動きやすい砂層・礫層(透水層)と、水が動きにくいシルト層・粘土層(難透水層)とが交互に重なり、それが累重しています。ですから地下水帯の水は、難透水層を底にしていくつかの透水層に分かれ、常に流動しています。ただ難透水層は、全く水を透さないというのではなく、水を透すのですが透りにくい。それで難透水層というわけです。殆ど水を透さないのは、一番下の不透水性岩体です。

一番上の第1透水層の地下水は、自由地下水面から第1難透水層までの砂層の中を流れます。この水は一樣に大気圧を受け、地下水位(地下水面)の高い方から低い方へ、この図では右から左へ流れます。自由地下水と呼ばれるように雨が降るとすぐに補給され、流れも比較的速いのが特徴です。

その下位には、第2難透水層、第3難透水層および不透水性岩体を底として、それぞれ第2透水層、第3透水層および第4透水層があります。これらの透水層の中の水は、上下の難透水層や側方などからの水圧が加わり被圧されています。一般に被圧された透水層に向けて深井戸を掘ると、被圧された水圧の分だけ水位が上がってきます。それが被圧水面です。ただ昨今の関東地下水盆では、深層の深い方の透水層から揚水しているのです。下位の透水層の方が水圧が低くなっている。そういう傾向が一般的になっています。

水は、圧力の高い方から低い方へ流れますから、各透水層の水位を調べれば、地下水の流れの方向が分かります。被圧透水層の水の流れは、地下水の容れものである地下水盆の器の形によって規定されますが、この図では、第1透水層とは逆に左から右への流れを想定しています。また図の場合には、各透水層からの人間による揚水活動によって、上位の透水層から下位の透水層へ流れるものとして描いてあります。そして不透水性岩体というのが、地下水盆の底になります。

また、ローム層とその下位の薄い難透水層との間には宙水層があります。多量の雨が降ると、土壌層とローム層を抜けてきた水が、下に難透水層があるために一旦ここに溜まってしまいます。地下の水溜まりのようなもので少しづつ流れて下においていくのですが、長期にわたって溜まることもあります。地質汚染の場合、宙水層は汚染の広がり方に大きく影響するので、細心の注意が必要です。

#### 《有機塩素系溶剤の特徴》

ところで有機塩素系溶剤は、さきほども触れましたように、非常に微量でも発ガン性が確

認されている有害物質です。その物性の特徴としては、揮発性でありながら水よりも重いということです。そして水に溶けづらいのですが、僅かづつは溶けるのです。

もう1つの特徴は、水より動粘性係数が小さくてすべりやすい。サラッとしているので、水が通らないところでもこの物質は通ってしまいます。ですから、コンクリートの器などにこの溶剤をプールしてさまざまな洗浄に使っていたような場合、水が通らないから当然この溶剤も通らないだろうという感覚でいると、それが違うんです。50cmくらいの厚さのセメントのコンクリートでも平気で抜けてきて、底から少しづつ漏れていくのがこの物質です。しかも僅かづつ水に溶けて、微量でも発ガン性がある。また僅かづつしか水に溶けませんから、いつまでも地中に残ることになる。とても始末に負えないというのが、この物質に対する率直な印象です。

#### 《有機塩素系溶剤による地質汚染》

有機塩素系溶剤のように、揮発性でありながら、水に難溶で水より重い液体は、重非水液(DNAPLs)と呼ばれます。また揮発性でありながら、水に難溶で水より軽い液体は、軽非水液(LNAPLs)といわれ、石油や灯油などがこれにあたります(p.5 欄外注1参照)。

タンカーの事故などで、原油などの軽非水液(LNAPLs)が海面上に流出したときなどは、その汚染状況は誰の目にも明らかなので大問題となり、懸命な除去作業が行われます。

ところが、軽非水液(LNAPLs)でも重非水液(DNAPLs)でも、それが陸地で地下を汚染していくときには、汚染が目に見えず、発見しにくいものですから除去作業が容易におこなわれません。この場合、原油などの軽非水液(LNAPLs)は、通気帯を落ちて一番浅い自由地下水面に達すると、これは水よりも軽いですから浅層の地下水面を横に広がっていき、それより下には落ちていきません。ですから、通気帯と通気帯中の地下空気、浅層の透水層と浅層地下水が汚染されるわけです。

ところが重非水液(DNAPLs)の場合には、こ

れは水よりも重いですから地下水の中を落ちていき、地下深部にまでどんどん広がっていきます。そして、これが目に見えない地下で起きているものですから、地下の汚染状況を把握することができず、汚染物質の除去作業も全くといってよいほど行われません。その結果、この汚染は地下で広がる一方となり、現在も着実に広がり続けているわけです。有機塩素系溶剤による汚染がいま深刻をきわめているのは、それが、地下の汚染であるという点にも大きな要因があります。

では、有機塩素系溶剤の重非水液(DNAPLs)が廃液として捨てられ、地下に浸透していくとき、地下地質がどのように汚染されていくのか。その状況を図1・1で見えます。

#### (a) 地層汚染

まず、地表から廃棄物層の中に捨てられた有機塩素系溶剤の原液(DNAPLs)は、水よりも重いですから、とにかく下に下にと落ちていき、廃棄物層の底に溜まります。図で廃棄物層の底の赤色の部分がそれです。原液(DNAPLs)の通過したあとには、その残りがすが他のいろいろな廃棄物にこびりついています。それが赤色の点や半円などの不飽和原液帯で、これを残留DNAPLsといっています。

廃棄物層の底の原液帯は、さらにローム層を通過して下に落ちていき、宙水層のところに溜まります。宙水層の原液帯は、下の粘土層の傾きや水の流れに引っ張られて水平方向に広がっていきませんが、とにかく水より通りやすいものですから、粘土層中の草の根の跡や貝の掘った跡などのごく僅かな隙間を見つけては下に漏れていきます。

この粘土層の下は砂層ですから、ここはどんどん抜けて原液は第1透水層まで落ちてきます。第1透水層では、水の中を落ちていくので水の流れに引っ張られて斜めに、左下方向に落ちていき、やがて第1難透水層の上に原液溜まり(DNAPLsプール)をつくります。

その原液帯も第1難透水層の上で止まっています。次、次第にこの粘土層から漏れていき、原液は第2透水層へと落ちていきます。

ただ第2透水層では、水は第1透水層とは逆の方向に流れますから、この流れに引っ張られて右下方向に落ちていき、やがて第2難透水層の上に原液溜まりをつくります。

ただこの原液溜まりでは、原液は左の方向へも動き始めています。これは、原液は水よりも重いので必ずしも水の流れにそって動くとは限らず、被圧透水層では、底の粘土層の傾斜にそって動く。そうしたケースを示したものです。

またこの原液溜まりには、第3透水層に達する深井戸が掘られています。この深井戸を掘削したとき、井戸壁と粘土層との間に隙間ができますが、井戸仕上げの際にはこの隙間に砂礫が充填されます。また各透水層には、それぞれ集水スクリーンが設けられています。そうすると上下の集水スクリーンと前述の隙間を充填した砂礫を通路にして、原液が下に落ちていくのです。こうして、図のように第3透水層の中を原液が流れ始めます。

この深井戸は、既設のものだけではありません。汚染を調査するために新たに深井戸を掘削する。そのときに井戸壁と粘土層との隙間は簡単に砂礫だけを充填してすませ、遮水材を使ってきちんとした仕上げをしなかった。その結果、下の透水層にまで汚染を広げてしまったというケースが実際に幾つかあるのです。こうした過ちは絶対にあってはならないことなので、特に申し添えました。

原液は、以上のように透水層や難透水層を動いていきますが、ただ非常に厄介なことには原液は、地下水をおしのけ地層中を通過するとき、砂や粘土の粒子に必ずその残りがすをこびりつけていくのです。図の赤色の不飽和原液帯(残留DNAPLs)というのがそれです。そして、こういった固体粒子にこびりついた汚染物質もまた、やがて水の中にゆっくりと溶けだすわけです。こうして原液は、地下を動きまわる過程で、地層中に汚染源を広げながら、次第に下の方に落ちていきます。原液帯と不飽和原液帯の汚染された地層を「地層汚染」と呼びます。

#### (b) 地下水汚染

有機塩素系溶剤は、非常に水に溶けづらいのですが、発ガン性があるくらいは十分に溶けます。それで、いま述べたように地層中の汚染物質から、ゆっくりゆっくりと地下水に溶けだし、地下水を汚染していきます。この汚染水は、当然のことですが、地下水の流れる方向に広がっていきます。図では、一番上の宙水層の汚染を第1地下水汚染プルーム(プルーム=もやもやと立体的に広がった塊)、第1透水層での地層汚染を発生源とし、その左側に向かって広がっている地下水汚染を第2地下水汚染プルーム、第2透水層での地層汚染を発生源とし、その右側に向かって広がっている地下水汚染を第3地下水汚染プルームとして区別してあります。これは、地下水汚染の発生源である地層汚染がそれぞれ違った場所にあるからです。

また第1難透水層の粘土層には、左端に不連続の部分があり、さらにその少し右には深井戸があって粘土層を貫いています。図では、これらの箇所を通過して、第2地下水汚染プルームが第2透水層にまで広がっていく様子を描きました。これは、汚染源がまだ第2透水層に広がってなくとも、こうしたケースによって第2透水層の水が汚染される場合のあることを示したものです。

#### (c) 地下空気汚染

有機塩素系溶剤は揮発性ですから、地層汚染や地下水汚染が発生源となって気化し、ガス化した汚染物質が通気帯にも広がっていきま。それが地下空気汚染で、図で地下空気汚染プルームと記してあるのがそれです。自由地下水面より上位の通気帯でおこる汚染で、こうした場所で地下工事が行われ、実際に被害が生じたケースがあります。

以上のように、有機塩素系溶剤による汚染は地層汚染、地下水汚染、地下空気汚染となってあらわれます。これは、地下地質が固相・液相・気相で構成されているからで、これらの3相を切り離れた地質がないと同様に、3つの汚染形態もまた分かちがたく結びついて

います。それで、これら3つの汚染を統一的に、また環境地質学的に捉えるために、3者を合わせて『地質汚染』と呼んでいるのです。《汚染機構の解明なしに本質的な解決はない》以上から分かるように、有機塩素系溶剤による地質汚染では、地下水汚染だけをとりあげて、それをいくら調査し対策を施しても、問題はいっこうに解決しません。もちろん、地表近くの汚染ガスだけを抜いても駄目です。それらの汚染源は、地下の地層汚染にあるのですから、時間がたてば、再び地下水汚染や地下空気汚染が発生します。ですから地質汚染の解決には、地下に浸透した汚染物質が、地質環境の中でどのように挙

動して地層汚染を広げているか、それがまた地下水汚染や地下空気汚染とどのように関連しているか、そういった地質汚染の全体の仕組みを、まず明らかにしなければならない。私どもは、これを「地質汚染機構の解明」といっていますが、この機構解明に基づいて浄化対策をたて、これにより始めて地質汚染を解決できるわけです。またそれ以外に、地質汚染の本質的な解決はあり得ないのです。有機塩素系溶剤による地質汚染の場合、その際立った特徴は、汚染物質が、いま地表から捨てられているのではなく、過去に捨てられたものが地下で汚染源を形成し、汚染源を拡大している点にあります。現在だけの問題で

あれば、汚染物質の排出を規制すればは使用者側も努力して排出しないようにするわけで、解決はそう難しくはないのです。ところがこの汚染は、汚染物質は過去に排出されたもので、それがいま地下で汚染発生源になって汚染を着実に広げている。この点に、この汚染の深刻さがあるのです。《地質汚染の地表への流出》地質汚染はまた、地下だけの問題ではありません。水や空気は地表と地下を出入りし、地層もまた地表に露出しますから、地質汚染の影響が地表にあらわれるのは当然のことで、すでに現実の事態として、その影響が各地にあらわれてきております。

図1-1- 有機塩素系溶剤による地質汚染機構図

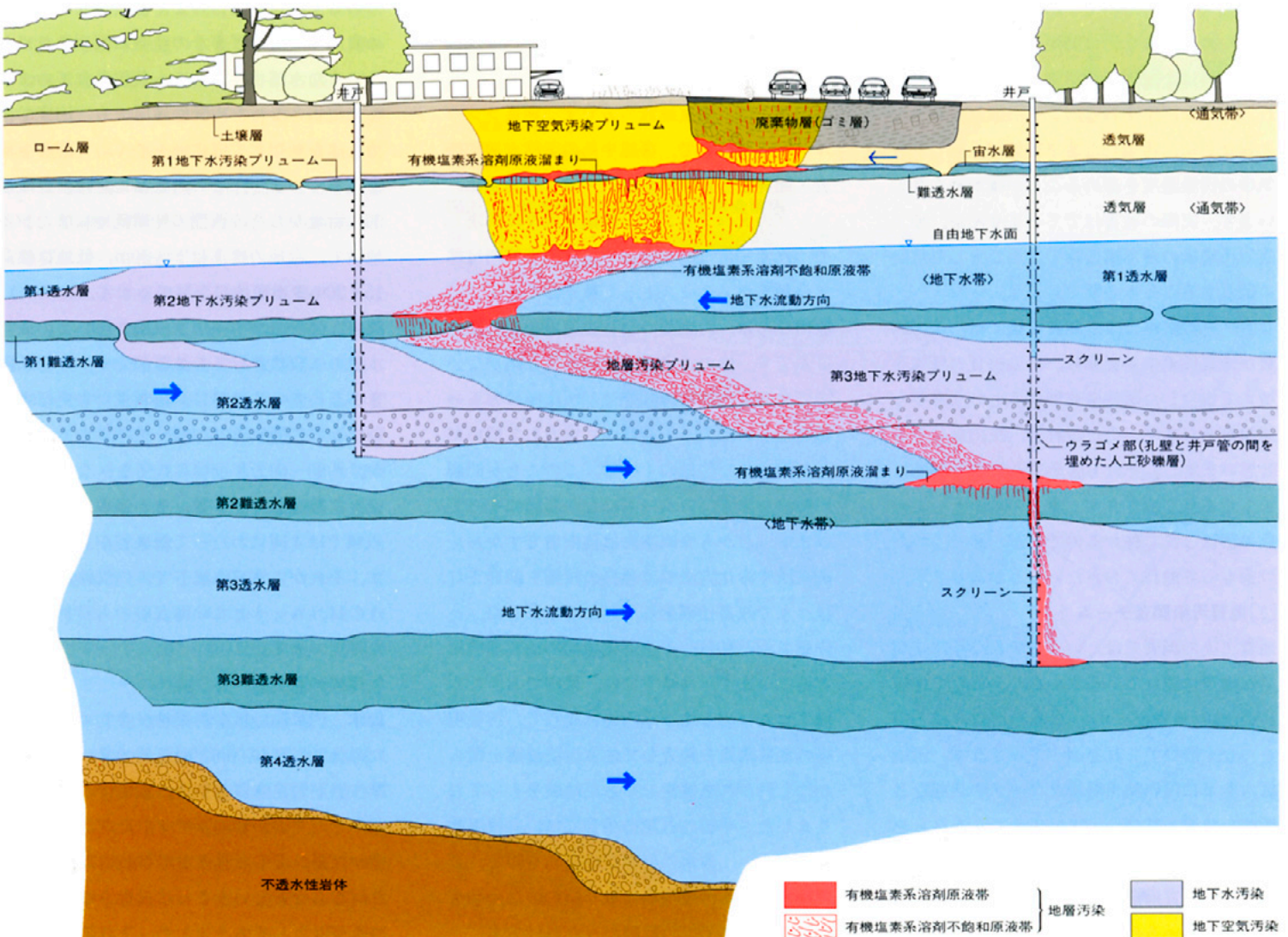




図2(第1章, 5ページ)は, 地質汚染の地表への波及の仕方を概念的に示したものです。まず, 図の中央の重非水液(DNAPLs)から左下に向かう矢印は, 原液がプールされて地層汚染となりますが, その原液が地表に流出してしまうというケースです。この汚染は, 日本の各地で実際に発生しており, 今後, 問題になってくるのが目に見えています。

次に, 左下の地層汚染から右側に向かう矢印をたどりますと, 原液や汚染物質が溶けだして地下水汚染となります。この汚染された地下水が, 湧水となって地表に流出する。これも実際に数多く発生してしまっていて, その典型が神奈川県秦野盆地です。ここでは, 内陸工業団地を誘致し, その中の高台に多くの工場が集まっているのですが, そこで地下浸透したために大変な汚染問題が起きています。もう一つは, 地下空気汚染が大気中に放出され, 大気を汚染するものです。低気圧がきたときなどに, 汚染した地下空気が上昇し, 大気中の汚染濃度を高めることが確かめられています。実際の被害はでていませんが, 地下空気汚染域の地下構造物では, こうした危険に留意することも必要でしょう。

なお, 有機溶剤による地質汚染では, この物質が地質環境中で変態し, 汚染物質の種類が増えて複合した形態に発展するという重要な問題があります。ただこれは, 後の話にできると思いますし, それも含めて基礎的な問題は第1章を見て頂きます。本日の前座としての私の話はこれで終わるのですが, あと1つだけ前もって触れておきたいことがあります。

### [3]地質汚染調査チーム

地質汚染の調査では, いうまでもなく汚染現場は地下に隠れていますから, 主として地層汚染診断(地質ボーリング)を中心に, 線と線をつなぐ恰好でこれを調べていきます。汚染は, 非常に薄い粘土層やクラックの状態など微細な状況と結びついているので, それらを精査するわけですが, それと同時に, これらが全体の地質構造や汚染の広がりどどのように関わっているのか, それを診断・予測し,

次々に対策をたてていかねばならない。しかも地下地質と地質汚染の状況は, 汚染現場ごとに違いますから, 調査段階の初期から浄化対策にいたるまで, その汚染現場に精通した人たちによってチームをつくり, これに対処していくことが必要で, またベストな方法なんです。このチームを, 私どもは調査チームといっていますが, もちろん君津の場合にもこうした調査チームによって汚染の解決に成功してきたわけです。じつは, その調査チームのメンバーというのが, 本日ここに出席されている方々なのです。

鈴木さんは, 君津市の環境保全課の方で, 今回の地質汚染に対しては問題解決の主役を担う立場にあったし, いまもあるわけですが, 鈴木さんは, いつも正面から問題に取り組んで, この難しい役柄をこなしてきました。本日の話は, 鈴木さんが中心になります。

品田さんは, 関東建設の方です。地質コンサルタントの会社で, 房総半島の天然ガスの調査・開発などを手がけられています。地質ボーリングの大ベテランで, 難題を次々に解決してくれました(関東建設の地質調査部門は株式会社テクノアースとして独立した)。

原田さんは, 汚染源の会社の環境担当の部長さんです。他の汚染現場ではあまり例がないのですが, 内箕輪地区では, 汚染源の方も一緒のチームに入って心底から協力して頂いたことが大きな特徴の1つで, このことが問題の解決を非常にスムーズにした要因になっています。しかも原田さんは技術者ですから, 調査法や浄化方法では独自の技術を開発され, 後々まで残る仕事をしていただきました。

佐藤さんと私は, 千葉県環境部の地質環境研究室にいます。当時すでに, 県内で起きた六価クロムによる地下水汚染に対して, 汚染現場の地質構造を精査して地質汚染機構を明らかにし, これを解決してきた経験をもっていました。今回の君津の場合には, 有機塩素系溶剤という非常に厄介な性質のもので, この物質による汚染現場に取り組むのは, 私も佐藤さんも初めての経験だったわけです。

汚染の発見から基本計画の策定まで

### 《君津市内箕輪の汚染現場》

鈴木 まず, 現場の位置を紹介しますと, 君津市は, 房総半島中部の東京湾に面した地方都市で, 人口は約9万人。南東部には広大な上総丘陵が連なり, この丘陵地帯を北西に向けて小糸川が流れます。丘陵をでた下流域は小糸川がつくる沖積低地となり, そこに市の中心部があります。河口湾岸の臨海地域には重化学コンビナートが並び, 京葉工業地帯の重要な一角を占めています。

君津市は, 豊富な地下水に恵まれたところで, 昔からその利用が盛んで「上総掘り」で知られる深井戸掘削技術も, この地域に発祥したものです。地下水はいまでも農業用水をはじめ食品や醸造など多くの産業に利用されており, また水道水源としても使用されています。汚染現場となった内箕輪地区でも, 旧家では地下水を利用して庭に池をつくって鯉や金魚を飼っています。その内箕輪地区は, 丘陵端部の台地からその西側の沖積低地にまたがる地域で, 台地の標高は30~50m, 低地は標高15~20mで市街地になっています。

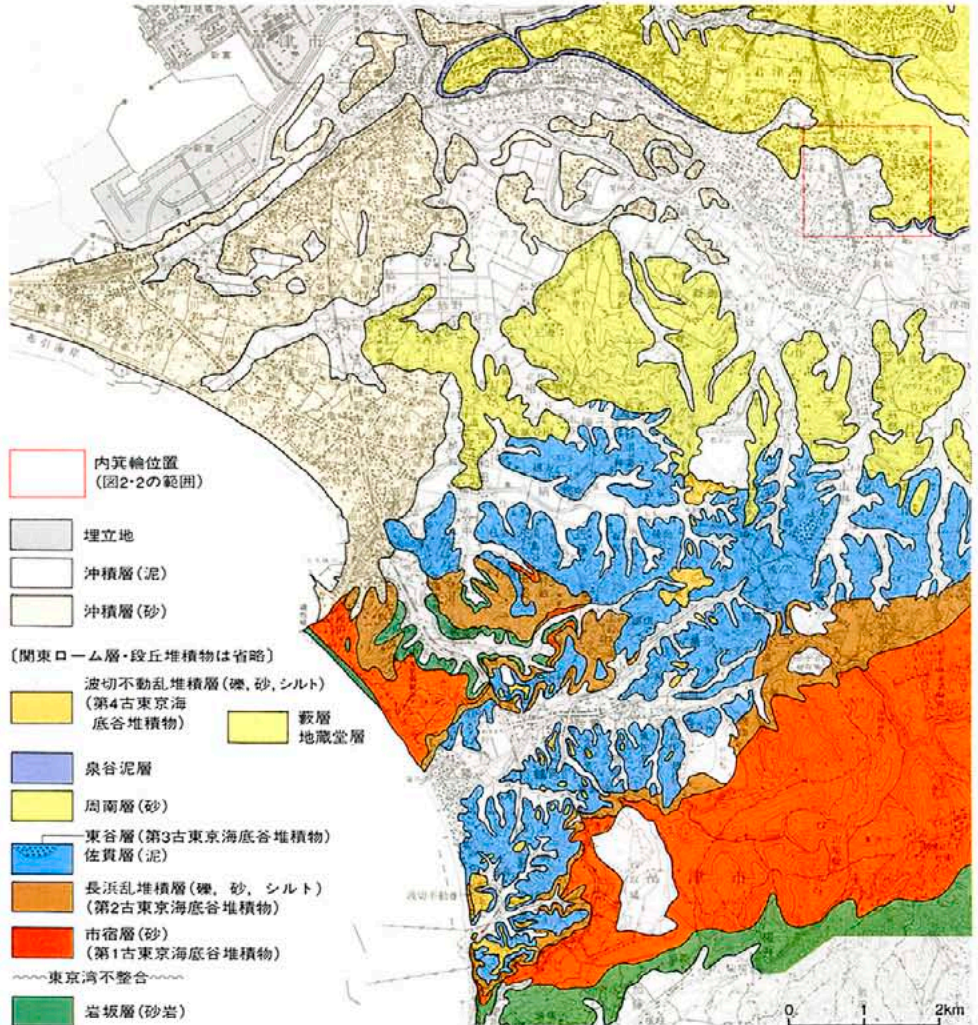
楡井 図2・1が小糸川下流域からいまの浦賀水道の入口にかけての地質図です。上総丘陵をつくっている地層は, 鮮新世から更新世前期にかけて関東海盆に厚く堆積したものです。約50~60万年前頃になると, この地層が徐々に隆起してきます。その過程で, この周辺域では4回にわたって海底谷が形成されます。それが古東京海底谷で, 内箕輪地区というのは, ちょうどこの海底谷の入口付近にあたっています。

### 《汚染の発見》

鈴木 内箕輪地区で汚染を一番初めに確認したのは1987年(昭和62年)3月です。日本では厚生省が暫定水質基準を, 環境庁が暫定排出基準をだすのが1984年です。ただこうした基準がだされても, 私どもでは特に調査しなければならないということにはならないわけでのんびりとしておりました。それで1987年に

図2-1 - 古東京海底谷と内箕輪地区位置図

〈地形図は国土地理院発行5万分の1図「木更津」「富津」を使用〉



なって「ちょっと調べてみようや」ということになり、調査費も余りないので市内の井戸を7カ所ほど調べてみました。

そうしますと、この7カ所のうち2つの井戸で汚染が発見されたのです。1つの井戸からはテトラクロロエチレン、もう1つの井戸からはトリクロロエチレンがでてきたのですが、トリクロロエチレンの方は2.9mg/lという余り聞いたこともないような、とんでもない高い濃度がでてきたんです。

《井戸台帳の作成》

これは、えらい困ったものだとということで、早速、その周辺地域の井戸という井戸を全部シラミつぶしに調べて、井戸台帳をつくりました。もちろん、この井戸にはすでに使われなくなった井戸も含まれており、さらに崖のしぼれ水や湧水や池の水まで、地下水に関わりのあるものはすべて、この井戸台帳に記載しました。また、既存のさく井ボーリング資料や建築工事の際の地質ボーリング資料、あるいは地形図・地質図・水利図などを収集して、整理・解釈をおこない、この地域の水文地質について検討しました。

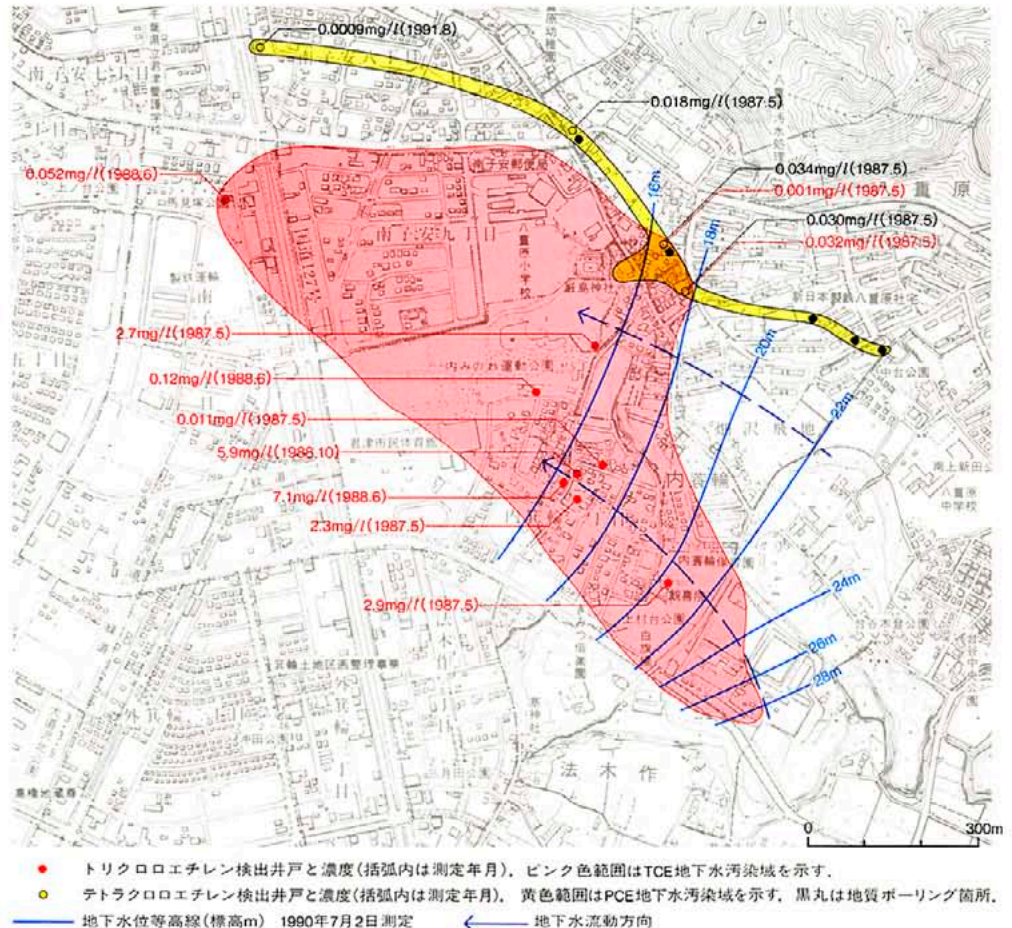
《内箕輪における地質汚染の仮説モデル》

こうして5月に入ってから、この井戸台帳にもとづいて一斉水質検査や水位測定を実施したわけです。その結果、汚染はかなり広い範囲にわたっていて、低地では地表面下50m付近の被圧透水層まで及んでいること、また場所によってはかなり高い濃度の汚染があることも分かってきました。

その汚染のた井戸を地形図にプロットしていきますと、トリクロロエチレンに汚染された井戸はすべて、図2-2のピンク色の範囲の中であって、その外側には汚染が認められません。ピンク色地域の南東端は台地で、そこに1つの工場があります。工場はこの範囲にはこれ1つだけしかなく、しかも、工場の東側や南側には汚染ができません。

一方、井戸の地下水位から地下水の流れの方向を大まかに推定しますと、南東から北西に向かって流れています。したがって汚染源は

図2-2 - 君津市内箕輪地区地質汚染現場



● トリクロロエチレン検出井戸と濃度(括弧内は測定年月)。ピンク色範囲はTCE地下水汚染域を示す。  
 ● テトラクロロエチレン検出井戸と濃度(括弧内は測定年月)。黄色範囲はPCE地下水汚染域を示す。黒丸は地質ボーリング箇所。  
 — 地下水位等高線(標高m) 1990年7月2日測定 ← 地下水流動方向

台地上の工場にあって、汚染物質は地下水の流れに沿って、その北西側の低地に向かって広がっていることが予想されます。

こうして、内箕輪における汚染の仕組みの概略を示す仮説モデルができます。この仮説モデルは、あくまでも本格的な調査・対策をスムーズに進めるための手掛かりとなるものですが、データがきちんとしていますから大要に間違いはなく、強い説得力をもっています。なお申し遅れましたが、汚染を発見した後、すぐに楡井さんや佐藤さんに相談し、県の地質環境関係の技術者と一緒になって、これらの作業を急ピッチで進めたわけです。

#### 《汚染源の工場へ》

さて、こうして台地上の工場が汚染源であると推定できましたが、ではその工場が何をつくっているかとなると、確かなことは何も分かっておりません、多分、電気メーカーだろうという、その程度だったんです(笑)。しかし、これまでの調査によって、汚染源はこの工場以外には考えられませんから、どうしても工場の中を調べなければならない。

原田 そこで立入調査権をもって乗り込んできたわけだ(笑)。

鈴木 まあ、立入調査権といっても竹光の刀みたいなものですが、しかし、この際はやはり刀を抜いて(笑)、少しでも早く汚染源の実状を知ることが必要だった。またもし有機溶剤がずさんに捨てられ、地表に廃棄されるようなことがあれば、これは直ちに止めさせなければならなかったわけです。

工場に入りましていろいろ調べてみますと、この工場では、1972年頃からその当時までに非常に大量のトリクロロエチレンを使っていたこと、過去のある時期には、地面を掘削してつくった工場内の廃棄物捨場に廃液が捨てられていたことなども分かりました。

また溶剤の使い方を見ますと、当時はどこでも同じ程度だろうと思いますが、施設の亀裂や配管の接合部の緩みなどからの漏れがあるし、廃液を流してドラム缶に回収するときにも、やり方が粗っぽいので漏れてしまってい

るわけです。それで、こうした箇所はすべて改善しなさいとか、また溶剤の扱い方についてはマニュアルをつくりなさいとか、いろいろ注意いたします。工場側の方でも私どもの意に沿ってくれまして、できることはすぐに実行してくれましたし、また地下の配管はすべて地上に移すなど、施設の改善作業に取り掛かってくれたわけです。

#### 《事故現場での汚染地層の研究》

ところで当時、汚染水をクリーンにするのに曝気装置というものがあると聞いておりました。これは、大阪の高槻市で初めてつくられたもので、ここでは、水道水源である地下水が有機溶剤に汚染されてしまったので、とにかくも水源としての地下水を守るということで、水道関係者が自分たちで工夫し、この装置を日本で初めてつくったわけです。有機溶剤の揮発性を利用し、汚染水を曝気して溶剤を空中に放出し水をきれいにするのですが、これが高槻市で成功したものですから、それをモデルにした曝気装置が神奈川県座間市でもつくられていました。

一方、君津市の水道水源井にも汚染が見られましたので、この井戸に曝気装置をつくらうということになり、原田さんと一緒に座間市の曝気装置を見学にいきました。この頃、工場ではいろいろと施設の改善を進めており、原田さんと私が座間市に出掛けたちょうどその日に、工場では改善した施設が立ち上がったわけです。ところが、ちょっとした不注意があったのか、事故がおきて40リットルほどの有機溶剤が漏れて地下に浸透してしまったのです。おそらくこの事故は、原田さんがその場にいれば起きなかったのではないかと思っておりますが、後になって振り返ってみると、この事故というのが私どもにとっては貴重な研究の場を提供してくれたのです。

というのは、有機溶剤が地下に入ったとき、どんな挙動をするか。汚された地層中に含まれる有機溶剤の濃度は、どのように分析し測定するのか。いまでこそ公定法という国で定めた測定法がありますが、当時は何ひとつな

く、私どもは自前で、こうした方法を見つけていくしかなかったわけです。

それで早速、有機溶剤が漏れたところにトレンチを掘って、これが地層中に入ったときの汚染の広がる様子を実際に確かめました。この液は洗浄力が非常に強いので、例えば地層にペンキがついていたりすると、それを全部とかしてペンキの色をつけたまま下に落ちていく。ある部分では地層を脱色しながら下に落ちていきます。また、汚染された地層を掘り出して天日にあてて風乾すれば、それがきれいになることも分かってきました。

その一方では、汚染した地層を実験材料にして、地層中の有機溶剤の濃度を測定する方法を研究していったわけですが、このことが、後の調査をすすめていく上で、非常に役立ちました。その意味では、この事故はラッキーであったともいえるのです。

#### 《基本計画の策定》

さて工場内では、前述の仮説モデルを実証するためにハンドオーガーを使って深さ10m程度までの試料を取り、地質と汚染状態を調べました。このときには、原田さんをはじめ工場の人々も一緒になって作業してくれまして、汚染の実状を明らかにすることを最優先にして、立場を越えた協力体制ができたことは非常にありがたいことでした。あとでお話するように、その後、私どもでは君津式表層汚染調査法を開発し、いまでは汚染源の調査が簡単に、また正確にできるようになりましたが、調査が始まったばかりのこの時点では、ハンドオーガーを使った肉体労働による方法しかなかったわけです。

こうして、工場内の汚染の事実も明らかになり、汚染源から汚染地域にいたる地質汚染の概略の仕組みを明らかにした仮説モデルが実証されましたから、これでいよいよ内箕輪の地質汚染を解決するための方策がたてられます。すなわち、汚染機構を解明するための地層汚染診断(地質ポーリング)箇所の選定と診断の順序、調査過程で実施できる浄化対策と地下水汚染の観測方法、さらには地層汚染の

浄化対策にいたるまで、調査から対策までを総合的に視野に入れた、内箕輪の地質汚染を根本的に解決するための基本計画が出来上がったわけですね。

#### 《会社側による基本計画の承認》

この基本計画を実施するための一番大きな問題は、いうまでもなく、地質ボーリングをはじめとする調査・対策費用を誰が負担するのか、ということです。私どもは金を持ってないものですから、ここはどうしても会社に費用を負担してもらわないと調査が始まりません。それで「汚染原因者負担の原則があるから、地質ボーリングなど調査の費用も負担してほしい」というようなことで、ここは粘り強く交渉します。

もうこの時期になりますと、汚染源が工場にあって周辺の環境を汚したことは会社も分かっていますから、交渉の感じも最初の頃とはだいぶ様子が違います。こうしてお互いが少しづつ歩み寄る格好で、工場の中では、地層汚染診断(地質ボーリング)は3カ所、それ以上必要な分はその都度相談しましょう。各観測井は、地層汚染の認められた透水層より1つ下の透水層まで設置し、その透水層が汚染している場合には、さらにその1つ下のきれいな透水層まで設置しましょう。工場の外側でも、地層汚染診断(地質ボーリング)は3カ所、それ以上必要な分はその都度相談しましょう。各観測井は、工場の中と同じ方法で設置しましょう。3カ所というのは、汚染を面的に把握するときの最小の単位ですが、こうして会社側で調査費用を負担してくれることに話がまとまったわけですね。

オフィシャルには、1988年(昭和63年)4月に会社側と市および県が協議し「内箕輪地区地下水汚染対策基本計画」を双方が承認したという形になっています。県が入っているのはこの基本計画の作成に楡井さんのところの研究室が関わっているからです。こうして、地質汚染の機構説明調査がいよいよ始まることになりました。

## 地質汚染機構説明調査

### [1]地質汚染診断(地質ボーリング)

《有機溶剤を扱う初めての地質ボーリング》  
鈴木 地下の地層や透水層を調べるには、いうまでもなく地質ボーリングをおこないますが、今回の調査では、地層汚染を調べるのが目的で、1本のボーリングについていえば、地層や透水層と同時に、どの深さのどのような層相のところか、どれだけの濃度の汚染物質があるかを正確に調べる。つまり地層汚染診断を行うわけで、これが、すべての調査の土台になります。

ところが、汚染物質の有機溶剤というのがまことに厄介な代物で、揮発性なので気化するし、また微細な隙間があれば下に漏れていきます。ですから、ボーリングコアから試料を採って調べるまでに、汚染物質が薄れてしまったら調査になりません。またボーリングの作業中あるいはその後で、汚染物質がほかの場所に移ったり、広がったりするようなことがあってもならないわけですね。

このように、有機溶剤を相手にした今回の仕事というのは、従来のボーリングの常識からすれば、ちょっと引き受け手のないような難しい注文がいろいろとついています。また初めての経験だけに、現場では予想もしない問題がでてくることも考えられます。それで、この難しい仕事をなし遂げてくれるのはベテランの品田さん以外にはないと思っていて、品田さんとは以前一緒に仕事をしてその人柄を知っておりましたので、それで品田さんをお願いしました。

品田さんに話したのは1988年(昭和63)7月頃です。これで、さきほど楡井さんのいわれた内箕輪の地質汚染調査チームのメンバーが全員揃ったこととなります。地質ボーリングは、1988年の8月から始め、最初の7カ所を翌年の1月までに打ち終わっています。このときは、それこそ皆が目が回るような忙しさで夢中になって仕事をしたように憶えています。さきほど、最初は工場の中が3カ所、工場の外

が3カ所といいましたが、汚染源を重視して工場の中で6カ所、工場の外は1カ所に変えております。

地質ボーリング地点は、図3・7に示すとおりです。工場内の6カ所はNo.1からNo.6までで、No.4は手法の開発を兼ねたテストボーリングです。工場外の1カ所はNo.11です。なおこの辺から後のことは、時間的経過に従って話しますとややこしくなりますので、それにとらわれずに話していきます。

#### 《層相の境界では必ずサンプルをとる》

地層汚染診断の地質ボーリングは、もちろんオールコアボーリングでおこないます。地層汚染診断の現場では、ボーリングによって地層コアが上がってきますが、この地層コアについては、層相と堆積構造をミリメートルオーダーで細かく観察し、センチメートルオーダーあるいはミリメートルオーダーでこれを記載します。

それと並んで重要なことは、地層コアに含まれている汚染物質を見逃さずに、その濃度を正確に調べることです。一般に行われているように、長さ1mのコアの中央付近の1カ所だけから画一的にサンプルをとり、それだけを調べて済ますというようなことでは、とうてい地層汚染診断にはならないのです。サンプルの取り方がどんなに粗い場合でも、層相の変わり目やクラックのあるところでは必ずサンプルをとり、汚染物質の濃度をチェックします。これらの部分には、原液(DNAPLs)や不飽和原液(残留DNAPLs)の存在する可能性がきわめて高いからです。また、原液があると分かるころでは、その上下の部分を詳しく観察しチェックします。

#### 《ガス検知管による地層汚染簡易診断法》

では、汚染物質の濃度はどのようにして調べたかといいますと、当時はこうした方法が何一つありませんから、私どもは、ガス検知管を使って調べる方法を開発しました。

この測定法は、地層や地下水に含まれる汚染物質の濃度を簡単に測定できます。まず汚染地下水の濃度測定法を説明しますと、図3・1

注2 = 同じ層準からのサンプルは、ガスクロ分析では4,000mg/lの濃度が測定された。この濃度は対水溶解度をこえており、TCE原液そのものである。

Aのように、瓶の中に200mlの汚染水を入れます。これに蓋をして1分間シェイクしますと、汚染水に含まれている有機溶剤が一定温度で一定量気化し、ヘッドスペースのガスに変わります。これをガス検知管で調べ、検知管の指示値によって、汚染水の濃度を知らなければなりません。

これと同じように、地層に含まれる汚染物質の濃度を測定する場合には、図3・1Bのように、まず20gのサンプルをとりますが、今度はこれを、きれいな蒸留水200mlの中に入れるのです。これに蓋をして1分間シェイクしますと、地層中の有機溶剤が水に溶け、ヘッドスペースのガスに変わります。これをガス検知管で調べれば、その地層の汚染濃度が分かるわけです。これを「ガス検知管による地層汚染簡易診断法」と呼んでいます。

《地質汚染診断図》

この方法で、コアから採ったサンプルの汚染濃度を調べますが、これらの診断結果はすべて、層相・堆積構造とあわせて地質柱状図に記載します。図3・2は工場内でも最大の汚染源となっているNo.9A地点の地層汚染診断図です。場所はもちろん台地の上です。図では、右側に層相を記載、左側にはサンプルの深度とトリクロロエチレン濃度を記し、電気検層の結果はスペースの都合で省きました。

No.9Aは、深さ20mの地質ボーリングで、図のように14.76~19.90mは青灰色の厚いシルト層となりますが、このシルト層からは汚染物質が認められません。つまり、この難透水層が支えとなって汚染物質がこれより下には落ちていないわけで、汚染物質はこの難透水層を底にして横に移動していることが容易に推定できます。

難透水層の上には、多くのシルトの薄層を挟んだ厚い砂層が重なり、一番上がローム層になります。自由地下水水面は、深度11.38mにみられ、それより上は通気帯になります。

第1透水層および通気帯では、12.21~12.58mの小礫・貝殻まじりの中~粗粒砂の層準を除けば、すべての地層に高濃度の汚染物質が認められます。とくに7.10~7.40mのシルト層の上の7.00~7.10mの中粒砂の層準、深さ7.07mのサンプルでは、じつに36.0mg/lというとんでもない値がでました。これは、トリクロロエチレンの原液そのものです(注2)。写真3・1はこれと同一層準の汚染地層のサンプルで、写真にみられる黒い丸状のものがトリクロロエチレンの原液の塊りです。

No.9A地点は、有機溶剤の廃液が捨てられた廃棄物捨場のすぐ傍からです。ここでは大量の原液が上から下へどんどん落ちていきます。原液の通過したあとには、その残りかす

が地層中の粒子にこびりつきますから、それでこの地点では、青灰色のシルト層の直上まで、上から下まで地層全体が高濃度に汚染されているわけです。

そして、通気帯の地層中にはいくつものシルト層が挟まれますから、それらの直上で汚染は側方に広がっていきます。一方、地下水帯に落ちてきた汚染物質は、地下水の流れにそって移動し、さらに遠方へと広がっていきます。

地層汚染診断が済んだ後、ボーリング孔は地下水の汚染状況の推移をみるため観測井として利用します。No.9Aのボーリング孔も深さ3~15mの部分にスクリーンを設けて観測井として使い始めたわけですが、暫くすると、スクリーンからトリクロロエチレンの原液が観測井の中に落ちてきたんです。写真3・2がこの観測井の中に落ちてきた原液です。原液に汚染された観測井はもう役にたちませんから、これはすぐに塞いでしまいました。

もう一つ、今度は汚染源の工場から北西に約400m離れた沖積低地の市街地、No.11地点の地層汚染診断図を紹介します。図3・3がそれで、この図でも、右側に層相を記載、左側にサンプルの深度とトリクロロエチレン濃度を記してあります(電気検層の結果は省略)。No.11は、深さが92mにも達する地質ボーリン

図3・1A - 汚染地下水の簡易測定法

- 1 全容量645mlのメジウム瓶に汚染水200mlを入れる。
- 2 1分間シェイクし2分間静置する。
- 3 ヘッドスペースガスの濃度を検知管で測定。測定後、温度計でヘッドスペースガス温度を計測。換算表で汚染水の濃度を求める。

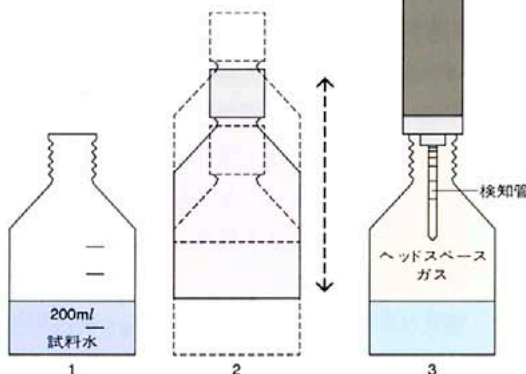


図3・1B - 汚染地層の簡易測定法

- 1 地層コアからサンプルを採る。
- 2 そのままの状態ですべてのサンプル20gを秤量する。
- 3 蒸留水200mlを入れたメジウム瓶の中に20gのサンプルを入れる。
- 4 1分間シェイクし2分間静置する。
- 5 ヘッドスペースガスの濃度を検知管で測定。測定後、温度計でヘッドスペースガス温度を計測。換算表で汚染地層の濃度を求める。

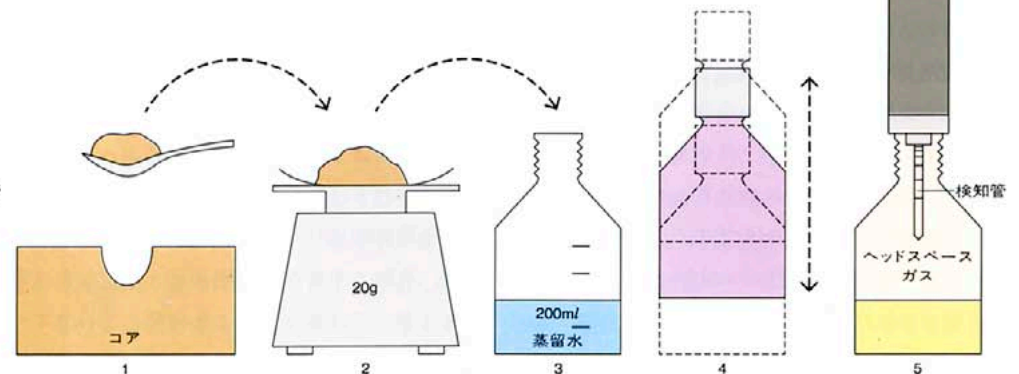
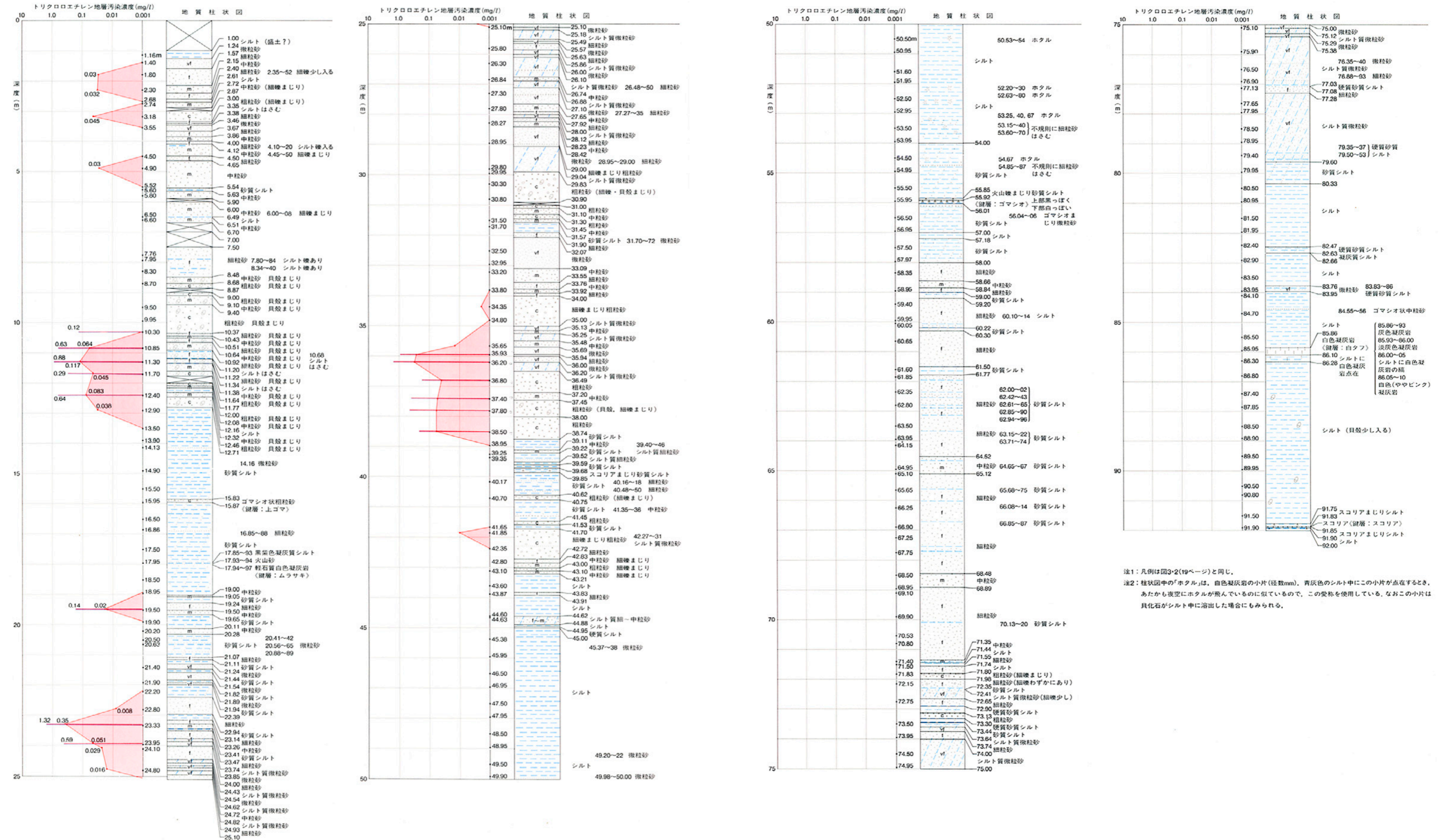




図3-3 - 地層汚染診断図(地質ボーリングNo.11) (地質ボーリング位置は図3-7参照)



グです。層相と電気検層の結果からみると、8.48～12.71mの砂層が第1番目の透水層、その下位にある12.71～19.00mの砂質シルトが第1番目の難透水層、19.00～43.21mが第2番目の透水層、43.21～58.00mのシルト層が第2番目の難透水層、その下位は58.00～72.90mに第3番目の透水層があり、さらにその下位には第3番目の難透水層があります。

そうしますと汚染地層が認められるのは、上位からいいますと、まず5.5mより上の部分にできます。ただ濃度は0.03～0.045mg/lの範囲です。

次に、第1番目の透水層の砂層中に汚染物質がでてきます。さらにその下位では、第2番目の透水層の地層中に汚染物質がでてきますが、ここではこの透水層の上部と下部とで認められます。最も深いところで汚染のでてくるのは、この透水層下部の41.85mの細礫まじりの粗粒砂の層準です。

つまり汚染源から僅か400mしか離れていない沖積低地の地下では、深さ40mにある地層が汚染されているということです。これらの地層汚染は、透水層中の地下水の流れにそって運ばれてきた汚染物質が地層粒子に付着したのですが、さらにこれらの汚染物質もまた、少しづつ地下水に溶け出していきますから、さらに遠方の地下水にも汚染が広がっていくこととなります。

汚染した最下位の透水層の下位には第2番目の難透水層、さらにその下位には汚染されていない第3番目のきれいな透水層があります。

このきれいな透水層に汚染の影響がでては大変ですから、この透水層までは常に監視することが必要です。それでこの深度までボーリングし、あとで観測井として利用します。

ただこの地点では、広域の地質構造を知るために、白色凝灰岩およびスコリアの層準にぶつかるまで掘りました。これらの火山灰は房総半島に広く分布し、地層対比の重要な鍵層になっているからです。それで92mという深さになったわけです。

以上の2つの地層汚染診断図を少し細かく見

ていただければ分かるように、だいたい薄いシルト層の上には、高濃度の汚染物質ののっていることが多いです。また薄いシルト層であれば連続性が悪いので、その周辺ですぐに途切れて、そこからまた下に落ちていきます。ですから、層相の特徴を知るとは汚染物質の移動経路を知るためにも非常に重要なことでもあるのです。

2つの地層汚染診断図は、台地上の汚染源と市街地の沖積低地というだいぶ離れた場所のものですが、その間をうめる地点やさらに遠方の地点などで地層汚染診断を行います。そしてこれらをつなぎあわせることにより、汚染物質がどのように移動し、どこまで広がっているのか、という立体的な地質汚染機構の様相が把握できるわけです。もちろん汚染物質の除去・浄化対策というのも、この機構解明にもとづいてはじめて的確に進めることができるのはいうまでもありません。このように、いま紹介した地層汚染診断図に示される地下の精査というのが、すべての土台になっているわけです。

《コア採取後30分以内の現場測定が原則》ところで、ガス検知管による汚染診断の大きな長所は、現場で次々にサンプルの汚染濃度を測定できることです。というのは、有機溶剤はすぐに気化しますから、コアをとってから15～30分以内に現場で測定しないと、正確な濃度が期待できないのです。この点は、品田さんからもお話ししていただいた方がよいかと思えます。

品田 さきほど鈴木さんの話にありましたように、一番初めは工場内のNo.4地点でテストボーリングをしたのですが、そのときのコアはすべて塩ビ管の中に入れて両端をシールし、そのまま楡井さんの研究室へ持っていきました。全部とってから持っていきますので1週間ほどかかりますが、その間、有機溶剤が逃げないように特製の冷蔵庫をつくり、それにコアを入れて保管するなど、ずいぶんと苦労いたしました。

ところが研究室で分析しますと、ほとんど入

っていないです。No.4地点は汚染されていることが事前に分かっているのですが、ほとんど入っていないわけです。結局、現場ですぐに測定するほかはない。コアをとってから30分以上かかったら正確な濃度が測れない。そういう結論になったわけです。

そうなりますと、ボーリング屋としては常識はずれなんですね(笑)。普通、ボーリングといいますが、現場で2人が3人で掘りますが、コアを鑑定する技術屋は1日に1～2回ほど行って、あるいは2～3日コアをためておいて層相を鑑定し記載すればよい。現場と技術との関連からすれば、そういうのがボーリング屋の常識なわけです。

ところが、この場合には30分が限度ですから、すぐにコアを鑑定し、そのコアからサンプルをとって物を分析しなければならない。近くに小さな実験室のようなものを構えて、さきほど鈴木さんがいわれた方法でどんどん測定していく。そうしますと、どうしても最低3人が必要で、3人の技術屋をこの現場におかなければならない。こういうことは、従来のボーリング調査では考えられない形だったんです。私の方の会社は、関東天然ガスというのが親会社なんです。それで親会社の方から応援を頼んで、何とか常時3人おくようにしたわけです。

またボーリングを始めて10数mぐらいまでの浅いところでは、コアをとるのが速いので4人でかからないと間に合わないんです。ともかく今までのような形では、物が逃げてしまっただけで証拠が何も残らなくなる。そのときにつかまないと駄目なんです。ですから、現場と技術でタイアップしながら、前もってきちんとした体制を組んで仕事を始めていく。そういう形をとりましたね。

《ポータブルガスクロマトグラフィー》鈴木 いまのお話のように、有機溶剤を扱うときは、現場で30分以内に測定するというのが鉄則になっています。それまでは、現場で測定するというような習慣は一切なくて、みんな実験室に持ちかえってガスクロマトグラ



フィーにかけていたわけですが、そうした従来の方法では有機溶剤はとて扱えません。そのため、さきほど述べたようなガス検知管による簡易測定法を開発したわけですが、その後、アメリカにはポータブルなガスクロマトグラフィーがあることを知りました。それで早速、販売店を通じてこれを取り寄せ、私どもが初めて現場で使ってみたわけです。そうしますと、この分析器には多くの長所があるので、いまではみんなが現場で使うようになりまして。

ガス検知管の場合には、トリクロロエチレン用の検知管を使うので、ほかの物質が入っていてもそれについては一切分かりません。それに対してガスクロマトグラフィーの場合には、ほかの物質やその濃度まででできます。これは、さきのヘッドスペースにガス検知管を入れるかわりに、このガスを1mlでも数100µlでもいいからとって、それをガスクロマトグラフィーに打ち込めばいい。そうしますと、一気に6つから7つぐらいの物質が同定され、それぞれの濃度まで分かる仕組みになっているわけです。

じつは環境庁の調査によって、地下水がテトラクロロエチレンやトリクロロエチレンに汚染されているところでは、同時にジクロロエチレンという化学物質によっても汚染されている傾向のあることが分かってきました。これに対しては、同時に複数の物質を測定できるポータブルガスクロマトグラフィーを用いないと調べることができません。それでいまでは、この分析器が使われているわけですが、この問題についてはあとで触れることにいたします。

#### 《サーモラベル(指温テープ)》

なお今回の地質ボーリングでは、仕事に取り掛かる前に心配していたことが2つほどありました。その1つは、オールコアボーリングというのは、鉄管を回転させながら地層を掘っていくので先端部の温度が上がるのではないかと、地層採取部であるボーリングの刃先の温度が上がれば、有機溶剤はどんどん気化し

て逃げていきますから、これを何とかチェックする方法がないか。その点を調査チームでは心配していたわけです。

そうしましたら原田さんの方から「サーモラベル(指温テープ)といって、温度に反応して発色し、色が変わるものがあるから、これをボーリングの刃先につけたらどうか」という提案があったわけです。それで、早速実際に試してみますと、温度が上がってないことが確かめられたわけです。これで1つの心配は解消しました。

《掘削時の循環泥水が運ぶ汚染とその対処》  
品田 いまの温度のほかに、今回のボーリングを始める前には、もう1つ疑問がありました。オールコアボーリングでは、循環水として泥水を使いながら掘り進め、地層コアを取っていくわけですが、この循環泥水が、地層コアに含まれる汚染物質を洗い流してしまわないか。そこまでいかなくとも、汚染物質の濃度をぐんと薄めてしまわないかどうか。その点を心配したのです。それで最初のテストボーリングのときに、いまの温度を調べると一緒に調べました。

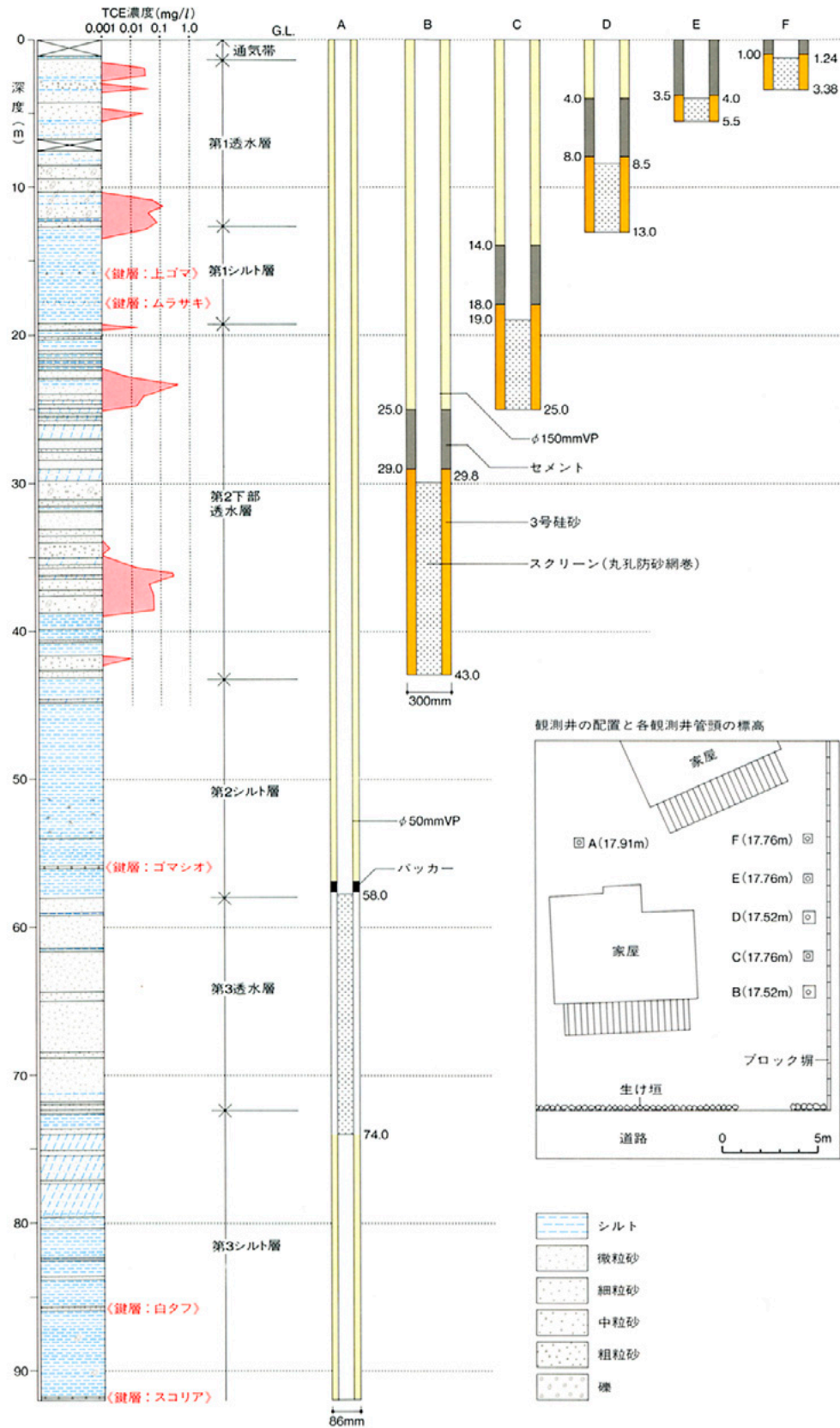
これは、地層コアをとると一緒にその傍らで標準貫入試験をやったのです。この方は、1m掘ってはストーンストーンとやりますが、それをしながら30cmの土を打ち抜いて持ってくる。そうしますと、その部分については泥水が回っていませんから、これを比較の材料にしたわけです。実際には、12mまで標準貫入試験をやりまして、循環泥水のコアと比較したのですが、両者にほとんど差異がみられなかったので、この心配は杞憂に終わりました。ただし、地層コアからサンプルをとる場合には、循環泥水がかかっていない真ん中の部分だけをとるようにしました。ですから循環泥水については、従来どおりのコア掘りで、サンプルのとり方をきちんとすれば問題がないことが分かったわけです。

ところが仕事を進めていくうちに、全く考えもしなかったところで問題がおきたんです。実は、最初のボーリングでは気がつかなかっ

たんですが、2番目のときに、厚いシルト層の下の本来なら汚染の出ないところに、僅かではあるんですが汚染が出ていました。さてこれは何だろうと考えているうちに、循環泥水を取りかえないでそのまま使っているために、循環泥水が汚染されてしまい、そのために下の方まで汚染を運んでしまったことに気がついたわけです。

それですぐに、5mとか10mおきにこれは、そのときのコアの中に入っている汚染物質の状況によって違いますが、循環泥水についても、トリクロロエチレンが入っているかどうかチェックする。2番目以降からはそういうやり方で進めました。ただ、このようにチェックしながらやりましても、非常に僅かなんですけど気付かない間に汚染を運んだことがありまして、あとで調査チームにおこられました(笑)。

図3・4 - 地層汚染診断と観測井の設置例(ボーリングNo.11地点) (地質ボーリング位置は図3・7参照)



## [2]地下水汚染とモニタリング

《透水層と地質汚染に応じて観測井を設置》  
鈴木 地層中から地下水に溶け出した汚染物質は、地下水の流れにしたがって透水層中を移動していきます。透水層を調べるには、地層コアの層相をよく観察するとともに、ボーリング孔を利用して電気検層をおこない、地層の電気抵抗も調べます。こうして透水層を確定します。

一方では、地下水位を観測し、他の地点のそれと対比しながら地下水の流れを確かめ、同時に地下水の汚染状態を経時的に調べ監視します。この重要なモニタリングの役割を果たすのが、多くの地質ボーリング地点に設置される地下水汚染観測井群です。

図3・4は、さきの地層汚染診断図で紹介したNo.11地点で、どのように観測井を設置したかを示したものです。図に見るように、さきに述べた第1番目の透水層が第1透水層にあたり、これは自由地下水です。その上は通気帯になります。以下、第1透水層下位の難透水層が第1シルト層、その下位の第2番目の透水層が第2下部透水層、その下位の難透水層が第2シルト層、その下位の第3番目の透水層が第3透水層、その下位の難透水層が第3シルト層になります。

地質柱状図右側のアカ色の部分が地質汚染の濃度で、これはさきの図でもみたように、通気帯・第1透水層・第2下部透水層上部・第2下部透水層下部が汚染されています。柱状図右側の、上ゴマ、ムラサキ、ゴマシオなどは鍵層の火山灰層です。

図のAからFが、地下水位・水質を継続的にモニタリングする観測井です。これらは、地下水の流れと地下水汚染の状態を調べるわけですから、当然各透水層ごとに設置します。図の例では、まず最下位の汚染されていないきれいな第3透水層に対しては、汚染の影響がこの透水層に及ばないように監視する必要がありますから、ここには第3透水層にスクリーンをセットしたA観測井をつくります。

次に第2下部透水層では、地層汚染が下部と

上部にありますから、下部の汚染に対してはB観測井を、上部の汚染に対してはC観測井を設置し、それぞれの汚染に対応した部分にスクリーンを設けます。同様に、第1透水層に対しても汚染した地層に対応して、D観測井、E観測井、F観測井を設置します。

このようにNo.11地点では、透水層と地層汚染の状況から6つの観測井を設置したわけですから、1カ所のボーリングに対する観測井は、最低でも監視の必要な透水層の枚数だけは必要ですが、さらに地層汚染の状況に応じて観測井の数も増えていきます。

なお、各観測井から水質分析用の地下水を採水する場合には、汚染地下水がスクリーンの1部の層準だけを通過している場合もあるので、少なくともスクリーンの下部・中部・上部から、さらにスクリーンが長い場合には、それらの中間部からも採水します。水質分析は、もちろん採水直後に行うのが原則で、現在では、ヘッドスペース法による検知管とガスクロを併用しています。

いまの段階で内箕輪地区では、浄化対策用まで含めるとボーリング地点の総数は34カ所、観測井は全部で77本設置されています。これらの観測井群によってモニタリングされた第1透水層および第2透水層の地下水汚染の経年変化は、図4・17に示してあります。

また図3・4には、AからFまでの観測井のパイプ径が記してあります。A観測井のパイプ径は50mmですが、B観測井のパイプ径は150mmと太く、他のものもほぼ同じ太さです。これは、あとで汚染を汲み上げるために太くして

あるわけですが、調査だから径が小さくてもよいと考えていると、後で浄化用のものを再びつくらなければなりませんから、調査過程から浄化対策も考えて計画をたてるようにしているわけです。

#### 《慎重を要する井戸底近くの掘削》

観測井は、透水層や地層汚染の状態にもとづいて、それぞれ独立した形で作るわけですから、ある観測井を掘削するとき、それ以外の透水層中の地下水に影響を与えては具合が悪いわけです。ですから、目標とする井戸深度近くになったら慎重に掘り進めます。下位の難透水層が非常に薄い場合には、これをつきぬかないようにするのが肝心で、ここを掘り進んで下位の透水層に汚染を広げてしまう場合もありうるので、特に慎重な作業が要求されます。

#### 《遮水の問題》

佐藤 それともう1つ、観測井をつくる場合には、遮水には特に注意する必要があります。下位の透水層の観測井をつくる時には、上位の透水層を切ってその下につくります。そのさい、下位の透水層から上の部分では、管壁と地層との間にどうしても隙間ができていくわけで、そこを通過して汚染物質が下に落ちていきます。そのために、ここの水どめの問題には非常に苦労して、新しい遮水材料なども開発しました。図のAからBまでの観測井には、各スクリーンの上に、それぞれの観測井の位置に応じて施された遮水措置を示してあります。

### [3]地下空気汚染と君津式表層汚染調査法

#### 《君津式表層汚染調査法》

鈴木 最初の楡井さんの話にありましたように、汚染した地層や汚染した地下水の中の汚染物質は通気帯で気化し、地下空気が汚染されます。その地下空気中の汚染物質は、大気中に出ようとしているのですが、いつも大気のプレッシャーを受けていて、プレッシャーが大きいかかっていたら僅かしか出ないし、少なれば余計出るわけです。

地下空気汚染物質のうち、地表面近くのごく表層の汚染物質を調べる方法として、私どものチームが新しく開発したのが「君津式表層汚染調査法」です。これは、まず地表面にボーリングパー(商品名)で、径が約1cm、深さ85cmの孔をあけます。そのポリウムはだいたい100mlになりますが、その孔の中に、アダプターに接続した検知管を孔の底までおろし、孔内のガス濃度を検知管式ガス測定器で測定するというものです(写真3・3参照)。

この調査手法は、地表面付近の汚染した地下空気を対象にするのですが、汚染物質の濃度分布を精しく調べることができ、汚染物質の地下浸透箇所などが明らかになります。また汚染地下水の移動経路なども分かってきます。1点の測定に要する時間は、わずかに3分程度。安価で簡便、精度や再現性に優れるので、これも各地に普及しました。

この調査手法は、最初は地表にある亀裂や隙間の中に検知管を入れ、地下から上ってくる汚染した地下空気の濃度を測ることから始めたのです。ただ亀裂や隙間は濃度を知りたい

写真3・3 君津式表層汚染調査法の手順

- ①ボーリングパーで深さ0.85mの調査孔を開ける。
- ②検知管を孔底まで降ろす。
- ③ガス採取器で孔内の地下空気を検知管に導入する。
- ④検知管のガラス管表面に印してある目盛りでトリクロロエチレンの濃度を読み取る。

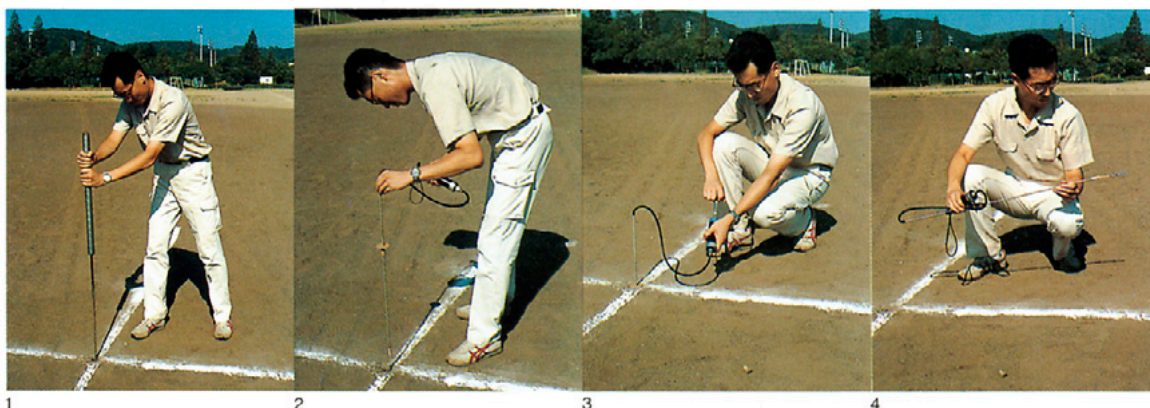


図3・5 - 工場敷地内の地下空気汚染ブリューム（君津式表層汚染調査法による）

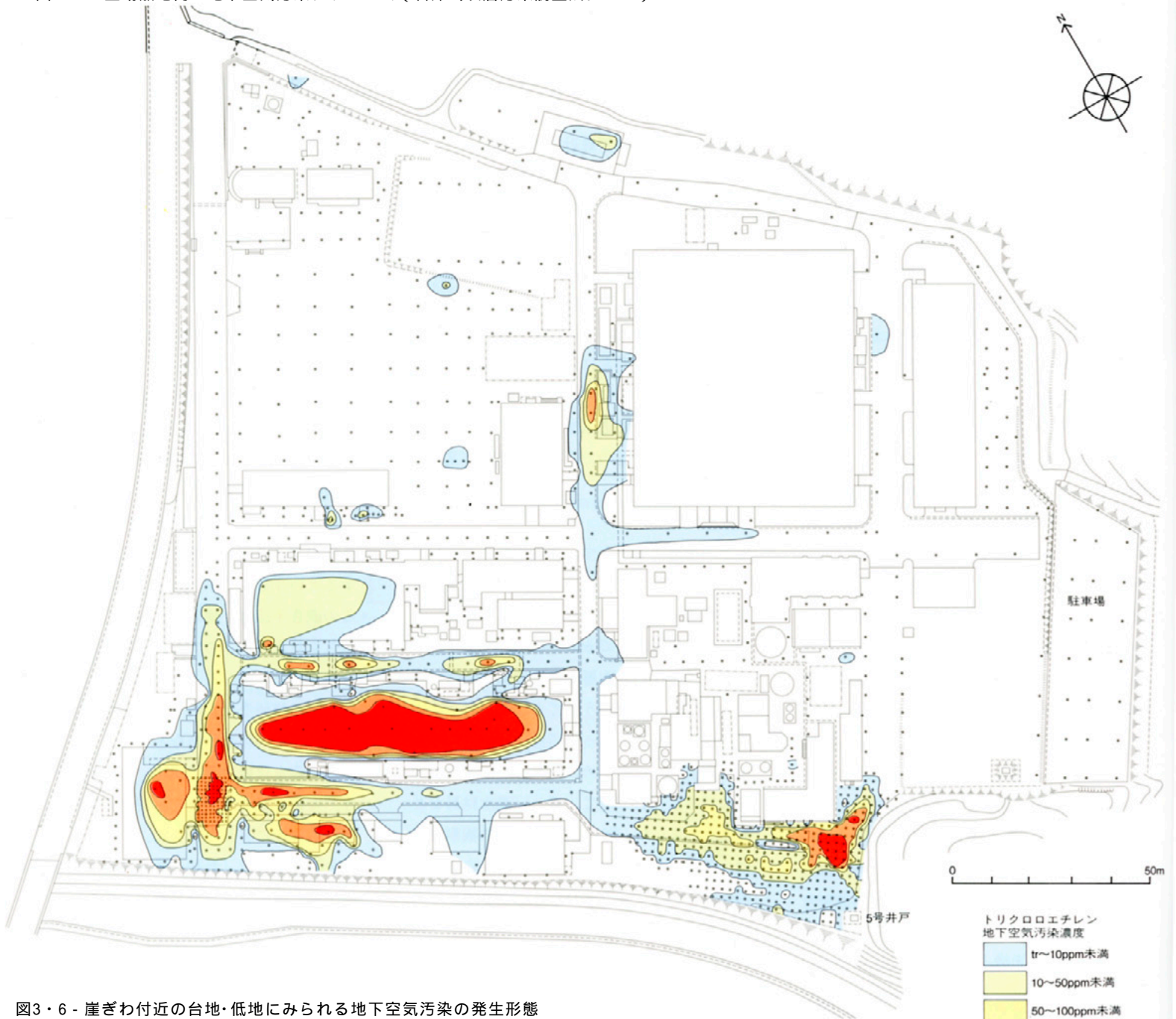
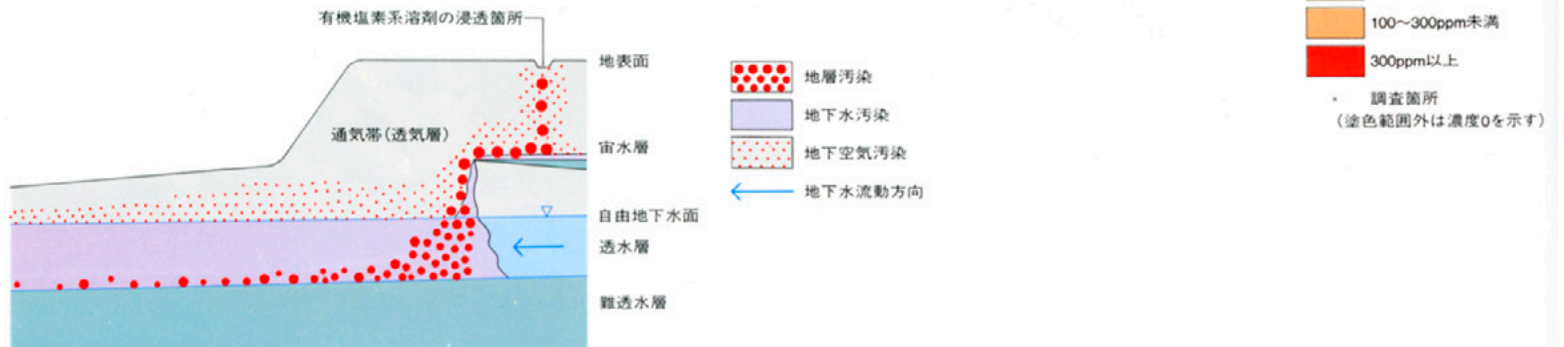


図3・6 - 崖ぎわ付近の台地・低地にみられる地下空気汚染の発生形態



場所にあるわけではありませんから、測定は容易ではなかったのです。そうしたところへ関東建設の村田さんが、ボーリングバーを提供してくれました。

品田 私どもの会社ではメタンガスを扱っています。配管漏れがあるとボーリングバーで孔を掘り、メタン計で孔の中のメタンの濃度を測りますが、漏れた箇所にくると濃度がぐんと上がります。少し離れていると濃度が薄いわけで、だんだん追い込んでいってジャストポイントを探します。この検査方法は有機溶剤の場合と同じなんです。

#### 《地下空気汚染の発生形態》

鈴木 図3・6は、崖端付近の台地上に汚染源があった場合、通気帯では、地層汚染や地下水汚染に伴って、地下空気汚染がどのような形態で発生しているかをみた概念図です。

まず汚染源からは、重非水液(原液)がほぼ垂直に落ちてきて、浅い宙水にひっかかり、そこを横に移動していきます。宙水が切れたところで、また下に落ちていき、下の透水層に溜まりますが、その一部は透水層のなかをぼるぼると動いていく。地下水に溶解した汚染物質は、地下水の流れにそって、透水層のなかに広がっていきます。

こうした場合、地下空気汚染は図に示すように、通気帯の重非水液の流れにそった部分と、地下水面の直上付近にてできます。ですから崖ぎわの台地の通気帯の厚いところでは、地下水面は深いので地表付近にはできませんが、低地に入って地下水面が非常に浅い位置になると、地表面近くにも出てくることになります。もちろん、台地上の汚染源の付近でも、地層汚染によって地表面近くに高濃度に汚染した地下空気ができます。

#### 《表層汚染調査による汚染源の確定》

図3・5は、汚染源である半導体工場の表層汚染図です。この工場は縦横200mほどの広さですが、まず4~8m程度の粗いメッシュをかけて測定し、測定値がゼロでないところは間隔を0.5~2m程度まで次第に絞り込んでいくというやり方で、約2,000地点ほどを測定しま

した。地表面がアスファルトその他で覆われている場合には、ドリルやコアカッターで孔をあけてから測定します。もちろん建屋の中も測定しています。

そうしますと、いろんな場所で300ppm以上といたきわめて高い濃度を示すアカ色の部分ができました。このようなところをホットスポットといっておりますが、これがまさしく汚染源で、工場敷地内にはこれが7ヵ所あり、汚染物質はこの箇所から地下に浸透していたことが分かるわけです。

ホットスポットのうち面積の一番大きいのは、この溶剤を使っていた工場の中です。ここでは、作業の過程で僅かづつ溶剤が床に落ちこぼれることがあったのでしょう。それが、厚さ約30cmほどのコンクリートの床を突き抜けて、地下に浸透してしまったのです。

ホットスポットのうち最大の汚染は、図の右端下の水井戸5号付近のもので、ここでは、地面の下の以前の廃棄物捨場に廃液が捨てられていました。それ以外では、トリクロロエチレン・タンクへ給油するときに液が漏れたりこぼれたりした箇所や、廃液の移し替えや運搬のときに漏れたりこぼれたりした箇所、それに、作業衣などの洗濯に使われたトリクロロエチレンが捨てられた場所です。これら汚染物質の除去・浄化については、また後ほどお話しします。

なお、これらの汚染源の原因行為と履歴を知り、その実態を正しくつかむことは、ガン細胞の再発や転移が起こらないためにも非常に重要です。履歴を知るには、航空測量の会社が撮影した空中写真がありますから、それにより、例えばこの場所には何年から何年まで小さな池があったとかいう、その工場の土地利用を調べます。こうしてホットスポットの場所での履歴と原因行為を把握する。そうした作業も欠かすことができません。

#### [4]内箕輪の地質汚染機構

##### 《地質構造》

以上のような調査から、内箕輪地区の地質汚染機構が明らかになります。図3・7は内箕輪地区で行われたボーリング地点を示したもので、浄化対策のために調査したのものも含まれます。図3・8Aはボーリング地点No.2からNo.11にかけての地質汚染断面図、図3・8BはNo.12からNo.14までの地質汚染断面図で、それぞれの断面線は図3・7に示しました。

図3・8Aは、汚染源の工場から市街地にかけての、ほぼ南南東-北北西方向の断面です。工場のある台地は、一番上には厚さ2~3mほどのローム層のり、その下に厚い砂層があるのですが、この砂層中にはシルトの薄層が多く挟まれ、何枚かの宙水層が認められます。砂層下部は第1透水層となり、自由地下水面は地表から約11mの深さにあります。

砂層の下位は、難透水層の第1シルト層になるのですが、このシルト層は非常に特殊な形で発達しています。第1シルト層は、No.9付近では約15mの厚さを保っていますが、その少し北では上部層と下部層に分かれてしまわず。上方の第1シルト上部層はNo.37あたりで急激に薄くなり、さらにこの薄いシルト層は北方に延びてNo.12の南あたりまでとぎれとぎれに続きます。

他方、第1シルト下部層は比較的厚いまま北に延びていきますが、No.12あたりから北にむかって上昇傾向に転じ、この部分を底とした船底型構造の断面形態を示します。この両者、すなわち第1シルト上部層と第1シルト下部層に挟まれるのが、第2上部透水層です。図3・8Bは第1シルト層および第2上部透水層の構造をより詳しく知るために、No.12から西方の部分を調べた断面です。この図に見るように、西方では、第1シルト上部層は地表に露出するほど上昇し、また第2上部透水層・第1シルト下部層も地表近くにまで上昇しています。これらは一様に東側に傾いていて、一番低いところはNo.33あたりにあります。こうした構造が、第1透水層および第2上部透水

図3-7 - 内箕輪地区汚染現場の地層汚染診断地点と水井戸分布

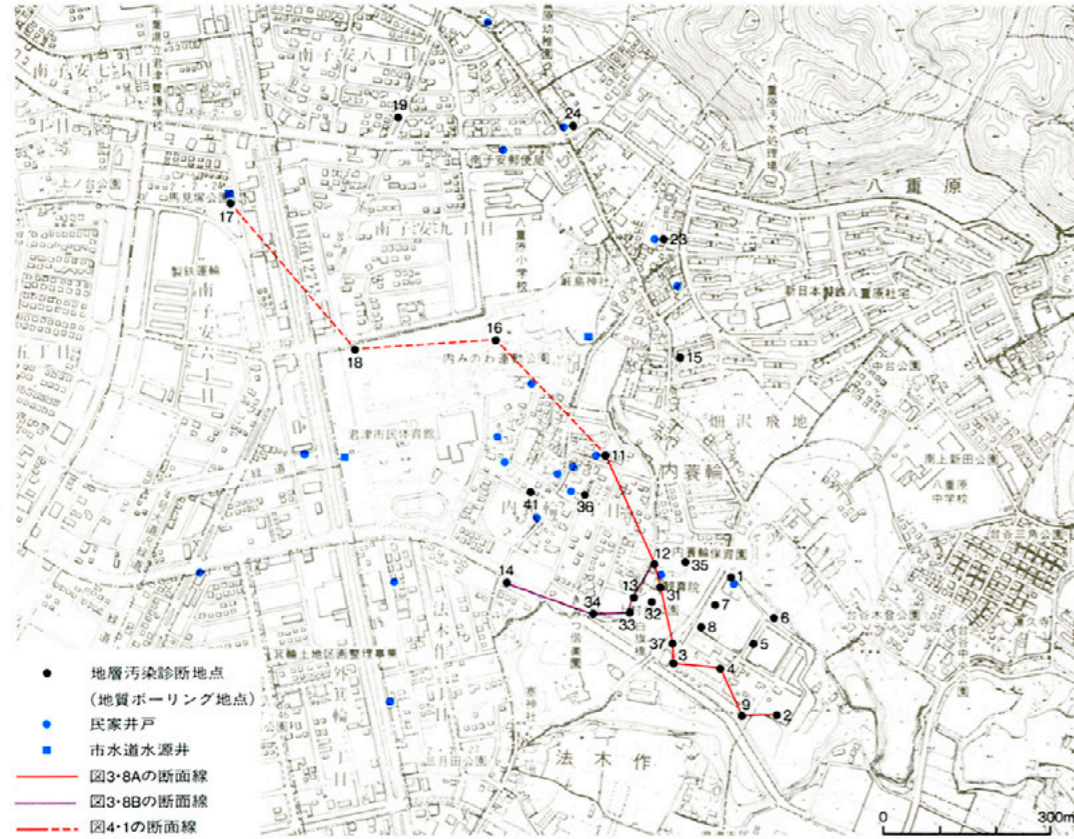


図3-8A - 地質汚染断面図(No.2 ~ No.11間) 断面線は図3-7参照

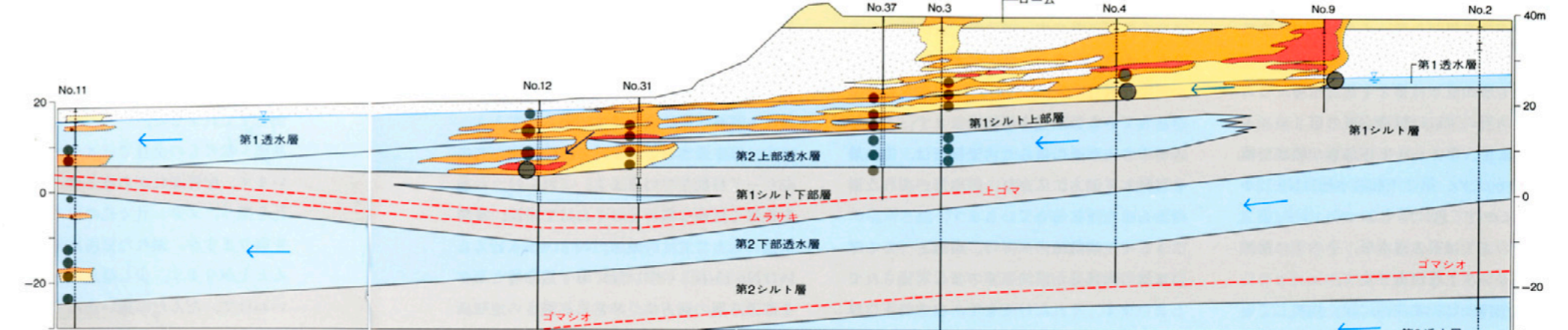


図3-8B - 地質汚染断面図(No.12 ~ No.14間)

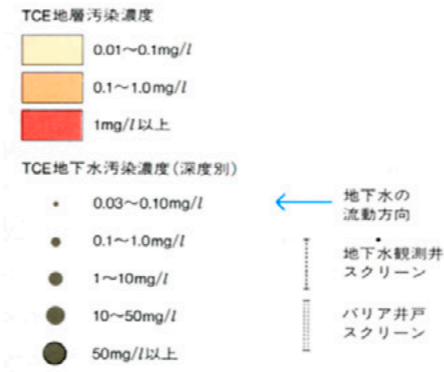
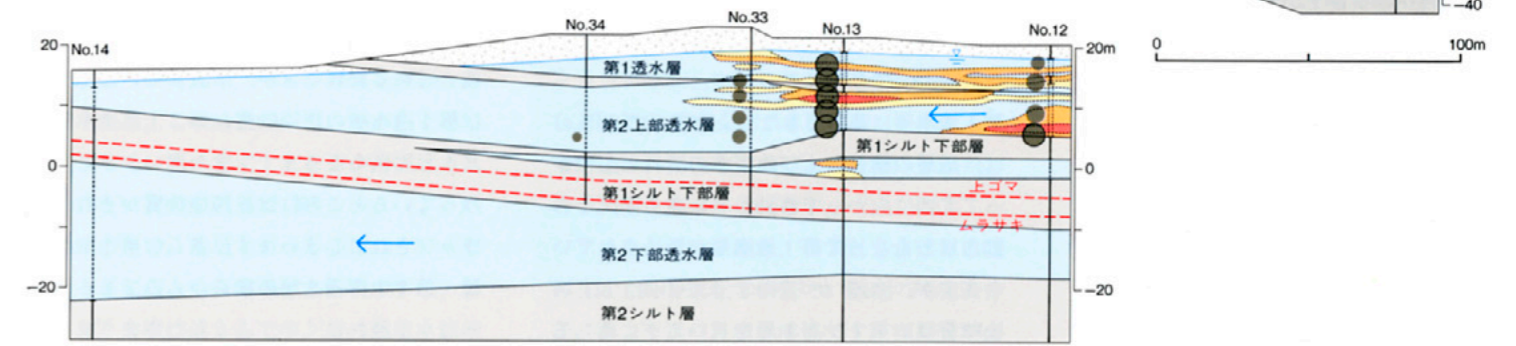


図3-9A - 第1透水層地層汚染ブリューム(1990)

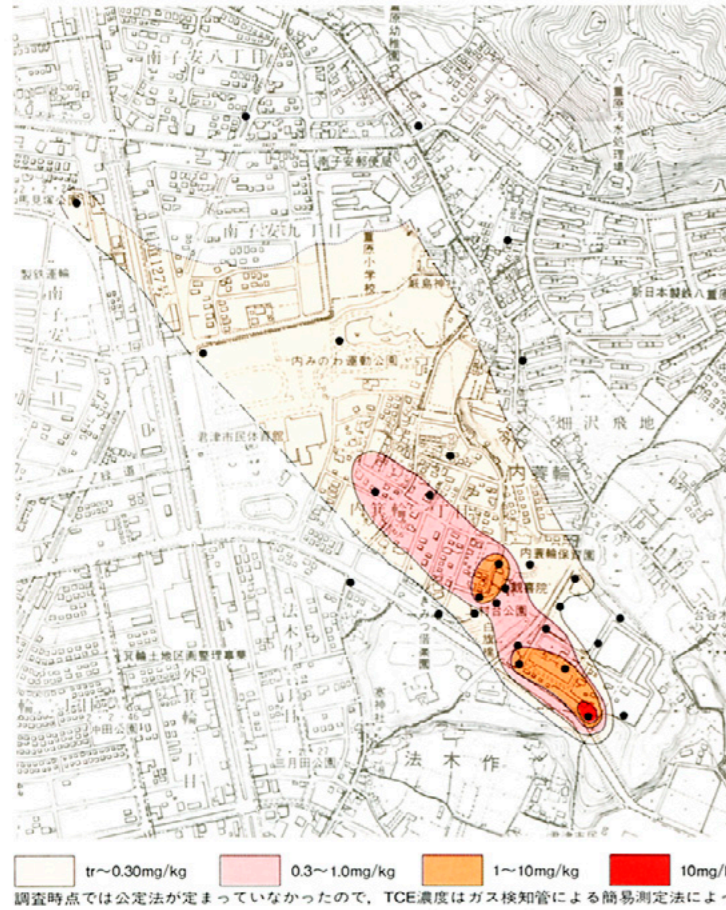


図3-9B - 第2透水層地層汚染ブリューム(1990)

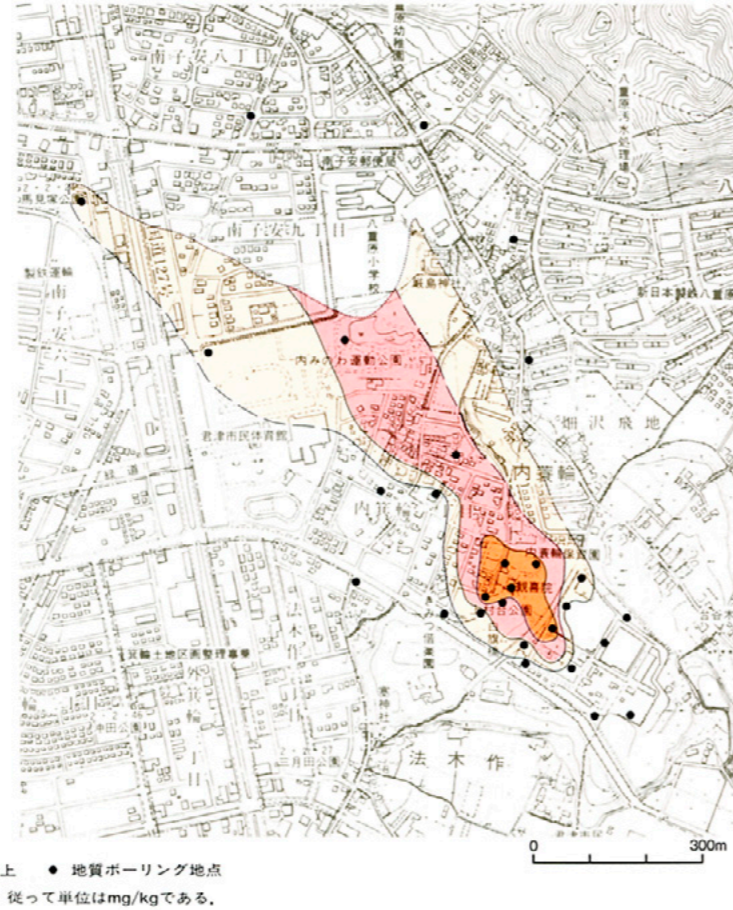


図3-10A - 第1透水層地下水汚染ブリューム(1990)

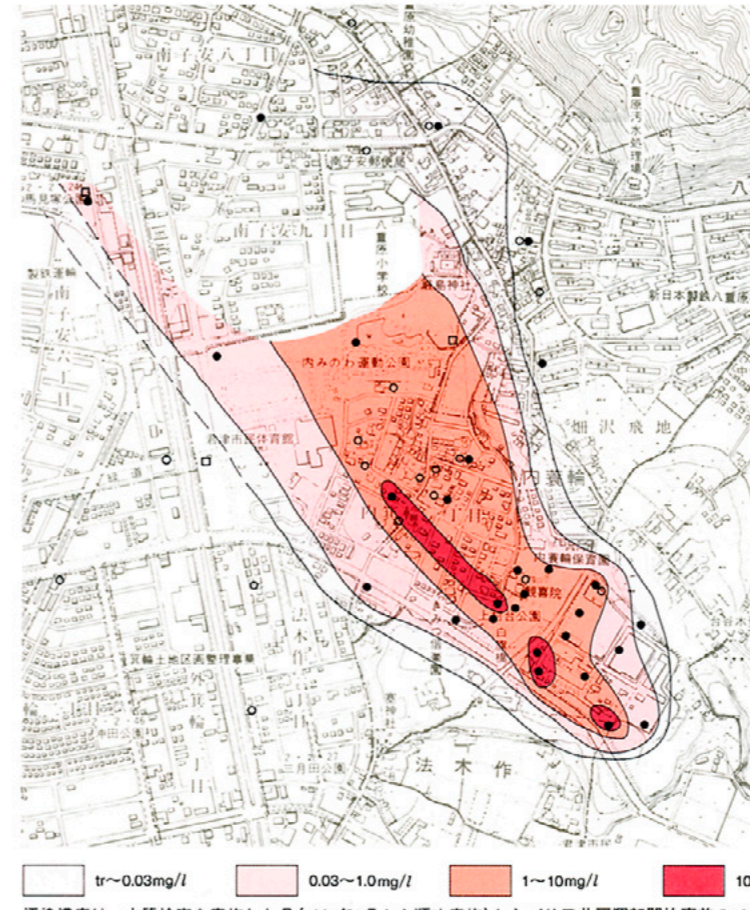
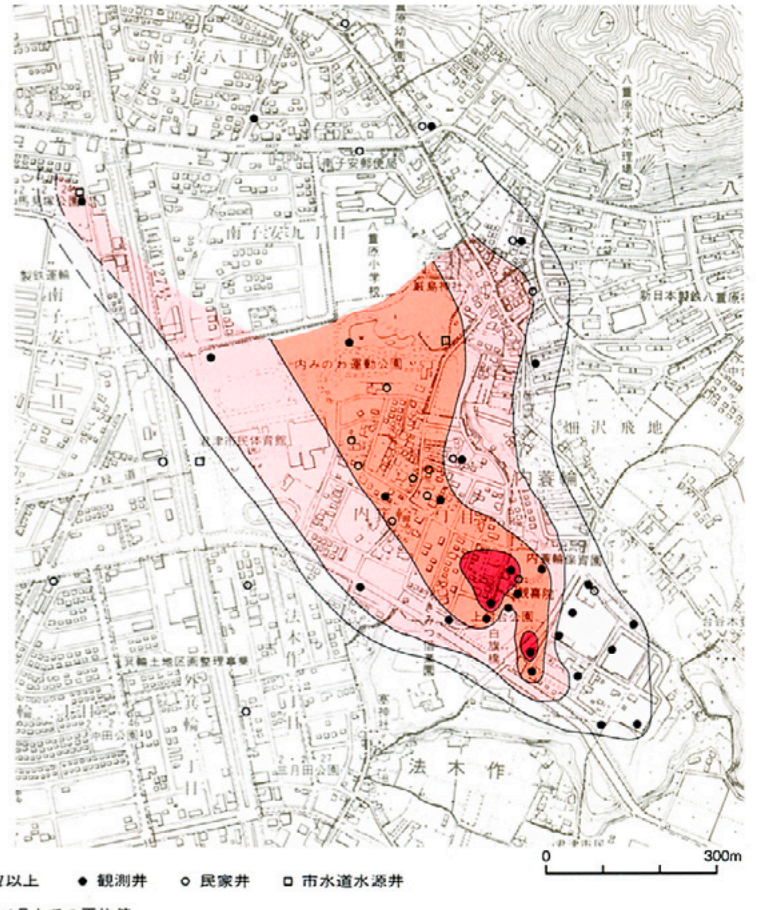


図3-10B - 第2透水層地下水汚染ブリューム(1990)



調査時点では公定法が定まっていなかったため、TCE濃度はガス検知管による簡易測定法によるため、単位はmg/kgである。

汚染濃度は、水質検査を実施した月(1987年3月から順次実施)からバリア井戸運転開始直前の1990年12月までの平均値



## 《内箕輪の地下地質構造の特異性》

品田 じつは、いまの第1シルト層なんですが、私の方で最初に描いた断面図は間違っていたんです。図3・12が最初の断面図、いまの断面図は図3・11で、これは表現の仕方が違うだけで図3・8Aと同じです。

最初の断面では、下の方の第2シルト層や第3シルト層の中の火山灰の対比はよかったです。第1シルト層にでてくる火山灰の対比がどうもはっきりしなかった。最初のときは、まだボーリングの本数も少なかった中で判断しているわけですが、上の方で顔を出したり出さなかったりする、僅かな軽石の細かい層があったんです。それが非常に微妙なものですから、これは当てにならぬわいと思って無視していたんです。ところが、実はそれがまことに有力な鍵層で(笑)……。

初め頭の中で、地層というものはこういう形になるもんだという意識があるんですね。ところが、実際は違うんです。その後すぐに崖端周辺を精査するために、第1シルト層に向けてNo.37やNo.31地点で地質ボーリングを行いました。そうしますと、No.37地点では第1シルト上部層がほとんど切れていて、そこから水がどんどん下に漏れている。上下の砂層の層厚変化で顔を出したり出さなかったりする火山灰をもう1度よくチェックしてみると、図3・11のようにつながらることが確かめられました。それで、第1シルト下部層の断面形態は船底型にならざるを得ない。

君津市の方から怒られましてね。最初の図面はもう議会で報告してしまった。それを何でも別の図面を描くのか、何とかならぬかというわけですが、これは何ともなるわけじゃない、実はこういうわけだとよく話しましたけれど(笑)。ですから、本当に地層をよく見ているんな仮説をたてながら、また可能性を追求して、地下の構造を対比していくことが非常に重要なことなんです。

編集 ここは、難しい場所なんですね。

楡井 難しいですよ。ここは技術的にも、地質的にもとにかく一番難しい。だいたい君津

のこの場所は、地質的には、関東海盆が隆起する過程で、大陸棚から古東京湾へと大きく環境が変わってきたところです。層相の変化は激しいし、地質構造も単純ではなく非常に複雑なんです。ですから今の間違ひなんて、むしろあって当然の話なんです。日本のほかの場所と比べても、ここが一番難しいと思いますよ。この難しい場所を解決しているんだから、日本各地の現場では、技術的にできないことはないんです。

## [5]有機塩素化合物による複合地質汚染

### 《ジクロロエチレン(DCE)の3異性体》

鈴木 さきに、テトラクロロエチレンやトリクロロエチレンによって地下水が汚染されているところでは、ジクロロエチレンによっても汚染されている傾向があると言いました。この問題を簡単に述べます。

ジクロロエチレン類は、いずれも自然界には存在しない合成化学物質で、無色の常温液体で、水より重く、難水溶性です。揮発性が高いので気化しやすく、大気中では短時間で化学分解されますが、水中では比較的安定しています。

ジクロロエチレン(DCE)は、塩素の結合位置の違いにより3つの異性体があります。

1.1-ジクロロエチレン(1,1-DCE)。

トランス-ジクロロエチレン(trans-1,2-DCE)。

シス-ジクロロエチレン(cis-1,2-DCE)。

というのがそれです。以下、2番目はトランス体、3番目はシス体と略して話します。

これらの3物質はいずれも有害物質で、とくに1.1-ジクロロエチレンは、WHOのガイドラインでは0.3µg/lとなっており、これはトリクロロエチレンよりもはるかに発ガンリスクが高いということです。

《ジクロロエチレン類の生産・使用・輸入》では、有害物質と指定されているジクロロエチレン類が、どこで生産され、どのように使用されているかを調べてみますと、まず1.1-ジクロロエチレンは、日本では1987年に約4万トン製造・輸入されています。これは、ラップ類の原料として使われています。

ただ、1.1-ジクロロエチレンについては次のような事情があるのです。日本では、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンに代わる溶剤として、過去の数年間に1.1.1-トリクロロエタン(TCA)を使ってきた経緯があります。ところが、無害であるとして使ってきた1.1.1-トリクロロエタンが、じつは微生物の関与だけでなく、非生物分解によっても1.1-ジクロロエチレンに変わることが分かってきました。現在では、日本の半導体産業では1.1.1-トリクロロエタンを使っていません。ただクリーニング店や小さな工場では、依然としてこれが使用されています。そういう深刻な事態が現実の問題としてあります。

それに対して、トランス体とシス体のジクロロエチレンについては、何を調べても情報がありません。通産省に聞いても分からないし、大学の先生にもいろいろ聞いてみたのですが「ないなあ」という答えでした。つまり、平たく言えば、試薬を除けば製造も輸入もしていないということなんです。

### 《日本の井戸の3割からシス体を検出》

ところが、この製造も輸入もしていないシス体やトランス体のジクロロエチレンが、日本の地下水にはたくさん含まれているのです。表3・1は、1988年(昭和63年)に環境庁が地下水汚染の実態を調査したものです。この表に見るように359本の井戸のうち、シス体は112本の井戸から、トランス体は45本の井戸から、1.1-ジクロロエチレンは57本の井戸から発見されています。

### 《ジクロロエチレン類への変態》

では、日本で製造も輸入もしていない物質がどうして日本ではたくさんの井戸に現れるのか。これは、「主として嫌氣的条件下では、生物分解あるいは非生物分解によって、脱ハロゲン化(塩素が落ちていく)がおこり、テトラクロロエチレン トリクロロエチレン ジクロロエチレン 塩化ビニルモノマーというプロセスがある」からです(第1章参照)。

日本各地の多くの井戸からジクロロエチレン類が多く出てくるのは、この変態効果による



ものとみなせません。

### 《変態による新しい地質汚染》

それで私は、現実の地質環境の中では、その実態がどうであるかを知りたいと思い、汚染源から約1 Km離れた沖積低地で地質ボーリングをおこない、これらの物質が地層中にどのように含まれているかを調べてみました。調査地点は図2・7のNo.18と同じ場所です。調査方法は、ボーリングで得られた試料をガス検知管による簡易測定法でトリクロロエチレンの濃度を分析し、同時にポータブルガスクロマトグラフィーで、1,1-ジクロロエチレン、トランス体、シス体、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンおよび四塩化炭素の6物質を分析しました。

図5(第1章7ページ)がその結果です。まず一番上の埋立層ではトランス体が検出されました。ここは、湿地干拓による湿地化をへて造成された埋立層です。

その下位の沖積層(完新統)からもトランス体が検出されました。この地層は、汽水域の内湾から陸上湿地へと変遷するなかで堆積したもので、上部には植物片を含む還元性の粘土が挟まれます。

その下位の第1透水層からは、トリクロロエチレンとシス体の2物質が複合した状態で検出されました。この地層は中粒砂～粗粒砂が主体で酸化的雰囲気にあります。

その下位の第2透水層からは、トランス体が検出され、下部の一部に1,1-ジクロロエチレンが検出されました。

以上のように、この沖積低地の地層中には、

トリクロロエチレンだけでなく、シス体とトランス体、さらには1,1-ジクロロエチレンまでが含まれています。この事実から、地下水の多くに含まれているジクロロエチレン類が、テトラクロロエチレンあるいはトリクロロエチレンに由来し、それが変態したものであることが分かります。

言い換えると、いま日本の地下では、この君津で見られたようなトリクロロエチレンからの変態や、または1,1,1-トリクロロエタンからの変態による汚染物質によって、新しい地質汚染が生じ、広がっているということです。ですから、有機塩素化合物による地質汚染というのは、テトラクロロエチレンやトリクロロエチレン、あるいは1,1,1-トリクロロエタンなどに限定できないわけで、変態した物質による汚染までを視野に入れないと、汚染の実態を正しく把握できないのです。

もっと平たく言えば、母親にあたるトリクロロエチレンなどの有害な物質から、ジクロロエチレン類などの有害な子供たちが、次々に、またあちこちに生まれだし、この家系によって地質環境における有害性が一層高められ、広げられているということです。

さきに楡井さんの話にありましたように、有機溶剤による汚染は、過去に地下に浸透した汚染物質がもとになって、地下に汚染源が広がっていくわけで非常に深刻な様相を呈します。ところが、それだけにとどまらず、この汚染はさらに、変態効果によって地質環境中で汚染物質の種類を増やし、複合地質汚染を形成しながら汚染を拡大し、地下水資源を破

壊していきます。

このような汚染は、それを放置すればするほど、それに対処する費用も増えていきます。汚染の発見された地域では、できるだけ早く汚染機構解明調査を行い、浄化することが急務と思います。

### 浄化対策

#### [1]浄化対策の全体像

鈴木 さきのように地質汚染機構が明らかになりましたので、次にはこの機構解明に基づいて汚染現場をクリーンナップするための仕事にかかります。ただこの現場では、汚染源の工場敷地内には非常に多くの汚染物質が地下に存在していますし、また汚染の影響も市街地にまで大きく広がっています。

一方、地表には工場や道路など多くの施設があって、掘削できる土地も限られているなど、さまざまな制約があります。そうした条件の中で、できるだけ速やかに、また将来に禍根を残さないような完全な形で浄化目標を達成しなければならないわけで、この仕事もなかなか容易なものではありません。

浄化対策の全体像は、図4・1のようになります。この図は、さきに見た図3・8Aと同じ断面をさらに一番北のNo.17まで延ばしたもので、図には、全体の汚染機構の中で、どの箇所どのような浄化技術を用いたかを示してあり

ます。図4・1によって、全体的な浄化対策の概略をごく大ざっぱに見てみますと、まずNo.9の廃棄物捨場を中心とした箇所では、汚染物質が集積している地層そのものを掘削除去し、これを無害化処理します。同時にその場所には集水ますを設置して、第1透水層の汚染地下水を汲み上げます。また掘削作業を行う前には、掘削する地層の周囲に第1透水層の基底まで鋼矢板を打ち込み、汚染物質が移動・拡散しないよう処置します。

ただ地層を掘削除去できる範囲というのは限られていますから、工場敷地の地下にはまだ多くの汚染物質が残っています。これを対象にした浄化技術がNo.3のところに記してある地下空気汚染吸引法です。この技術も今回新しく開発したもので、簡単にいうと、通気帯に空井戸をつくり、通気帯に気化してくる汚染物質を、どんどん吸い上げてしまうというものです。

以上は工場敷地内での対策ですが、もちろんこれだけでは汚染物質を除去することは出来ませんから、残りの汚染物質は、第1透水層

・第2透水層を通して工場の外に流れ出ていきます。工場のすぐ西側からNo.12にかけて「バリア井戸により汚染地下水を揚水排出」とあるのは、これらの汚染地下水はもちろんNo.12周辺の高濃度の汚染地下水をバリア井戸によって揚水排出し、汚染水が市街地に向かって移動・拡散しないように防いだものです。このシステムも今回新しく開発しました。こうして、汚染地下水の市街地への移動・拡散を防ぎますが、すでに市街地に移動している汚染地下水があります。この汚染水は、まずNo.16地点の近くにある内みのわ運動公園内で揚水排出し、浄化したあと再利用します。さらに汚染域の末端部にあたる一番北のNo.17の地点でも揚水排出し、これより下流側への汚染物質の拡散を防ぎます。以上が、内箕輪地区の汚染現場を浄化するための全体的な戦略ということになります。以下、個々の浄化技術についてお話しします。

図4・1 - 内箕輪地質汚染現場における浄化対策の全体像

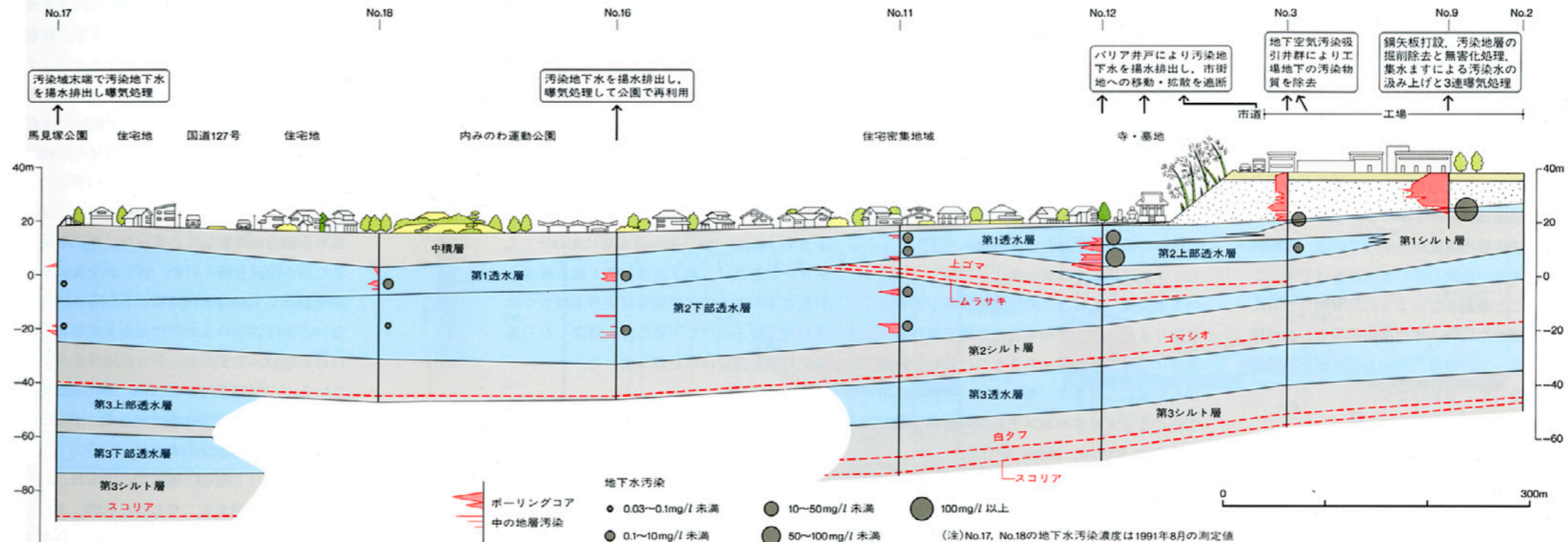


表3・1 - 昭和63年度地下水汚染実態調査結果

(平成2年版環境白書各論編より)

物質名	調査井戸数	検出井戸数 (検出率)	WHOガイド ライン超過数 (超過率)	EPA基準 超過数 (超過率)	WHO ガイドライン (mg/l)	EPA 基準 (mg/l)
1,1-ジクロロエチレン	359	57 (15.9%)	38 (10.6%)	9 (2.5%)	0.0003	0.007
シス-1,2-ジクロロエチレン	359	112 (31.2%)	—	—	—	0.07
トランス-1,2-ジクロロエチレン	359	45 (12.5%)	—	—	—	0.1

## [2]汚染地層の掘削除去とその関連技術

### 《事前の調査》

さきにお話しましたように、工場敷地内のホットスポットの中で最も大きなものは廃棄物捨場のところですが、ですから、この部分の地層を掘削除去するわけですが、それには、汚染地層の地下での広がり方を見極めないことには手を付けられません。

それで、この区域の地層汚染の実態を知るために、第1シルト層までのオールコアボーリングを行いました。図4・2Aは、さきの工場敷地内の地下空気汚染ブリューム図の部分図で、500ppm以上という高濃度の汚染範囲を新たに描き出したものです。この図の9Aから9Hまでの8カ所で新たにボーリングを行ったわけです。図4・2Bがこの精査の結果の一部で、この地層汚染診断から分かるように、地表面下約15mにある第1透水層基底までは掘削することが必要です。

ただこの場合、汚染は第1シルト層の直上で止まっていますから、絶対にこの層を切つてはならないわけです。ここではシルト層が比較的厚いのでそうした心配はないのですが、じつは国内で公表されている掘削例が幾つかあるんですが、それを見ますと、例えば上位の透水層と汚染していない下位の透水層の間にある薄い粘土層も切ってしまう。そういう切つてはならない部分を切っている例が多いんです。

ですから掘削後の経過をみますと、上位の透水層の濃度はずっと下がっているんですが、下位の透水層の濃度が上がっている。掘削に伴って汚染が拡散してしまったわけです。こうしたことが起きないように、事前にきちんとした精査を行い、また掘削作業も一般の作業とは違って、慎重に進めることがたいへん重要になってくるわけです。

### 《鋼矢板の打設》

さてこの現場では、第1透水層基底まで掘削したいのですが、残念ながらこの場所では、掘削地周辺の建物・道路・斜面の状況や土木技術の施工上の制約などがあって、掘削でき

る範囲は南北10m・東西30m・深度10mが限界とされました。その結果、平面としては図4・2Aに示す範囲、断面としては図4・3に示した部分を掘削することになりました。

まず掘削作業にかかる前に、汚染物質の流出防止と掘削中の崩壊防止を兼ねて、掘削する周囲に第1透水層基底の約15mの深さまで鋼矢板を打って四方を囲みました。ただこの矢板を打つのが大変で、これだけで……

原田 2ヵ月ぐらいかかってますね。約7mほどの深さからN値が50以上になってしまうんです。アースオーガーで掘削しながら圧入するんですが、安全をはかるために、横梁や中間杭などを併用しますから時間がかかります。ただ、鋼矢板は噛み合わせ構造になっていまして、鋼矢板には適しているんです。

### 《掘削現場の雨水対策と安全衛生管理》

鈴木 掘削作業と汚染地層の処理の話は、やはり一番苦労された原田さんから……

原田 掘削は、いまの断面図に描かれていましてように4段階に分けて行いました。掘削作業についての細かいことは省き、ここでは汚染物質の性質と関連して2つほど一般の作業とは違う点に触れてみます。

1つは雨水対策で、掘削過程で雨が降って掘削箇所に雨水が溜まることがあります。この対策としてはドラム缶などを埋め込んで釜場をつくり、水中ポンプで汲み上げ、汚染水を曝気処理しました。また掘削した汚染地層を集積・保管するときには、それがどんなに小規模であってもシートで遮蔽するなど、雨水には細心の注意をはらいました。

もう1つは作業中の安全衛生の問題で、一般の土木関係の人は、この汚染物質のことをよく知りません。ですから安全教育を徹底し、濃度によっては防護マスクをつけるなどの指示も必要になります。ちなみに、労働安全衛生法によるトリクロロエチレンの室内作業許容濃度は50ppm、268mg/m<sup>3</sup>です。

### 《熱風併用風乾処理装置》

掘削した汚染地層は、自動化を前提に設計した攪拌乾燥装置で浄化処理しました。これ

は畜産用の鶏糞乾燥装置を改良したもので、図4・4がこの装置の概念図です。中央のデッキプレートの上では、刃が時計回りに回転しながら往復運動を繰り返し、そこに積まれた汚染地層を細断・粉碎して上方に巻き上げます。こうして空気接触させて有機溶剤を気化させる仕組みです。

デッキプレートの下からは温風を送って効率を高め、建屋はビニール温室ですから室内の温度も高くなり、除去効果はさらに向上します。またビニール温室の天井部分には活性炭フィルターをつけ、気化した汚染物質の大気排出を抑制するようにしました。機械運転員が必要なのは、汚染地層を所定位置へ搬入するときと浄化処理後の土を搬出するときだけで、あとはすべて自動化されています。

この装置では、汚染濃度が100mg/kg程度の地層であれば、細断・粉碎の回数が30回以上でガスクロ分析では不検出となり、無害化できます。掘削した地層の総量は約2,700m<sup>3</sup>になりましたが、すべてをこの装置で無害化し、元の位置に埋め戻しました。掘削工事は1989年7月に始めてその年のうちに終わり、処理は1990年末までに、埋め戻しは1991年末までに完了しております。

### 《「集水ます」による汚染水の揚水排出》

鈴木 鋼矢板で囲んだ部分にはまだ汚染した地層が残っていますし、もちろん第1透水層の地下水はひどく汚染されています。この汚染地下水は、図4・3に示してあるように、2つの「集水ます」井戸で汲み上げました。集水ますは直径0.9m、第1透水層にあわせてスクリーンを設け、地下水が第1透水層基底付近に下がるまでほぼ完全に汲み上げつづけました。汲み上げた汚染水は、特設した三連曝気処理装置で浄水処理しました。

図4・2A - 元廃棄物捨場及びその周辺の地下空気汚染ブリュームと掘削地



図4・2B - 掘削地周辺の地層汚染診断図

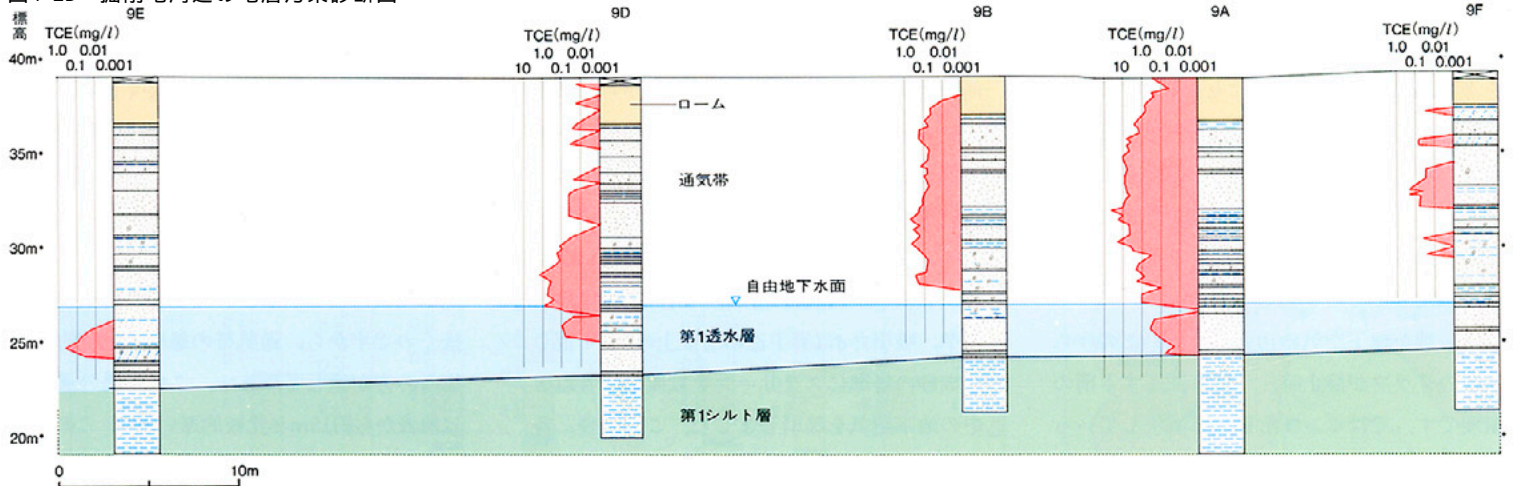


図4・3 - 汚染地層の掘削除去

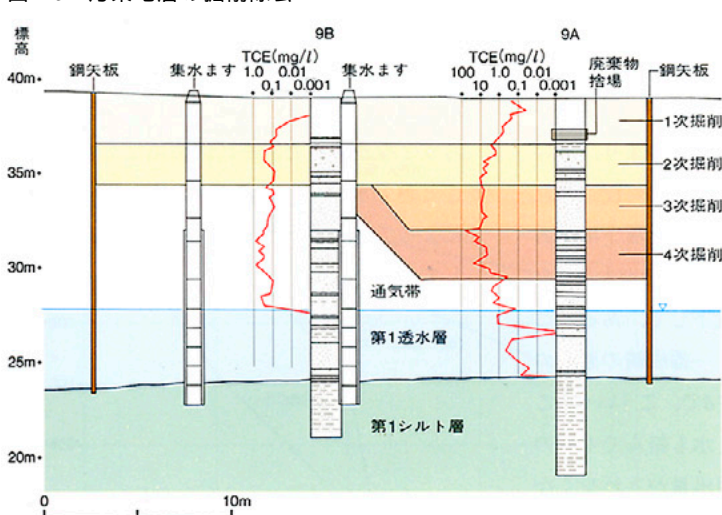
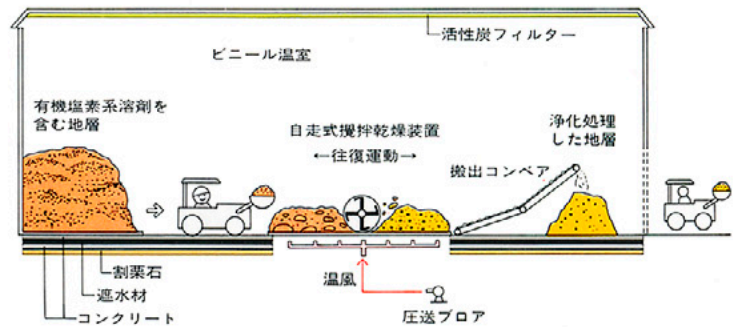


図4・4 - 熱風併用風乾処理装置の概念図



### [3]地下空気汚染吸引法

#### 《地下空気吸引井による汚染物質の回収》

以上のように、廃棄物捨場のホットスポットはその地層を掘削して無害化しましたが、工場内の地下にはまだまだ沢山の汚染物質が残っています。これらの汚染物質を浄化するために新しく開発したのが地下空気汚染吸引法です。これは簡単にいうと、通気帯に地下空気を抜く空井戸を掘り、真空ポンプで減圧して汚染物質の気化を促進し、効率よく汚染物質を回収しようとするもので、有機溶剤の揮発性を利用した浄化装置です。

図4・5は、地下空気汚染吸引井の最初の実証装置で、場所は工場西側の境界付近、No.3ボーリング地点のすぐ傍らです。図の一番左側は地質柱状図と地層汚染の状況、その右側に示したのがこの吸引井の構造です。この最初の吸引井では、地下空気を抜くスクリーンを深さ3mから21.0mまでにセットし、ローム層を除く通気帯の全層準をカバーできるようにしてあります。なお地下水面は深さ約16m付近にあって、その上が通気帯になります。吸引井の一番上の矢印は、ここから地下空気を抜き減圧したことを表します。

図の右端が地下空気の汚染濃度で、このうち左側のグラフが静止時、つまり減圧する前の濃度です。ではポンプを運転し減圧していったとき、この濃度がどう変わったか。それを見たのが右側のグラフです。それぞれの濃度は深度別に測定してありますから、左右のグラフを比べればその違いは一目瞭然、両者の数値には2桁の差がみられます。

図4・6は、この吸引井で管内の圧力を低減して吸引風量を増加させたとき、排出ガス濃度(地下空気汚染濃度)がどう変わるかをみたものです。排出ガス濃度は、図に見るように急速に上昇し、トリクロロエチレンの気化が促進される状態がよく分かります。

このように管内の圧力を減圧し、吸引風量を増やしていけば汚染物質を確実に回収できることが分かるわけですが、ただ細かく見ると、図4・5から読み取れるように、運転時

の濃度は深度によって違いがあります。これは、同じ通気帯の中でも、透気性と地層汚染濃度が複雑にからみあっているからで、汚染物質の回収を効率よく行うためには、地層汚染の状況と地層の透気性を考慮して、吸引井を仕上げる必要があります。

#### 《地層の透気性と地下空気吸引井群》

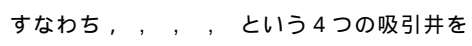
それで次に、同じくNo.3ボーリング地点の傍ら、図4・8Bに示すように、地下空気汚染が300ppm以上という場所でこの点を調べました。すなわち、 という4つの吸引井を設置し、それぞれ透気性の異なった地層中から地下空気を吸引してみたわけです。そしてこれらの吸引井群から3方向にむけて、それぞれ21~23, 24~26, 27~29という観測井群を設け、各吸引井の影響圏や装置の運転状況を確認しました。

図4・8Aは、これらの各観測井群を設けた箇所の地質柱状図です。ここでは上から、埋土、ローム層、細砂、礫混じり粗砂、中砂、シルト混じり細砂、というような地層構成になっているわけですが、こうした地層条件に対応して、吸引井はローム層下部の層準、吸引井は礫混じり粗砂の層準、吸引井は中砂の層準、吸引井は第1透水層直上のシルト混じり細砂の層準にスクリーンを設置し、各地層中の地下空気を吸引しました。この場合、各層準のスクリーン位置は、汚染濃度の高い部分に合わせてセットしています。

図4・9は、これら4つの吸引井での吸引風量と減圧量との関係を調べた結果です。そうしますと、透気性の一番優れている礫混じり粗砂の層準にあわせた吸引井では、吸引風量が大きくても減圧していきます。つまり、この層準では汚染物質の気化がどんどん促進されるわけです。それに対してローム層下部にあわせた吸引井になると、吸引風量が大きくならないうちに圧力だけは低下して、あるところで詰まってしまいます。一番成績の悪いのは第1透水層直上の吸引井で、こういうところは地層の性状だけでなく水も絡んでくるので、わりと早い段階で吸引風量がとれなくな

り詰まってしまいます。

各吸引井の運転条件は、こうしたデータに基づいて設定することにより、汚染物質を効率よく回収することができます。そのさい、観測井から熱風を吸引させ、汚染物質の気化効率をさらに高めることもできます。

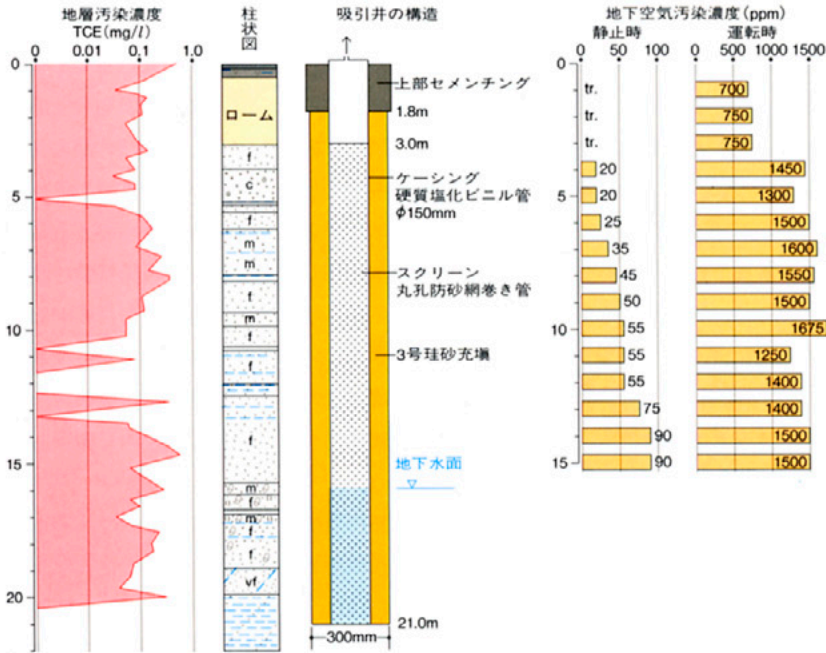
図4・10は、地下空気汚染吸引井および観測井の装置を模式的に描いたものです。ここではNo.3-Dのような全層準から一様に地下空気を抜く吸引井も含めて描いてありますが、この吸引井のバルブは閉めることもできます。なお、No.3-D吸引井に小型ポンプを接続したときのトリクロロエチレンの回収量を、図4・7に示します。この1号機は、1991年の11月20日から運転を開始し、1992年の10月31日まで、積算して300kg、つまりドラム缶1本程度のトリクロロエチレンを回収しています。また、当初1,000ppmというドロドロとした原液も1年のうちにすっかりなくなってしまいました。このように、地下空気汚染吸引法は、浄化技術として非常に有効なことが分かります。

#### 《地下空気汚染吸引法の適応現場》

地下空気汚染吸引法は、通気帯の汚染物質を抜くのですから、通気帯の層厚が比較的厚い場所の方が適しています。この現場の通気帯は地表から約15mと比較的厚いので、この技術も生きてくることになります。

この技術はまた、建物の移転や地層の掘削を伴わずに汚染物質だけを除去する、いわゆる原位置(In-Situ)除去技術です。吸引井は垂直でなく斜孔した形でできますから、こうした斜孔吸引井を設ければ、工場が操業中であるうとなかろうと、それに関係なく運転することができます。この工場でも、斜孔吸引井によって建屋地下の汚染物質を効果的に除去しています。

図4-5 - 地下空気汚染吸引井（実証装置No.3D）での汚染濃度の変化



(注)地層汚染濃度はガス検知管による測定値、柱状図の凡例は図3-2と同じ。

図4-6 - 管内減圧と吸引風量・排ガス濃度との関係

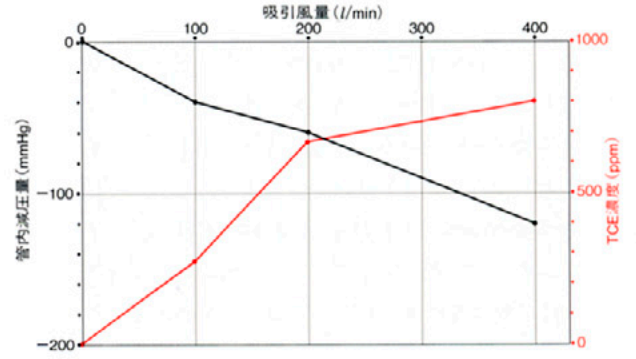


図4-7 - 実証装置No.3D吸引井におけるトリクロロエチレン回収量と地下空気汚染濃度の推移

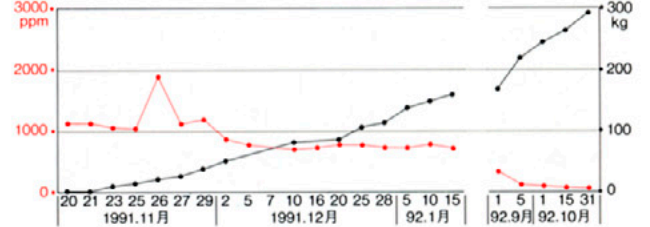
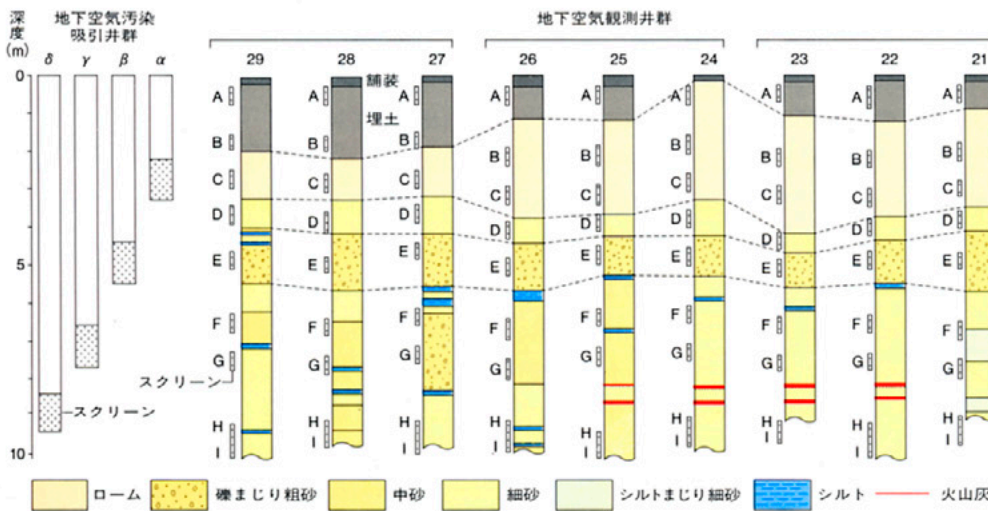


図4-8 - 地下空気汚染吸引井および観測井群の設置例

A: 透気性の差異に基づいて設置した各吸引井と観測井群のスクリーン位置



B: 各吸引井と観測井群の設置地点

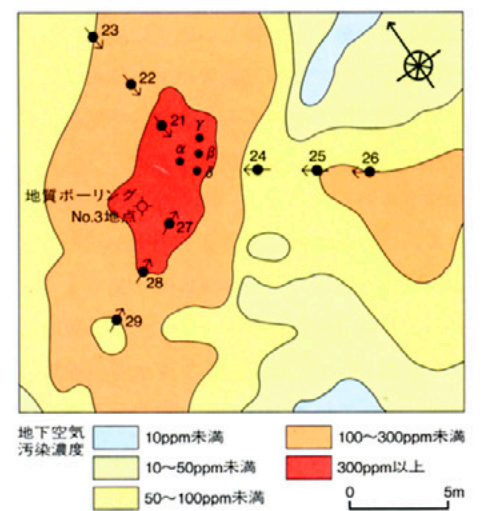


図4-9 - 各吸引井における管内圧力と吸引風量との関係

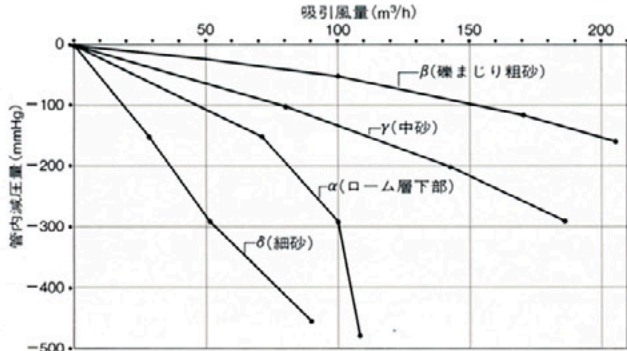
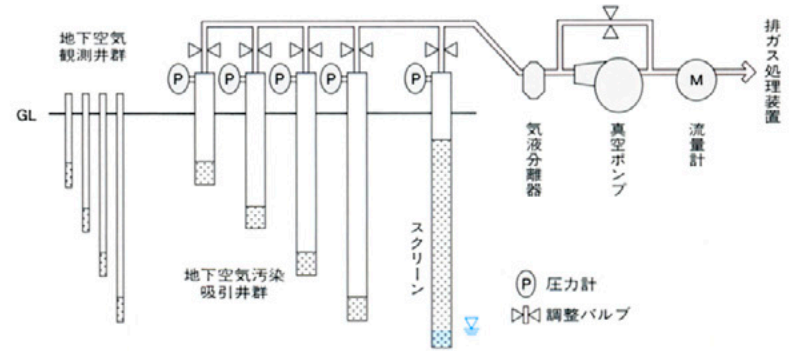


図4-10 - 地下空気汚染吸引井群・観測井群の装置概念図



#### [4]バリア井戸システム

##### 《バリア井戸》

工場敷地下の通気帯にある汚染物質は、以上の方法で除去しますが、一方、第1透水層からは汚染地下水が工場外へ流出していきまます。これに対しては「バリア井戸」によって汚染地下水を揚水排出し、市街地への移動・拡散を遮断します。井戸で揚水すると、周囲の地下水がこの揚水井に集まってくるので、当然汚染した地下水も集まってきます。それで、地下水の流動を遮断したいところに揚水井群を設け、ここで透水層から汚染地下水を強制的に揚水排出し、この揚水井群をバリアにして、その外側には汚染地下水を流出させないようにするわけです。揚水排出した汚染地下水は、導水管で工場内の浄水処理装置に運び無害化します。このシステムも、この現場で始めて開発したものです。

ただこの技術を用いる場合には、揚水井群の設置場所やスクリーン位置あるいは揚水量の設定などが難しく、精しい調査に裏付けられた正確なものでないと効果が上がりません。未調査の段階で揚水すると、側方や深部にまで汚染を拡大する危険があります。

バリア井戸システムは、本来は工場の敷地内あるいは敷地境界に設けるのですが、ただこの現場は、さきの汚染機構解明で見たように非常に特殊な構造をしています。工場敷地のすぐ西側のNo.37地点で第2透水層の地層汚染が始まっていますし、また台地から低地に出たところ、No.31、No.12、No.13などの周辺には高濃度の汚染区域があります。したがってこの現場では、工場地下から流出するものだけでなく、この区域の高濃度の汚染地下水が市街地へ流出するのを防ぐ、そういうバリア井戸がのぞましいわけです。

##### 《高濃度汚染地域の精査》

図4・11は、この問題の地域を君津式表層汚染調査法によって調べた結果です。この地域は地下水面が浅いところにあるので、この調査法が有効に使えるわけですが、図のようにボーリングNo.31付近で汚染濃度が最も高く、

最高値は70ppmを示しました。

この地域の断面図は、さきに図3・8Bに示しましたが、今回はさらにそのすぐ東側でオールコアボーリングを行って、この地域の地下地質と汚染状況を精査しました。図4・12がその結果で、図に見るように、ここでも第1シルト層上部層がほとんど消滅しているため、汚染は第2上部透水層まで侵入しています。ただ2つの断面図からは、汚染の最も激しい地点は図3・8BのNo.13にあることが分かります。

##### 《バリア井戸の運転状況とその効果》

バリア井戸の位置は、以上のような調査結果をもとに、汚染濃度の高いこと、揚水可能な水位があること、地盤沈下が発生しないように沖積粘土層が無いが薄いこと、用地上井戸の設置が可能なこと、というようなさまざまな観点から検討しました。

細かい点は省略して大筋だけを述べますと、揚水井(バリア井戸)としては、No.12、No.13、No.31、No.35と台地上のNo.37の5地点7本を選定し、水位自動観測井をNo.12、No.31、No.33、No.35、No.37の5地点に設けました。この間、揚水試験や水質検査を約半年間にわたって行い、各井戸の干渉状況や汚染濃度の変化を考察し、さらに地盤沈下の発生しない範囲で各井戸の揚水量を決めました。すなわち、汚染濃度の最も高いNo.13の水位を最低とし、次にNo.12とNo.31の水位が低くなるように揚水量を調整し、合計揚水量450～350l/minで運転を行うことにしたわけです。

図4・13は、バリア井戸周辺域の第1透水層の等水位線図です。上のA図が運転開始前の水位分布図で、これが運転開始後になると下のB図のように変わってきます。運転開始後には、低地ではNo.13、No.31、No.12の部分に水位の下がる大きな目玉ができ、台地ではNo.37の部分に水位の下がる目玉ができ、この2つの箇所でも強制的に揚水されている状況がよく現れています。しかも、周囲の水位にはそれほど大きな変化を与えておりません。図4・

14は、バリア井戸が運転される前と後では、バリア井戸および下流側で地下水中の汚染濃度がどのように低減したかを見たものです。A図はバリア井戸No.13とNo.12における濃度変化、B図は下流側のNo.11地点での濃度変化です。後者の図からは、バリア井戸の運転開始後には、第1透水層・第2透水層ともに汚染濃度が激減し、下流側への汚染物質の移動が遮断され、バリア井戸の本来の目的が十分に達成されていることが分かります。なお、内箕輪地区での全体的な地下水汚染状況の経年変化は、図4・17に示しますので参照してください。

バリア井戸で揚水した汚染地下水は、導水管で工場内の浄水処理装置に運んで無害化します(図4・11)。浄水方法は、充填塔2塔連結の曝気処理で、原水水質50mg/l(トリクロロエチレン)に対し、処理水質は0.02mg/l以下、処理水量1,440m<sup>3</sup>/日で設計されています。処理水は、当初は公共下水道へ流していましたが、1993年6月からは地下水へ戻すことが漸く認められ、透水層へ戻す準備をしています。

##### 《地盤沈下対策》

ところでバリア井戸をつくった場所は、地形的には台地から沖積低地に転じてくるところで、もともと地盤沈下の傾向のあった地域です。こうした場所で地下水を揚水するのですから、当然、地盤沈下のリスクを背負っているわけで、地元住民の反対もありました。

ただ先ほどからも述べているように、バリア井戸の設置場所や揚水量の決定に際しては、地盤沈下が発生しないよう慎重に考慮しています。その上で、ここでは2ヵ月に1回1級水準測量を実施して、地盤沈下をきちんとモニターしています。またバリア井戸は、汚染物質を汲み上げるのが目的です。それで、旬間から隔月の頻度で行われる各井戸の水質検査結果を照合してシステムの運転条件を設定し、その効果的な運用をはかっております。現在まで地盤沈下の徴候は全く現れておりません。

図4-11 - 市街地高濃度汚染区域の表層地下空気汚染とバリア井戸システム

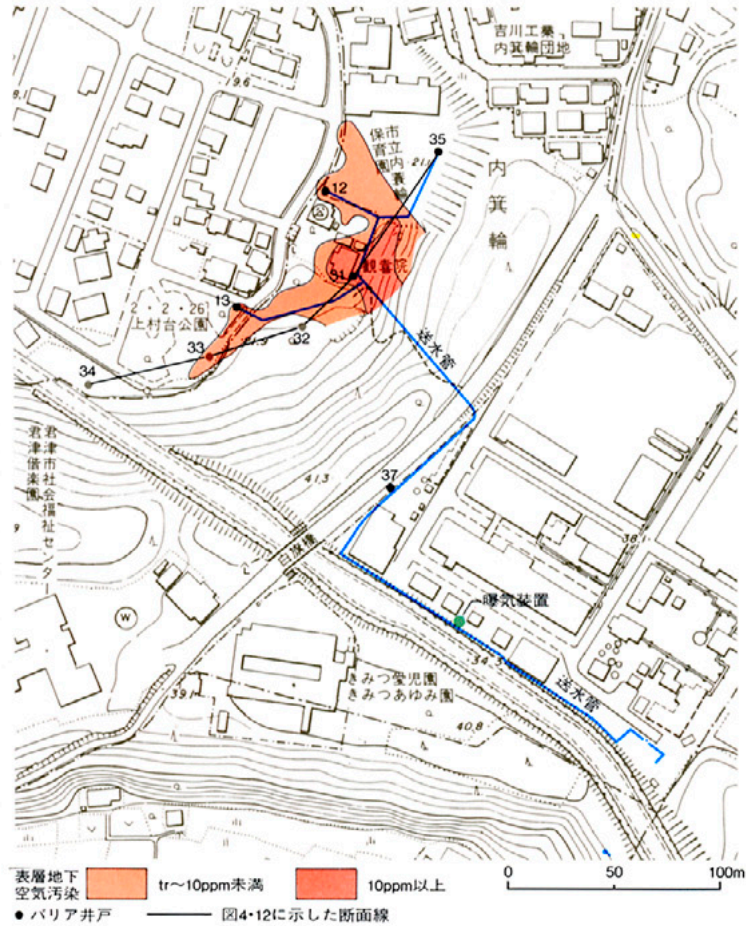


図4-12 - 市街地高濃度汚染区域の地層汚染診断図

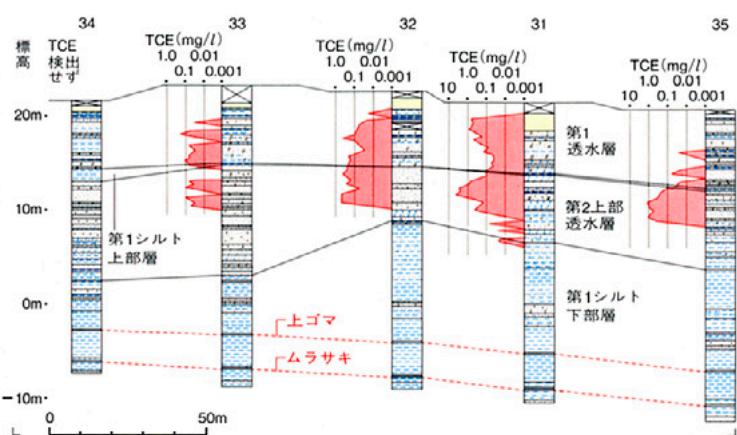


図4-14 - バリア井戸運転前後の時期における地下水中のトリクロロエチレン濃度の隔月変化

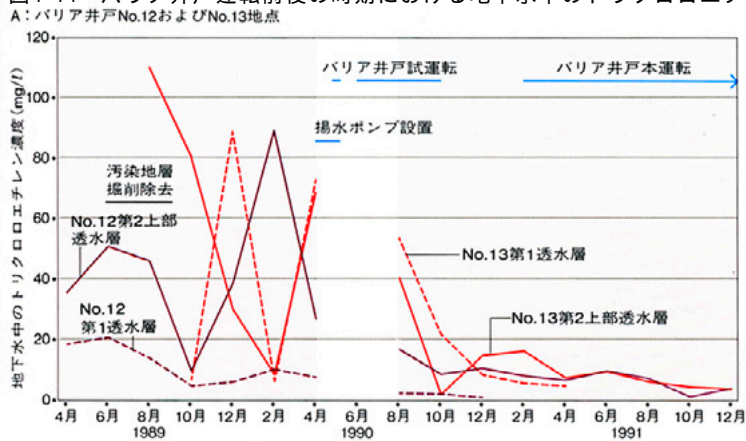
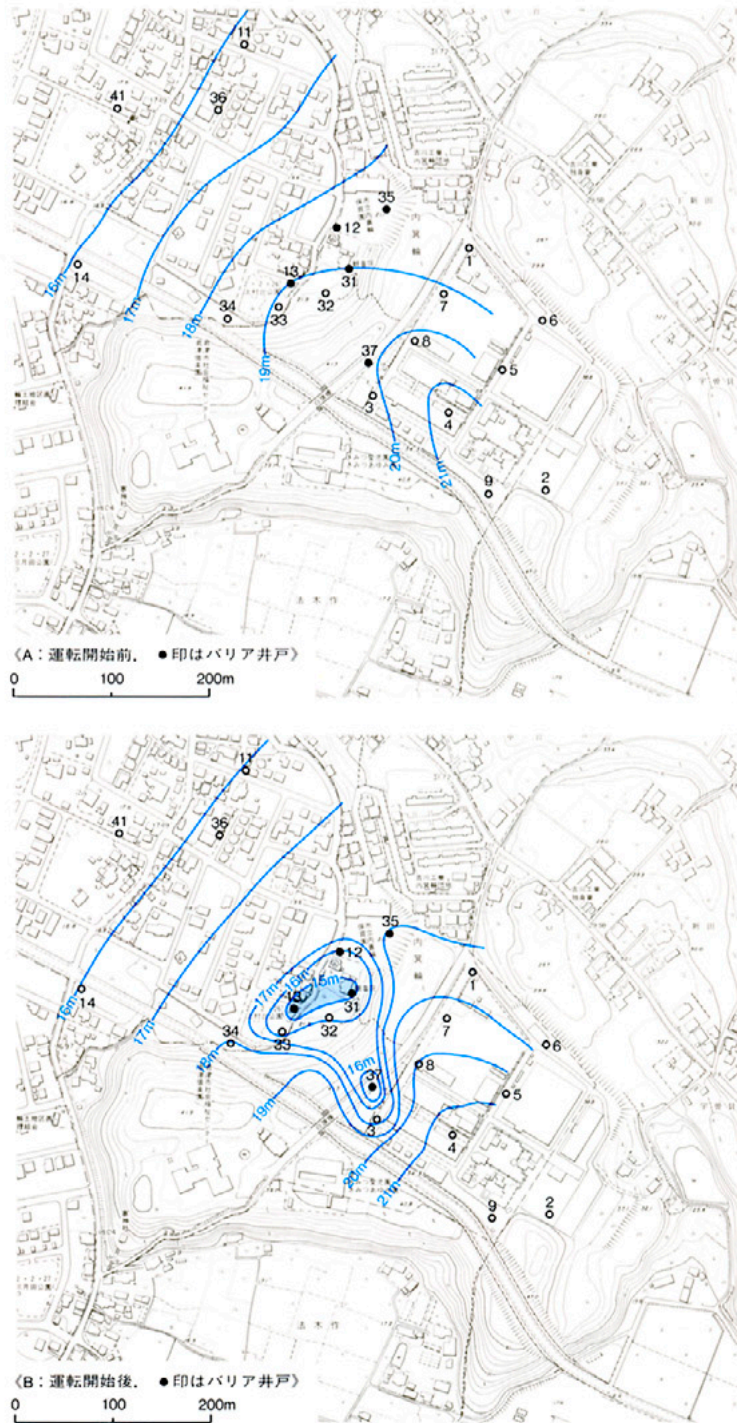


図4-13 - バリア井戸設置周辺地域の第1透水層の等水位線図



[5]市街地での揚水・曝気処理と地下水利用  
 以上のように数段階の浄化対策を施しても、すでに市街地に拡散している汚染物質については、これを回収することができません。それで市街地では、2カ所の公共用井戸で汚染地下水を揚水排出し、これを曝気処理しています(うち1カ所ではこの水を再利用)。  
 その1つは、汚染源から約0.5km北西にある内みのわ運動公園の公共用井戸(20号井戸)です。この地点では、汚染源から余り離れていないので、汚染も比較的高い濃度で推移しています。もう1つは、汚染源から約1.5km北西の君津市3号井戸で、これは市の水道水源井です。ボーリングNo.17地点の近くで、汚染域の末端部にあたるので汚染濃度も低く、これより下流側では汚染が認められません。ですから、ここでの汚染地下水の浄化は、下流側への汚染物質の拡散を防止するという重要な役割をもっているわけです。  
 この2カ所の公共用井戸で、汚染地下水を揚水排出し、これを曝気処理しているわけですが、その内容は表4・1のようになります。2つの施設とも処理能力は1日1,440m<sup>3</sup>ありますが、稼動時間を1日7～8時間に抑えているのは、地盤沈下を考慮しているからです。

内みのわ運動公園20号井戸の場合には、原水水質3mg/lに対し、処理水質を0.02mg/l以下に浄化し、この水を公園内で使っています。こうしたケースの地下水利用は全国でも例がなく、この現場で始めて実現したことです。  
 図4・15は、内みのわ運動公園の20号井戸で、1989年6月から1994年12月までの間に回収したトリクロロエチレン量です。この期間で総計906kgを回収しており、およそドラム缶3本分ぐらいのトリクロロエチレンを市街地で回収したことになります。  
 [6]浄化の効果確認と環境影響のモニタリング  
 以上のように、この現場では幾つもの浄化技術を使って浄化対策をすすめてきたわけですが、各技術の運用にあたっては、その浄化過程や周辺環境への影響を定量的に把握し、またその効果を確認しながら進めています。  
 この現場では、隣接するPCE汚染地域を含め、現在までに約85本の観測井が設けられ、また周辺の15本の民家井戸でもモニタリングしています。こうした観測井や民家井戸では、各井戸の水質に少しずつ違いがありますが、いずれの井戸でも汚染濃度が低減しています。  
 図4・16は、代表的な井戸での汚染濃度の変化の経緯を示したものです。このうち内みの

わ運動公園20号井戸では、当初3mg/lもあった濃度が1994年12月時点で0.28mg/lに減っています。また汚染地層を掘削除去した場所に設けた集水ますでは、当初の130mg/lという高濃度が94年12月時点で0.086mg/lに減っています。バリア井戸では、1992年に濃度が上昇し、1993年の前半が下降、後半に上昇という具合に推移していますが、これは工場敷地内でさまざまな浄化作業が行われ、汚染物質が移動しているためで、バリア井戸が汚染物質を確実に捕獲している証拠です。  
 図4・17は、この汚染現場における浄化効果の全体的な姿を地下水汚染を中心に見たものです。浄化対策未着手の1990年から、浄化の進行しつつある1994年までの5年間について、第1透水層および第2透水層の地下水汚染ブリュームの濃度を示したものです。これは年平均の値で描いてありますが、10mg/l以上という一番濃度の高い地域は、1991年以降には殆どなくなりかけています。1～10mg/lというオレンジ色の範囲も次第に狭まっていく状態が読み取れ、浄化の効果が確実に上がっていることを示しています。

表4・1 - 市街地2カ所の公共用井戸における揚水排出と曝気処理

設計仕様	内みのわ運動公園	君津市3号井戸	設計仕様	内みのわ運動公園	君津市3号井戸	
揚水量 (m <sup>3</sup> /day)	420	480	水質	トリクロロエチレン	トリクロロエチレン	
稼働時間数 (H/day)	7	8		原水濃度 (mg/l)	3.0	0.06
曝気装置処理能力(m <sup>3</sup> /day)	1,440	1,440		処理水濃度(mg/l)	0.02	0.01
気液比(G/L) (倍)	60	40		除去効率 [%]	99.3	83.3
空塔速度(LV) (m・h)	40	40	運転開始年月	1989/5	1988/9	
用途	日本庭園	排水				

図4・15 - トリクロロエチレン積算回収量と水中濃度の経時変化

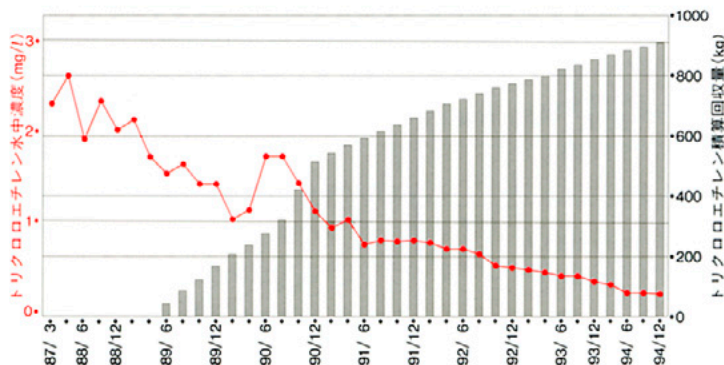


図4・16 - トリクロロエチレン水中濃度の経時変化

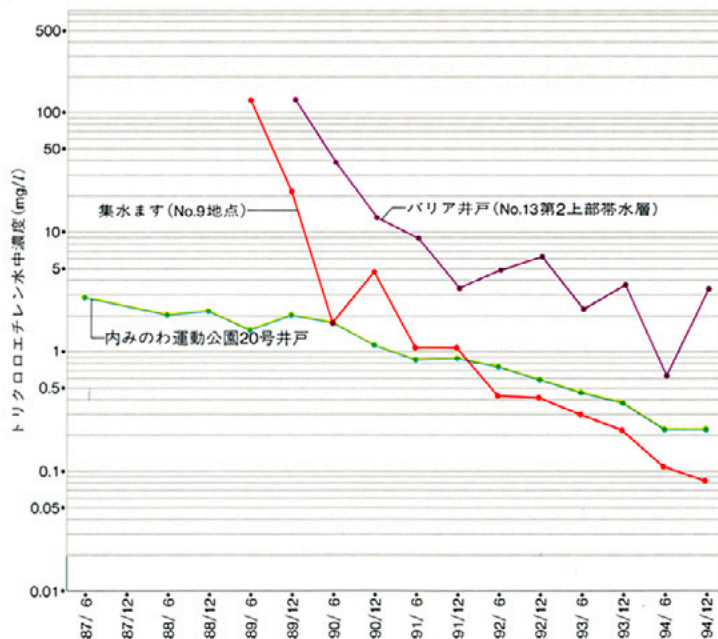




図4-17A - 第1透水層地下水汚染ブリユームの経年変化(1990~1994)

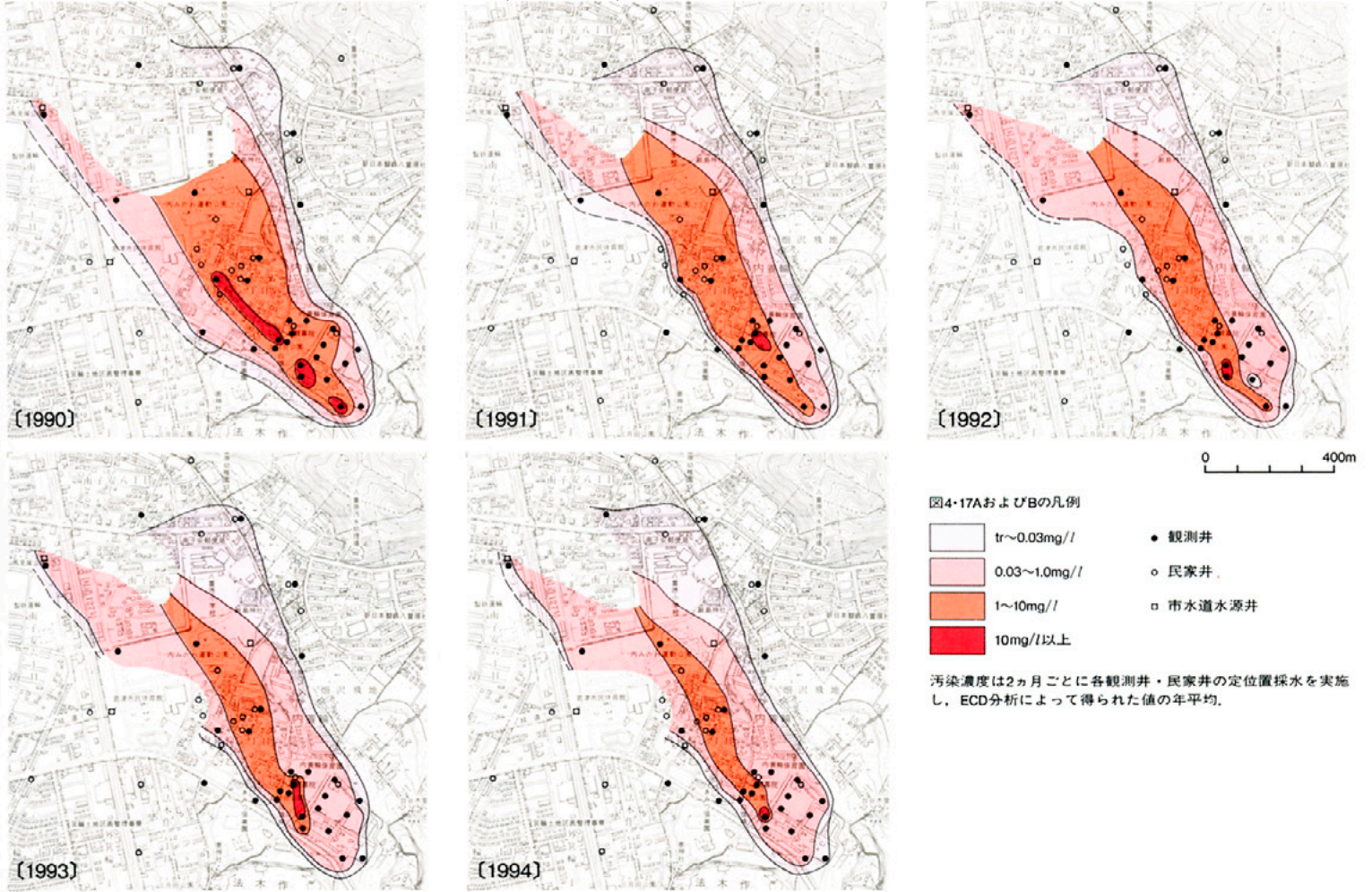
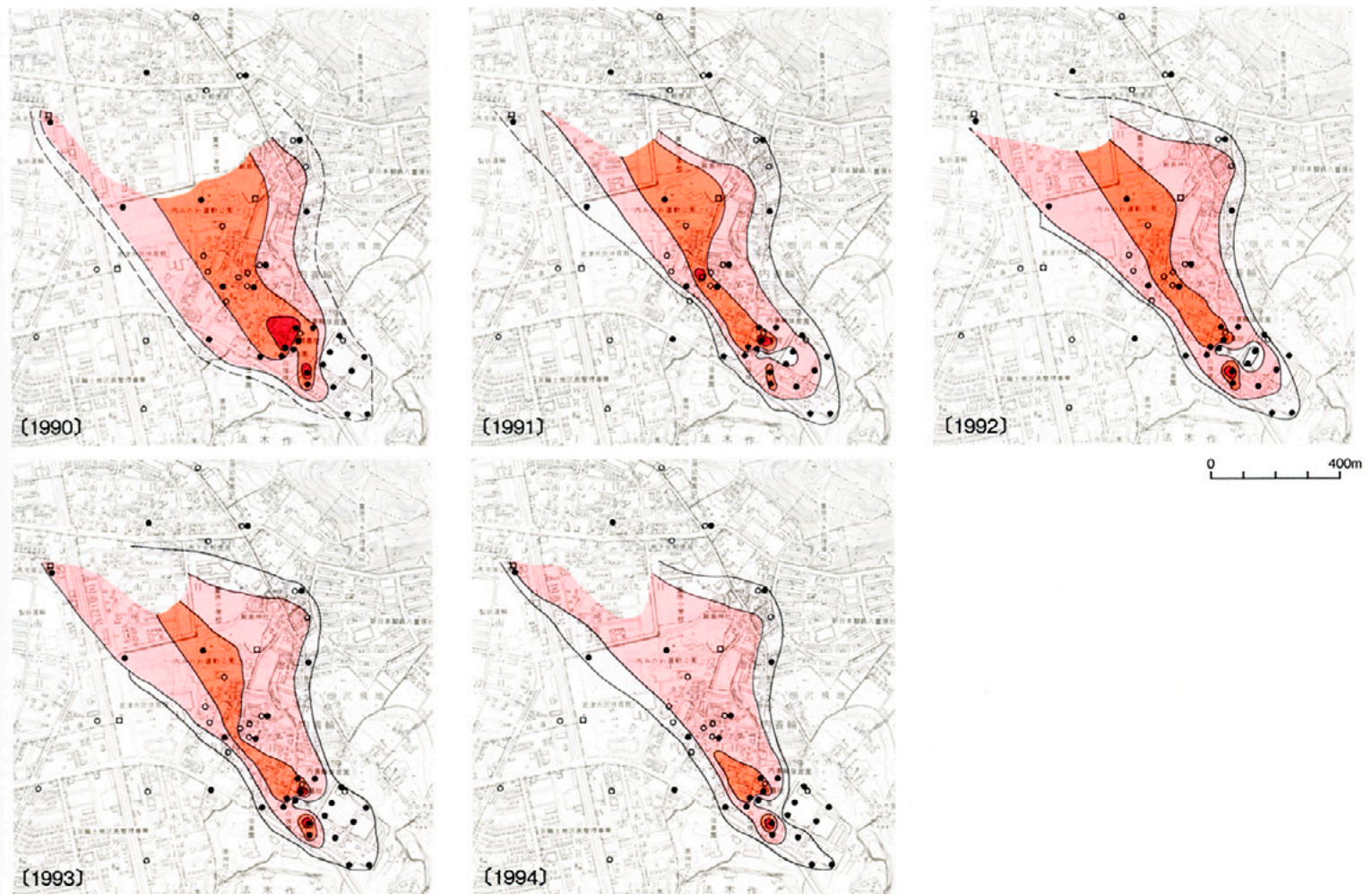


図4-17B - 第2透水層地下水汚染ブリユームの経年変化(1990~1994)



## 地質汚染をめぐる

### 地元住民との対応 - 反発から理解まで -

鈴木 これまで、対社会的な問題については全く触れてきませんでしたので、次にこれについて簡単にお話します。

最初に、この汚染問題が君津で発生したときには、日本ではまだまともな調査が1つとして行われていませんでしたから、まして一般の人々が有機溶剤の事など知っているはずがありません。それで当初、地元の住民の間には、汚染した水を飲めば明日からでも病気になるのではないかと、というような不安を抱く風潮が生じてしまいました。

市の方では毎年「公害白書」を発行して、その中でいろいろな汚染についてのデータを必ず公表しております。ですから汚染の事実を隠すような意図は全くないのですが、このときには、たまたま私どもの仕事が余りにも忙しくて、白書の刊行が半年ほど延びてしまったんです。そのために住民の側から「公害隠し」という批判もでてしまい、それと同時に、汚染に関係していることも、関係していないことも一度にどーんと訴えられて大変な話になってしまったわけです。

地下水汚染の影響としては、汚染した井戸の水が流れ込んでいた庭の池で、鯉や金魚などの背中にこぶができて魚が死んでしまったという例が実際にあるんですが、こうした話がでけますと、井戸の周りにいた猫がみんな難産したとか、子供が難病にかかったとか、中年の人が病気で亡くなったのは変死ではないか、というように、人々の健康問題に直接結びつく格好で話がどんどんエスカレートしてくるんです。日本では水俣病については誰でも知っていますから、そうしたイメージで人々の間に不安感が広がってしまい、非難の矛先が私どもや原田さんのところに集中してきたわけです。

こうなってきましたと、汚染物質の毒性が有機水銀の毒性とは違うことや、WHOのガイドラインの数値とその意味についていくら説明し

ても、一般の住民に対しては一切通じません。「難しい数字の話を持ち出して、おれたちをごまかすのか」ということになってしまうわけです。ただいくら非難されましても、私どもとしては多くの住民と遊離した形では何をしても始まらないわけで、それで市の方では、すぐに「君津市トリクロロエチレン等地下水汚染健康調査専門委員会」をつくって住民の健康診断を行い、人々の健康への不安を取り除くよう対処したわけです。

また死んだ鯉や金魚については、それを貰ってきて県の衛生研究所で生物の専門家に解剖してもらいました。その結果は、金魚の内臓からは0.34ppmという非常に高い濃度のトリクロロエチレンが検出されました。これについては、ウイルス性の腫瘍にも類似した奇形のものがあるので、死因についての因果関係は不明という所見になっております。ただいずれにしても現在、私どものグループではそれ以上の評価をしていく体制にはありませんので、これらの記録はすべて保存してあるわけです。

原田 確かに、最初は地元の人たちは「汚染した水を飲んだら、すぐ死ぬのではないかと」という不安を持っていましたね。私どもも住民と話をしている最中に随分と激しい抗議を受け、「汚染したこの水を飲んでみる」と極端なことも言われましたし、話の内容にはとにかくすごいものがありました。

ただ私どもが非常に助かったのは、水道の普及率は100%でしたし、地下水はおいしいからときたま飲んでいるという例が3件程度だったわけです。それに対しては、行政の方でも保健所と連携して「飲むんだったら必ず煮沸してから飲んで下さい」というように素早く対応してくれて、人々の不安感を消してくれました。

またバリア井戸設置のさいに、地盤沈下するのではないかと住民の意見に対しては、地質環境研究室の古野さんたちが水準測量を実施し、住民代表の自治会や住民側でつくった対策委員会に、観測井の濃度分析結果とも

あわせて行政側が詳しく説明されるという形で進められました。いろいろな浄化対策についても詳しく説明されましたし、行政側がこうした適切な方法で事実を発表してくれましたので、私どもも随分と助かりました。

新聞にも、この問題が大々的に報道されて私どもは随分と叩かれたんですが、そうしたことがあっても住民の理解が得られ、1992年の春には住民と私どもとの間で正式な和解交渉が成立する運びになったわけです。

楡井 私の方の地質環境研究室にも、1992年4月付けで、内箕輪自治会長と内箕輪地下水汚染対策委員長との連名で「汚染原因者の誠意ある対処のもとに汚染除去が行われ、地下水汚染濃度も漸減してきた」という礼状が届きました。このときは、率直に言って嬉しかったですね。というのも、今までの日本の公害問題あるいは環境問題の中では、このように事態が科学的に解明された上で、住民・企業・行政の関係が円満な形で解決をみた例は皆無であったからです。

これには、最初はいろいろとあつたにせよ住民の方も早く理解してくれましたし、行政の対応もよかったですし、また研究・技術の面も難しい課題を解決してきたわけですが、何といっても原田さんの方での並々ならぬ努力が大きいです。また一度お訪ねを受けたことがあるんですが、会社の社長が非常に立派な方で、優れた見識をもって事態を進められた。この点は、いくら強調してもしすぎることはないように思います。

編集 新聞にも大きく報道されたんですか。  
鈴木 関西の人は読まなかったかもしれませんが、最初の地質ボーリングが始まった1988年の秋頃に、新聞の千葉版に「君津市でハイテク汚染」として大きく報道されたんです。千葉版は首都圏の人はみな見えていますから、関東では多くの人が知っていると思います。その中では、私どもも「公害隠し」と書かれたりして、だいぶ叩かれました。

楡井 僕らが本格的な調査に入った忙しい真っ最中だったですね、新聞やテレビでいろいろ

るといわれたのは、それはしんどかったですよ。私の心境からすれば、当時、六価クロムの問題がうまく解決できたので、新聞には褒められるとばかり思っていたわけ(笑)。それがとんでもない。新聞記者に、役所のどの会議に何回行ったとか、みんなチェックされてね。それでも、僕らはすべてきちんと対応してきたんですよ……。

ただ、いま考えてみると、マスコミの力というのは高く評価できるんです。こういう汚染問題のときには、マスコミは非常に重要な役割をもっていて、僕らも何十カ所という汚染サイトに対処してきていますが、マスコミに叩かれたところの方が解決がきちんとした方向で早く進みます。これは事実ですね。君津の場合でも、首都圏で大々的に報道されましたから、これがきっかけとなって環境庁は日本での正式な基準をつくっていくわけでしょう。アメリカをはじめ先進国では、以前から厳しい環境基準をつくっているのに、日本だけはまだ環境項目の中に有機塩素系溶剤を正式に入れてなかったんですから。

#### 地下水資源を護る

佐藤 それと、これは楡井さんの持論なのにいまの話に出なかったので私から追加させてもらうことですが、君津の場合には、住民・企業・行政の3者の共通の価値観として、地下水が貴重な水資源であるという認識が前提にあって、これに疑問を抱くような話は一切なくて解決が図られてきたわけです。つまり最初から最後まで一貫して、汚染地下水の浄化という問題が3者の共通の目標になっている。ですから、解決の方法も客観的に科学的な方法で進められ、この目標が達成される見通しがついた時点で、3者の関係が円満な形に収まっているわけです。

このことは余りにも当然のことで、いまさら何を言うのかと思われるかもしれませんが、じつはこうした例の方が非常に稀なんです。これまで地下水の汚染が問題になると、日本ではほとんどの場合、水源を河川などの表流水に切り替えるという日本独特の形で対処さ

れ、地下水は切捨てられてしまっていたのです。特に有機塩素系溶剤の汚染の場合には、専らこうした方法で対処されてきたわけで、いったん地下水の利用が放棄されると、もう汚染は進む一方になってしまいます。

そうした中で、水源を他に切り替えることなく、あくまでも地下水を利用し続けてきたのが高槻市です。さきほども鈴木さんの話にもありましたが、ここでは市の関係者や水道技術者たちが、機構解明や浄化対策を行いながら、自分たちで曝気装置をつくって汚染地下水を浄化し、水源としての地下水を守り続けてきたわけです。

それで以前、シンポジウムが行われたときに高槻市の水道の方に「曝気してきれいにしたといっても、その水は一度汚染したものだから、住民の間に抵抗感があるのではないか」と質問したことがあります。それに対して高槻市の方は「いま、淀川からもってくる水道水は塩素処理をするので、どうしてもある程度のトリハロメタンが入ってしまう。しかし汚染された地下水の方は、曝気してしまえば非常にきれいな水になる。そのことを住民は知っている所以抵抗感はない」と言われました。この話を聞いたときにも、やはり互いの気持ちの底には、地下水を利用し続けることで貴重な水源を守っていこうとする共通の意思があることを感じたわけです。

とくに現在のように、表流水を高度処理しようとするればえらく金がかかります。また遠方にダムをつくって、そこから延々と水を引くようなことをすれば、途方もない金がかかってしまいます。地下水をきれいにする方がよほど安くつくわけです。しかも汚染さえとってしまえば地下水は非常にきれいで、すばらしい水質です。ですから地下水を使いつつ、これを後世に残すということはきわめて当然のことなんです。この当たり前のことがずれてくるから、どこかでおかしくなってくるんです。

住民・企業・役所の3者の関係

楡井 佐藤さんの言われる通りで、住民と会

社と役所と、それぞれの立場があるわけですが、そのときに、汚染を浄化してきれいな地下水を次の世代に残そうという発想よりも、とりあえずこの3者の間で成り立つ合意があるんです。例えば、住民のある部分から、我々は被害者なんだからとにかく金をくれという要求がでる。そうすると、会社の方がそれにの格好で、面倒な対策を行うよりも、対策に使う金をすべて住民に渡そうとする。行政の方も、それに対応する形でおざなりな対策を指導する。こうして、とりあえずの仮の安定ができ、一応の決着がつくわけです。しかし汚染物質は、地下にどっさりあるから何一つ解決されていない。

そしてこうした場合には、仮りの安定を支えるために、問題の解決には少しも役立たない金がどんどん支出される。やはり加害者には加害者としての理がありますし、また被害者には被害者としての理があるわけですから、その辺はきちんと整理して、環境は環境として浄化していくために金を使うのが本当なわけです。しかし、そうした本来の形とは全く別の次元でこの3者の関係が動き始め、3者の間でさまざまなタイプの合意ができる。この合意によって、肝心の汚染の問題に蓋をしてしまうといった例が多いんです。こうなると、もう悲惨な結果になるしかありません。ですから佐藤さんが言われたように、汚染を浄化し、きれいな地下水を末代まで残すという本来の目標を3者が共通して持っていないとだめなんです。

もちろんこの場合、いくら3者で汚染を浄化しようといっても、研究者や技術者が汚染機構を解明し得る方法論をもち、きちんとした浄化対策を実施しようとする強い意志を持っていなければ何にもならないわけですが、逆にいうと、地下水の利用を止めて汚染に蓋をするような風潮のもとでは、そうした能力をもつ研究者や技術者が育ってこないということも事実なのです。こうした風潮に歯止めをかけるためにも、君津のケースは非常に大きな意味をもっているわけです。

六価クロム問題の経験から

じつは、汚染問題というのは研究者や技術者にとっても非常に厳しく、また重い責任がかかってくる性質のもので、私が、そのことを痛感したのはだいぶ以前、六価クロムの問題が発生したときのことで。

それは、千葉県南部の鴨川での話ですが、海草類からアイスクリームの増量剤をつくっていた会社があって、その会社は山の上に自分の土地をもっているものだから、海草類の残りカスを廃棄物として山の上に捨てていた。一方、山の下には湧水を使っている集落があるんですが、その湧水から六価クロムがでてきたのです。当時は、公害の最も激しい時期で、しかも六価クロムは自然界には存在しないというのが定説とされていたから、汚染源は山の上の廃棄物処分場にあるとする風潮が、行政にも住民にもあったわけです。

そのとき僕は地質屋なものだから、調査を頼まれてその現場に出掛けたわけです。そうしますと、会社の方は「自分たちはそんな物質は扱っていない」と言って、真っ青になっている。それで、ともかく山をよく調べてみることにしたわけです。そうしますと、玄武岩帯の湧水はきれいな水なんです。驚いたことに、蛇紋岩帯の湧水にはすべて六価クロムが含まれていることが分かった。このときの調査・研究で、僕は「自然界では蛇紋岩から六価クロムが出る」という新しい論文を書いて、従来の定説らしきものを退けたのですが、同時にミスジャッジの危険性さえあった六価クロム問題を正しく解決し、会社を無実の罪から救うことができた。この点については僕は今でも誇りに思っています。

というのも、公害研究の専門家である化学分析だけを方法論にしている人達が、汚染源は山の上の処分場であると指摘していたからです。この人達は、自然のある部分を分析するだけで自然を見ようとはしない。六価クロムを含む水は自然界には無いという定説があれば、その定説とppmの測定結果だけを根拠にして汚染源をきめつけていたわけです。

それで僕らは、保健所の野犬狩り担当の職員にも協力してもらって、みんなで沢という沢に入って水と岩石をとってきて、水の方はいまの化学分析の人達に調べてもらい、岩石の方は僕らが調べたわけです。その結果、自然の水にも六価クロムを含むものがあることが分かった。こうして分析の人達とも一緒になって、会社や住民に正しい事態を知らせることができたわけです。

研究者・技術者の汚染問題への関わり方  
その後何年かたってから、今度は全く別の会社で六価クロムの廃液を地下に捨てているという事態がおきました。アーバンクボタ27号に佐藤さんが書いているところです。このときには、汚染源は会社にあることは明らかなんですが、こうした場合、我々は会社をただ一方的に非難するようなことは絶対にしません。とにかく会社と一緒にあって、汚染を浄化していこう。われわれも一緒に歩こうということで、常に会社と仲良くなるように心掛けます。

もちろん、会社の方だって財布と相談ですから簡単には事は運ばないので、ときには脅かしに近いことも言いますが(笑)、そのときにも、会社をよくしてやろうという発想が心からないと絶対にだめです。会社の方だって、そのくらいのことは見抜きます。だから、本当に解決するんだという誠意をもって、こういう調査をすれば、汚染機構が明らかになり浄化できることを、会社と一緒に話し合う。医者と同じなんです。患者の気持ちを察して話し合っていく。そうすれば会社だって、自分の会社をつぶしたくないから金を出してくるんです。この会社の場合でも、汚染機構の解明から浄化対策のかなりの部分まで費用はすべて会社が出したんです。

ところがその後、この扱いが別な行政の役人によって、その人達がやりだすと途端におかしくなってしまうんです。誠意をもって事態に対処する技術屋がいればよいのですが、そうでない場合には、自分たちは殆ど足を運ばないで、ppm値で机上できれいになったか

どうかという結果だけしか見ない。こうなると、住民の方は団交で交渉するから企業との対立だけが激しくなり、あげくには、機構解明や浄化対策に使う金がなくなってしまう。人心は荒れてくるし、汚染は少しも解決しない。もう、何とも言えない情けない事態になってしまう。このように汚染問題では、研究者や技術者の関わり方が事態の進展に大きく影響する。そういう一面もあるんです。

汚染の「場」を見ることの重要性

佐藤 いまの六価クロム汚染のことですが、これをアーバンクボタ誌27号に書いたのは私ですが、この仕事には、楡井さんが長年にわたって研究してきた環境地質調査のノウハウが生きているんです。私は一緒にボーリングの地層コアを分析し、データをまとめていったのですが、その過程でたいへん重要なことを学んだわけです。

地下のことは目に見えませんが、例えば地下水の流れ方は、地下水位を測り、それを図面に描いて判断し、汚染の分布は、水の流れにそって広がり方を予測します。ただこれらのことは、最初は頭の中だけで分かっていることです。それがボーリングを打って、実際に分析したデータと照らし合わせていくと、現実にその通りになっていることがはっきりと分かってくる。これには正直に言って驚いたわけですが、それと同時に、データの方から地下の動きを見ることがだんだんと出来るようになってきました。

また、シルト層が突然に切れているところがあれば、その場所で水は上から下へ抜けていく、汚染も抜けて下で広がっているだろう。厚いシルト層であっても、砂まじりの箇所があれば、そこから水は下へ抜けていき、汚染も下に抜けていくだろう。こうしたことは、データを整理していくときに分かってくるわけですが、ボーリングを打って実際に分析すると、その通りに汚染がでてくるので、抜けていることがはっきりと分かる。

こういうことを、いろいろと経験してきますと、地下地質の分析から、地下水の容れもの

とそこでの地下水の流れがよく分かってくるわけですが、じつはそういう物の考え方があって始めてデータの整理ができる。言い換えると、汚染物質が流れていく「場」を読み取る目が出てくるわけです。

このように地下水汚染の場合には、汚染の流れの場を見ることが一番大事なんです。ところが環境関係や公害関係の研究所には、地質学的な物の見方ができる人、つまり場を見る人がいないんです。分析する人はたくさんいるんですが、そのデータをどう整理するかとなると、場が見えてないから解析の仕方が分からない。さきほど品田さんが自らの失敗を話されましたが、実際には、品田さんはすぐに失敗をリカバーしております。あの話のポイントは、失敗したことよりも、直ちに軌道修正ができた点にあるわけですが、それは品田さんには、汚染の流れの場が見えているからできることなんです。

この辺のことがなかなか理解されないものですから、各地で地下水汚染に取り組もうとしても一向に進まない。汚染物質の分析も大事なんです。一番大事なところは、地下水や汚染物質の入っている容れものの形。それと物を運ぶ力、地下水の動きです。そういう場の中で汚染物質が動いていく。ですから、汚染調査の本質は場の方にあるわけで、汚染物質が六価クロムであっても、有機塩素系溶剤であっても、機構解明調査の本質的な部分は同じなんです。

汚染物質が六価クロムであれば、この物質に適応した分析法を用います。また汚染物質が有機塩素系溶剤であれば、さきほどの鈴木さんの話にあったように、この物質に適応した調査・分析法を新しく開発してこれを使っていきます。しかもこの物質は地下で変態していくのですから、場の問題は一層重要になってくるわけです。

そしてこの場合、汚染現場の地下構造は、その場その場で違って、1つとして同じ構造のものはないという、その点が重要なんです。つまり、ある特定の汚染物質の分析法に

ついては一般的に適用できるのですが、肝心の場の構造については、汚染現場ごとに明らかにする以外にはないわけで、それが君津の方法なんです。従って、汚染の場を見ることができる、そういう目をもった人がいないとうまくいかない。

いま各地の汚染現場には君津で開発した分析法だけは普及しているんですが、肝心の機構解明にまで進んでいるケースは、全国的にみて非常に少ない。この原因は、やはり場を見ることがの重要性が理解されていないからではないか、場を見れる人が携わっていないからだろう。私はそのように考えています。

日本の公害・環境問題の中での地質汚染  
鈴木 日本の公害・環境問題は、よくppm行政といわれるように、行政側でこれに携わっている技術分野のほとんどの人は化学屋さんで、これらの人々が日本の公害問題、特に大気汚染や水質汚濁の問題を大きく前進させてきたわけです。

ただ大気や水というのは、媒体としては比較的均一で、汚染物質の拡散・希釈という方法が有効に使えます。ですから発生源さえ抑えれば、汚染もいわば短期間の現象として制御できる。それで汚染物質を分析しチェックして、発生源からの排出を規制する。発生源の方でも、これに心えるという格好で事態を進めることができたわけです。

ところが地下の汚染の場合には、いくら汚染物質の排出を規制し、地下浸透を止めさせても、すでに地下に入っている汚染物質は、大気や表流水のように簡単には動いてくれないので、長期にわたって地下に残ります。そのとき日本ではどうしたかということ、地下の汚染を浄化するのではなく、代替水源を求めるという対症療法でその場をしのいできてしまったわけです。同時に、汚染による健康被害の防止という側面だけが強調されてきた。

この点が、アメリカやヨーロッパとは違った日本の環境・公害対策の大きな特徴の1つなんです。ですから有機溶剤のように、すでに地下に汚染源のあることは明らかな場合でも、

これを浄化しようという体制が備わっていない。その点に大きな問題があるんです。

楡井 いまの鈴木さんの話のように、日本の公害問題では、大気汚染や水質汚濁は主として物理化学的手法で、いわゆるppm行政で効果をあげてきました。その間にも、日本経済はどんどん成長していった、そのことは大変結構なんです。やはり汚染物質や廃棄物をださないで大量の製品をつくれるはずがないわけです。では、大気や表流水を余り汚さずに、それをどこへ持っていったかということ、これらはみんな、我々のいう地質圏に運ばれてしまった。それでいま、地質圏のあちこちにこうした汚染が出始めている。

これに輪をかけているのが、内陸工業団地に誘致された半導体工場なわけです。臨海コンビナートで村や町が成長したのを見ているから、今度は内陸の村や町でも、自分たちのところに工場にきてもらって成長したい。そこに、公害のない工場が来るとなれば誰だって賛成します。こうして、地下水の涵養域である台地の上に工場を誘致した。

そのときには、下水道などの施設はまだ不備な場合もありますし、工場の方は、とりあえず暫定的なら構わんだろうということで、工場の廃液を地下浸透させてしまう。その廃液に有機溶剤が含まれていたわけです。当時は有機溶剤は有害物質ではなく、法律に触れることもなかった。ですからいま、これらの汚染源が全国で何千カ所もあるといわれているのも、いわば必然の結果として生じたことなのです。

そして有機溶剤が有害物質であることが分かってくると、今度は工場に排出規制をする。これは、それまでのppm行政でやってきた一番得意の手法なわけです。しかし、地下の汚染源に対しては何一つできない。いままでの公害の歴史の中で、本腰を入れて地下の汚染に取り組んだことが一度もないから、調査の手法も浄化の手立ても全く知らないという状態になっていたわけです。

このように地下の汚染問題には、さまざまな

過去の事情が絡んでいて、一向に解決への出口が見えてこないのですが、それに加えて、実は廃棄物という大きな予備軍も抱えているのです。いってみれば、いままでの環境・公害問題全体の矛盾のツゲがすべて、地質圏の汚染という形で集まってしまっている。

自然界では、大気圏・水圏・地質圏は連続していますから、地質圏の汚染物質は、将来必ず水圏や大気圏にも広がっていきます。我々の目から見れば、このままの状態が続いていけば国土が汚染してしまい、地下水資源を始めとした地質環境資源が全面的に破壊されてしまうだろう。地下の汚染問題はいま、環境問題は当然のこととして資源問題にまで発展し、拡大してきている。そのことを、本当に心配しているのです。

#### 地質汚染に対する調査・対策の進め方

ともかくこうした状況の中では、汚染サイトを一つ一つきっちりと解決し、実績を重ねてみんなのコンセンサスを得ることが一番重要なことです。ですから、君津のような大規模で難しい汚染サイトを初めて手がけて、その解決に成功した。つまり地質汚染は、解決しようと思えば解決できることを、実績として示した意味は実に大きいんです。

君津の問題がきっかけになって、その後すぐに千葉県では地下水汚染防止対策指導要綱をつくり、県内の各市町村が中心になって地質汚染の調査・対策を進めています。この方式では、汚染源が確定するまでの調査費用は市町村がもちますが、財力の弱いところは県が補助金をだして、市町村が安心して調査できるようにしています。そして汚染サイトごとに、市町村の担当者とわれわれのような研究者・技術者とが一緒になった調査チームをつくり、一つ一つ汚染サイトを解決していつているわけです。

市町村単位で仕事を進めているので、市町村の人たちは熱心ですし、汚染源の会社の方とも仲良く、脅しもすかしも両方ありますけれども、ともかく一緒に歩こうということをやっているわけです。こういう現場は、県内で

はいま約20ヵ所ほどありますが、その中には汚染をほぼなくしてしまったところもありますし、あるいはさらに新しい課題に取り組んでいるところもでてきています。

ただほかの県をみると、我々と議論して本格的な機構解明まで進んでいるケースがまだ僅かしかないわけで、その点にさびしさを感じます。環境問題を真剣に考えている若い世代の人々が一番悩んでいるようなんですが、世代を問わず、この問題に正面から取り組んでほしい。そして汚染サイトの大小でなく、1つの汚染現場で、機構解明から浄化対策までを成功させてほしいと思っているわけです。地質汚染の機構解明の技術面では、アメリカよりもずっと進んでいるんですから。

#### アメリカの地質汚染調査と日本

編集 アメリカでは、地質汚染の問題はどんな具合になっているんですか。

榎井 私たちも、何回もアメリカに行って実状を見ていますが、地質汚染の調査や対策の技術面では、間違いなく私たちの方がずっと進んでいます。というのもアメリカでは、地質ポーリングをして汚染を調べるときに、君津でのような精密な地層汚染診断を全くしていないんです。基本的な調査の仕方の問題があるように思います。

ただ環境政策となると、これは、アメリカの方が格段に進んでいます。ご存じのようにアメリカでは、スーパーファンドという非常に強力な環境法が制定されています。この制度では、汚染企業がEPA(アメリカ環境保護庁)によってスーパーファンドに指定されると、EPAや州政府の水質保全局は、住民と協議した上で、汚染企業に対し、汚染した地下水を復元するための調査とその対策を行うよう勧告します。この勧告は、連邦政府の名でだされるわけですが、汚染企業がこれを怠ると、3回の勧告を限度に社長を逮捕してしまうというような強権も発動できる。そういう厳しさをもっていますから、どんな会社でもこれに従って調査・対策を行うわけです。また、汚染企業の行う調査計画やその経過は定期的

に公開され、住民がこの調査結果を検討する場合には、住民のコンサルタントへの相談料や調査費がスーパーファンドから支出される。そして汚染した地下水は、たとえば2,000年までにトリクロロエチレン濃度を5ppbにするというような最終的浄化目標値を定め、その目標に向けて対策が進められるわけです。少し古い資料ですが、1989年11月の時点ではシリコンバレーでの地下水汚染現場は141地点、このうちスーパーファンドの適用を受けた現場は、1990年5月現在で29地点です。これらの汚染サイトの工場名・所在地・操業状態・指導監督の行政機関とスタッフの構成などはすべて公表されているので、私どもでも簡単に知ることができます。

ところが、これだけの素晴らしい制度をもちながら、実際には、アメリカでは地質汚染の解決がなかなか進んでいないのです。これにはさまざまな事情があると思いますが、私の感じている問題点は、2つほどあります。

1つは、アメリカは、汚染原因者負担の原則によって、加害者がすべてを負担するわけですが、その加害者というのは包括責任なんです。つまり、汚染源の会社はもちろん、その会社に融資している銀行、土地を所有している不動産会社、廃棄物を埋設した会社など、その他さまざまな関係会社全部の責任になってくる。それも汚染発生時にまで遡って関連会社の責任が問われるわけです。そうするとそれらの会社の間では、責任の分担をめぐる訴訟がおきてくる。アメリカは本来が訴訟の国ですから、これらの会社の間での訴訟が絶えずおきている。こうして時間と金ばかりかかってしまう。これが1つです。

もう1つは、汚染源の会社が地下水の復元調査や対策を行う場合に、EPAや州の水質保全局がこの指導監督にあたることはあたるのですが、その際に君津のように、公的機関の技術者がコンサルタントと一緒に「調査チーム」をつくって、これに対処するというシステムがないんです。

ですから、汚染源の会社には、環境コンサル

タントが直接に結びつくという恰好で仕事が進められる。そうすると、会社の方は調査のことはよく分からない。コンサルタントの方は、仕事がいつまでも続く方が自分らの利益になるので、どうしてもそうした傾向に陥りがちになる。責任ある公的機関の技術者が携わっていないので、その辺のチェックが甘くなり、精密な地層汚染診断が行えるような雰囲気は全くみられないわけです。

一方、EPAは国立の研究所や大学の研究室に多くの金を支出し研究を奨励しますから、研究の方は大いに進んで、いろいろな浄化のテクニックがでてきます。そうすると、今度はマニュアルをつくる。だからマニュアルだけはたくさんできるわけで、それでEPAは、これを使って進めなさいというわけです。ところが現場では、正確な地層汚染診断はしない、汚染の場も完全に把握していない環境コンサルタントが多いものですから、マニュアルの現場対応が一致しないことが多く、それで、進まない場合がでてくるんです。

このように、スーパーファンドという素晴らしい法律をもちながら、それを十分に生かしてないのがアメリカの現状のように思います。それに比べると日本の場合には、制度的な面では、数段以上も遅れています。汚染した地下水を復元するための制度的な保障はなく、代替水源に切り替えるだけですませてしまうというような乱暴なことを平気でしてきたわけです。ただこれからの時代は、国際間の情報交流が一段と密になり、また国際レベルで環境問題が厳しく論議されてきますから、地下水に対するこうした態度は許されなくなるだろうと私は思っています。

それともう一つ、この汚染を国土という立場で比較すると、日本はアメリカに比べれば、国土は狭いし、生産活動や生活に適した地域はさらに小さい。その僅かな地域に汚染が広がっているのですから、汚染のもつ意味は比較できないほど深刻なはずですが、ただ、ともかく日本でも、これまでの話でお分かりのように、すでに問題解決の実績をもっています。

地質汚染の機構説明の方法や浄化対策については、ほぼ完成に近いところまでできていて、問題の解決には十分な方法と技術とをもってしているわけです。ですから、いま日本で本当に地質汚染を解決しようという気持ちがあれば、できないことはないと思います。

多層集水井戸による地質汚染の深層化  
ただ地質汚染というのは、それが地下水流動系と関連しているだけに、早期の解決が最も望ましいのです。じつは最近、多層集水の井戸(幾つかの透水層にスクリーンをもつ井戸)があるかなりのところでは、そこを通路として、汚染が急速に、深層部に広がっていることが明らかになってきました。これはたいへん深刻な問題なので、この事例について少し詳しく紹介します。

《汚染現場の地質環境と地層汚染の状況》  
図4・18がその地質汚染現場で、ここは台地上にあって、南北から沖積低地の谷がせまっている局所的地形のところですが、この場所には廃棄物処分場があるのですが、ここからテトラクロロエチレン(PCE)が地下へ浸透していったわけです。それで、S-1からS-8までの8地点で地層汚染診断を行い、さらにこれらの地点には各透水層ごとに地下水汚染観測井を設置して、地質汚染の状況を調べました。

図4・19は、この地質汚染現場のS-8・S-2・S-5・S-3地点をとる地質断面図です。図に示すように、通気帯中の透気層は、上位から第1透気層、第2透気層、第2B透気層の3層からなります。

透水層としては、上位から第1透水層(常総粘土層上の宙水層)、第2A透水層(第2A難透水層上の宙水層)、第2B透水層(自由地下水)、第3A透水層、第3B透水層、第3C透水層、第4透水層の7層からなり、第3A透水層より下位は被圧透水層です。

また難透過層としては、第1難透水層(常総粘土層)、第2A難透水層(第2Aシルト層)、第2B難透水層(第2Bシルト層)、第3A難透水層(第3Aシルト層)、第3B難透水層

(第3Bシルト層)、第3C難透水層(第3Cシルト層)、第4難透水層(第4シルト層)の7層が存在します。

そうしますと、廃棄物処分場直下(S-2)の地層汚染診断結果では、上位からほぼ連続して地層汚染が認められ、一番深いところでは、第3C透水層・第3C難透水層にまで汚染が及んでいます。ただし、第3B透水層・第3B難透水層(最下部を除く)では、地層汚染は見られません。

一方、隣のS-5地点での地層汚染診断結果はどうかというと、ここでは、上位から第3B透水層までは汚染が見られません。それが、第3B難透水層の最下部・第3C透水層・第4透水層というように、より深い方の地層でいきなり汚染がでてきます。その東側のS-3地点もほぼ同様で、地層汚染は第3C透水層だけに認められます。また、S-2の南西側のS-8地点でも第3C透水層の一部のみに汚染が見られるという状況です。

このように汚染源周辺域では、主としてその深層部の方だけに地層汚染が生じているという、そういう特異な形で地層汚染が広がっているのがこの汚染現場の特徴です。

《地下水流動と地下水汚染ブリューム》  
では、この汚染現場の地下水流動と地下水汚染ブリュームはどうかというと、それを示したのが図4・20の(a)から(e)までの5枚の図です。まず各透水層の地下水流動をみますと、第2B透水層は、この地下水面が自由地下水面のため、局所的地形に支配された地下水流動系になっています。

第3A透水層は、北西側と北東側から流動し、S-2の南側に涵養しています。第3B透水層も、東側と西側から流動し、S-2の南東側近くに涵養しています。

第3C透水層は、S-2付近から放射状に地下水が流出しています。第4透水層も、第3C透水層と同じく、S-2付近から放射状に地下水が流出しています。

次に、S-2付近の各透水層の地下水位をみると、下位の透水層ほど低くなっています。つ

まり、上位の透水層から下位の透水層へと水が流れるわけで、被圧透水層であっても下位の透水層ほど地下水位が低いのは、人間による揚水活動が関与しているからです。

一方、各透水層の地下水汚染のブリューム図をみると、どの透水層でもS-2付近に高濃度部が存在します。ただし、第3A透水層・第3B透水層では、S-2付近は地下水位の低い部分(涵養域)にあたっているため、汚染地下水は周辺に流出しにくい状況にあります。それに対して、第3C透水層・第4透水層では、S-2付近は地下水位の高い部分にあたり、この付近を中心に放射状に地下水が流出していますから、汚染地下水もまた周辺に広がっていきます。そして前述したように、S-2付近では地下水流動は上位から下位へ、つまり第3A透水層・第3B透水層から第3C透水層・第4透水層へ向かいます。

#### 《上下の透水層を連結する多層集水井》

こうして見てきますと、この現場の特異な汚染形態は、S-2付近での地層汚染が、深層の第3C透水層にまで達している点に求められます。では、どうしてS-2付近では、地下に連続性のよい難透水層が幾層も発達しているにもかかわらず、深層の第3C透水層にまで汚染が及んでしまうのか。この疑問に対しては、S-2付近には、第3A透水層・第3B透水層と第3C透水層・第4透水層をつなぐ地下水や汚染物質の通路があると考えて始めて理解できます。それで図4・19には、S-2地点のすぐ右側に「地下に存在する既設の多層集水井(推定)」を描きました。

関東地下水盆には、地下に埋もれた多層集水の井戸がたくさんあるのですが、この辺りにも、以前には使用されていた多層集水の井戸があったと思われます。そして、ある時期からこの井戸を使用しなくなり埋め戻したのですが、そのときに井戸の上部だけは埋め戻さなかった。そのために、地下に残された各透水層のスクリーン部や井戸のウラゴメ部(孔壁と井戸管の間を埋めた人工砂礫層)を通

路にして、上方から下方へ地下水が流動しているのです。

このように、この汚染現場で見える限り、有機塩素系溶剤による地質汚染は、多層集水井を介して、いきなり地下深層に波及しています。多層集水井の構造は、いま揚水中のものも、地下に埋め残されているものも同じですから、この深層化は、多層集水井のある殆どどこで発生します。

こうして、水より比重が大きく、水中を駆け足で落下する有機塩素系溶剤の地質汚染は、多層集水井と関連して地下水帯の深層部まで速やかに広がっていき、やがては地下水盆内の地下水の質そのものを変えてしまいます。さきほど地質汚染は、地下水資源を始めとする地質環境資源を全面的に破壊してしまう心配があると申しましたが、この恐れは、多層集水井の存在によってさらに加速し、深刻さが増大しています。

#### 地下水盆の修復とその管理

##### 《従来の地下水盆管理の問題点》

これまで関東地下水盆では、水準測量網や地盤沈下・地下水観測井網を充実させ、地下水資源の持続的利用とその環境管理を成功裡に進めてきたわけですが、その際、何よりも地下水流動を中心として帯水層の単元を、すなわち透水層の単元を重視してきました。ですから、揚水活動のための多層集水井が透水層単元に大きく影響し、地下水盆の水文地質構造を変化させている事態についても、もちろん把握していたわけです。

ただこれまでの段階では、地下水の量的収支と地盤沈下に関わる環境管理が中心的課題であったために、多層集水井による地下水移動と透水層単元の破壊が、特別な問題として浮上することは全くなかったわけです。つまり、地下水盆における地下水流動系を、専らその量的側面だけに限って捉え、管理していれば満足できることが殆どだったのです。

ところがここに、水より重い有機塩素系溶剤が多層集水井を駆け落ちるといふ、誰もが予想もしない事態が各地で発生したのです。こ

の点になると、いくら予想できないこととはいえ、やはり地下水盆の環境に責任をもつ者にとっては自責の念にかられます。地下水流動の質的側面を過少評価した、甘い認識がなかったとは言い切れないからです。

##### 《地下水盆管理の新段階》

いま、多層集水井による地質汚染の深層化は、各地の地下水盆下の見えないところで、静かにそして着実に進行しています。しかし、地質汚染の深層化防止は、正確な地質汚染機構の解明をもとに浄化対策を進めていくことで達成できるのです。現にこの問題に取り組んでいる汚染現場や、廃棄物処分場からの漏汚水問題に取り組んでいる現場でも、そこに生ずる技術的難題をほぼ解決しております。

ただこの場合、地下水盆を破壊から守り、これを修復していくという立場で対処することが必要で、その過程で、地下水盆における地下水流動系を質・量ともに環境管理できる、より高次の体制をつくっていく。そして、国土の貴重な水資源を未永く利用できる体制を築いていく。地質汚染に対しては、どの地域でもこうした展望を固守しつつ、目前の汚染を解決していく態度が必要と思います。

##### 《発展途上国の地下水開発と技術援助》

最後になりますが、いま触れた問題は、じつは日本の国内だけに止まらないのです。多層集水井による地下水開発は、経済発展を急ぐ発展途上国に対しても、わが国をはじめとした先進国からの技術援助として行われていることも多いのです。しかし、地質環境資源のもつ本質的な側面を度外視して、地下水の量のみを求めるいままでの技術には反省すべき点もあります。ですから、さわやかな国際交流関係を確保する意味からも、日本国内での私どもの苦い経験を発展途上国の人々に知らせ、健全な技術援助を行うことが必要で、そのことは、わが国の地質環境問題に携わる研究者・技術者の使命と思います。

編集 時間もなくなりましたので、この辺で終わりたいと思います。本日は長時間にわたり有り難うございました。



図4-18 - PCE地質汚染現場の位置図

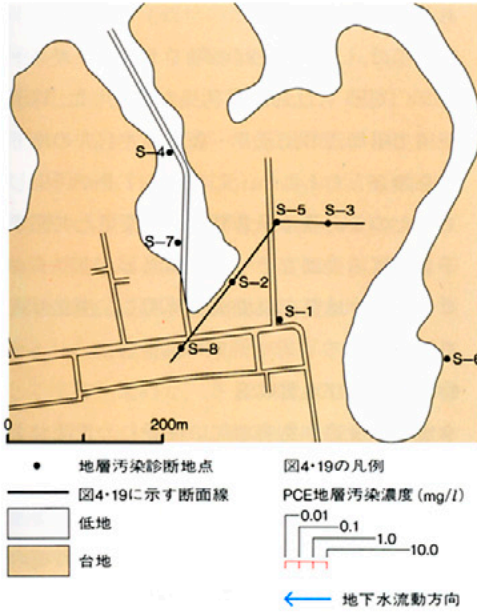


図4-19 - PCE地質汚染現場の地質断面図

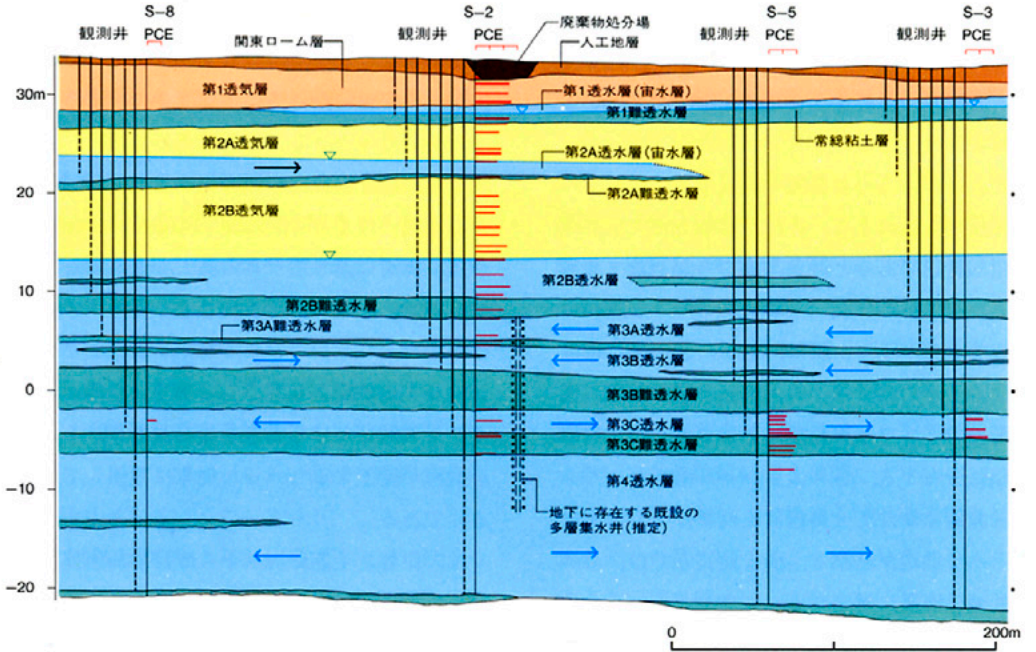


図4-20 - PCE地質汚染現場における各透水層の地下水流動と地下水汚染ブリューム  
 (a) 第2B透水層 (b) 第3A透水層 (c) 第3B透水層

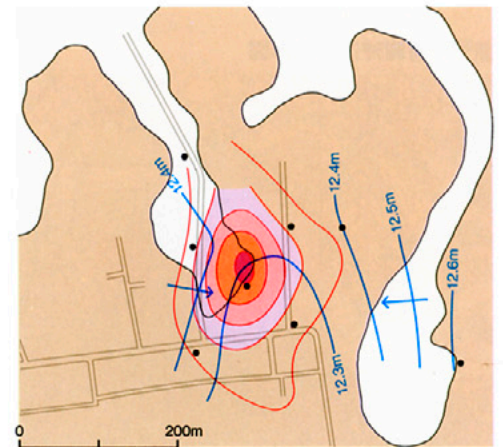
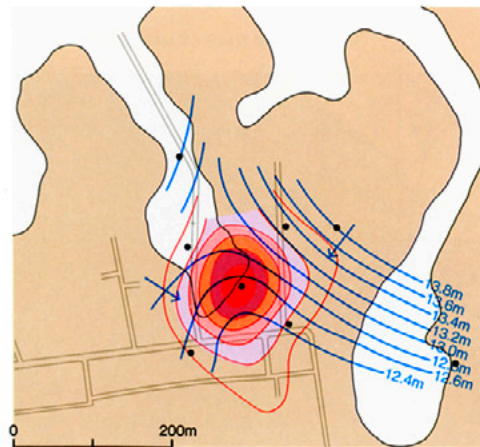
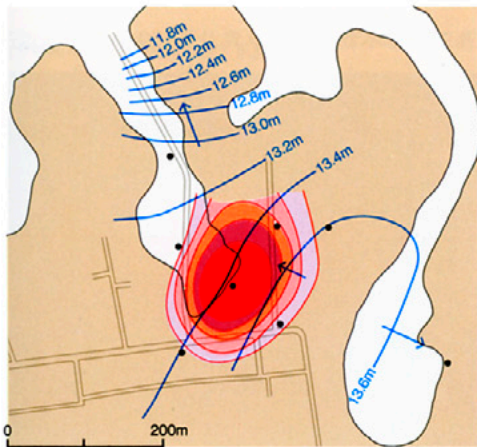
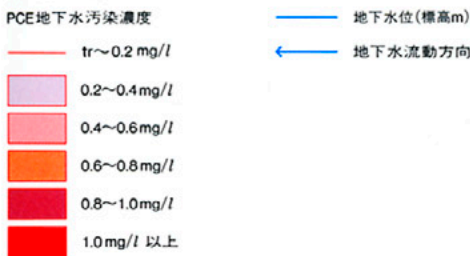
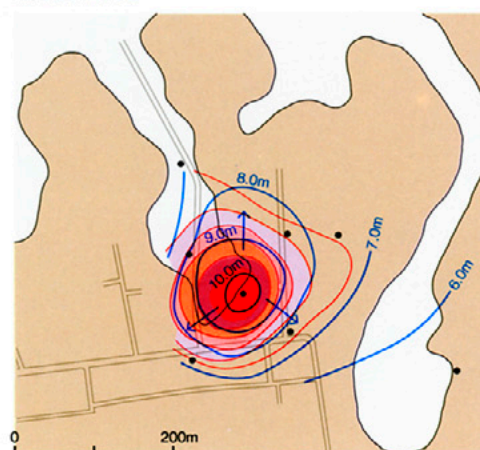


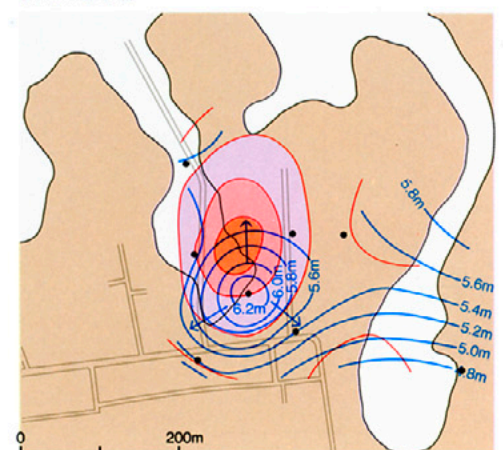
図4-20の凡例



(d) 第3C透水層



(e) 第4透水層



# 3 南房総のクリーンな町

地質汚染浄化に成功した千倉町

千倉地質汚染調査チーム

## 安房郡千倉町

房総半島の南端、太平洋に面する千倉町は昔から漁業の町として知られているが、真冬でも温暖で、色鮮やかな花々が畑一面に広がる美しい町である。

ところが、このお花畑の位置を構造地質学の観点から眺めると、それが地球上の大山脈の頂部付近にあるという、誰でもが一驚する事実が明らかになる。8,000m級の峰々が東西に連なるヒマラヤ山脈は、地球の造山帯に位置する。その南にはこの大山脈と平行して、低海拔のシュワリク丘陵、そしてガンジス河の順に分布する。さらにネパール南端からインド北端にかけては東西に流れるガンジス河にそって低地が延びる。構造地質学では、この低地は海溝に対応する。つまり、ヒマラヤ山脈に源をもつガンジス河の支流は、激流をなして流下した後、シュワリク丘陵を横断し、ネパール南端で海拔数10mになり、海溝軸にあ

たる本流のガンジス河と合流する。

日本列島も造山帯にあたり、関東山地から房総半島南部にかけては、ヒマラヤ山脈からシュワリク丘陵にかけての地質構造に対応させてみることもできる。さらにその東南には、図1の房総沖海底地形図で見ると、房総半島南端の沖からは、海面下9,000mの伊豆・小笠原海溝に達する一本の長大な海底谷が延びていて、地上の河川と同じように多くの蛇行が認められる。つまり、ヒマラヤ山脈とシュワリク丘陵間よりも、シュワリク丘陵からガンジス河にかけて大きな比高があり、そこを大河が流下するといった現象に類似しているのである。

では、伊豆・小笠原海溝から房総半島南部を眺めてみよう。海水をはぎとってみれば、蛇行している海底谷の谷間からは、房総南部の清澄山系などは、房総ヒマラヤといっても遜色のない大山脈として眺められることだろう。

そのほぼ頂上付近に、お花畑のある千倉町があることになる。

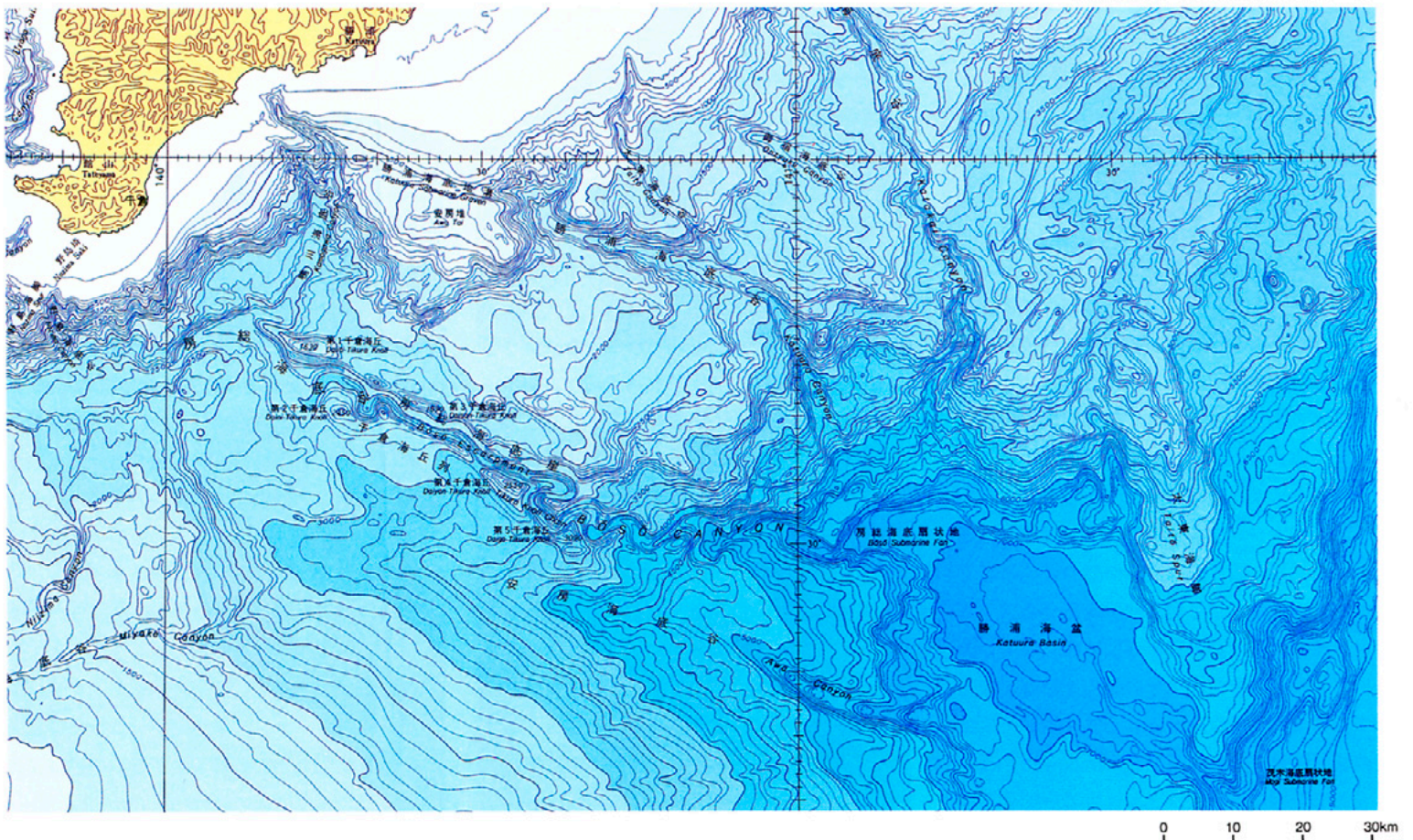
1992年に、この花一杯の町でトリクロロエチレン(TEC)による地質汚染が発覚した。TCE使用工場周辺の民家井・農業用井44井の地下水を調査したところ、このうち7井が汚染していたのである。千倉町は、千葉県と共同で千倉地質汚染調査チームを編成し、トリクロロエチレン地質汚染機構を解明し、浄化対策を達成した。

## 地形および地質概況

本地域は房総半島南端部に位置し、丘陵および岩石海岸部は、新第三紀の固結した堆積岩(三浦層群石堂層)からなる。湾入した臨海部には、それらの岩石を不整合に被い、谷埋め状に被覆する恰好で沖積層が存在する。沖積層は普通は地下に埋積されているが、房総半島南部地域では、隆起した沖積層が海成段丘をつくっていることで特徴づけられる。

図1 - 房総沖海底地形図

水路図誌利用「海上保安庁許諾第070024号」



《千倉地質汚染調査チーム(ABC順)》

相内 誠	新井文夫	熱田みどり	古野邦雄	針谷謙一	樋口朋之
堀江仲安	石渡康尊	岩本広志	水野高良	村田順一	楡井 久
小川かほる	佐藤賢司	品田芳二郎	鈴木喜計	高田義雄	田村正義
竹内智子	高島英世	宇山英気	宇澤政晃	山口秀幸	代市喜茂

このことは、地表に露出する堆積物を直接の対象として、完新世の地史を研究することが可能な、日本でも有数な模式地であることを意味している。これらの研究は、当初、館山市香の“沼サンゴ礁”の化石研究から始まった。その後、1703年(元禄16年)の元禄地震や1923年(大正12年)の関東大地震の際にはこの地域の隆起量が大きかったことから、これらの海成段丘には、過去における大地震を引き金とした地殻変動の履歴が保存されているとして注目を集めた。さらには、地形・地質学的なアプローチから、地震性地殻変動周期や過去の海水面変動の推移を議論した研究がなされている。

房総半島南部地域の完新世海成段丘は沼段丘と呼ばれ、4段に区別されている。特に千倉町周辺では段差が顕著で、高位面から低位面に向かって、それぞれ沼面、沼面、沼面、沼面(元禄段丘:元禄時代の海岸部)、そ

して現在の海岸部に分けられている(中田ほか, 1980)。

安房地域の段丘編年を、地形面の性状と堆積物の両面から検討した横田(1978)は、千倉町瀬戸川流域の露頭観察により、本地域の段丘面を岡瀬田面(中田ほか, 1980の沼面)とし、岡瀬田面の構成層を岡瀬田層としている。

横田(1978)は、岡瀬田層を上部と下部の2層に区分している。岡瀬田層下部は、川尻川沿いの露頭観察によると、基盤岩の直上には基底角礫層が存在し、その上には内湾棲の貝化石、円礫層を含む青灰色シルト層が重なっており、3~4回のシルト砂礫泥炭の変化を繰り返しているとしている。

一方、岡瀬田層上部は、瀬戸川流域ではラミナの明瞭な浅海棲貝殻片を含む粗砂で、地表付近に形成された腐植質層の直下から数m下まで、起源不明の水磨された浮石礫を特徴的に含んでいるとしている。また、岡瀬田面上に

の風成砂中の、黒色の有機質を多く含む厚さ60~150cmの土壌層(クロスナ層)を記載している。

なお、地表の層序と次節に述べる本地域の地下地質層序を対比すれば、第1透水層は岡瀬田層上部に、第1難透水層~第3透水層は岡瀬田層下部に相当する。

地下地質および水理地質

《概要》

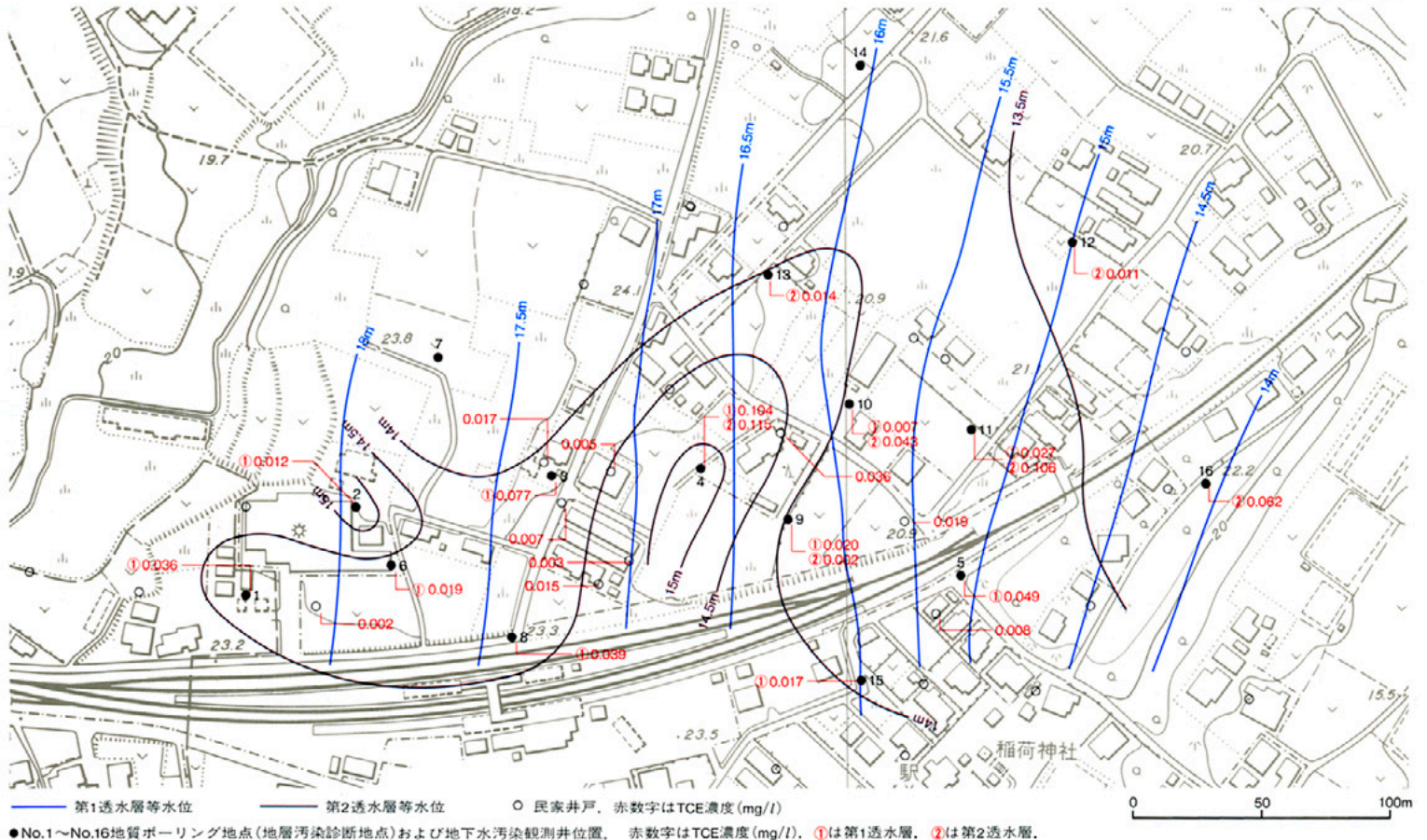
本地域においては、16本のオールコア地質ボーリングを実施し、各孔ごとに堆積物を詳しく調べ、地層区分を行った(ボーリング地点および民家井の位置は図2参照)。

本地域の沖積層は、層相および堆積層により、地表部から順に以下のように区分される。

- 表土・風成砂層
- 貝殻混じり中・粗砂層
- 塊状細砂層
- 細~微粒砂層(以上 ~ は第1透水層)

図2 - 地層汚染診断位置および第1透水層・第2透水層等水位線(1994年2月24日測定)

(地下水水位単位は標高m)



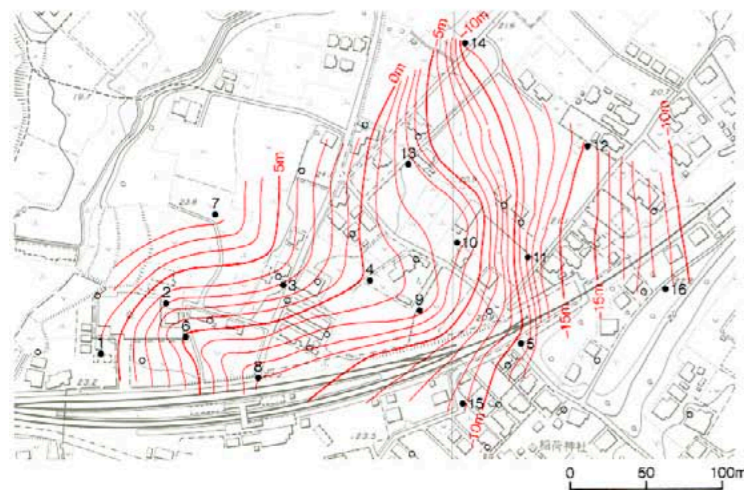
粘土層(第1難透水層)  
 中～粗砂層(第2透水層)  
 粘土層(第2難透水層)  
 泥岩屑礫層(第3半透水層)  
 シルト質微粒砂層(第3透水層)  
 崩積性不淘汰礫層

本地域における各層の水理地質学的な特徴をみると、第三系の石堂層は不透水性基盤である。沖積層は、第1難透水層の加圧層を介在して、不圧状態の第1透水層と被圧された第2透水層に区分される。さらに第2難透水性加圧層の下位に、局部的に第3透水層が存在する。これらの各層の分布形態は、基本的には第2透水層より下位では谷埋め状の形態をなし、特に第3透水層や第3半透水層は、きわめて局部的な分布を示す。第1難透水層より上位の地層は、これらを広く被覆している(図3、図4、図5、図6)。

地下水の流動方向は、概査的に行った民家井戸(不圧の自由地下水面標高)の観測からは、季節的な変動はあるものの、西から東への流動方向が推定された。観測井の設置による地層単元(後述する層と層の半加圧地下水位)での地下水位も、ほぼ同じ結果を得た。一方、第1難透水層を介在する下位の第2透水層の地下水位は、ボーリングNo.4地点に峰をもち東寄り、西にも振り分けた状態を示す(図2)。

なお第3透水層や第3半透水層は、地下水の

図3 - 沖積基底等深線図



流動から取り残された部分である。上部の第2難透水層が厚いため、第2透水層からの補給が閉ざされていること、さらに相互の地下水位の比較しても、第3透水層の圧力水頭が第2透水層よりも高いことにも示されているように、第3透水層の地下水はきわめて滞留した状態にあることが推定される。このことは、電気伝導度にあられる第3透水層の溶存イオン物質が、他の透水層のそれと比較して1桁以上多いことにも示されている。

《各層の層相と分布形態》

(a) 沖積層

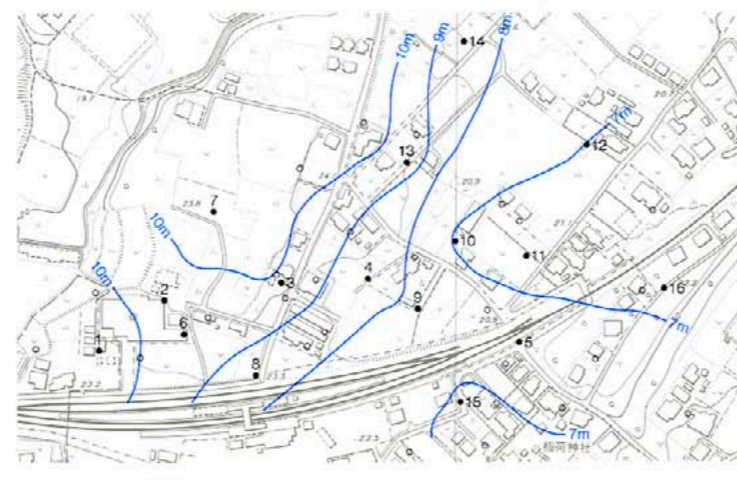
(a)-1 第1透水層

本地域の自由地下水面は地表下5～6mにあり、渇水期と降雨期を比較しても最大2m程度の季節変動が認められる。地質汚染の単元を把握する意味では、本来ならば地下水面より上の通気帯と、地下水帯を区別して述べるべきであるが、ここでは季節変動が大きいので、通気帯と地下水帯を区別せず、地層区分を重視して述べる。図4に第1透水層の基底面形状を示す。

表土・風成砂層

碎石・アスファルト、埋土、耕作土などの人工地層があり、その下に有機質の黒色細粒砂層(土壌層)が存在する。土壌層の下は黄灰色の中～粗粒砂層で、一般に層理に乏しく黄灰色の塵状の風化痕が認められる。白色の水磨された浮石を少量含む。

図4 - 第1透水層基底等深線図



貝殻混じり中～粗砂層

上位層から鮮明な境界で本層に変化する。中～粗粒中に径2mm～1cm大の浅海棲貝殻片を10～15%混入している。部分的に貝殻片の粒径が増し、礫状の挟みを呈する。一般に水磨した浮石片に富む。層厚は、下位の層と相補的な関係になっている。下位層とは明瞭な境界で接する。汚染源の工場内で実施したハンドオーガボーリングでは、1m程度の距離で隣接する2地点で、層の上面の高低差は1m以上にも及んだ。層との境界は単純な浸食面ではなく、風化により貝殻片が溶脱し、波状を呈するのであろう。

塊状細砂層

上位層とは、本層の方が貝殻片中の基質が細粒砂主体であることから区別される。層相は均質・塊状な細砂を主体とし、浮石および貝殻片をごく僅かに含む。本層下部には、浮石が層状をなし密集する部分が認められる。

貝殻混じり粗砂を挟む細～微粒砂層

中～粗粒砂中に径2mm～1cm大の貝殻片を10～15%混入しているほか、少量の浮石を伴う。層相は層に類似するが、基盤の固結したシルト岩のブロックを多く含む。なおこのブロックには、フジツボ・マガキなどの貝殻が付着している。

(a)-2 第1難透水層

粘土層

緑灰色のシルト層である。一般に上位の層に削られる。本層最上面には、縄文海進の際

の外浜浸食の形跡が認められる。粗粒な砂粒がシルト中に埋まっている構造が認められるほか、5cm幅で上位の砂層を引っ張り込んだ砂管(砂質管状生痕)が存在する。

本層は一般に均質で、貝殻片の薄い2枚貝が合弁状態で観察されることもある。中～下部には、淘汰良好な1枚の中～細砂を挟み、この砂は構成粒子径が下部から上部に減少する級化構造が認められる。本層最下部は、暗褐色の有機質シルトで構成され、植物遺体の密集層が存在する。

No.10, No.11, No.15, No.16に認められるように、本層は東南方に著しく薄化する。

(a)-3 第2透水層

中～粗砂層

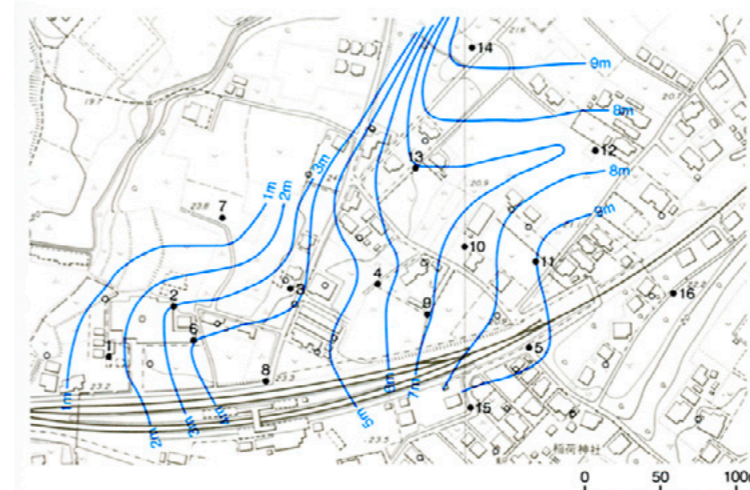
後背地に分布する豊房層や千倉層の砂層に由来する暗黒色の中～粗砂である。一般に層理は明瞭で、級化構造が認められる他、淘汰が良好で、細砂～シルト分の基質を殆ど含まない。最上部にあたる層との接触部付近には、暗褐色シルトを塊状に含む。これは、水たまりなどにできる乾裂痕の可能性もある。なお本層は東方に厚化しているが、他の基盤岩の位置の高い部分では薄くなり、分布形態は基盤構造に規制されている(図5・図6)。

(a)-4 第2難透水層

粘土層

No.7地点を除くすべてのボーリング地点に認められる青緑灰色のシルト層である。上位の層の粘土層に比べ貝化石に乏しい。下部は

図5 - 第2透水層等厚線図



風化した泥岩屑が混入し、全体に有機質の特徴を有する。層厚はNo.12地点で最も厚い。

(a)-5 第3半透水層

泥岩屑礫層

No.5, No.8, No.11, No.12, No.14, No.15, No.16において認められる。径1cm内外の基盤岩に由来する淡緑灰色シルト岩礫よりなる。礫の形状は垂角礫のものが殆どで、良円磨礫も存在する。基質は同質の中～細砂で若干のシルト分を伴うが、含有量は2割以下で、礫支持の形状をなしている。本層でシルト分の多いものは、崖錐性の堆積層が分級状態が悪く未成熟であるために、基質にシルト分の存在する目詰まり状態の半透水層としての特徴をもっている。

(a)-6 第3透水層

シルト質微粒砂層

No.12, No.14で認められる。シルト分を含む微粒砂と細砂の不規則な細互層である。1枚の砂層は級化および逆級化を示し、河川氾濫原堆積物の特徴を有する。ただ入れ物である沖積谷の規模が小さいから、ごく局所的な堆積体であろう。

(a)-7 沖積層縁辺堆積層

崩積性不淘汰礫層

沖積谷の側壁部に偏在して分布する不淘汰な風化緑色泥岩の角礫層である。部分的に有機質なシルト質細砂を挟むが、貝殻は含まない。層相上、礫の含有量以外には層や層の粘土層と区別しにくく、沖積谷の形態が復元さ

れてはじめて層相上の区分が可能となった。透水性は難透水層と評価される。

(b)三浦層群(石堂層)

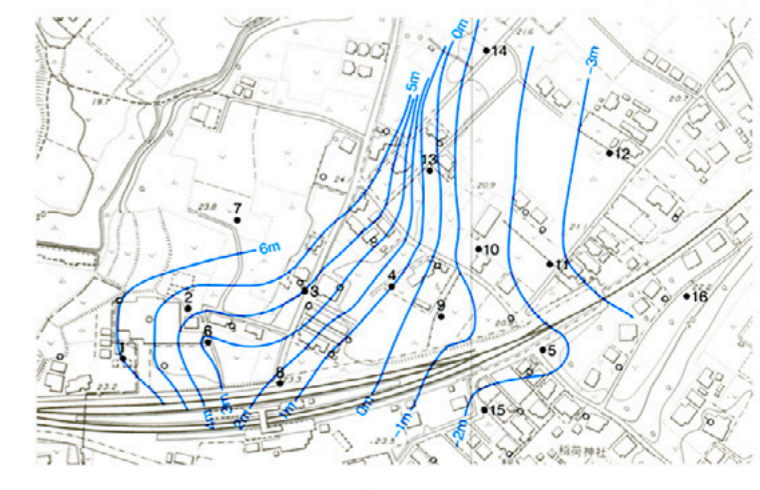
本層は、灰色～青緑灰色の硬質なシルト岩を主体とし、凝灰岩薄層を頻繁に挟在する。部分的には、火砕質な砂岩を挟んでいる。本層は細かいき裂に富むが、このき裂は癒着性のもので透水性が乏しい。観測井設置のさいはスクリーン下部のパッカーにより充分な遮水を施した上、孔底まで盲管の仕上げとした。

《沖積層の堆積過程》

これまで述べたことから、本地域の沖積層の堆積過程は以下のようにまとめられる。最終氷期の低海水準期に谷地形ができる。その後、海水準が次第に上昇するに伴い、本地域では、崩積土による埋横や部分的な氾濫原が形成される。停滞水域は溺れ谷(層)になるが、後背地からの河川の影響による砂礫質の供給が強い。谷の斜面には、崩壊の堆積物である(層)が、さらに河川流水域では層の再堆積性の層が堆積し、谷底部では河床流路が頻繁に変わる砂質河川成の層が形成される。谷地形が不明瞭になり、最後に形成された陸側内湾停滞水域に形成された粘土が層である。

海水面が最も上昇した後は、本地域の埋め立てがほぼ完了し、外洋沿岸域の影響が強くなりだし、砂浜～沖合沿岸域の堆積物が形成される。その際に形成された地層が層から層に相当し、岩礁(礫浜)からの取り込み礫

図6 - 第2透水層基底等深線図



も多数存在する(層)。通常では、波浪が底質に及ぼす影響の少ない沖浜域では、塊状の層や層が形成される。層は、碎波帯の上部外浜域の堆積物である。

やがて海水面が低下し、本地域は乾陸化し汀線付近前浜の地層(層の砂鉄ラミナ細砂)ができるが、陸側からの風成の砂丘の前進によりその一部が壊されていく。

#### 地質汚染調査

##### (a)表層地下空気汚染診断

汚染原因者の可能性が高いA社工場とその周辺578地点で、君津式表層汚染調査法による地下空気汚染調査を行った。その結果を図7に示す。図の地下空気汚染プルームにみるように、最大のホットスポットは前庭のゴミ置場にあり、380ppmという高濃度のトリクロロエチレンが検出された。そのほか建屋内では3地点でホットスポットがみられ、また裏庭駐車場に30ppm前後の地点が存在した。

この調査結果にもとづき、前庭のゴミ置場傍ではNo.1、裏庭ではNo.2の地点でオールコアボーリングを実施し、地層汚染の状況を詳しく調べた。建屋内の3地点のホットスポットでは、人力によるハンドオーガボーリングを行い、汚染の実態を精査した(図8)。

一方、調査の進捗過程で、No.10地点で地下水中に高濃度の汚染が認められたので、その近くの工場とその周辺、また事前に高濃度汚染井戸であることが判明しているNo.10西南の民家井戸周辺、さらにはその近隣の作業所などで表層地下空気汚染調査を実施した。しかし、これらのいづれの地点からも、表層地下空気汚染は認められなかった。したがってNo.10周辺には地表に汚染源はなく、地下水の汚染は側方から移動してきたものであることが確かめられた。

##### (b)地層汚染診断

###### 《オールコア試料による地層汚染診断》

ボーリング地点の位置は、汚染物質の漏洩域と、地下水(ある意味では地下空気)による側方移動域を明確化するという観点から「地質汚染調査チーム」によって決定された。調査

の進展に伴い、高濃度地下水汚染プルームの存在が確認された場合には、その都度「表層汚染調査」によって汚染浸透場所の存非を確かめ、結果的にはポイントソースの汚染源としてのA工場を絞り込んでいった。

地層・地下水汚染プルームの全容が解明された現在では、ボーリング地点は以下のような意味合いをもつ。

No.1, No.2, No.6 = A工場敷地内のホットスポット確認。

No.3, No.4, No.10, No.11, No.16 = 線上に並んだ地下水汚染の顕在域での地層汚染の確認。特にNo.10, No.11は地下水汚染の中軸部に相当し、さらにNo.16はその延長部にあたる。

No.5, No.8, No.9 = 低濃度の民家井戸地下水汚染域。

No.7, No.12, No.13, No.14, No.15 = 地下水汚染プルームの形状確定。

さらにボーリング調査の結果からは、透水層の地下水汚染単元を明らかにし、それぞれの地下水汚染単元に対応して観測井を設置する(図9・図10)。これにより、地下水質の経時的变化をモニターすることができる。

###### 《地層汚染診断結果》

ここでは、No.1~No.16のオールコアボーリングによる地層汚染状況の調査結果のうち、主要なものについて簡単に述べる。なお、図11に第1透水層のトリクロロエチレン地層汚染プルーム、図12に第2透水層の地層汚染プルームを示す。

[No.1]: 層・層の通気帯で地層汚染が認められる。濃度はいずれも0.05mg/l以上、最も高いのは深度2.28mの0.14mg/lで、本地域では最高濃度の地層汚染域となっている。この近傍には、透明で接着剤様の異臭を放つペースト状の団塊が捨てられていた。

さらに層中の深度9.8mでも地層汚染が認められる。これは、層中の第1透水層上部の地下水汚染を引き起こしているものと判断される。

[No.6]: 通気帯に汚染質の痕跡が存在する。

この地点の特徴は、トリクロロエチレンから変態したDCE異性体が検出されたことで、層中の3カ所に1,1-ジクロロエチレンが存在した。濃度は0.556 $\mu$ g/l(0.00056mg/l), 0.603 $\mu$ g/l, 0.386 $\mu$ g/lであった。

[No.3]: 汚染質の大部分は、層基底部分から層・層に存在し、通気帯には地層汚染は認められない。

[No.4]: 汚染質は層および層基底部分に存在し、通気帯では認められない。

[No.10]: 第1透水層の層基底部分から層のほぼ全体にわたって汚染質が認められる。さらに、薄化した第1難透水層(層)を介在して、下位の第2透水層(層)にも地層汚染が集中して分布する。

[No.11]: 第1透水層の層に地層汚染が集中する。さらに薄化した第1難透水層を介在して、下位の第2透水層(層)にも地層汚染が集中して分布する。ただし第2透水層の地層汚染は、上位の地層汚染とは連続して分布していないので、これは、より上流の第1難透水層尖滅部で第2透水層に落下してきた汚染質が、地下水の流動に伴って移行してきたものと考えられる。

なおNo.11も含め多くの地点で、第1透水層と第2透水層の基底部分に単独の地層汚染が認められる。基底部分付近は、一般に粗粒物が多く含まれるので地下水の移流速度が大きく、他の細粒物堆積層と比較して汚染物質が残りにくい。それで複数の地層汚染にはなりにくい。これらの基底部分では、下位のシルト層直上の地下水移流速度の減少に伴って、単独に地層汚染が残されるものと推定される。特に第1透水層基底部分は、粗粒層によるシルト層の削り込みがあって堆積物の淘汰が悪く、地層汚染残留の一因となる。

[No.16]: 層の第2透水層基底部分に地層汚染が認められる。

##### (c)地下水汚染診断

地層汚染診断が終了した後、すべてのボーリング地点には、透水層単元ごとに観測井が設置される。これらの観測井群により、経時的

に地下水位を計測して地下水の流重力方向を知り、あわせて地下水質を現場で分析することが可能となる。汚染質の種類と量の測定は、PID現場分析とガス検知管を併用した。

図15は、1994年2月の地下水位と水質を、地層汚染も含めた地質汚染断面図として示したものである。図の断面は、前述の地層汚染診断結果で触れたNo.1からNo.16までの本汚染地域の主要地点を結んでいる。

さらに汚染質の流動・拡散プロセスを検討するために、透水層別の地下水汚染プルームの経時的変化を示した。図13が第1透水層、図14が第2透水層の地下水汚染プルームで、それぞれには[1993年7月][1993年11月][1994年2月]におけるプルームの状態が描かれている。

第1透水層では、93年7月時点では、汚染源東方下流域のNo.3付近に地下水汚染中心部が存在する。それが93年11月時点になると消滅するが、94年2月時点ではより下流域のNo.4, No.5, No.9地点に絞り出されるように、これらの地点で再び濃度が高くなる。

第2透水層では、No.3よりさらに東のNo.4, No.10付近に汚染中心部が存在するが、94年2月測定時には、中心汚染域はかなり縮小するものの全体として東に移動し、No.11が中心汚染域に変わっている。それに伴い、プルームはNo.16まで伸張している。

No.4付近には、第1透水層と第2透水層で高濃度汚染部が認められる。第1難透水層がこの付近で薄化するため、第1難透水層の遮水能力が低下し、汚染プルームが第1透水層から第2透水層へと拡大するのであるが、さらに以下のような機構がこれに加わる。

さきに地下地質の項で触れたように、第1難透水層の層の粘土層には砂質管状の生痕が存在し、この化石棲管を介して汚染質が下位の第2帯水層に移行する。もう一つは、この付近にある民家井戸と農業用井戸の2つの井戸が多層集水井であるため、井戸を伝わって汚染質が第2透水層に移行する。2つの井戸が多層集水井であることは、その後の揚汚水

図7 - 工場敷地内の地下空気汚染プルーム(君津式表層汚染調査法による)

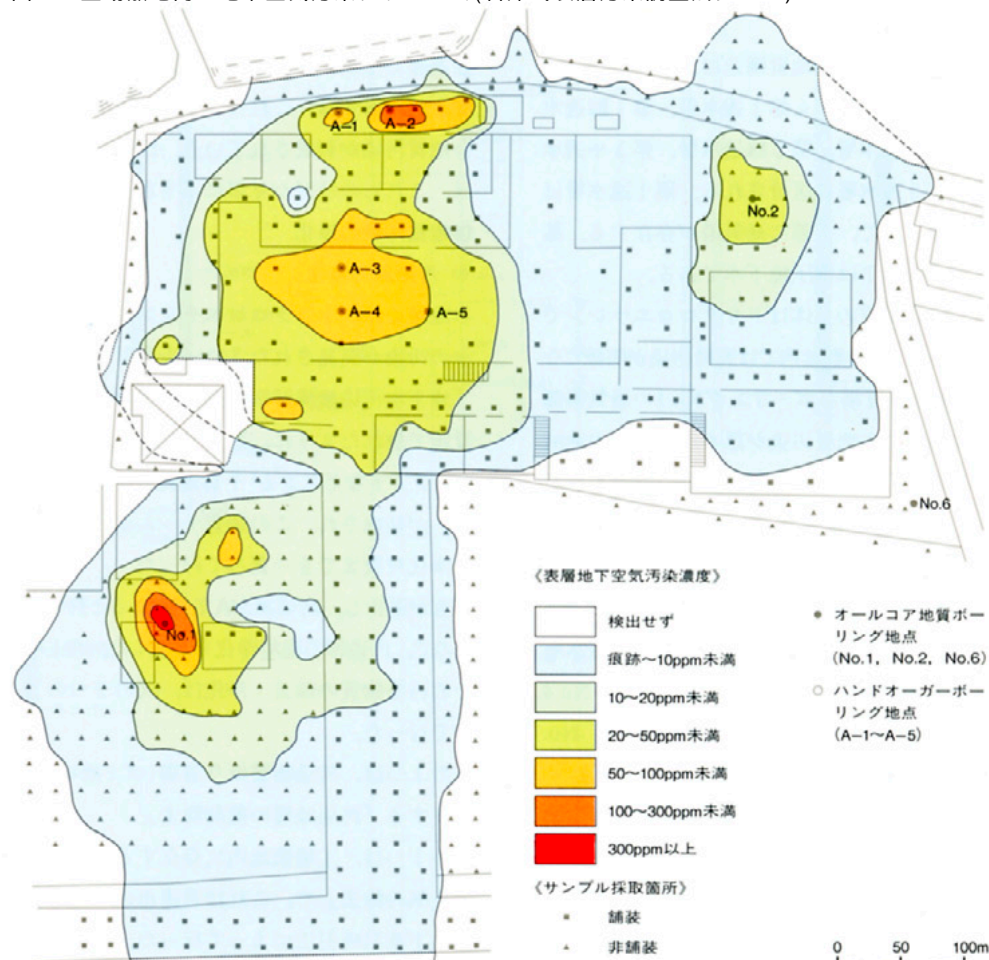
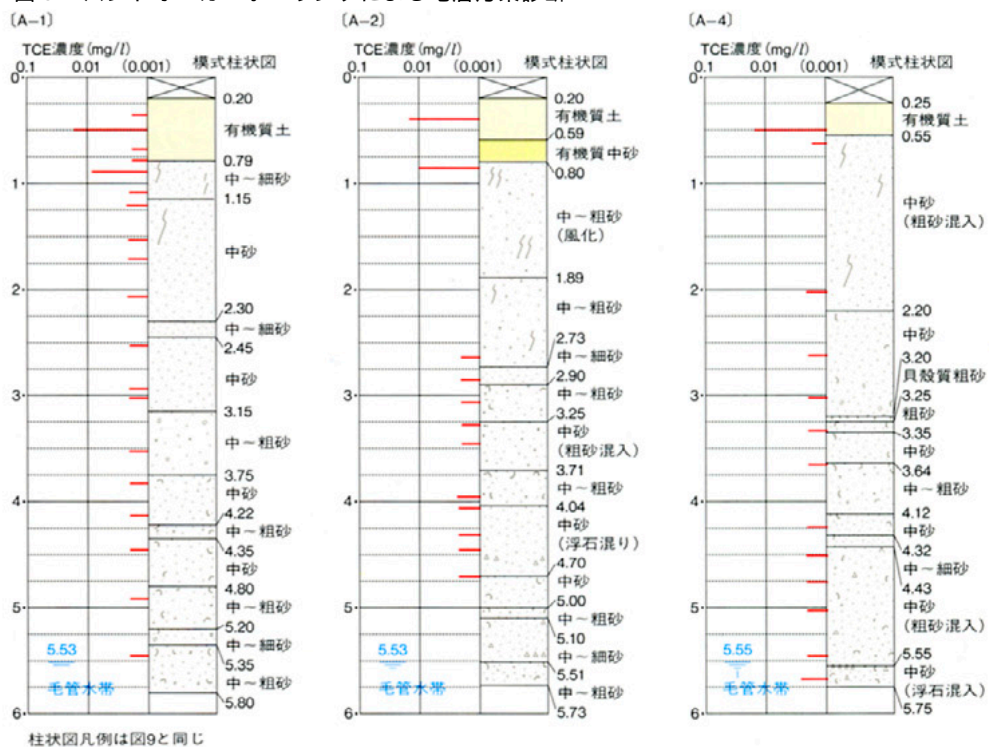


図8 - ハンドオーガーボーリングによる地層汚染診断



試験で明らかにされた。

#### 地質汚染診断結果

(1) 本地域の水文地質構造は、石堂層を水文基盤とし、上位から第1透水層、第1難透水層、第2透水層、第2難透水層、第3半透水層、第3透水層に区分される。第1透水層は不圧地下水で、上部に通気帯が存在する。第2透水層以下は被圧地下水である。

(2) 汚染物質の主体はトリクロロエチレンである。A工場の敷地内では表層汚染が明確になり、廃棄物置場のボーリングNo.1の通気帯部には高濃度の地層汚染が認められた。本地域周辺の他の事業所では表層汚染は認められない。汚染原因者はA工場である。

(3) A工場汚染源の通気帯から浸透した汚染物質は、No.3、No.4の順に、地下水の流動方向に沿って第1透水層を東流する。第1透水層の地下水汚染は、No.1、No.2、No.3、No.4、No.5、No.6、No.8、No.9、No.10、No.11、No.15に認められる。

第1難透水層が薄化するNo.4近傍で、汚染物質は下位の第2透水層に拡大する。この部分に相当するNo.10、No.11では、第1透水層および第2透水層に明確な地層汚染が存在する。第2透水層の地下水汚染は、No.4、No.9、No.10、No.11、No.13、No.16に認められる。高濃度の汚染中心部は、東に移動しながらその範囲が次第に縮小しているが、No.16では低濃度ながら汚染は増加傾向にある。なお汚染物質が、第1透水層から第2透水層に移動する要因の1つとして、多層集水井の存在が無視できない。

(4) 本地域の地質汚染は、その規模も小さく濃度も低いですが、そのためにトリクロロエチレン地質汚染の特徴がよく示されている。汚染源からの汚染物質の供給がなくなっても、一度地下に浸透した汚染物質によって、汚染域は汚染源からより遠方へ、同時により深層で広がること。

また、No.6地点では1,1-ジクロロエチレンによる地層汚染が認められ、No.1、No.3、No.11地点ではシス-1,2-ジクロロエチレンによる

地下水汚染が認められる。両者とも、地質環境でのトリクロロエチレンの脱ハロゲン化変態過程で生成する汚染物質である。こうして第1透水層では、これら3つの物質により複合地質汚染が形成されている。図11～図15には、これらの状況が見事に示されている。

#### 地質汚染の浄化

##### (a) 汚染源の浄化

本地域では、トリクロロエチレンによる地下水の汚染が発見されたさい、千倉町によって「地下水汚染機構解明調査」が実施された。冒頭で触れたように、県・千倉町・地質コンサルタントなどによる「千倉地質汚染調査チーム」が結成され、この調査チームが、調査から浄化対策までを一貫して行った。調査が進捗し、汚染源がA工場にあると判明したので、汚染源の現場浄化を実施した。A工場での汚染物質の除去・浄化は、次の2つの方法で行った。

その1つは、汚染物質仮り置場(ゴミ捨場)に存在する「汚染地層の掘削除去」。

他の1つは、工場敷地内に存在する「汚染地下空気の除去」で、これは君津市の承認を得て地下空気吸引法によって行った。

後者の方法は、本地域の地形・地質の特徴と汚染の状況に適合し、汚染物質の除去・浄化にきわめて有効な方法となったので、ここでは、それについて詳述する。前者の汚染地層の掘削除去については、本地域独自の特徴もないので省略する。

##### 《汚染現場の性格と「地下空気吸引法」》

本地域は、冒頭で述べたように房総半島南端に位置し実新世の海成段丘上にある。海岸に沿って伸びる現在の国道410号線は、元禄大地震により陸化した部分と言われているが、度重なる地殻変動の結果、本地域の沖積層は最高で25m程度の海拔高度を保っている。この点が、他の地域ではみられない本地域の特徴の1つである。

このため本地域では地下水位が低く、地表から5～6mの深さにある。またこの深さまでの堆積物は、主として縄文時代以降の沿岸域で

つもった海成砂から構成されているので、砂層中にシルトや粘土などの挟みがなく、したがって宙水が存在しない。地形・地質にみられるこうした特徴は、汚染物質の滞留や移動など、その動き方に大きく影響する。

すなわち本地域では、5mほどの好条件の通気帯が存在し、しかもここには宙水層がないので、汚染物質は長期にわたって通気帯中に捕獲されてしまう。このことは、これを放置すれば、地下水への汚染物質の供給がいつまでも続くことになるが、逆に通気帯の汚染物質を除去すれば、汚染源の浄化が可能なることを意味する。通気帯の汚染物質は、地下空気吸引法により排除できる。

工場敷地内の表層汚染調査を行ったさい、建屋内のホットスポット周辺ではハンドオーガーボーリングを実施して、通気帯の地層汚染を調査した。これらの調査結果では、極表層部と地下水毛管帯に達した部分にのみ小規模の地層汚染が認められた(図8)。

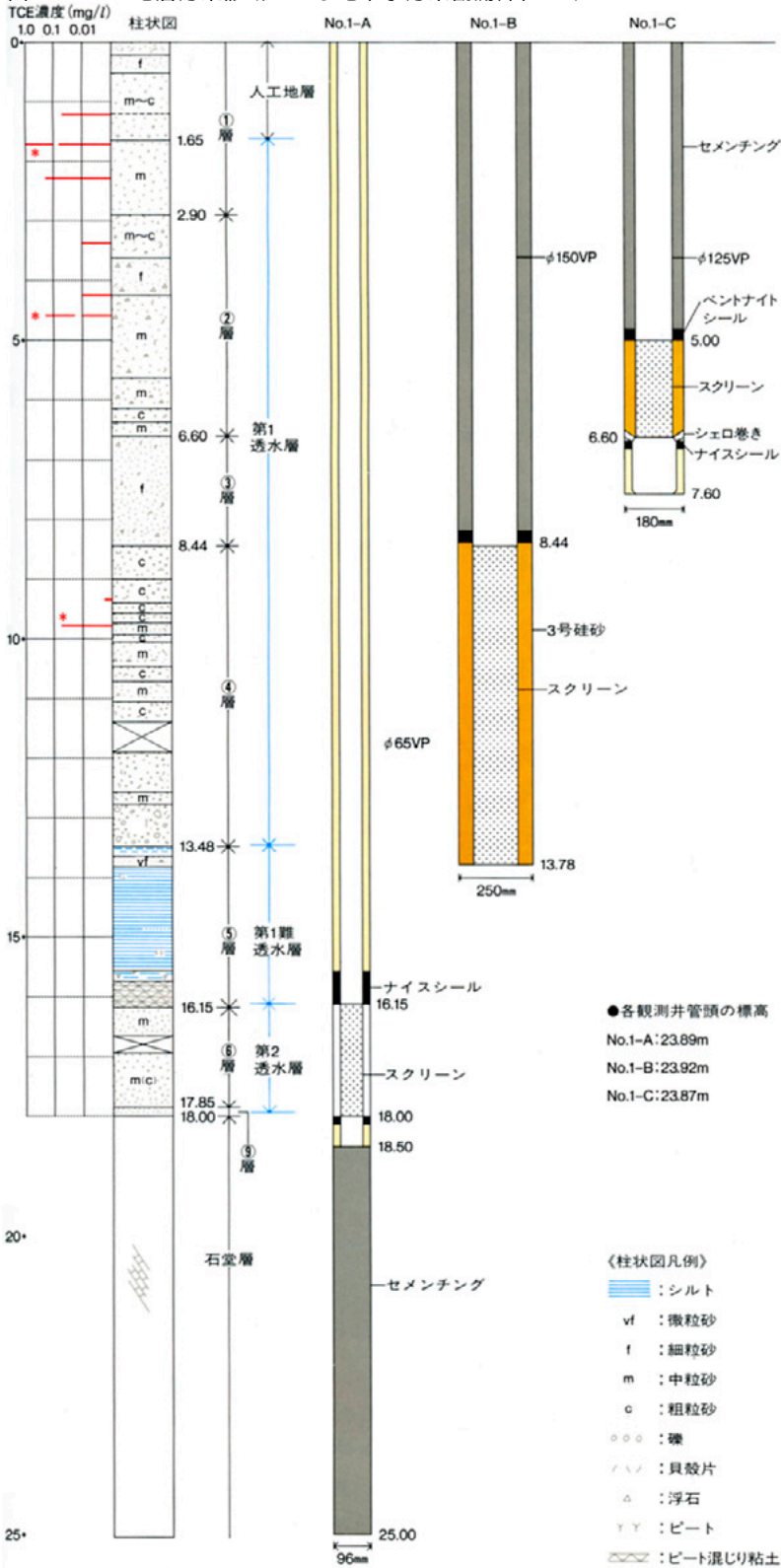
ハンドオーガーボーリングは、建屋内では10箇所、屋外で6箇所の合計16箇所を実施したが、このうち7孔を地下空気吸引井に、残りの9孔を地下空気観測井に仕上げた。吸引井には、50mmの硬質塩化ビニールパイプをストレート加工し、80メッシュのステンレススクリーンで防砂網巻を施した。掘削孔にパイプを挿入した後は、孔壁との間に珪砂を投入し、地下空気吸引による砂粒の吸い込みを防止した。

地下空気観測井は、16mmV P管による多層仕上げを行った。これは、スクリーン部に珪砂をだかせ、盲管部をセメントミルクにより遮閉し、特定深度の地下空気の汚染濃度と真空吸引の差圧をサンプリングするのである。なお5本の地下空気吸引井は、75mmV P管の吸引管に接続して、室外のプロワーまで配管した。プロワーは、3相200V、出力3.7kwで、吸引量5m<sup>3</sup>/分の場合、1,500mm/Aqの能力があるものを使用した。

##### 《地下空気吸引による汚染源の浄化達成》

工場建屋内の地下空気吸引井は、A-3、A-4、

図9 - No.1地層汚染診断および地下水汚染観測井仕上げ



\* : ECD分析(含水補正)

図10 - No.10地層汚染診断および地下水汚染観測井仕上げ

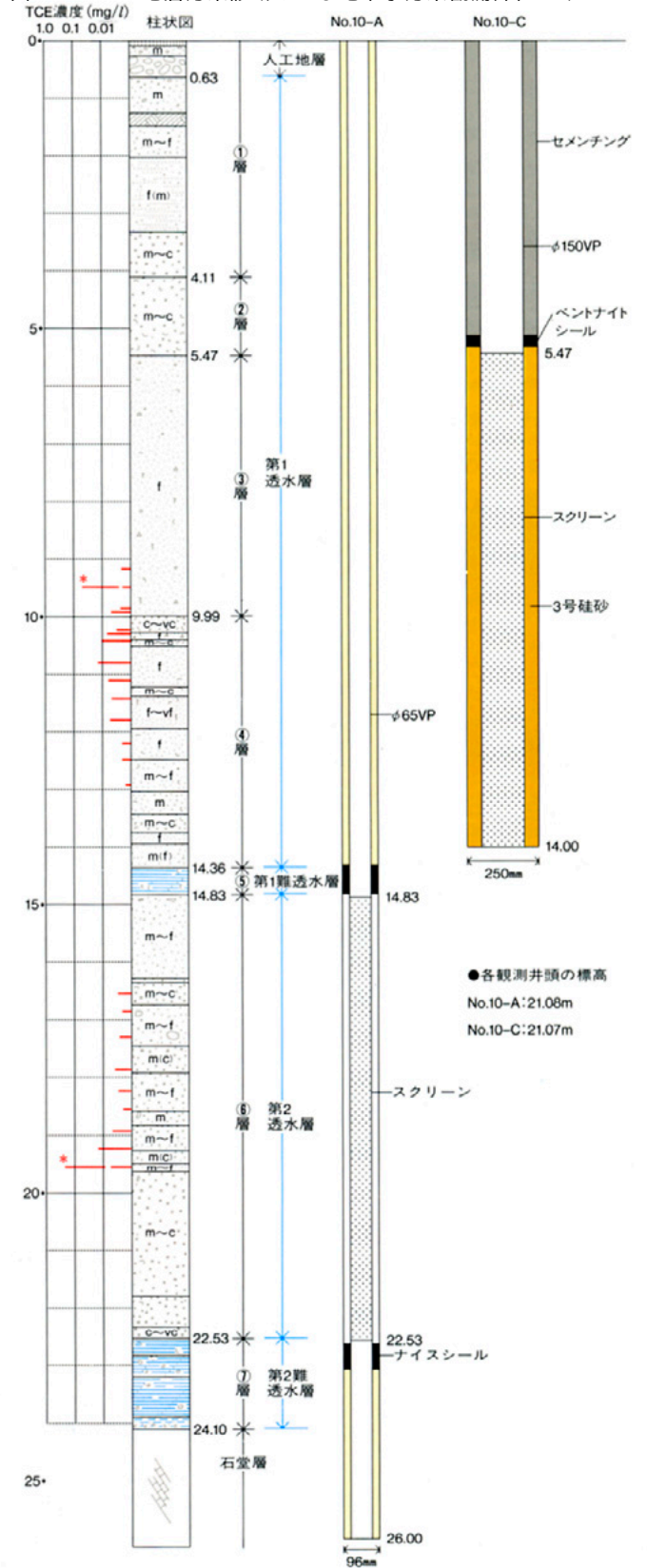
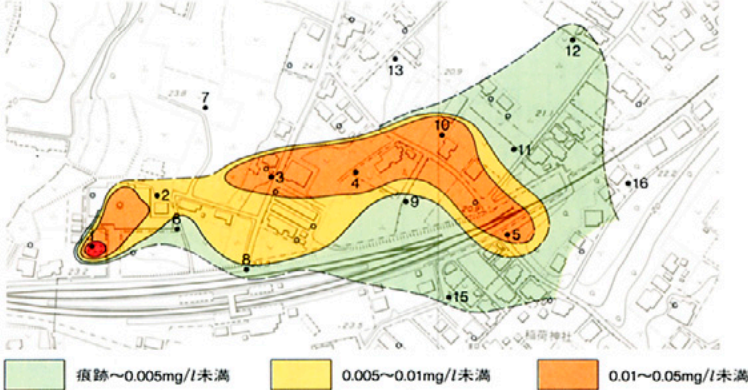




図11 - 第1透水層トリクロロエチレン地層汚染プリューム



地層試料20gを分取後200ccの水に混合攪拌し、500ccの気相部濃度を検知管およびPID(ポータブル・ガスクロマトグラフィ)にて現場分析、分析値のうちECD(公定法)によるものは含水補正値を検討し、上記測定法への変換値を求めた。

図12 - 第2透水層トリクロロエチレン地層汚染プリューム



図13 - 第1透水層トリクロロエチレン地下水汚染プリュームの経時変化 [1993年 7月14～16日]

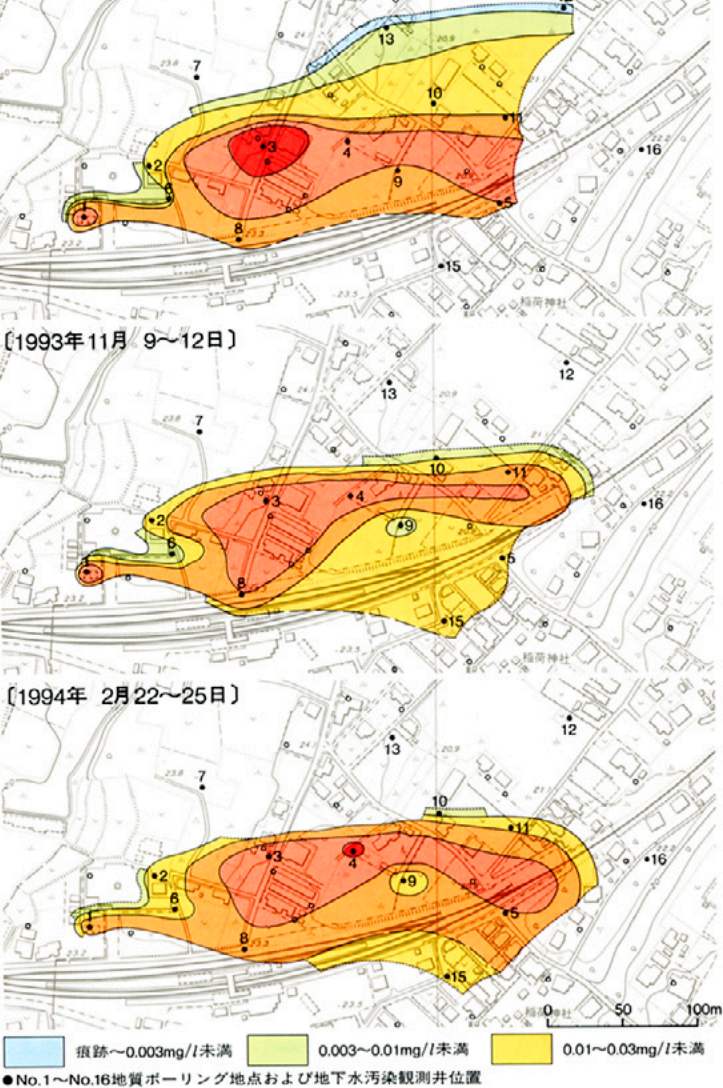
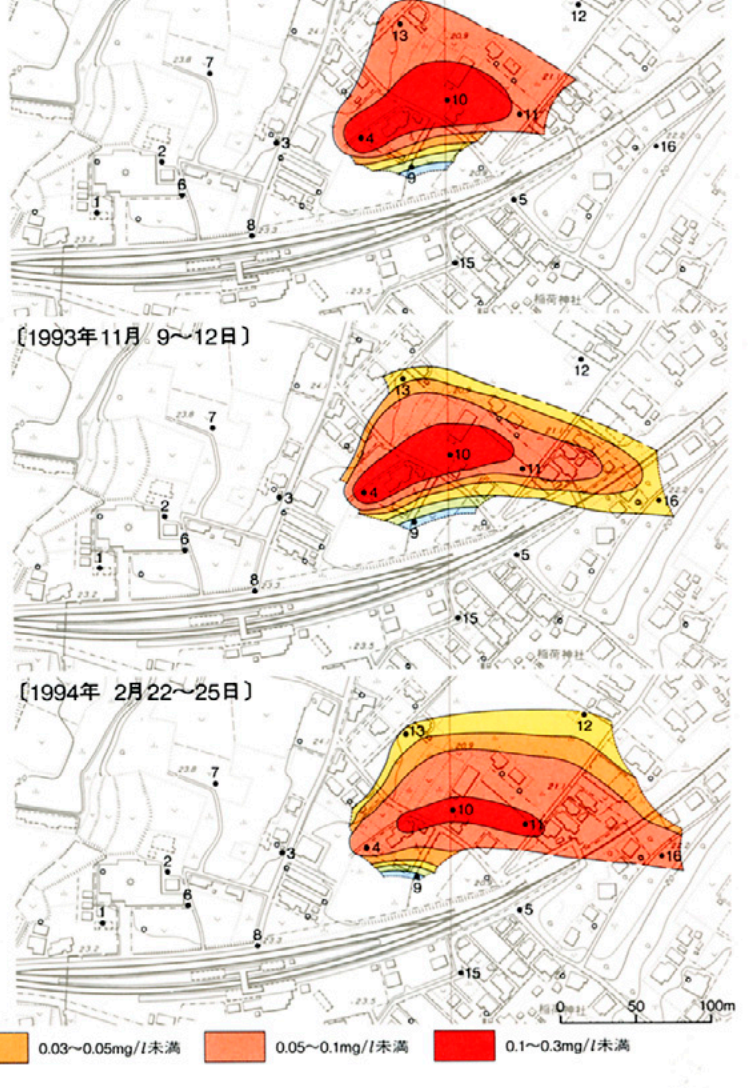


図14 - 第2透水層トリクロロエチレン地下水汚染プリュームの経時変化 [1993年 7月14～16日]



A-5のグループと、A-1、A-2のグループに分けて運転した。最初に観測井と吸引井の孔内トリクロロエチレンガス濃度を測定し、次に孔口のバルブ操作により孔内差圧状態の変化を調べる「現場揚気試験」を実施し、適性吸引量を求めた。

連続揚気は、約2ヵ月にわたって実施した。最初、排気濃度は5ppm前後もあったが、多少の推移はあるものの最後は0.3~痕跡程度に変化した。また観測井のトリクロロエチレン濃度もゼロになり、クリアアップゴールとして運転を中止することになった。

連続揚気開始から排気濃度に明らかな変化の認められる18日間の「トリクロロエチレン除去量」を計算すると、合計860gの原液状態のトリクロロエチレンが除去されたことになる。

(b)揚汚水井による浄化

先に述べたように、地下水観測井群の設置によって、本地域の地下水汚染プルームの現状と動態が明らかになった。揚汚水井は、第1透水層ではNo.3、No.4、No.8に、第2透水

層ではNo.4、No.10、No.11に設置した。

汚染源近辺に揚汚水井戸を設けなかったのは(1)汚染源そのものの地下水汚染は、調査開始時点ですでに規模が縮小している。

(2)汚染源では「汚染地層の掘削除去」および「汚染地下空気吸引」によって、将来にわたっての汚染物質の供給が止められた。からである。

揚汚水井による浄化に際しては、

(1)動水状態で地下水汚染を拡大させない。

(2)揚汚水は井戸設置時に同時に導入した曝気装置を使用し、十分な処理を施して放流する。

(3)地盤沈下の観測のため定期的に水準測量を行う。

以上の3点を考慮したのはいうまでもない。

6本の揚汚水井では、地表・地下環境に対する負荷を最小限に止める観点にたつて、それぞれの井戸で揚汚水試験を行った。現在、本運転を実施しており、地下水の汚染濃度は低下の一途を辿っている。

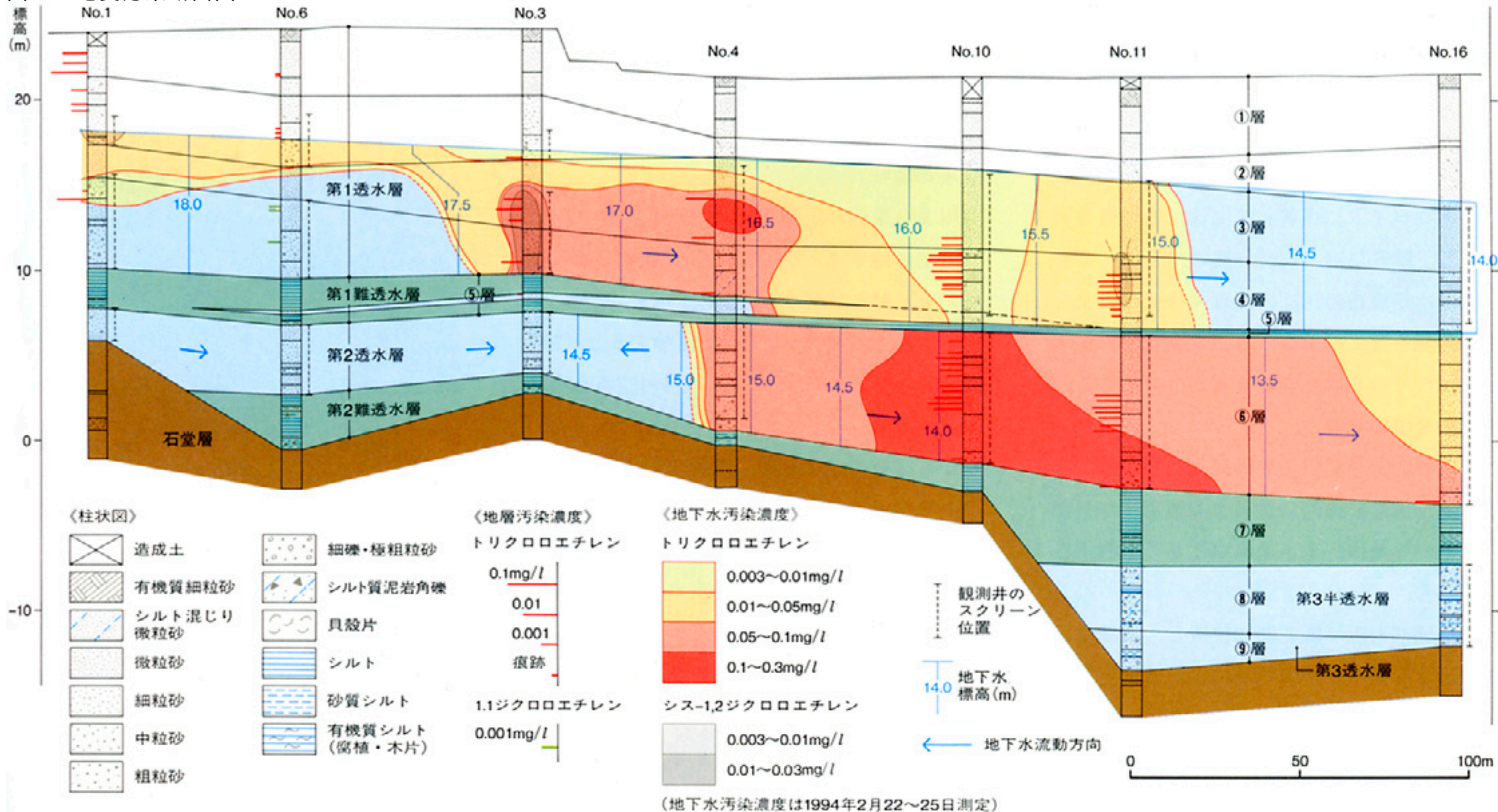
名実ともに美しい町

いま地質汚染は全国的に増加し、多くの自治体を悩ませている。公表されずに水面下で眠っている汚染現場も数多い。風光明媚な観光地やリゾート地でも同じ現象がみられ、人間の目に映る景観だけは重視されるが、目に見えない足元の汚染については、黙して語ることがない。こうした社会的雰囲気の中にあっても、きれいな空気と海に囲まれた千倉町は、地質もクリーンにして観光客を迎える。お花畑の町、千倉のクリーンな心が地質汚染浄化を成功させたのである。

写真 - 1月の真冬でも花畑の広がる千倉町



図15 - 地質汚染断面図





# 高槻地域における地下水質と地質

- 特に含有ヒ素について -

三田村宗樹 = 大阪市立大学理学部地球学教室

殿界 和夫 = 高槻市水道部水質試験係

はじめに

水道水質の安全性についてWHOなどによる国際的な見直しが進む中で、わが国でも、厚生省は平成4年12月に「水道水質基準」の改正を行い、環境庁は平成5年3月に「水質汚濁に係る人の健康保護に関する環境基準」の項目追加や基準値の変更を行った。

これらの改正では、ヒ素の水道水質基準値に関しては旧基準値の0.05mg/lから新基準値の0.01mg/lへと、より強化された。わが国の水質基準値の多くは発ガンのリスク $10^{-5}$ ~ $10^{-6}$ にあたるが、ヒ素の新基準値のそれは $6 \times 10^{-4}$ という1けた高いものになっており、ヒ素の低減化は、今まで以上に重視されなければならない課題となっている。

厚生省の水道統計(平成4年度)水質編によれば、水道水源4,118カ所のうち、ヒ素濃度が $5 \mu\text{g/l}$ (0.005mg/l)以上検出される水道原水の合計数は、報告のあった統計上でも367カ所8.9%にもなる。原水のヒ素検出例のほとんどは地下水・伏流水で、それだけを見ればヒ素検出率はさらに高くなる。その起源の多くは、金属鉱山排水・金属鉱脈などからの溶出や温泉、または粘土に吸着したヒ素の溶出、さらには廃棄された農薬や残留農薬から溶出したものと考えられている。

地下水中の含有ヒ素の除去は、水酸化第二鉄などのコロイドに吸着して共沈する性質を利用して、除鉄処理と同時に処理できる。しかし、浄水処理後の汚泥の処理や今後の安全な水源開発を考えた場合、ヒ素を含有する地下水の特性や分布の把握が重要となってくる。

## 高槻地域の地質

大阪平野北部の北摂山地南麓部一帯では、ヒ素・フッ素を特徴的に含有する地下水が存在し、その一部は、上水道原水としても利用されている。

高槻地域は大阪平野北部に位置し、南部は淀川に沿う沖積平野や扇状地の広がる低地となり、北部は北摂山地となっている。

北摂山地は、丹波層群(中・古生層)からなり、主に泥質岩・砂岩・チャートなどが分布し、

西北部では、丹波層群を貫いて茨木複合花崗岩体が分布している。その周辺には、この花崗岩体に関連した熱水性の小規模な金属鉱床が存在し、高槻市北方の萩谷地区では明治中頃まで銅鉱石の採掘が行われていた。

山地部と低地部との間には、大阪層群(鮮新~更新統)からなる丘陵地がある。大阪層群は、南部の低地の地下にも広く分布している。大阪平野の北限を画する有馬-高槻構造線の東部は、地形的には、高槻地域の扇状地面を切る低地帯として認められ、丘陵南端では、大阪層群の南への急斜構造から確認される。最近、反射法地震探査によって、枚方市楠葉の淀川河川敷で有馬-高槻構造線の東側延長部が確認されている。また、高槻市唐崎の淀川河川敷で生駒断層・枚方撓曲の北方延長部とみられる構造が認められている。

## 地下水の水質特性

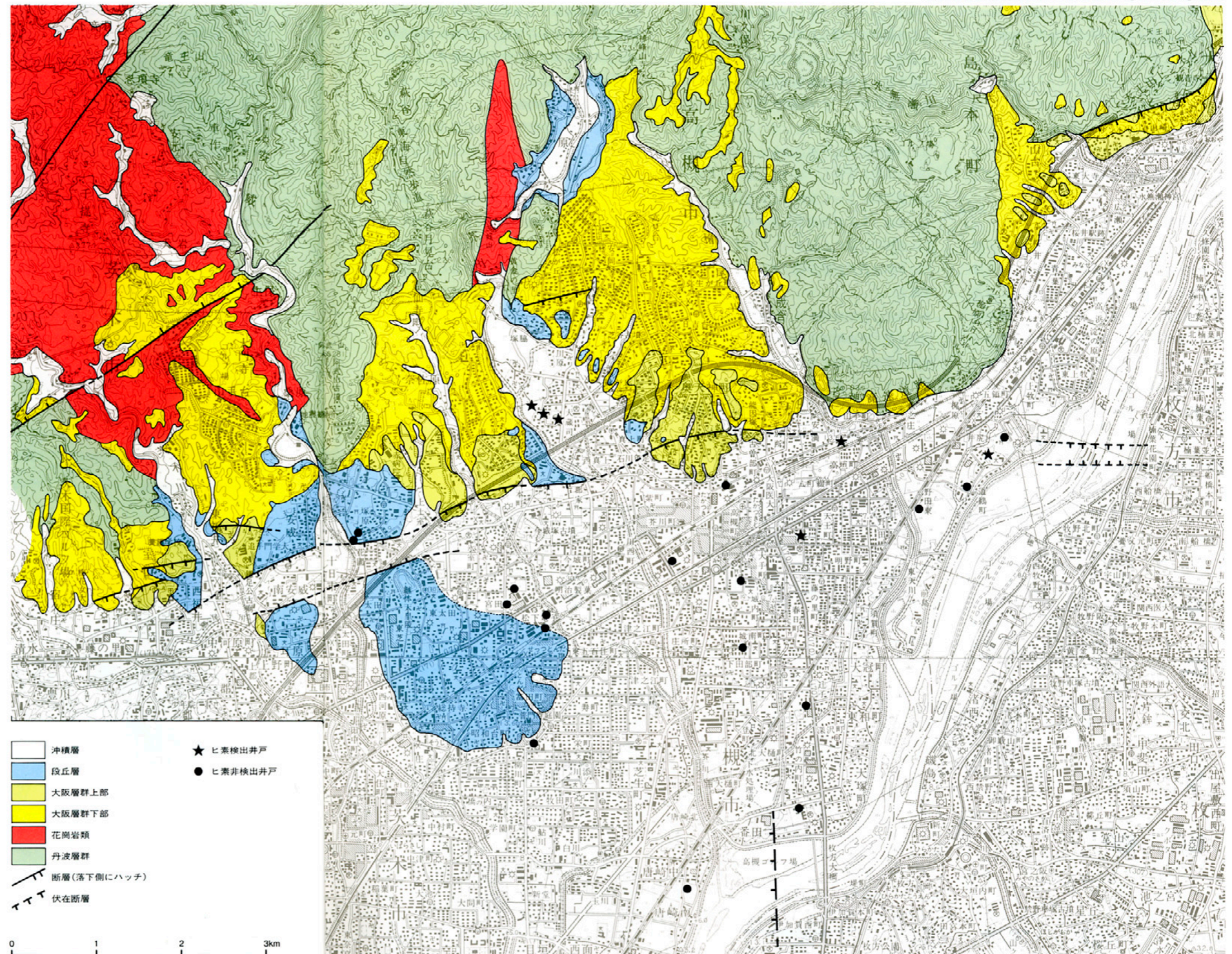
地下水の水質主成分をヘキサダイアグラムとして表し、その分布を調べた結果を図2に示す。ヒ素の検出された井戸は8地点であり、その多くはストレナ深度(スクリーン深度)が100m未満の比較的浅い井戸になっている。本地域の地下水は、水質主成分の分布状態からは、図3にみるように、東部・南部・西部の3地域に区分できる。

## 《東部地域》

芥川より東側の主要な地域で、重炭酸ナトリウム型の地下水となっている。図4に東部地域のトリリニアダイアグラムを示す。ストレナの中心深度100mをもって区分すると、100m以深の地下水には相対的にナトリウムイオンが多い。

しかも深層の地下水は、浅層のものに比べてナトリウムイオンに富み、硫酸イオンが比較的少ない傾向にある。これは、地下水が浸透してゆく過程において、介在する粘土鉱物との間で、カルシウムイオンとナトリウムイオンとのイオン交換反応が進行するとともに、硫酸イオンが還元されてゆくと判断できる。また、重炭酸イオンが全陰イオンの50%以上を占めることから、この地域では、地下水

図1 - 高槻地域の地質図 (西山研ほか、1970をもとに作成)





金子(1979)は、仙台市のヒ素含有地下水がすべてアルカリ性であることを報告している。溶出実験の結果、粘土層中に吸着していたヒ素は、pHが高くなるにつれて陰イオン交換性の減少に伴って溶脱し、アルカリ性の地下水に溶出してゆくことを確かめている。高槻市の場合、仙台市の例とはpHの点で異なっている。これには、井戸の多層集水構造が影響して、本来のヒ素含有地下水とより表層の地下水とが混合している可能性も考えられる。ヒ素の含有の原因・機構についてはまだ言及できないが、大阪層群などの粘土層中に吸着しているヒ素の溶出や熱水性金属鉱床からの溶出などがあげられる。今後これらについて検討を加えてゆく必要がある。

図3 - ストレーナ位置100m以深のトリリニアダイアグラム

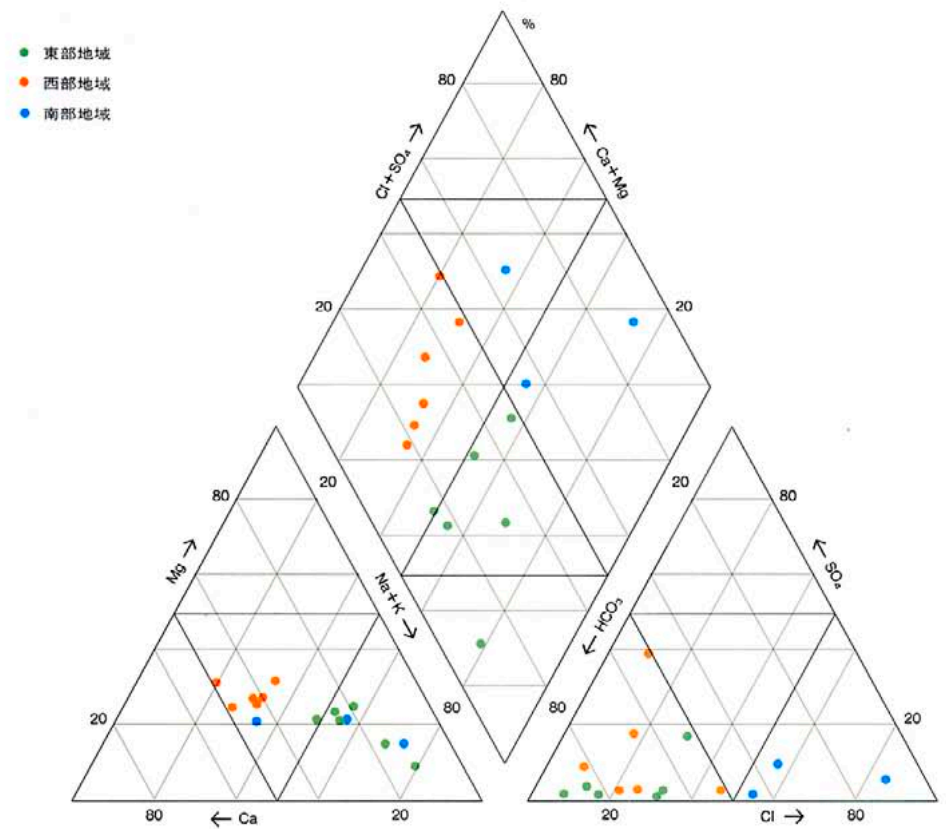


図5 - ボーリング試料中のヒ素含有量

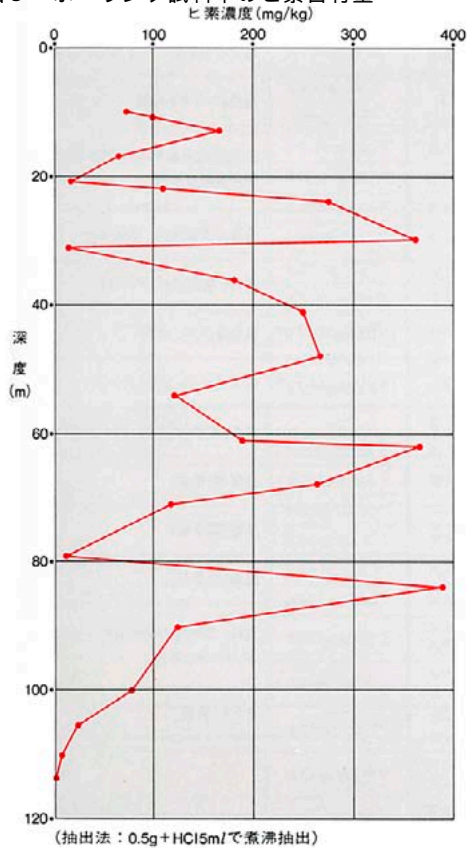
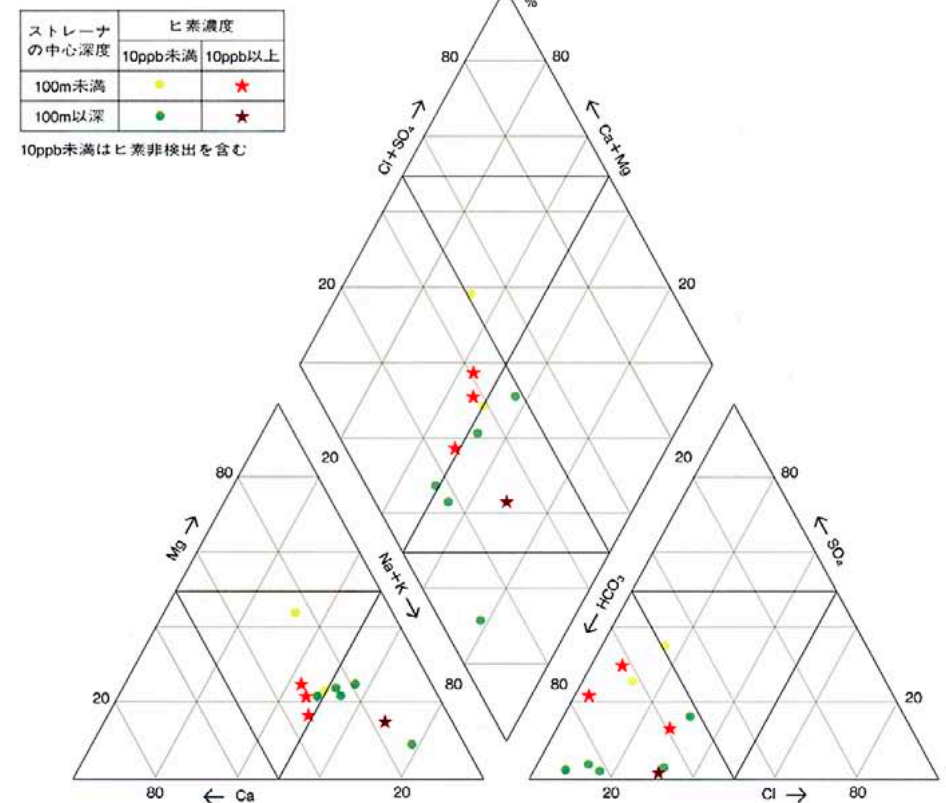


図4 - 東部地域のトリリニアダイアグラム



# 地下水汚染および土壌汚染に係る環境基準等

近藤恵美子 = 環境庁水質保全局水質管理課調査係長

## 環境基準とは

環境基本法第16条では、「政府は、大気汚染、水質汚濁、土壌汚染及び騒音に係る環境上の条件について、それぞれ、人の健康を保護し、及び生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準を定めるものとする」と定めており、この「維持されることが望ましい基準」というものがすなわち環境基準であり、具体的には環境庁告示で示している。また、これと併せて「政府は公害の防止に関する施策を総合的かつ有効に講ずることにより、環境基準が確保されるように努めなければならない」と定められていることから、環境基準とは、政府が公害の防止のための施策を行う際の行政上の「目標」ということができる。「公害の防止のための施策」の具体例としては、水質関係では、水質汚濁防止法による工場・事業場の排水規制や下水道や浄化槽といった生活排水処理施設の整備など、大

気関係では、大気汚染防止法による排出の規制などがあげられる。環境基準自体は強制力を伴うものではないが、排水規制などには強制力があり、法令に違反した場合には罰則が適用される。

## 水質汚濁に係る環境基準

水質汚濁に係る環境基準(水質環境基準)は昭和45年に制定され、その後、何回かの改正を経て現在に至っている。なお、ここでの水質環境基準とは公共用水域について適用されるものであり、現在、地下水には環境基準は設定されていない。

水質環境基準は、人の健康の保護に関する項目(健康項目)と、生活環境の保全に関する項目(生活環境項目)の2つに分けられている。健康項目は、全国の水域について一律に適用されるものであり、水銀、カドミウム、トリクロロエチレン等の23項目について定められている。生活環境項目は、河川、湖沼、海域

の3種類の水域に分け、水道や水産といった水域の利用目的に応じて、水域ごとにpH、BOD、COD、全窒素、全燐などが定められている。ここでは生活環境項目に関する説明は省略し、健康項目について最近の動向を説明する。

健康項目に関しては、昭和50年までに、水銀、カドミウム、PCB等9物質について定められた改訂を行っていなかったが、近年、多種多様な化学物質が使用されてきており、これらによる汚染にも対処する必要があることから、平成5年3月に、従来の9項目に15項目(有機塩素系化合物、農薬等)の追加、1項目(有機燐)の削除、2項目(鉛、砒素)の基準値強化を行った(表1)。

水質環境基準は、基本的に飲料水経路の影響を考慮して、生涯にわたり連続的な摂取をしても健康に影響が生じないレベルをもとに設定されており、さらに食品経路の影響につい

表1 - 水質環境基準健康項目の新旧対照表

項目	新基準値	旧基準値	主な用途
カドミウム	0.01mg/l以下	0.01mg/l以下	金属カドミウム：顔料、ニッカド電池 酸化カドミウム：電気メッキ・安定剤
全シアン	検出されないこと	検出されないこと	シアン化ナトリウム：製錬、メッキ
鉛	0.01mg/l以下※	0.1mg/l以下	金属鉛：鉛管、鉛板、蓄電池 二酸化鉛：ゴムの硬化剤 硝酸鉛：マッチ、爆薬
六価クロム	0.05mg/l以下	0.05mg/l以下	三価クロム：研磨剤、顔料 六価クロム：有機合成の触媒、メッキ
砒素	0.01mg/l以下※	0.05mg/l以下	金属砒素：半導体材料、合金添加 砒酸：木材防腐剤、医薬品原料 亜砒酸：農薬、殺鼠剤
総水銀	0.0005mg/l以下	0.0005mg/l以下	金属水銀：乾電池、蛍光灯 塩化第二水銀：触媒、医薬品 酸化第二水銀：水銀電池
アルキル水銀	検出されないこと	検出されないこと	
PCB	検出されないこと	検出されないこと	トランス等の絶縁油、熱媒体、複写紙
ジクロロメタン	0.02mg/l以下	—	溶剤(トリクロロエチレン等の代替物質)
四塩化炭素	0.002mg/l以下	—	フルオロカーボン類の原料、溶剤

項目	新基準値	旧基準値	主な用途
1,2-ジクロロエタン	0.004mg/l以下	—	塩化ビニルモノマー、樹脂の原料
1,1-ジクロロエチレン	0.02mg/l以下	—	塩化ビニリデン原料
シス-1,2-ジクロロエチレン	0.04mg/l以下	—	溶剤等の用途がある我が国における使用実績は不明
1,1,1-トリクロロエタン	1mg/l以下	—	金属の常温洗浄、蒸気洗浄
1,1,2-トリクロロエタン	0.006mg/l以下	—	溶剤、塩化ビニリデン原料
トリクロロエチレン	0.03mg/l以下	(0.03mg/l以下)*	脱脂洗浄剤、溶剤
テトラクロロエチレン	0.01mg/l以下	(0.01mg/l以下)*	脱脂洗浄剤、ドライクリーニング溶剤
1,3-ジクロロプロペン	0.002mg/l以下	—	農薬(土壌くん蒸剤、殺線虫剤)
チウラム	0.006mg/l以下	—	農薬(殺菌剤)
シマジン	0.003mg/l以下	—	農薬(除草剤)
チオベンカルブ	0.02mg/l以下	—	農薬(除草剤)
ベンゼン	0.01mg/l以下	—	染料、溶剤等の合成原料 ガソリン中に含有
セレン	0.01mg/l以下	—	ガラス、窯業

(注) 1. 基準値は、「最高値(総水銀のみ年間平均値)」から「年間平均値(全シアンのみ最高値)」に変更  
 2. 定量限界は全シアン0.1mg/l、アルキル水銀及びPCB0.0005mg/l  
 3. 有機燐(パラチオン、メチルパラチオン、メチルジメトン及びEPN)は環境基準から削除  
 ※基準値強化 \*旧基準値は水質環境目標 旧基準の「シアン」は、新基準では「全シアン」に名称変更

でも考慮されている。また、人の健康の保護に関連する物質であるが、検出状況からみて、現時点では直ちに環境基準項目とはせず、引き続き知見の集積に努めるべきと判断された25物質を要監視項目として、水質保全局長通知により定めている(表2)。

地下水汚染に係る水質基準  
さきに記したように、地下水については現在のところ環境基準は設定されておらず、環境庁水質保全局長通知によって「評価基準」というものを定めている。

地下水の評価基準は、水質汚濁防止法の改正に伴い平成元年に定められた。このときの法律改正の要点は、以下の3点である。

- 水質汚濁防止法の目的に地下水質の汚濁の防止を追加する。
- 有害物質を含む水の地下浸透を禁止する。
- 都道府県知事に地下水質の監視を義務づける。

平成元年度より改正法に基づき地下水質の調査が行われており、その結果を評価するための基準として定められたのが評価基準である。なお平成元年当時の評価基準は、当時の水質環境基準健康項目(9項目)にトリクロロエチレンとテトラクロロエチレンを加えた11項目であった。その後、平成5年に水質環境基準健康項目の改正に併せて改正し、現在は環境基準と同じになっている。

土壌汚染に係る基準  
昭和45年に「農用地の土壌汚染防止等に関する法律」が制定され、これと同時に公害対策基本法(現在は環境基本法)が改正され、土壌の汚染についても環境基準を定めることとされた。しかし当時は、土壌汚染に係る知見が必ずしも十分でなかったことなどから設定には至らなかった。その後、市街地の再開発に伴い有害物質による土壌汚染が判明する例が増加してきたこと

などから、行政上の目的となる環境基準を設定することが必要とされ、平成3年8月、カドミウム等10項目について土壌環境基準が定められた。さらに、水質環境基準健康項目の改正を踏まえ、平成6年2月に項目追加等の改正が行われ、現在は25項目について設定されている(表3)。

土壌環境基準は、様々な土壌環境機能のうち、水質を浄化し地下水を涵養する機能及び食料を生産する機能を保全する観点から設定されている。具体的には、前者については土壌を10倍量の水で溶出させたときの溶出液中の有害物質濃度が水質環境基準以下であることとしており、後者については米または土壌中の有害物質の濃度で定められている。なおこれらの環境基準は、汚染がもたら自然的原因であることが明らかであると認められる場所、原材料の堆積場、廃棄物の埋立地などには適用しないこととされている。

表2 - 要監視項目及び指針値

項目名	指針値	主な用途
クロロホルム	0.06mg/l以下	冷媒(ジクロロフルオロメタン)の原料、麻酔剤
トランス-1,2-ジクロロエチレン	0.04mg/l以下	溶剤等の用途があるが我が国における使用実績は不明
1,2-ジクロロプロパン	0.06mg/l以下	溶剤、テトラクロロエチレン等の原料
p-ジクロロベンゼン	0.3mg/l以下	トイレの防臭剤、衣服の防虫剤
イノキサチオン	0.008mg/l以下	農薬(殺虫剤)
ダイアジノン	0.005mg/l以下	農薬(殺虫剤)
フェニトロチオン(MEP)	0.003mg/l以下	農薬(殺虫剤)
イソプロチオラン	0.04mg/l以下	農薬(殺菌剤)
クロタロニル(TPN)	0.04mg/l以下	農薬(殺菌剤)
プロピザミド	0.008mg/l以下	農薬(除草剤)
オキシジン銅(有機銅)	0.04mg/l以下	農薬(殺菌剤)
ジクロロボス(DDVP)	0.01mg/l以下	農薬(殺虫剤)
フェノプカルブ(BPMC)	0.02mg/l以下	農薬(殺虫剤)
クロルニトロフェン(CNP)	—	農薬(除草剤)
イプロベンホス(IBP)	0.008mg/l以下	農薬(殺菌剤)
EPN	0.006mg/l以下	農薬(殺虫剤)
トルエン	0.6mg/l以下	染料、香料、有機顔料
キシレン	0.4mg/l以下	塗料、農薬、医薬品の溶剤
フタル酸ジエチルヘキシル	0.06mg/l以下	可塑性剤、絶縁媒体
ニッケル	0.01mg/l以下	特殊鋼、電熱線、メッキ
アンチモン	0.002mg/l以下	金属アンチモン：鉛、錫などの合金 酸化アンチモン：樹脂・繊維の難燃剤
ほう素	0.2mg/l以下	粗ほう素：金属精錬時の脱酸剤 ほう酸：医薬品、ガラス
モリブデン	0.07mg/l以下	モリブデン：特殊鋼、真空管、耐熱材料 モリブデン酸ナトリウム：試薬、試料添加剤
フッ素	0.8mg/l以下	フッ化水素酸：半導体のエッチング剤 フッ化ナトリウム：木材防腐剤、防虫剤
硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素	10mg/l以下	肥料、人・動物の排泄物・排水等から環境水中に流入、土壌中では好氣的条件下で生成

表3 - 土壌汚染に係る環境基準

項目	基準値
カドミウム	検液1リットルにつき0.01mg/l以下であり、かつ、農用地においては、米1kgにつき1mg未満
全シアン	検液中に検出されないこと
有機燐	検液中に検出されないこと
鉛	検液1リットルにつき0.01mg/l以下
六価クロム	検液1リットルにつき0.05mg/l以下
砒素	検液1リットルにつき0.01mg/l以下であり、かつ、農用地(田に限る。)においては、土壌1kgにつき15mg未満
総水銀	検液1リットルにつき0.0005mg/l以下
アルキル水銀	検液中に検出されないこと
PCB	検液中に検出されないこと
銅	農用地(田に限る。)において、土壌1kgにつき125mg未満であること
ジクロロメタン	検液1リットルにつき0.02mg/l以下
四塩化炭素	検液1リットルにつき0.002mg/l以下
1,2-ジクロロエタン	検液1リットルにつき0.004mg/l以下
1,1-ジクロロエチレン	検液1リットルにつき0.02mg/l以下
シス-1,2-ジクロロエチレン	検液1リットルにつき0.04mg/l以下
1,1,1-トリクロロエタン	検液1リットルにつき1mg/l以下
1,1,2-トリクロロエタン	検液1リットルにつき0.006mg/l以下
トリクロロエチレン	検液1リットルにつき0.03mg/l以下
テトラクロロエチレン	検液1リットルにつき0.01mg/l以下
1,3-ジクロロプロペン	検液1リットルにつき0.002mg/l以下
チウラム	検液1リットルにつき0.006mg/l以下
シマジン	検液1リットルにつき0.003mg/l以下
チオベンカルブ	検液1リットルにつき0.02mg/l以下
ベンゼン	検液1リットルにつき0.01mg/l以下
セレン	検液1リットルにつき0.01mg/l以下