

地下水汚染の現場から 汚染機構の解明と対策の確立のために

佐藤賢司 = 千葉県水質保全研究所地盤環境研究室

稲生義彦 = 千葉県環境部水質保全課

榎井 久 = 千葉県水質保全研究所地盤環境研究室長・東海大学講師

はじめに

地下水汚染は、古くからある公害の1つであるが、近年、トリクロロエチレンやテトラクロロエチレンといった比較的耳新しい物質による地下水汚染が新聞紙上を賑わしたことから、再び社会的に注目を浴びようになってきた。しかし、数多い地下水汚染現場の中で、汚染対策が実施されている例は少なく、その大半は汚染機構の解明もなされていないのが実状のようである。地下水資源を管理し有効に利用していくといった観点からは、各地下水汚染現場での科学的調査に基づく地下水汚染機構の解明と、早急な対策が望まれるところである。

地下水汚染調査は、いかなる場をどのように地下水が流れ、また汚染物質が地下水によってどのように移動・拡散したかを解明することである。筆者らは、地下水汚染調査の3原則として、次のようなことを提案している。

帯水層単元の確立

各帯水層や帯水層間の地下水流動の解明

汚染物質の移動経路と拡散・吸着過程の解明

このように、まず地下水流動の場を明らかにするといった考え方は、地下水盆管理の考え方と同じである。ここでは、関東ローム台地における6価クロム地下水汚染現場の事例を示し、その調査と対策について述べる。

図1 - 6価クロム地下水汚染現場

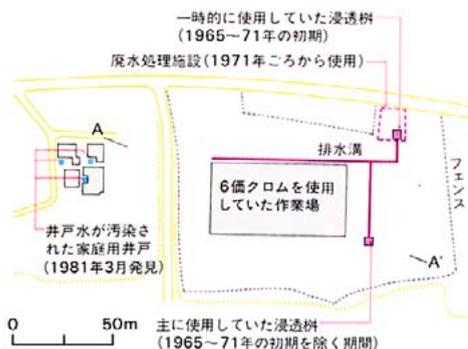
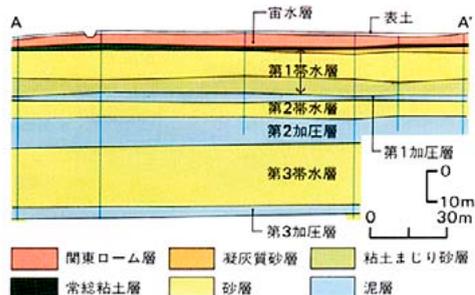


図2 - 汚染現場の地下地質断面図



地下水汚染現場

この地下水汚染は、標高約30mの関東ロームに発生したものである(図1)。台地上のある工場で、金属表面処理工程から出た6価クロムイオン(以下 Cr^{6+} と略す)を多量に含む廃液が、一時期、地下浸透していたことから発生した汚染である。地下浸透に用いられた浸透樹は、関東ローム層を幅4m四方、深さ3mの大きさに素掘りしたもので、2ヶ所あったようである。地下浸透の期間は1965年~1971年と推定され、北側のものは初期の一時期に、その後は南側のものが使用されていたといわれている。そして1983年になって、浸透樹から150m離れた3つの家庭用井戸の井戸水が汚染されているのが発見された。井戸水の Cr^{6+} 濃度は、最高2.7mg/lであった。

地下水汚染機構

この地下水汚染現場では、多数のオール・コアによる地質ボーリングが行われた。まず、汚染源と考えられた浸透樹の近傍、汚染された家庭用井戸の近傍、ならびにこれらの中間の2地点で、深度60mの地質ボーリングを行った。地下地質を明らかにして帯水層単元を確立することと、ボーリング・コアに含まれる Cr^{6+} を分析して、どの帯水層まで汚染が進行しているのかを確認することが主な目的であった。次に、汚染がみられた深度30mまで(後述する第2帯水層まで)について、12地点で地質ボーリングを行った。汚染の平面的広がりを見極めるために、ボーリング地点は、汚染の確認された地域から始まり、外側に広げていった。最後に、ごく浅い部分(後述する宙水層まで)の汚染状況を見るために、浸透樹周辺の23地点で深度6mの地質ボーリングを行った。さらに、これを補足するために、深度4m~6mのハンドボーリングによる調査も16地点で実施している。

地質ボーリングにみられたこの地域の地下地質は、下位より、砂層と泥層の互層からなる下総層群の最上部、凝灰質砂層、常総粘土層、関東ローム層、そして表土からなる(図2)。下総層群にみられる3つの砂層は、それぞれ帯水層を形成している。ここでは、上位のものから順に、第1帯水層・第2帯水層・第3帯水層とよぶことにする(各帯水層の下位にある泥層も、上位のものから順に、第1加圧層・第2加圧層・第3加圧層とよぶ)。第1帯水層は不圧帯水層、第2帯水層と第3帯水層は被圧帯水層であ

る。そして、これらの帯水層の上位にもう1つの帯水層がある。すなわち、常総粘土層の上位かつ関東ローム層の最下部に宙水が存在し、宙水層を形成している。

これらの帯水層系の地下水流動を立体的に把握するために、多数の地下水位・地下水質観測井を設置した。経費節約のため、すべての地質ボーリング孔を観測井設置に利用した。さらに、これを補充して、第2帯水層用と第1帯水層用の観測井を新たに設置した。帯水層別観測井数は、第3帯水層用が4井、第2帯水層用が16井、第1帯水層用が16井、そして宙水層用が23井である。

以下に、各帯水層における地下水流動と、それに伴う汚染物質の移動経路を、汚染の進行に沿って述べることにする。

Cr^{6+} を含む廃液は、浸透樹だけでなく、浸透樹につながる排水溝からも地下浸透し、関東ローム層中をあまり側方に広がることなく宙水層まで降下したと考えられる。これらは、浸透樹や排水溝の直下では、宙水層より上位の関東ローム層中に連続して高濃度の Cr^{6+} が検出されることと、これらの地点から数メートル側方に離れたと、同じ層準の関東ローム層に Cr^{6+} が検出されなくなることから推測されることである。関東ローム層には、植物の根の跡といわれる細孔が無数にみられるが、これが地下水の垂直移動に貢献しているようである。

宙水層では、浸透樹・排水溝の側方に汚染が拡大するとともに、下位の常総粘土層や、さらに下位の凝灰質砂層にも汚染が進行している(図3)。しかし、宙水層~常総粘土層の平面的汚染分布をみると、高濃度汚染域が南方に、すなわち、地下水位分布から推定される宙水の流動方向に帯状に延びており、宙水の流動とともに Cr^{6+} が移動していることが読み取れる。詳細な Cr^{6+} の移動状況は、宙水の流動方向にほぼ直交する断面上の汚染分布にみることが出来る。宙水層から第1帯水層への汚染の進行は、この現場の南東部にみられる常総粘土層のせん滅地域と密接な関係が認められる。地質ボーリング試料の分析結果によると、宙水層の汚染地域であっても、常総粘土層が発達している地点では、第1帯水層の自由地下水面より上位の砂層からは Cr^{6+} が検出されないが、常総粘土層がせん滅している地点では、この砂層からも Cr^{6+} が検出される。このことから、常総粘土層のせん

図3の注 = 地下水位は、南側浸透池の西側の観測井 (No.1-1)の管頭を基準にして表示。汚染分布は、各地質ボーリングの宙水層～常総粘土層の地質試料にみられた最大汚染濃度 < 溶出した Cr^{6+} の重量 / 地質試料 (湿潤状態) の重量 > (mg/kg) を使用。

滅地域では、宙水の一部が第1帯水層に降下していると推測される。そして、第1帯水層汚染地域の最上流部は、このような常総粘土層のせん滅地域と一致している。

地下水位分布から推定される第1帯水層の地下水流動方向は、宙水層と異なり、北西方向が卓越している。汚染現場の北部や南東部では、これと異なる方向への流動もみられるが、これは、それぞれの下流地点にある谷への地下水流出によるものであろう。第1帯水層に降下した Cr^{6+} が、このような第1帯水層の地下水流動方向に沿って移動していることが、第1帯水層～第1加圧層の地質試料や第1帯水層の地下水の分析結果から明らかになった(図4)。また、各地質ボーリング地点における第1帯水層～第1加圧層の垂直汚染分布を比較すると、第1帯水層の下流側の地点ほど、高濃度汚染部の位置が下がる傾向がみられる。第1帯水層の地下水が、より水位の低い第2帯水層へ漏水し、それとともに第1帯水層の汚染が第1加圧層へ進行しているようである。

第1帯水層の汚染分布には、もう1つ特徴的なことがある。それは、宙水層から Cr^{6+} が降下している地点を除き、自由地下水面より上位の砂層からは、 Cr^{6+} が検出されないことである。このことは、第1帯水層が不圧帯水層であることを裏づけるとともに、自由地下水面の高さがあまり変動していないことを想像させるものである。第1帯水層の砂層は、ほぼ自由地下水面を境にして、層相がわずかに異なっており、上半部が細砂、下半部が粘土質細砂からなっている。上半部に比べて下半部の透水性が低いために、この境界付近に自由地下水面が形成されているようである。

第2帯水層の地下水位分布にみられる地下水流動方向は北西方向であり、第1帯水層の地下水流動方向と大局的に一致する。そして、第2帯水層の汚染地域は、第1帯水層汚染地域の比較的下流部に限られる。これらの地域では、前述した第1帯水層から第1加圧層への汚染の進行が、第2帯水層にまで及んでいると考えられる。第2加圧層以深については、地質ボーリング試料の分析結果をみる限り、汚染が進行していないようである。

井戸水が汚染された3つの家庭用井戸は、第2帯水層汚染地域の downstream に位置し、井戸深度から推定して、第2帯水層・第1帯水層の地下水

図3 - 宙水層の地下水位分布と宙水層～常総粘土層の汚染分布

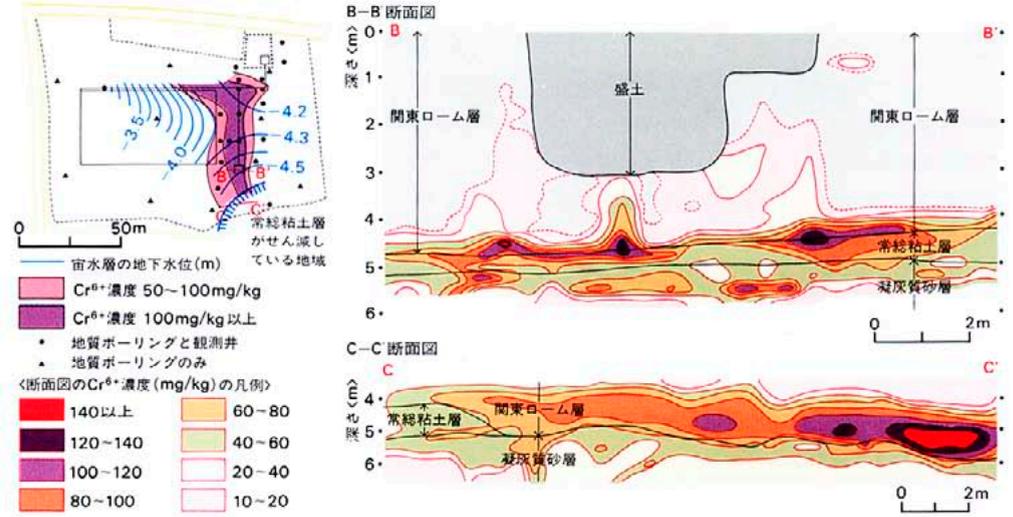


図4 - 第1帯水層の地下水位分布と第1帯水層～第1加圧層の汚染分布

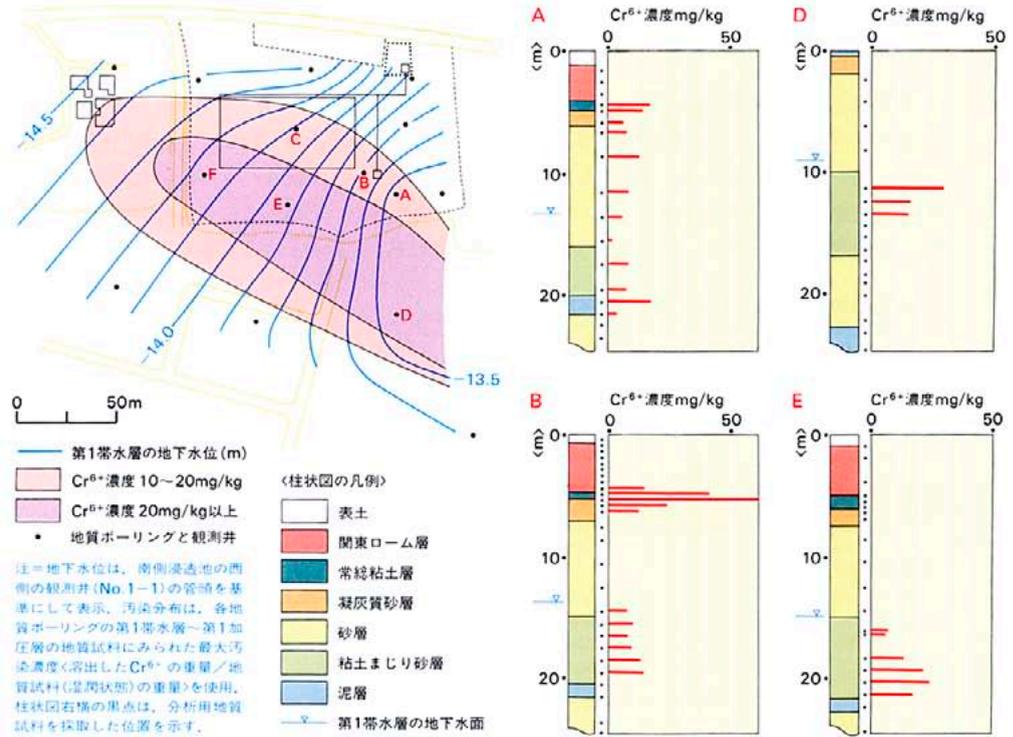
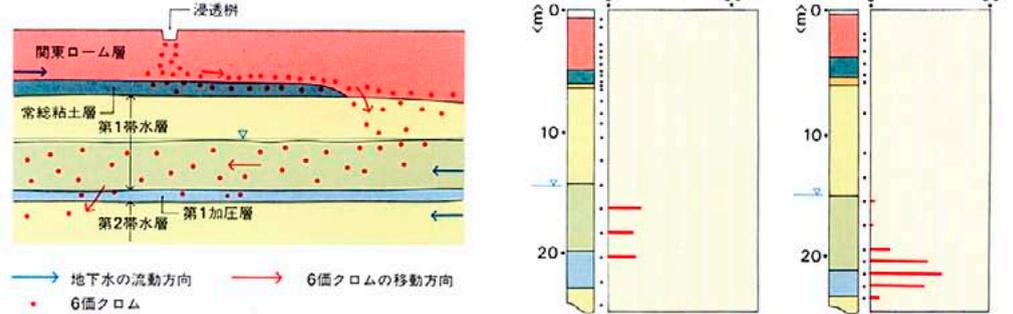


図5 - 地下水汚染機構の概念図



を利用していただけと思われる。これらの井戸水を汚染した地下水汚染機構は、以上のように解明された(図5)。

この地下水汚染現場では、宙水層の存在が汚染機構を複雑なものにしている。その理由として次の2点があげられる。1つは、宙水層の地下水流動方向が、第1帯水層・第2帯水層の地下水流動方向と基本的に異なり、かつ局所的なこと。そして、宙水層から第1帯水層への汚染の進行が、特定の地域、すなわち、常総粘土層のせん滅地域でみられることである。

汚染除去対策

実施された汚染除去対策は、宙水層の対策と第1帯水層・第2帯水層の対策とに分けられる。宙水層の汚染除去には、汚染地層、すなわち常総粘土層・関東ローム層の汚染部分を掘削して除去する方法をとった(図6)。掘削した汚染地層は、還元剤として硫酸第1鉄を混合し、あらかじめつくった貯蔵施設に入れ保存している。この貯蔵施設は、宙水層が汚染されていない場所で、関東ローム層を掘り下げ、周囲に防水シートを張ってつくったものである。貯蔵施設内には、汚染地層中の水を汲み上げたり、保存後のCr⁶⁺の還元状況を見るため、集水管のつい

た井戸と観測井が設けられている。一方、汚染地層掘削跡は、底部に亜炭と酸性白土を混合したものを敷き、汚染されていない関東ローム層で埋め戻した。亜炭と酸性白土は、周囲から汚染地下水が進入した場合、Cr⁶⁺を還元・吸着させるためのものである。

第1帯水層・第2帯水層の汚染除去には、汚染地下水を揚水して除去する方法がとられている(図7)。揚水井としては、第1帯水層・第2帯水層の高濃度汚染域にある観測井や、汚染の先端部にある観測井・家庭用井戸が利用されている。前者の場合は、汚染除去の効率がよく、後者の場合は、汚染の進行を防ぐ効果がある。一般に地下水を汲み上げると、周囲の地下水が揚水井に集まってくるが、汚染地下水の場合も同様で、揚水井では周囲の観測井よりもCr⁶⁺濃度が高くなる傾向がみられる。

揚水した汚染地下水は、亜炭を利用したCr⁶⁺除去装置で処理した後、深度450mの帯水層に注入している。この帯水層の地下水はフミン質なため現在利用されていないが、このため、仮に微量のCr⁶⁺が混入しても、地下水中の有機物によりCr⁶⁺が還元されることが期待できる。汚染地下水の汲み上げは現在も続けられている。

以上述べてきた対策の効果は、地下水質の監視により明らかになった汚染分布の推移にみるることができる(図8)。図にみるように、第1帯水層の汚染は大きく減少してきていることがわかる。この原因としては、第1帯水層の汚染地下水の汲み上げが続けられてきたことに加えて、宙水層の汚染地層が除去されたことがあげられる。このため、宙水層から第1帯水層への汚染地下水の補給が減少したと思われる。一方、第2帯水層では、汚染地下水の汲み上げが続けられているにもかかわらず、汚染の減少はそれほど顕著ではない。この原因としては、第1加圧層に吸着されていたCr⁶⁺が、第1帯水層から第2帯水層への漏水によって、徐々に第2帯水層へ移動してきたためと考えられる。ただし、汚染地下水の揚水が続けられている家庭用井戸では、揚水開始以後、井戸水中のCr⁶⁺濃度が上昇してきたが、最近ではCr⁶⁺濃度が低下傾向にある。汚染除去対策も、ようやく峠を越え始めたようである。この地下水汚染現場では、やがては清浄な地下水がもどってくることを信じて、対策と監視が続けられている。

図6 - 汚染地層の除去手順およびその保存施設

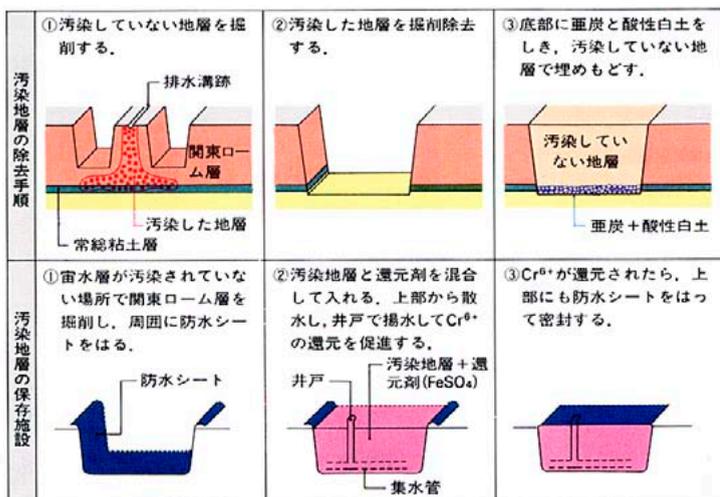


図7 - 汚染地下水の汲み上げと処理

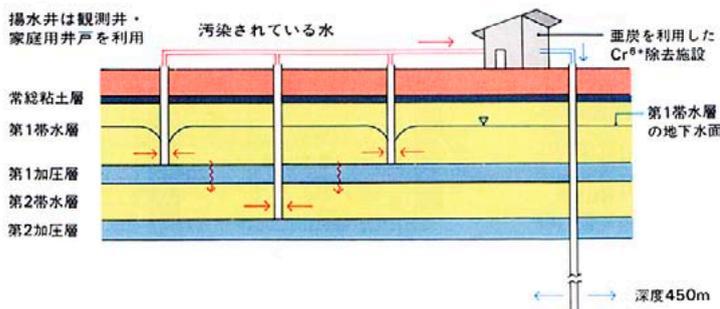


図8 - 第1帯水層・第2帯水層の汚染分布の推移

