

# 土壌浄化のための基礎科学

藤 縄 克 之\*

## Fundamental Science for Soil Remediation

Katsuyuki FUJINAWA\*

Faculty of Engineering, Shinshu University, Wakasato 500, Nagano 380-8553

### 1. はじめに

農業において、土壌は作物栽培のための重要な生産手段である。土壌物理学が、土壌中で生起する様々な物理現象の解明や農業の生産性向上に果たしてきた役割の重要性は論をまたない。しかし、多くの生命が育まれる媒体としての土壌、子供たちが泥遊びに興じる素材としての土壌、汚れた雨水などが浸透して不純物が除去される装置としての土壌、などを考えるとき、健全な土壌がヒトや生態系に限りない恩恵を与えてきたことが分かる。

しかし、著しく経済が成長した20世紀は同時に土壌環境の劣化が放置されてきた世紀でもあった。わが国では、1982年に環境庁が地下水汚染全国調査を実施し、有機溶剤などによる地下水汚染が全国いたる所で発生していることが明らかになった。地下水汚染が土壌を経由して発生することを考えれば、土壌汚染がいつそう深刻な状況にあることは必然的に理解できるところではあるが、水道水源などとして利用されている地下水の汚染がまず社会の関心を集めたとしても不思議ではない。ところが、最近になり状況は大きく変化しつつある。

図1は環境省による年度別の土壌汚染調査対策事例件数を示したものである。土壌環境基準の制定を契機に調査事例が増加し、事例数の増加に伴って基準値超過件数も激増していることが分かる。新たな地下水汚染の発見は地下水水質調査が網羅的でない限り当面続くと予想されるが、工場跡地の土壌汚染が用地売買の障害となったり、汚染土壌の移動が新たな環境問題を引き起こすなど、土壌汚染の社会的波紋はさらに広がる様相を呈し始めている。

このような社会情勢に対応すべく、土壌・地下水汚染修復ビジネスが近年急速に発展している。土壌・地下水の汚染機構解明に対する社会的要請も大きい。物理的・化学的・生物学的先端技術を駆使する汚染修復産業

もまた新しい学問分野の形成に大きな役割を果たしている。このような時代の流れを背景に、欧米では様々な分野の研究者が土壌・地下水汚染分野に参入しており、新しい基礎科学の発展もめざましい。そこで、ここでは、土壌・地下水の汚染物質、汚染源、汚染メカニズム、そして浄化技術を展望し、土壌物理学が今後果たすべき役割を整理してみたい。

### 2. 土壌汚染物質と移動形態

土壌や地下水を汚染する物質や微生物は、さまざまである。汚染質が土壌・地下水中で受ける作用は物理的作用・化学的作用・生物学的作用に区分できるが、すべての汚染質は土壌・地下水中で多かれ少なかれこのような作用を複合的に受ける。汚染された土壌や地下水を浄化するには、浄化する対象となる汚染質の移動・変換機構を理解しておく必要がある。

土壌・地下水汚染対策を考える上で類似の作用を受ける汚染質を類型化したものを表1に示す。なお、表1では放射性物質を除いて比較的汚染頻度の高いものや水質汚濁防止法における健康項目および要監視項目などを中心に分類している。

無機物質類（重金属類）による汚染では水田土壌のカドミウム汚染が良く知られているが、工場跡地の六価クロムによる汚染や、廃棄物処分場からの砒素汚染など、新しいタイプの汚染も問題となっている。昭和40年度から昭和60年度に発生した地下水汚染の環境庁による調査では、無機物質による汚染件数は多い順に六価クロム、水銀、シアン、カドミウムとなっており、平成11年2月からは硝酸性窒素・亜硝酸性窒素とともにホウ素とフッ素が健康項目に追加されている。ちなみに、汚染源には電気めっき業、熱処理業、化学工業、鉱業、窯業などが多い。重金属類の汚染機構では、浸透流に伴う移流分散に加えて、吸脱着プロセスが重要であり、場合によ

\* 信州大学工学部 〒380-8553 長野市若里500

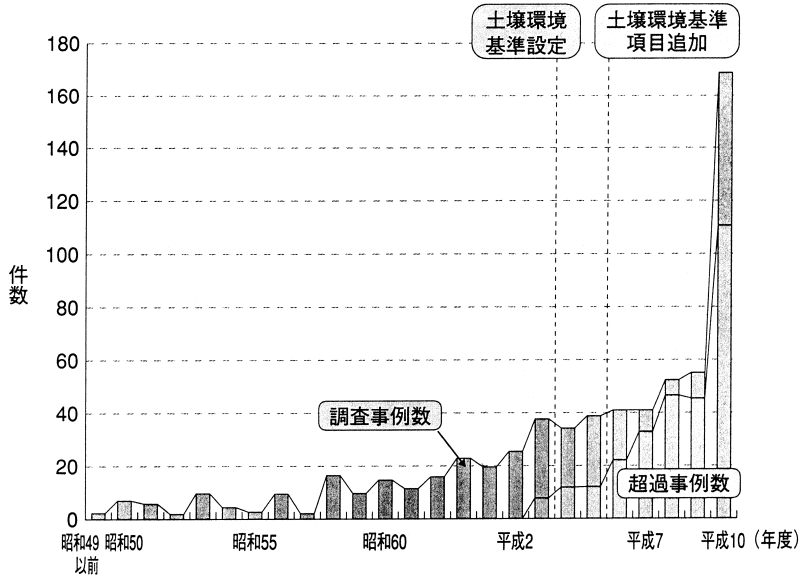


図-1 年度別の土壌汚染調査・対策事例数

表-1 土壌・地下水汚染物質類の分類

無機物質類	六価クロム・水銀・シアン・カドミウム・砒素・鉛・亜鉛・マンガン・銅・ニッケル・ホウ素・フッ素など
病原性微生物	コレラ菌・赤痢菌・腸チフス菌・パラチフス菌・大腸菌・ポリオウィルス・肝炎ウィルスなど
有機化合物	テトラクロロエチレン・トリクロロエチレン・1, 1, 1-トリクロロエタン・1, 1-ジクロロエチレン・四塩化炭素などの塩素系溶剤関連物質 シマジン・チオベンカルブ・プロピザミド・CNP などの除草剤, チウラム・イソプロチオラン・オキシ銅・TPN・IBP などの殺菌剤 1, 3-ジクロロプロペン (D-D) ・EDB などの刹線虫剤, DDVP・EPN・MEP・BPMC・ダイアジノン・イソキサチオンなどの殺虫剤 アルキルフェノール類・ビスフェノール A・フタル酸エステル類・スチレンモノマー・17-β-エストラジオールなどの環境ホルモン ベンゼン・トルエン・キシレンなどの石油系炭化水素
放射性物質	<sup>3</sup> H, <sup>90</sup> Sr, <sup>129</sup> I, <sup>137</sup> Cs, <sup>239</sup> Pu, <sup>226</sup> Ra など
無機態富栄養塩類	硝酸性窒素・亜硝酸性窒素などの無機態窒素, 無機態リン, 塩化物, 硫化物など

ればイオン交換を考慮した多成分系の輸送プロセスとしてとらえる必要がある<sup>1)</sup>。

病原性微生物に汚染された地下水によりかつて内外でコレラ, 赤痢, 小児麻痺, 腸チフスなどが大流行したことがある。特に記憶に新しいところでは, 1990年に埼玉県内の幼稚園で発生した病原性大腸菌による地下水汚染で2名が死亡し, 21名が溶解性尿毒症症候群に感染する

という被害が発生している<sup>2)</sup>。我が国では, 病原性微生物が地中をどのように移動するか研究した事例はほとんど無いようである。しかしながら, 病原性大腸菌のO-157はしばしば社会問題となり, その汚染経路として地下水が疑われることもある。大腸菌ばかりでなく肝炎ウィルスなども浸透水と共に移動し, 病気が蔓延することがある。これらの微生物の移動には, 移流分散のみな

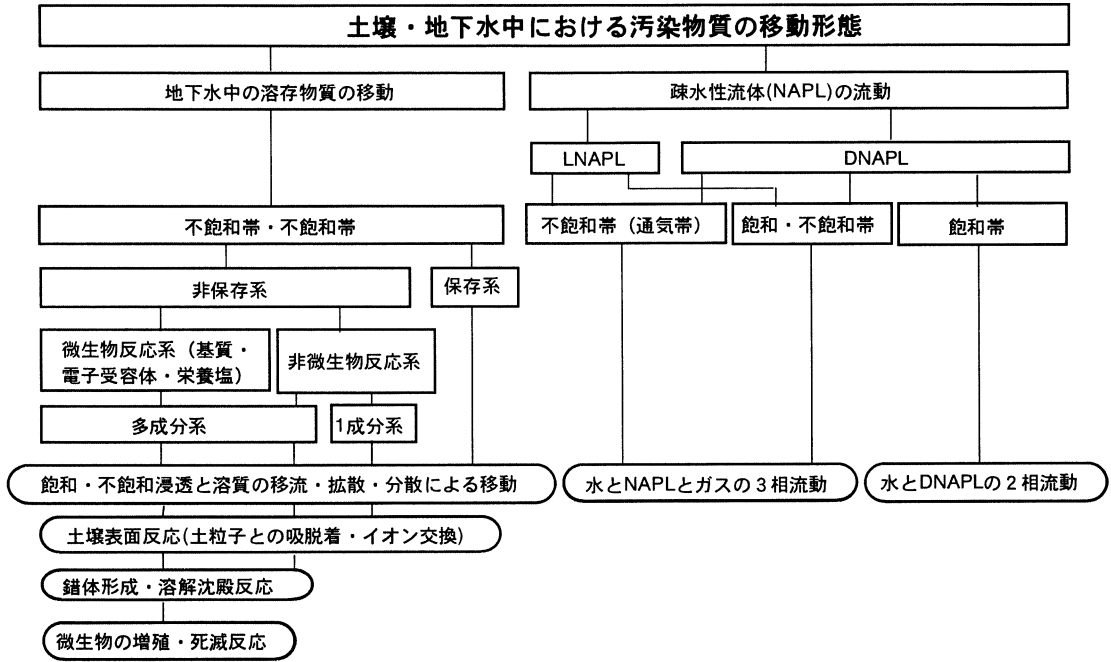


図-2 土壌・地下水汚染数学モデルの系統図

らず土壌中における濾過プロセスや吸着プロセス、あるいは他の微生物との拮抗作用なども複雑に関わっており、地中における微生物の移動特性の解明は今後の重要な研究課題である。

近年、もっとも社会的反響が大きい汚染物質がトリクロロエチレンなどの有機塩素系化合物である。半導体の製造工程やドライクリーニングなどで有機溶剤としてかつて大量に用いられたトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンあるいはその分解生成物であるジクロロエチレンなどの有機塩素系化合物は、現在各地で深刻な地下水汚染を引き起こしている。しかし、トリクロロエチレンなどの疎水性液体（NAPL）による汚染のメカニズムについてはかなり研究が進展してきているとはいえ<sup>3)</sup>、いまだ未解明な部分も少なくない。

表1に掲げた除草剤・殺菌剤・殺虫剤・刹線虫剤などの農薬は、すべて水質汚濁防止法健康項目および要監視項目に含まれている物質である。米国ではDBCP・EDB・1, 2-D・シマジン・アルディカーブなどによる地下水汚染が頻発しており、農薬による地下水汚染機構などの研究が進んでいる。一方、我が国では、DBCPや臭化メチルなどによる地下水汚染について若干の報告例はあるが、農薬による地下水汚染の体系的な実態解明は今後の課題である。

生殖障害・神経障害・免疫障害を起こすとして最近注

目されている環境ホルモンの多くは、界面活性剤・樹脂・プラスチックなどの原料や可塑剤として大量に製造・消費されてきた化学物質である。環境庁が平成10年に実施した環境ホルモン緊急全国一斉調査において、全国8地点で地下水水質調査が行われている。調査は農業地域、市街地、工業地域、その他の地域で行われているが、地下水の全サンプル中からビスフェノールA、ノニルフェノール、フタル酸エステル類など何らかの環境ホルモンが検出されている。平成8年4月1日現在の我が国における安定型処分場の全施設数は1,688カ所に上っているが、廃プラスチックは金属くずなどとともその性質が安定しており生活環境上の支障を及ぼすおそれが少ないと考えられる産業廃棄物として浸出液に無防備な安定型処分場で処分されてきた。しかし、最近の研究<sup>4)</sup>によれば、廃プラスチックなどを埋めた最終処分場の浸出水中からビスフェノールAなどの環境ホルモンが高濃度で検出されているほか、フタル酸エステル類なども検出されている。環境庁の調査では地下水中の環境ホルモンの由来は明らかにされていないが、最終処分場も含め環境ホルモンによる地下水の汚染源を早急に調査するとともに、土壌・地下水中の挙動を解明する必要がある。

米国では、約140万のガソリン地下貯蔵タンクの少なくとも10%が漏洩していると考えられており、石油貯

表-2 難水溶性物質による汚染土壌・地下水の浄化技術

処理体系	技法	技法の概要	個別技術	個別技術の概要
物理的処理	土壌除去法	土壌とともに汚染物質を除去する。		
	揚水処理法	NAPL そのものあるいは汚染地下水を揚水し、汚染物質を除去する。	単一井戸単一ポンピング法	システムの費用は安いですが、処理水量が多く、効率が悪い。
			ダブル井戸ダブルポンピング法	処理水量が少なく、効率が良いが、システムの費用が高い。
			単一井戸ダブルポンピング法	井戸口径が大きい分システムの費用は高いが、処理水量が少なく、効率が良い。
			エアースパーージング法	注入井戸から空気を注入し、揮発した汚染物質を地下水とともに回収する。
	土壌ガス吸引法	土壌で揮発したガスを、吸引する。	土壌ガス抽出法	土壌ガスのみを抽出する
			二相同時抽出法	土壌ガスと汚染地下水を同時に抽出する。
	拡散防止法		バリアー井戸法	井戸からの揚水により、汚染物質が拡散することを防ぐ。
			囲い込み法	シート、粘土、鋼矢板などで、汚染物質を囲い込む。
			固化法	水ガラスやベントナイトなどで、汚染物質を固化させる。
化学的処理	不溶化法	化学反応を利用して汚染物質を不溶化させる。	硫化物化法	
			還元法	
			キレート化法	
	毒性低減化法	化学反応を利用して汚染物質を分解し、無害化する。	化学触媒法	化学触媒を用いた分解により有機塩素化合物などを脱塩素化する。
			光触媒法	汚染水や汚染ガスに赤外線を照射し、有機塩素化合物などを脱塩素化する。
	流動性促進法	界面活性剤を利用して、汚染物質の流動性を高める。	土壌洗浄法	掘削した汚染土壌を界面活性剤を利用して洗浄する。
			Soil Flushing 法	界面活性剤を利用して、原位置で汚染物質の流動性を高め、地上に揚水する。
	溶媒抽出法	有機溶媒を用いて、汚染物質を抽出処理する。	超臨海抽出法	超臨海状態でCO <sub>2</sub> を溶媒として使用し、汚染物質を除去する。
	電気的分離法	汚染土壌・地下水に直流電流を流し、電気泳動現象により汚染物質を抽出し、揚水処理する。		
	生物学的処理	在来微生物利用法	汚染サイトに存在する微生物を利用して、汚染物質を分解する。	Natural Attenuation
Bioventing				
Biosparging				
Biostimulation				
導入微生物利用法		組み替えDNA技術などを用いて高い分解能を持つ微生物を育種し、汚染箇所に導入する。	Bioaugmentation	

蔵施設は土壌・地下水汚染対策の重要な対象施設となっている。ちなみに、スーパーファンド汚染サイト 263カ所のうちの24%が石油系の汚染サイトである。一方、環境庁が平成6年度に全国121の地方公共団体で実施した調査では石油による地下水汚染は全体の3%弱(12件)で、統計上石油による土壌・地下水汚染は極めて少ないことになっている。しかし、石油製品にはベンゼン、トルエン、キシレン(BTX)などの有害物質が含まれている。ちなみに、ベンゼンは毒性や爆発性があり、発ガン

性が疑われているため、水質汚濁防止法では健康項目に指定されており、また、トルエンとキシレンには毒性や爆発性があり、さらにキシレンには催奇形性の疑いがあるため、現在両物質は要監視項目に指定されている。したがって、これらの有害物質に対しても土壌・地下水中の挙動を解明し、科学的知見に基づいた実効性のある汚染対策を実施する必要がある。

やや特殊であるが、原子力発電や核実験によって生じる放射性物質も、欧米では土壌・地下水の汚染物質とし

て位置づけられている。また、米国では放射線は白血病を含む様々な腫瘍の原因となるばかりでなく造血器官や生殖腺や免疫機能にも影響を与えるため<sup>226</sup>Raや<sup>90</sup>Srなどの放射性物質に対して水道水の水質基準が設けられているが、わが国の水道法では放射性物質に対する水質基準は設けられていない。表1の<sup>226</sup>Ra以外の放射性物質は、いずれも原子力発電に伴って生成される。したがって、原子力発電所における事故や放射性廃棄物の管理に問題があると土壌や地下水が放射性物質により汚染される可能性がある。このような放射性物質の地中における挙動を、逐次崩壊により娘核種を生成する多成分系輸送プロセスとして把握しておく必要があろう。

農学分野の貢献が最も期待される汚染浄化は、硝酸性窒素などの富栄養塩類の浄化であろう。窒素には、有機態窒素と無機態窒素があり、土壌中では微生物の介在の下に極めて複雑な形態変化をするため、研究としては非常に挑戦しがいのある課題であると思う。

図2は、土壌・地下水中における汚染物質の移動形態を類型化したものである。汚染物質の移動をモデル化する場合、各ルーチンに従って定式化する必要がある。土壌水や地下水中に溶解した物質の移動が問題となる場合、非保存系物質では土壌水や地下水の流れ及び汚染物質の分散とともに化学的・微生物学的反応なども考慮する必要がある。汚染物質が土壌微生物により分解される場合は、汚染物質の挙動のほかに、土壌微生物や分解時に利用される酸素などの電子受容体の挙動を定量化することも重要である。

有機塩素系溶剤や石油系炭化水素などのように汚染物質が液体で疎水性の場合は、水や土壌ガスと疎水性液体の多相流れとして現象を定性的・定量的に把握する必要がある。さらに、通気帯中で揮発したNAPLガスの移動が問題となる場合は、NAPLの相変化なども考慮できるような熱移動と連成させた非等温システムを考える必要がある。もちろん、疎水性液体といっても多少は水に溶解し、溶解成分は移流・分散・反応・分解プロセスに預かることになる。

なお、有機化合物の中にはダイオキシンなどのように分子自体の特性は疎水性で固体のものもある。したがって、汚染物質が疎水性で固体（粉体）の場合、それ自体が移動するというよりむしろ有機物などに吸着した後、コロイドなどとして浸透流により輸送される汚染経路などを考える必要があろう。

### 3. 汚染土壌・地下水の浄化技術開発と基礎科学

汚染機構解明と並行して様々な修復手法が開発されている。表2はNAPLによる汚染土壌・地下水の浄化技

術を整理したものである。できるだけ早期に汚染物質を原液状で回収する物理的方法が、もっとも効率的であり、修復に要する期間やコストが節約できる。NAPL以外でも高濃度の汚染物質を除去する最も効率的な方法は物理的处理であろう。このような物理的处理法には、土壌除去や拡散防止法などの他に、揚水処理法や土壌ガス吸引法などがある。原液が流動した後に地層間隙中にトラップされたNAPLを回収する場合、ガス化させて吸引したり、界面活性剤で流動性と水溶解性を促進させる方法などがあるが、回収効率は低下し、修復期間が長くなり、費用もかさむようになる。

ある程度汚染物質の濃度が低下してくると、物理的方法はコストの割には効果が上がらなくなる。このようなケースでは、化学的処理が有効である。化学的処理法には、不溶化法、毒性低減化法、流動性促進法、溶媒抽出法、電気的分離法などがある。

地下水中に溶解したNAPLを浄化する場合、生物学的に処理する方法が浄化に時間はかかるがコストを削減でき、コストエフェクティブであるとされている。この処理法には、組み替えDNA技術を用いて育種した外来微生物を導入するBioaugmentationや在来微生物を利用するBiostimulation、Bioventingといった手法があるが、最も消極的な方法として人為的には何もしないNatural Attenuationという在来微生物に期待する他力の浄化法もある。このような微生物の浄化能力を活用したバイオレメディエーションでは、汚染物質の分解に適した微生物の選定のみならず、その微生物の浄化能力が最大になる条件を明らかにする必要があり、汚染物質の濃度や原位置の温度、あるいは微生物が必要とする栄養塩や電子受容体などを考慮した最適条件をどのように発現させるかが浄化の決め手となる。しかしながら、バイオレメディエーションは技術的にまだ確立されていない上、修復には極めて長い期間を要し、必ずしも修復効率が良いとはいえない。

我が国で利用されている上記の浄化技術は、残念ながら海外から導入されたものが圧倒的に多い。今後、日本独自の技術が開発されれば、海外も含めてそのマーケットはかなり大きいと思われるが、そのためには浄化技術の基礎となる物理的・化学的・生物学的諸現象を科学的に解明しておく必要がある。たとえば、注入井戸より蒸気を注入し、回収井戸から疎水性流体、汚染地下水、汚染蒸気を回収する蒸気注入真空抽出法は、多孔体間隙に残留した汚染物質を回収できる有効な浄化方法であるが、この方法の原理を理解するためには、水・疎水性液体・土壌空気との多相流れとともに各相中における溶解成分の移流分散や、熱移動と相変化による影響なども解明

し、必要に応じて数値モデルなどにより定量化する必要がある。

#### 4. おわりに

以上、土壌・地下水の汚染質の動態および浄化法とその科学的バックグラウンドについて述べた。土壌・地下水汚染問題の解決において、土壌物理学の果たす役割は極めて大きい。しかし、地中における物質移動現象の解明には、数学、物理、化学、生物、地学といった理学系の基礎科学のすべてが関与している。このため、従来型の個別単独研究では非効率であり、土壌物理学のみならず、水文地質学、水理学（流体力学）、土壌・地球化学、微生物学などの自然科学分野の研究者との共同研究が不可欠で、さらに汚染問題に対応できる社会システムを構築するためには法学や経済学などの社会科学などの助力も必要となる。この研究分野では、これまで以上に他分

野の研究者と交流するなど、研究スタイルそのものあり方も変える必要があると思われる。

#### 参考文献

- 1) 藤縄克之 (1994) : 「誌面講座」地盤環境汚染 (6) — 地盤環境汚染の解析手法. 土と基礎, 42 (8) : 71-78.
- 2) 藤縄克之監修, 土壌・地下水汚染対策欧州視察団編 (1998) : 地下水問題とその解決法. 環境新聞社.
- 3) 藤縄克之・日比義彦・藤原幸彦 (2001) : 多孔体中における水-疎水性液体-気体の等温多相流れに関する研究の進歩. 農業土木学会論文集, No. 214 : pp. 149-158.
- 4) 安原昭夫 (1997) : 廃棄物埋立地の浸出水. 土の環境圏第4編第5章第3節, フジテクノシステム : pp. 1181-1196.

#### 質疑応答

尾崎 (国際航業) :

土を使った浄化について

藤縄 :

デモとして、肥えた土をつくり、石油で汚染された水に色素を入れて流した。きれいな水が出た。濾過機能でSSもとれる、色素は吸着された、微生物そのものもきれいにしてくれる。今後は有望と思う。

諸泉 (岡山大) :

環境物質に注目されているということですが、具体的にはどんな切り口でお考えですか。

藤縄 :

実証されているわけではない。汚染が起きているのではないかということです。環境庁が環境ホルモンの調査をしている。このなかで、地下水の調査が一度行われた。全国の北海道から九州までいろいろな所で行った。私は出るとは予想していなかったが、調査の結果、全てのところから環境ホルモンがでた。1つはエストロジオールといって生物そのものが出すホルモンである。家畜の糞尿や人間の尿尿からもでている。農村域では家畜から出たことが疑われる。都会では、下水管が漏れていることも考えられる。上水道管が水漏れするのはよく知られている。もう1つの心配の材料は、廃棄物の処分場である。ここには(廃棄された)プラスチックが遮水シートのない安定型の処分場にたくさん入っている。こういう所から溶けて出てくる可能性は十分ある。私はこういうもの

を懸念している。

宮崎 (東大) :

80年という年が確定できたのはなぜか?

藤縄 :

たぶんエイヤーです。シートメーカーでは、40年あるいは50年もちますと、言っているようだ。しかし、どこもまだ、それだけの期間使っているところがない。ただ、いくら長くとっても50年以上は無理ではないかと考えている。どこに行っても処分場のシートの周りの環境は劣悪だからだ。ネズミ、微生物、紫外線などさまざまな要因で劣化している可能性がある。これ(80年という数値)はあまり信用しないしてほしい。

石黒 (岡山大) :

産業廃棄物の欧米でのとりくみ状況は?

藤縄 :

自分の目で見したのは、3ヶ所ある。1つは、フィンランドのヘルシンキの近く。ここは花崗岩の上に処分場ができていて、シートを敷かないで山積みになっていた。その周囲に花崗岩をくり抜いた溝を掘って、そこに浸出してくる地下水を揚水して処理をするという方法を採用していた。一番印象に残ったのは、周囲に民家があるが、反対は起きなかったかと聞いたら、反対は起きたとの返答があった。その対応方法が興味深かった。まず、住民は定期的に健康診断を行う。処分の方法を決める廃棄物行政には住民の代表が入っている。住民の人たちは、余分な心配はしていないとのことだった。もう一つは、処分場の周辺にモニター用の井戸をたくさん作り、そこで定期

的にモニタリングしているので、そういう意味で、処分場の敷地のなかだけではなく、処分場の周辺まで含めて対策をとっている。しかも住民の健康診断までもやっていることに感銘をおぼえた。あと、廃棄物には産業廃棄物と一般廃棄物があるが、産業廃棄物の処理で興味深かったのは、ドイツのシュトゥットガルトの廃棄物処分場である。ここでは有機溶剤による汚染が相当深刻に起きていた。地下水汚染が大きな社会問題になる以前に、シュトゥットガルト市の方針として、工場などの廃棄物はここに捨てなさいという行政指導を行っていたようで、

それが原因で汚染が起きた。現在は市の方からかなりな補助金を投入して浄化をしている。すなわち、過去の行政指導の失敗については行政も責任をとるという姿勢がある。もう一つ、外国と比較しにくい点があるのは、降水量です。汚染が起きやすいかどうかは処分場の中の汚水の挙動にある。そのため、降水量の多い所はリスクが大きい。アメリカでもたくさん処分場があるが、降水量が少ないところは、日本で考えているようなリスクはないだろうと考えている。