

日本の汚染土壌の全体像概説

Overview of soil pollutions in Japan

松本 聡*

Satoshi MATSUMOTO*

財団法人 日本土壌協会
Japan Soil Association

摘 要

国土面積が小さい割には、国内随所に鉱山が分布したわが国には、古くから鉱山廃水がもたらす重金属類による土壌汚染が発生してきた。土壌が重金属類で一旦汚染されると、土壌中での重金属類のきわめて遅い移動性を反映して、掘削除去しない限り土壌汚染は消滅しない。すなわち、重金属類による土壌汚染は典型的なストック汚染である。そのため、現在でも、都市・農村地域を問わず、重金属類による土壌汚染が明るみに出るケースはあとを絶たない。一方、重金属類以外の物質による土壌汚染も時代の変遷とともに出現した。農薬、ダイオキシン、PCB、油類、トリクロロエチレン、ベンゼンなど微量で強い発がん性を有する難分解性の有害有機化合物による土壌汚染である。これらの物質は土壌中では重金属類に比べてはるかに大きな移動性を有し、地下水系への拡散の可能性もあり、新たな対策が求められている。土壌汚染問題は、大気汚染や水質汚濁問題のように公共財で起こる問題でなく、私有財で起こる問題であるので、法制化に当たっては、時間を要するだけでなく、地域住民の同意をどのように取り付けるか、未だに多くの課題を残している。

キーワード：掘削除去、重金属汚染、ストック汚染、難分解性有害物質による汚染、封じ込め工法

Key words : excavation and elimination of polluted soil, soil pollution by heavy metals, stock pollution, soil pollution by less decomposable materials, sealed construction method of polluted soil

1. 土壌汚染とは何か

土壌汚染とは何かは、感覚的には分かっても、これを明確かつ厳密に定義づけた語彙は筆者の知る限り、見当たらない。まず、土壌とはどこまでを土壌とするかを限定しなければならない。農耕地における土壌汚染、すなわち、作土(地表面からほぼ15 cm までの深さの土壌)が鉱山廃水中の重金属類で汚染されたことから始まるわが国の土壌汚染は、現在では、都市域の土地を構成する物質全般までを指しており、汚染の対象土壌は農耕地土壌に限ったことではない。しかし、汚染という言葉は、人間の諸活動が高じて本来、生物の生存に何ら悪影響を及ぼすことがなかった環境に、好ましからぬ状況を生じさせることと解すれば、土壌汚染とは何かを考える場合に、その定義の輪郭が見えてくると思われる。すなわち、人間の様々な活動が、土地基盤を含む土壌環境に新たな有害な物質の蓄積をもたらし、その結果、人の健康および安全な生活環境を脅かし、ま

た、他の生物の健全な生育を阻害することであると、ここでは定義しておく¹⁾。

この定義では、「新たな有害な物質の蓄積」が土壌汚染を定義するもう一つのポイントになっているが、無害な物質であれば蓄積しても土壌汚染にはならないかという問題が生じてくる。たとえば、栄養無機塩類(塩化ナトリウムなど)の多くは無害ではあるが、人為的に多量に土壌に蓄積される場合があり、植物(作物)は塩害で大きな被害を受ける^{2), 3)}。この場合も、本来の土壌環境が悪化するので、広義の土壌汚染に当たるであろう。しかし、本稿では土壌汚染の定義をこのように拡大することはしないで、新たな有害な物質の土壌・土地への蓄積と、その結果もたらされる人の健康被害、生活環境への影響が懸念されることを土壌汚染であるとし、記述を進めることにしたい。

受付：2009年10月14日、受理：2009年11月21日

* 〒010-0917 秋田市泉中央4丁目17-37, e-mail : dqchs219@ybb.ne.jp

2. 土壌汚染の機構と汚染の拡大

本稿の摘要の部分で、土壌汚染の特徴として、それがストック汚染であることを述べた。しかし、汚染原因物質(以下、汚染物質という)が土壌にひとたび蓄積された後には、確かに土壌系から容易に抜け出せないストック汚染になる傾向は強いが、厳密に言うところ汚染された土壌からその一部が離脱して他の系に移行したり、または微細粒子となって、土壌に付着したまま、移動したりする場合もあり、ここではそれらを拡大(伝搬)として扱い、これについても言及したい。

土壌汚染の機構は、汚染物質が大気や水を汚染していく過程とは大きく異なり、その様相はきわめて複雑である。この原因は、土壌が空気や水のように比較的均一な相から構成されていないためである⁴⁾。物質の存在形態を固相、液相および気相の3相に区別すれば、土壌は一般には固相に区分されがちであるが、決して単一の固相から構成されているものではない。土壌には、固相の他に、気相(土壌空気)、液相(土壌水)が存在し(土壌三相という)、土壌の置かれている状態によっては、これらの相が存在する体積の割合は、たとえば、固相：40%、気相：20%、液相：40%というように、土壌の気相と液相の合計体積率が固相のそれを上回る場合がしばしばある。しかも、土壌の三相はそれぞれ特有の組成と機能を有することから、汚染物質が土壌に混入すると、それぞれの相で特有の反応系が進行することになる(図1)⁴⁾。たとえば、一般に土壌空気は大気組成よりもはるかに高い炭酸ガスの分圧を示し、土壌水は炭酸塩、硝酸塩などの水溶性塩類が高濃度で存在する。さらに土壌の固相部分は、石英砂のように物質の吸着能の低い部分と、粘土や有機物のように吸着能の高い部分とが混在していて、吸着容量一つをとって見ても、一様ではない。加えて、この複雑な構造のなかに土壌生物が棲息しており、土壌生物と汚染物質との反応(主として、土壌生物による分解や

取り込み)も起こっていると考えられる。このように、土壌中の微視的な環境があまりにも複雑であるが故に、土壌に入った汚染物質が土壌中でその後どのような形態をたどるかについては不明な部分が多く、この分野の詳細な研究が待たれるところである。

ところで、汚染物質が土壌を汚染した現実問題を考えると、汚染物質が土壌に入る前と後とで、汚染物質の濃度が云々されるケースがほとんどであり、濃度の増加には、汚染物質が無機化合物であれ、有機化合物であれ、「土壌の強い吸着機能」が関与している⁵⁾。

土壌に吸着機能が存在することは紛れもない事実であるが、汚染された区域の土壌をトータルで考える場合、強い吸着が永久に持続するのかどうかは明らかではない。高濃度の電解質溶液の存在下であれば、重金属イオンと土壌コロイド間の交換反応が、また、難分解性の有害有機化合物と土壌腐植との吸着であれば、その土壌溶液の反応(pH)が、重金属や有害有機物のその後の行動に重要な影響をもたらすことが予想される。このようなことから、汚染土壌区域では「本格的な土壌調査」が必須であると考えられる。従来の調査は掘削による調査が主体で、掘削によって得た土壌試料から、汚染物質の種類と埋設位置を特定することにその目的があった^{6), 7)}。これは、土壌汚染がストック汚染であるという前提に立っているからであり、汚染物質の現場での動態を探る本格的な土壌調査とはいえない。筆者の期待する調査とは、ボーリング調査により、地下水調査と併行して、汚染物質の埋設位置を中心に土壌試料を採取し、汚染物質の濃度柱頭図(垂直濃度分布図)とその部位での形態を明らかにし、その動態を把握することである。更に、可能であれば、ボーリングによる調査の範囲を広げることによって、汚染物質の水平方向への動態も把握する。このような調査ではじめて、地下に埋設された汚染物質の動態とその後の拡散(伝搬)の予想がより確かな精度で得られ、地域住民に説明可能な資料を提供できるものと考え

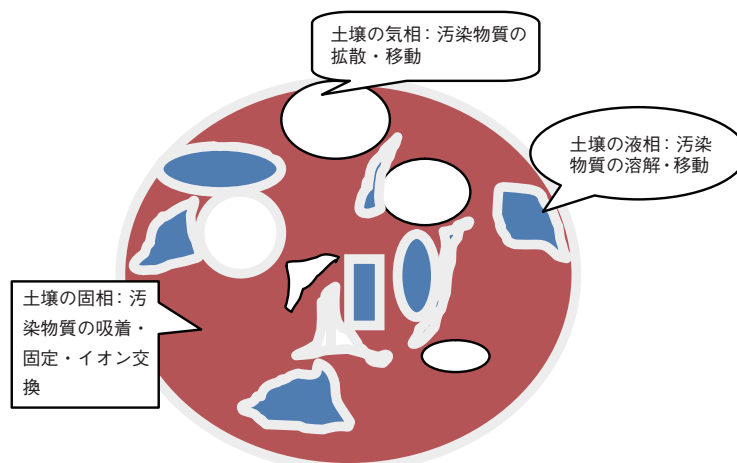


図1 土壌三相の概念図.

る。

地下水面に接する汚染土壌からの有害物質の拡散以外に、汚染土壌が露出している場合には、風雨によって、汚染物質が移動し、汚染範囲を拡大する。とくに、細かい土壌粒子が汚染物質を付着したまま風で運ばれると、汚染範囲を著しく広げることだけにとどまらず、衣服に付着して屋内にまで汚染をもたらす可能性がある。また、かつて、残留性の強い農薬が牧場に散布されたことにより、牧草→乳牛→母乳→乳幼児という経路で、乳幼児の体を蝕む事件も発生した⁸⁾。このように、土壌汚染そのもの、またその拡大は、私たちの五感に訴える部分が弱いため、深く、静かに潜行する汚染であるという認識を強く常にもつことが必要である。とくに、表層近くに存在する汚染土壌に発する汚染の拡散速度は大きく、広範になることから、直ちに厳重な措置を施さなければならない。

3. わが国での土壌汚染の事例^{9) - 12)}

繰り返しになるが、土壌汚染とは「有害物質が存在しない土壌に外部から汚染原因物質が新たに混入すること」から発生する。有害物質が土壌に混入する経路は様々なケースが存在するが、ケースごとにこれまでに起こった事例の主たるものを部分総括して、表1に示した。表1のケース1～10の事例は必ずしも年代順にはなっていないが、わが国における土壌汚染の時代的経緯を推察することができる。農耕地の土壌汚染からはじまり、現在では経済リスクが絡んだ土地資源の汚染まで内容が変貌し、複雑化していることがわかる。もちろん、これらの土壌

汚染問題はどれ一つとして現在に至るまで、完全には解決されていない。これは、土壌汚染問題は大気汚染や水質汚濁と違って、発生源対策を完璧に行っても、問題の根本的な解決にはならないことが多いからである。たとえば、現在、廃坑になった鉱山からの廃水は厳重な水質管理のもとで処理されているので、発生源対策はなされている。しかし、かつて汚染された広範囲の土壌地帯の土壌は撤去されることなく、汚染されていない清浄な土壌を安全な厚さに土盛り(客土)して、安全な農産物が生産されている。このように、土壌汚染とその対策はその土地の使用目的に合わせて技術的にも、経済的にも修復可能な方法を選択して、当面の問題を回避する実際的で、現実的な方策がとられることが多い。

4. わが国における土壌汚染の歴史的経緯とその汚染に関わる法律制定に至る経緯

わが国における鉱山の開発は奈良時代に遡ることから、鉱山廃水による土壌汚染の歴史も非常に古いと想像されるが、残念ながら明治時代以前にその明確な記述を求めることはできない。わが国の土壌汚染のもっとも古い記述は1887年、足尾銅山の鉱山廃水中に含まれる銅が渡良瀬川の沖積土壌地帯に分布する水田のイネを枯死させた事例である。社会的に大きなこの事例は足尾銅山鉱毒事件として有名ではあるが⁹⁾、イネを枯死させた原因物質が銅であると特定するには、当時の東京帝国大学農科大学農芸化学科の調査を待たなければならなかった。次いで起こった大きな土壌汚染問題は神通川流域の水田地帯におけるカドミウムによる汚染であった¹⁰⁾。しか

表1 わが国でこれまでに起こった主要な土壌汚染の事例。

ケース	汚染の経路	汚染原因物質
1	鉱山事業所の不完全な廃水処理施設から流出した汚染物質が河川流域の主として沖積土壌を汚染	銅, カドミウム, ヒ素, アンチモンなど
2	毒性の強い農薬の農耕地土壌への施用または混入	BHC(γ -HCH), デルドリンなど ^(*)1)
3	金属精錬事業所の不完全な煤煙処理施設から排出された汚染物質が事業所周辺の土壌を汚染	亜鉛, カドミウム, 銅など
4	電力事業所で使用済みの石炭灰や製鉄事業所で使用済みの鉱滓堆積物からの漏水が周辺土壌を汚染	フッ素, ホウ素など
5	鍍金(メッキ)工場などからの廃水が漏水し、土壌の下層土部分を汚染	六価クロム, シアン化合物など
6	ゴミ焼却場の不完全な設備から排出された煤煙による周辺土壌の汚染	ダイオキシン, ダイオキシン類 ^(*)2)
7	先端技術である半導体の製造工程で使用される毒性の強い有機塩素系溶剤が地下に漏出し、下層土を汚染	トリクロロエチレンなど有機塩素系溶剤
8	内燃機関, 製油所などから排気される窒素酸化物および硫黄酸化物などの粉塵による土壌汚染	窒素酸化物および硫黄酸化物など ^(*)3)
9	ガソリンスタンド, 廃油処理工場などの事業所から漏出した油類による土壌汚染	石油など鉱物油, ベンゼン
10	工場跡地の土地利用改変に伴う土壌調査で、工場稼働時に使用された有害物質による下層土の汚染が判明	ベンゼン, シアン, 鉛, ヒ素, 六価クロム, 水銀, ダイオキシン類

*1: 毒性の強い農薬は現在製造・販売中止。低毒性農薬が中心に市場に出回っている。

*2: ダイオキシン類対策特別措置法の制定(1999年)により、ゴミ焼却場からの排出は現在は報告されていない。

*3: 硫黄酸化物は脱硫装置の高度化により、現在はほとんど問題のないレベルになっているが、窒素酸化物については未解決の部分が多い。

し、カドミウムによる汚染が明らかになったのは、土壌汚染の発見以前に、流域に住む主として高齢の経産婦を中心に起こるイタイイタイ病の原因物質が萩野昇医師らの現地調査によって、カドミウムに起因することが指摘されてからである。それによって、上流の神岡鉱山の廃水に由来する流域の沖積土壌の土壌汚染がはじめて明らかにされた。以上の二つの大きな土壌汚染問題で明らかのように、汚染原因物質の特定は植物の生理障害や人の疾病が引き金になって発見されたもので、当初から土壌汚染があるという認識はなかった。このように、土壌汚染を指摘するには、比較的高いレベルの化学分析技術が要求され、また、土壌が汚染されているのではないかという社会の高い関心が必要であった。当時はこの両方を満たすほどの社会的環境にはなかったため土壌汚染が社会問題化することが少なかったと考えられる。しかし、これらの土壌環境問題以後に起こった土壌問題、すなわち、鳥取・島根両県のヒ素による土壌汚染¹¹⁾、安中市の金属精錬工場からの煤煙による亜鉛・カドミウムによる土壌汚染¹²⁾、水俣湾の底質土の水銀汚染、さらには、高度経済成長期に次々と発見された種々の有害な難分解性有機化合物による土壌汚染は、公害に寄せる社会的関心の高まりと分析技術の進歩を反映して、その汚染物質の特定が短期間になされるようになった。

このように、土壌汚染問題がわが国の環境問題のなかでも、重要な部分を占めていたにもかかわらず、1967年に制定された「公害対策基本法」(1993年、「環境基本法」が制定されたのを受けて廃止)では、土壌汚染は対象にされなかった。土壌汚染防止に関する法律の制定は、1970年12月に制定された「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」が嚆矢である。そして、1991年8月に当時の環境庁から、「土壌の汚染に係る環境基準」(土壌環境基準)として、ようやく告示された。この告示は、人の健康保護と生活環境保全のために維持することが望ましい基準(環境基準)として定められたもので、当初は10項目であったが、その後数次にわたって改正され、現在では27項目に及んでいる。

土壌環境基準の27項目に挙げられている汚染物質は、土壌から地下水など他の系に溶出する可能性がある物質(項目)を「溶出基準項目」として挙げ、六価クロム、PCB、水銀など26項目が定められている。一方、農作物(コメ)に対する影響および農作物(コメ)に汚染物質が蓄積することによる人の健康に対する影響の観点から、カドミウムなど3項目が定められている(両方の項目を合わせると、29項目になるが、両方の観点にまたがる項目が2項目あるので合計27項目となる)。こうして、土壌汚染に対する法的な整備が進むなか、2002年に「土壌汚染対策法」が制定され、翌年2月に施行された。上述の「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」が制

表2 わが国における土壌・水・地下水に関連した基準・指針・法、年代順告示。

設定年	基準・指針・法の設定内容
1970	農用地の土壌の汚染防止等に関する法律
1986	市街地土壌汚染に係る暫定対策指針(9項目)
1989	水質汚濁防止法の改正
1991	土壌環境基準の設定(10項目)
1992	国有地に係る土壌汚染対策指針の設定
1993	環境基本法
1994	土壌環境基準の項目追加(25項目)
1994	重金属に係る土壌汚染調査・対策指針 有機塩素化合物に係る土壌汚染調査・対策暫定指針
1996	水質汚濁防止法の改正
1997	地下水の水質汚濁に係る環境基準の設定
1999	1994年の土壌汚染調査・対策指針の改定
2002	土壌汚染対策法の制定
2003	土壌汚染対策法の施行
2009	土壌汚染対策法の一部を改正する法律の公布

定されて実に32年後の制定である。なお、2009年4月に同法の一部を改正する法律が公布され、2010年の施行に向けて準備が進行中である。表2には、わが国における土壌汚染ならびに地下水などに関連する基準・指針・法令を年代順に示した。

土壌汚染に関する対策の法制化の時期が、大気汚染や水質汚濁関連の対策のそれらに比べると格段に遅れ、長く環境行政上の課題になっていた。これは、土壌汚染の問題はこれまで述べてきたように、大気汚染や水質汚濁問題とは異なり、発生源を断れば汚染が解消するフロー(流れ)汚染ではなく、一度生じた汚染は掘削除去しない限り長くその場所に残留するストック(貯蔵)汚染であること、汚染の対象が大気などのように公共財ではなく、私有財産であること、汚染があっても人が直接摂取しない限り、健康被害のおそれは少ないことなどの特徴があるためである。そして、これを法律で規制しようとする場合には次のような検討課題があり、これらが、法制化を遅らせたという指摘がある⁷⁾。

- ①土壌汚染対策を実施する要件はどのようなものとするべきか。とくに、人による暴露の可能性をどのように評価するのか。
 - ②多額の費用を要する汚染対策の実施主体は誰であるべきか。汚染原因者や土地所有者か、行政か。
 - ③汚染原因者を実施主体とした場合は、汚染原因者が不明または存在しない場合には、誰を実施主体とするか。また、行政を実施主体者とした場合には、行政が私有地を対象に事業を行うことが適当か。
- などである。

引用文献

- 1) 利根川治夫(1985)土壤汚染, 大百科事典, 平凡社.
- 2) 中野政詩・宮崎 毅・松本 聰・八木久義・小柳津広志(1997)土壤圏の科学, 朝倉書店.
- 3) 松本 聰(2003)大地からの収奪と再生. 原田信男(編), 食と大地. ドメス出版, 184-206.
- 4) 八幡敏雄(1983)土壤の物理, 東京大学出版会.
- 5) 日本土壤肥料学会(編)(1981)土壤の吸着現象, 博友社.
- 6) 環境省(2002)土壤汚染対策法施行規則, 環境省令第29号.
- 7) 土壤環境法令研究会(2003)逐条解説土壤汚染対策法, 新日本法規.
- 8) 市川定夫・石田和男・伊藤重行・佐藤敬三・永田靖(監修)(1992)環境百科, 駿河台出版社.
- 9) 古在由直(1892)足尾銅山鉍毒の研究. 東京化学会誌, 13, 26.
- 10) 山根忠昭・山路 健・高見有一(1976)ヒ素汚染土壤における水稻生育障害の発現機構とその対策(第1報). 鳥根農試研報, 14, 1-17.
- 11) 丹野 貢(1979)神通川流域におけるカドミウム汚染の実態と対策. 渋谷政夫(編著), 土壤汚染の機構と解析, 産業図書, 72-78.
- 12) 浅見輝男・本間 慎・田辺晃生・畑 明郎(1974)生野鉍山周辺におけるカドミウム等の重金属汚染. 日本の科学者, 9, 35-40.



松本 聰

Satoshi MATSUMOTO

2001年3月、東京大学大学院農学生命科学研究科応用生命化学専攻教授を定年退官後、秋田県立大学生物資源科学部教授として、2007年3月まで勤務。両大学の名誉教授。現在、(財)日本土壤協会・会長。専門は環境土壌学であるが、

土壤だけに捉われず、土壤と関連した、人間も含めた生物圏、水圏、気圏までも研究対象にし、土壌圏科学とも言うべきマクロな生態学への進出を目指している。共著書中、たとえば「人口と食糧」「土壌圏の科学」「土壌圏と地球温暖化」「食と大地」「土」などの執筆は土壤の有する機能が人や生物の生き様にどのような影響をもたらしているかを解説したもので、上述の筆者の意図を表したものである。本誌の創刊号から編集委員(2002～2005年編集委員長)。

