特集2・土壌・底泥中の重金属—動態モデル、汚染の事例から修復技術まで—

重金属による土壌汚染の対策技術

保 賀 康 史*・藤 長 愛一郎*・大 山 将*

1. は じ め に

現在の土壌汚染問題の多くは都市部での工場や事業所跡地等で発生しているが、古くは水銀やヒ素、銅などの重金属による農用地の土壌汚染を原因とする公害問題に始まる。この農用地の土壌汚染については、昭和45年に公害対策基本法や水質汚濁防止法などと共に農用地の土壌の汚染防止等に関する法律が制定され、同法に基づく汚染地の調査、客土等の対策が実施されてきた。

その後、昭和50年代から60年代には東京都内や千葉県での六価クロム鉍さいによる土壌・地下水汚染、国立研究所跡地での水銀による土壌汚染など、市街地での問題発生が相次いだ。

この様な状況の中で、平成3年に土壌の汚染に係る環境基準（土壌環境基準）が設定されるとともに、土壌汚染調査・対策指針（環境庁水質保全局）が策定され、重金属類や農薬による土壌汚染の有無を判断する基準及び対策を講ずる際の目標などが設定された。そして有機塩素系化合物等による土壌汚染の顕在化にともない、平成6年には上記の指針に有機塩素系化合物に係る土壌・地下水汚染調査・対策暫定指針が追加、改訂された。

さらに平成11年には平成6年指針を全面改訂した「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針及び同運用基準（環境庁水質保全局）」が策定された。この指針・運用基準には平成5年度から環境庁により実施された「土壌汚染浄化新技術確立・実証調査」の結果も生かされ、具体的な対策技術も示されている。

最近では、工場跡地等の再開発・売却の際や環境管理の一環として汚染調査を行う事業者が増加、あるいは都道府県等による地下水の常時監視が拡充するなど、汚染問題の顕在化の傾向が進み、土壌汚染

対策技術の研究・開発が一層図られるようになった。

2. 重金属等による汚染対策の動向

鉛やヒ素、六価クロムなどの重金属汚染土壌の浄化においては、掘削除去後に場外へ搬出、運搬して、処分されることが多く、その場合は産業廃棄物の最終処分場に埋立て処分されていた。最近では、汚染土壌を洗浄や焼却して無害化し、覆土材やセメント原料として再利用される場合もある。また、処理コストの低減と再利用の観点から、オンサイト処理して埋め戻し材料に再利用する場合も見られるようになってきている。

また、電氣的に土壌中の汚染物質を移動させて処理する方法の研究開発も見られるようになった。

3. 土壌汚染対策法と修復技術

土壌環境基準項目などの有害物質による土壌汚染は、放置すれば人の健康に影響が及ぶことが懸念されることから、国民の安全と安心を確保するため、その環境リスクを適切に管理し、土壌汚染による人の健康への影響を防止する必要があるとして、本年1月には「今後の土壌環境保全対策のあり方」が中央環境審議会で取りまとめられ¹⁾、これをもとにして本年5月に土壌汚染対策法が成立、公布された。

この法律では、調査によって汚染されていることが判明した土地は指定区域とされ、都道府県が土地所有者等に対し、汚染の除去等の措置の実施を命ずることができる²⁾としており、適用できる措置例は次のように示されている²⁾。

(1) 直接摂取によるリスクの観点から必要な措置

① 立入禁止措置

② 舗装措置

* (株) 鴻池組 Yasushi HOUGA, Ai-ichiro FUJINAGA, Sho OHYAMA

- ③覆土（盛土措置）
- ④その他の覆い措置
- ⑤指定区域外土壌入れ替え措置
- ⑥指定区域内土壌入れ替え措置
- ⑦原位置封じ込め措置
- ⑧遮水工封じ込め措置
- ⑨遮断工封じ込め措置
- ⑩掘削除去措置
- ⑪原位置浄化措置
- (2) 地下水等の摂取によるリスクの観点から必要な措置
 - ⑫原位置不溶化措置（重金属等に限る）
 - ⑬不溶化埋め戻し措置（重金属等に限る）
 - ⑭原位置封じ込め措置
 - ⑮遮水工封じ込め措置
 - ⑯遮断工封じ込め措置（揮発性有機化合物を除く）
 - ⑰掘削除去措置
 - ⑱原位置浄化措置

次に、上記の汚染の除去等の措置に対応する技術の例として、筆者らが経験し、対応してきた中から重金属による土壌汚染の対策技術に関して述べることにする。

4. 重金属汚染土壌の修復技術

重金属汚染土壌の修復技術として、色々な技術が各企業によって用いられているが、筆者らは掘削・封じ込め、固化・不溶化、土壌洗浄、間接熱脱着、溶融固化技術（ジオメルト工法）を単独あるいは複合させて使用している。これらの工法は、汚染物質の種類や濃度、現場の状況などによって選択される。

4.1 封じ込め・掘削

1) 封じ込め

汚染土壌対策方法として、「浄化」と「封じ込め」に大別できる。「封じ込め」とは現場や処分場で遮水工や遮断工を施工し、汚染を拡散しないようにする方法である。ここで、遮水工とは管理型最終処分場に、遮断工とは遮断型最終処分場の規格に準拠したものである。溶出量値Ⅱ以下の汚染土壌は遮水工を、この値を超過する土壌は遮断工を施工して封じ込める。

原位置での遮水工では、遮水壁を不透水層まで構築し遮水を行っている。遮水壁の構築には種々の工法があるが、設定条件を満たすための設計と精密な

施工技術が要求される。また、掘削後の遮水工では、遮水シート等による遮水を行っている。

2) 掘削

汚染土壌の掘削には環境保全対策が必要であり、汚染物質の種類と濃度により、粉じん対策が必要となる。重金属でも微細粒子となって大気中に飛散しやすい場合には、飛散防止建屋などの対策が必要となる場合もある。現場の周辺環境を保全し、近隣住民の健康を守ることは、浄化工事を行ううえで最優先されるべきである。また、汚染土壌を直接扱う作業員が粉じんや汚染物質にばく露されないように対策することも必要である。この場合も、汚染物質の種類と量に応じたばく露対策を行って掘削を行っている。

以上の環境保全対策を行ううえで、適切なモニタリングを行い、対策が効果的かつ正常に行われているかを確認することは必要不可欠である。

3) 対策事例 有機ヒ素化合物撤去対策

①概要

地中のコンクリートピット内に収納された有機ヒ素化合物（最高濃度25%）と周囲の汚染土壌（約

写真1 粉じん飛散防止建屋

写真2 飛散防止建屋内での掘削状況

9,000 m³) の撤去工事を実施した。銅矢板で汚染領域を遮蔽し、飛散防止建屋内で掘削撤去を行った。撤去物は専用容器に封入し、海上運搬により指定の処分業者に搬出した。

②環境保全・安全対策

- ・粉じん飛散防止建屋による周辺環境への汚染物質の拡散防止 (写真1, 写真2)
- ・フィルター式集塵装置の設置
- ・粉じん, 有毒ガスの測定および常時監視
- ・監視モニターによるハウス内の常時監視
- ・密閉型防護服の使用
- ・作業員の特殊健康診断の実施
- ・浸出水処理設備の設置・運転管理

4.2 固化・不溶化

汚染土壤にセメント等の固化材や薬剤を混合して、物理・化学的に汚染物質の溶出を抑制する方法であり、操作が比較的簡単で大量の処理が可能となる。また、短期間での処理が可能で比較的安価な方法と考えられているが、処理後は封じ込め処分等の対応が必要な場合がある (写真3)。

セメントによる重金属等の固定化の原理は、以下のように考えられる³⁾。

- ・セメント水和物の生成により、汚染物質を物理的に封じ込める (移動性・溶出性の縮小)
- ・水酸化カルシウム飽和状態の中で重金属は水酸化物となり不溶化される (溶解度の減少)
- ・水和生成物は重金属を吸着する作用があり、重金属を固定する (吸着固定)

固化・不溶化工法では、セメントなどの固化材を添加・混合して高い強度を持つ固化体に汚染土壤を改質するとともに、汚染物質の溶出濃度を大幅に低減することが可能となる。固化材の選定や土質に応じた混合方式と添加量の設定が重要となる。

また、筆者らは、セメント以外にもより不溶化効果の高い特殊固化材 (マグネシウム系固化材) に関

写真3 固化・不溶化処理状況

しても適用を進めている^{4) 5)}。表1に各種実汚染土壤に対して高炉セメントB種およびマグネシウム系固化材を用いて固化・不溶化処理した事例の一部を示す。

汚染物質の溶出量が土壤環境基準以下まで不溶化することを目標として処理したものであるが、シアン、フッ素汚染土壤や鉛を含む複合汚染土壤に対してマグネシウム系固化材が優れた不溶化効果を発揮することが確認できる。

4.3 土壌洗浄

掘削した土壌を機械的に洗浄・分級して汚染物質を分離・除去する方法である。

下記に、筆者らが用いている土壌洗浄の処理フロー⁶⁾ (図-1) を示す。

汚染土壤は水と共に洗浄機に投入され、汚染物質を土壤から分離するため同装置内で解砕される。洗浄機から排出されたスラリー状の土壌は分級機において汚染物質を含む濁水と土壌 (粗粒分) に分離される。この土壌は分級機出口部ですすぎ洗いされ、洗浄土として回収される。一方、濁水中の汚染物質は水処理設備において分離・回収され、最終処分される。

この洗浄法では、界面活性剤などの洗浄助剤を使わずに高い浄化効率を得ることができるため、発生する濁水の処理が容易であると共に、従来の土壌洗浄処理に比べ使用水量が少ない。また、大量の処理

表1 固化・不溶化処理事例

汚染土壤	シアン汚染土壤	フッ素汚染土壤	鉛・ヒ素・セレン複合汚染土壤		
測定項目	シアン (mg/L)	フッ素 (mg/L)	鉛 (mg/L)	ヒ素 (mg/L)	セレン (mg/L)
原土壌	3.1 [37]	2.7 [110]	0.09 [790]	0.25 [230]	0.041 [24.8]
高炉セメントB種	0.14	0.47	0.017	0.007	< 0.005
マグネシウム系固化材	< 0.1 (N.D.)	< 0.08	< 0.005	< 0.005	< 0.005
[処理目標] 土壤環境基準	検出されないこと	0.8	0.01	0.01	0.01

※原土壌の [] 内は含有量 (mg/kg)

図-1 洗浄フロー図

写真4 土壌洗浄設備全景

図-2 分級洗浄による効果

が短時間で可能で、油と重金属類の複合汚染にも適用可能である。

浄化事例として、都市ガス工場跡地の土壌洗浄⁷⁾を下記に紹介する。

石炭を主原料として都市ガスを製造していた都市ガス工場跡地から検出されたシアン汚染土(約

18,000 m³)を土壌洗浄を用いて浄化した(写真4)。

シアン溶出量が0.5 mg/L以上の土壌に関する投入土および洗浄土の分析結果を図-2に示す。分級洗浄によるシアン除去率は90%以上であり、平均除

図-3 間接熱脱着の概略構成

図-4 間接熱脱着設備 (TPS) 配置図

去率は96%を達成した。

4.4 間接熱脱着

土壌を加熱することにより、汚染物質を揮発させて分離する方法であり、低沸点重金属や油、有機塩素系化合物等による汚染土壌を対象とする。

当社では加熱方式にダイオキシン類等が発生しない間接加熱方式を採用している(図-3)。

汚染物質の種類・濃度や土質による影響が小さく、複合汚染にも対応可能であり、汚染土壌の現地処理が可能である。また、短期間での処理が可能であるが、分離された汚染物質は別途処理が必要である。間接熱脱着設備配置図の例を図-4に示す⁶⁾。

4.5 ジオメルト工法

土壌中に挿入した電極間に通電し、ジュール熱で

汚染土壌を熔融(1,600℃以上)することにより土壌中の汚染物質を分解無害化または安定したガラス固化体中に封じ込める(図-5)。処理対象物質は、重金属類の他、ダイオキシン類⁹⁾、PCB類、農薬、放射性廃棄物等がある。

この技術は、有機・無機の汚染物質が混在する複合汚染にもオンサイト処理による対応が可能であり、処理後はガラス固化体となり減容効果が大い。また、ガラス固化体は、無害かつ安定しているので再利用可能である。

このシステムでは、熔融に伴い発生した排ガスは、二次加熱設備で850℃で2秒間燃焼し、湿式洗浄を経て、さらにHEPAフィルター、活性炭フィルターで浄化して大気放出する。

この工法を用いた有害物質の浄化事例として、以下にダイオキシン類汚染物のジオメルト処理について述べる。(写真5)

焼却施設解体に伴って発生したダイオキシン類汚染混合廃棄物(焼却灰、廃水処理汚泥、鉄くず等15.6m³)をジオメルト工法で処理したことにより、ダイオキシン類が、周辺環境を汚染することなく、ほぼ完全に浄化できた(表2)。

また、水銀、ヒ素、カドミウム、クロムなどの重金属類についても、処理後の固化体および大気放出ガス中の濃度はいずれも規制値を満足していた。ジ

図-5 ジオメルト処理システムの構成

写真5 ジオメルト設備 (1トン/バッチ)

表2 ダイオキシシン類濃度モニタリング結果

対 象	単 位	濃 度	基準値
処理前	pg-TEQ/g	100,000程度	1000
処理後の固化体	pg-TEQ/g	0.2以下	1000
大気放出ガス	pg-TEQ/m ³ N	0.02以下	100
敷地境界の大気	pg-TEQ/m ³	0.3以下	0.6

敷地境界は溶融地点から25～50m離れている

オメルト工法はダイオキシシン類などの有機物だけでなく重金属類についても、周辺環境を汚染することなく、浄化できることが実証されている。

なお、本工法は、英国 AMEC 社が実施権を保有する技術である。日本国内においては、鴻池組他4社により設立された(株)アイエスブイ・ジャパンが実施権を保有している⁸⁾。

5. お わ り に

本稿では特に重金属等の土壤汚染に対する対策技術を中心にについて述べたが、これらの技術を単独

あるいは複合して適切に用いることで、対象とする汚染物質や濃度、土質など、より幅広く対応できるものと考えている。また、環境負荷の軽減やコスト面から、より新しい技術の開発が進められている。

しかし、これらの技術を用いて浄化対策を行い、汚染問題の解決を図る際にも、周辺住民への説明や関係自治体の理解を得ることは必要不可欠である。この面からも、信頼に足る技術開発と適用を心掛けていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 中央環境審議会答申：今後の土壤環境保全対策の在り方について (2002)
- 2) 中央環境審議会答申：土壤汚染対策法に係る技術的事項について (2002)
- 3) 山田哲司，大山将：セメントなどの固化材による重金属類汚染土壤の固化・不溶化処理について，地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究集会第8回講演集，p45-48 (2002)
- 4) 大山将，小山孝：重金属類汚染地盤に対するセメントによる固化・不溶化効果に影響を与える要因について，第5回地盤改良シンポジウム (投稿中)
- 5) 大山将，小山孝他：重金属類汚染土壤の固化・不溶化処理に関する検討，第13回廃棄物学会研究発表会 (投稿中)
- 6) 笹本譲，中島卓夫他：汚染土壤の洗浄・熱脱着による浄化システムの開発，鴻池組技術研究報告，Vol.12，p17-24 (2002)
- 7) 直井彰秀，有田昌義他：分級洗浄法によるガス工場跡地の環境修復，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，p.615-616 (2002)
- 8) 木川田一弥，安福敏明，太田幹夫：ジオメルト工法によるダイオキシシン類汚染土壤・廃棄物の無害化，地球環境，33，(4)，pp.111-113 (2002)
- 9) 西村良平，橘 敏明：高濃度ダイオキシシン類汚染焼却炉の解体とダイオキシシン類汚染物の現地無害化処理，資源環境対策，38，(7)，p.35-40 (2002)