

バイオレメディエーションによる汚染土壌の修復

大澤 武彦 (株)アイ・エス・ソリューション

キーワード：バイオレメディエーション(Bioremediation)、土壌汚染対策法(Soil Contamination Countermeasures Law)、ランドファーミング(Land Farming)、バイオパイル(Biopile)

“土壌汚染対策法”の概要、土壌汚染の現状、さらに土壌環境修復エンジニアリングの進め方について述べている。今後の汚染土壌浄化技術の一翼を担うのはバイオレメディエーションである。バイオレメディエーションには、利用する微生物の違いによりバイオスティミュレーションとバイオオーグメンテーションがあるが、前者が今後増加する油汚染土壌の浄化に適用が期待される。

バイオレメディエーションの実施例として、“ランドファーミング”、“バイオパイル”、および“バイオスパージング”を紹介している。

はじめに

土壌汚染問題は大気汚染、水質汚染問題に次ぐ新たな環境問題であるといわれて久しい。

顕在化する土壌汚染の増加などを背景に土壌汚染の法制化が求められるようになり、2003年2月に“土壌汚染対策法”（以下、“土対法”という）が施行された。さらに、環境省は2006年3月に市民の生活環境と身近に関係する軽油、灯油、ガソリンや潤滑油などによる油汚染土壌対策にかかわる“油汚染対策ガイドライン—鉱油類を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方”（以下、“油ガイドライン”という）を示している。

現在、土壌汚染修復市場での土壌汚染調査・対策工事は、①企業の買収・合併(M&A)に伴う閉鎖工場・事業場敷地の売却、②不良資産の売却、③担保不動産の価値回復・向上、④法令を遵守した企業経営(コンプライアンス活動)を行うこと、⑤企業が環境ISOを取得するなどの積極的な環境管理活動を行うことなど大半が土地取引および土地の価値回復・向上を契機・目的として行われている。

これを背景に土壌汚染の調査および対策工事を含む土壌汚染修復市場は拡大傾向にある。これも、土壌汚染は私有財産と密接にかかわる問題であるからだろう。

最近の土壌汚染対策技術では、汚染物質を分解・除去する方法が注目され、それには化学的に汚染物質を分解・除去する方法と微生物の働きを利用する生物学的分解法がある。後者を一般に“バイオレメディエーション”という。

バイオレメディエーションは、米国では、1980年にはすでに革新的な対策技術として実用化され、スーパーファ

ンドサイトで適用されている⁸⁾。日本においては、1990年には数社からなる企業コンソーシアムが結成され、原位置バイオレメディエーションの研究開発が行われている⁹⁾。

2005年3月には経済産業省および環境省はバイオレメディエーション事業の健全な発展と利用の拡大を期待し、特に後述するバイオオーグメンテーションを実施する際の安全性の評価手法および安全の管理手法などのための基本的要件をまとめた“微生物によるバイオレメディエーション利用指針¹⁰⁾”を告示として発令している。今後、油汚染土壌を浄化する機会が増えることが予想され、油汚染土壌の浄化に対してはバイオレメディエーションが有効であり、今後普及する技術といえる。

昨今、事業者(汚染源事業者)、住民および自治体といったすべての利害関係者がリスクなどに関する情報を共有し、相互の意思疎通を図りながら土壌汚染対策を円滑に進めようとする“リスクコミュニケーション”が行われることがある。読者の方の中には“リスクコミュニケーション”の場に、事業者、住民あるいは自治体いずれかの立場で参加することがあるかもしれない。個人の立場ではマンションを購入する場合、建設地における土壌汚染の有無などの履歴を確認するなど、土壌汚染問題は市民の生活と密接にかかわるようになってきている。

ここでは“対策技術”とは表-2(p.20)に挙げた汚染対応技術すべてを指し、化学酸化やバイオレメディエーションなどのように汚染物質を分解・除去する技術を“浄化技術”と使い分けている。“土壌環境修復”とは、土壌汚染の調査および対策を併せた概念と良好な環境を取り戻すといった意味で用いている場合がある。本稿で用いている“対策”は、“土対法”でいう“措置”と同義語である。

1. 土壌・地下水汚染の現状

全国レベルでの土壌汚染問題は、1980年代の半導体工場のトリクロロエチレン(以下、TCEという)や、テトラクロロエチレン(以下、PCEという)などの揮発性有機塩素化合物(以下、VOC: Volatile Organic Compoundsという)による汚染の顕在化に始まり、2003年2月には“土対法”が施行されるにいたっている。

1.1 土壌・地下水汚染とは

土壌汚染は、工場で使用したVOCや重金属などの不適

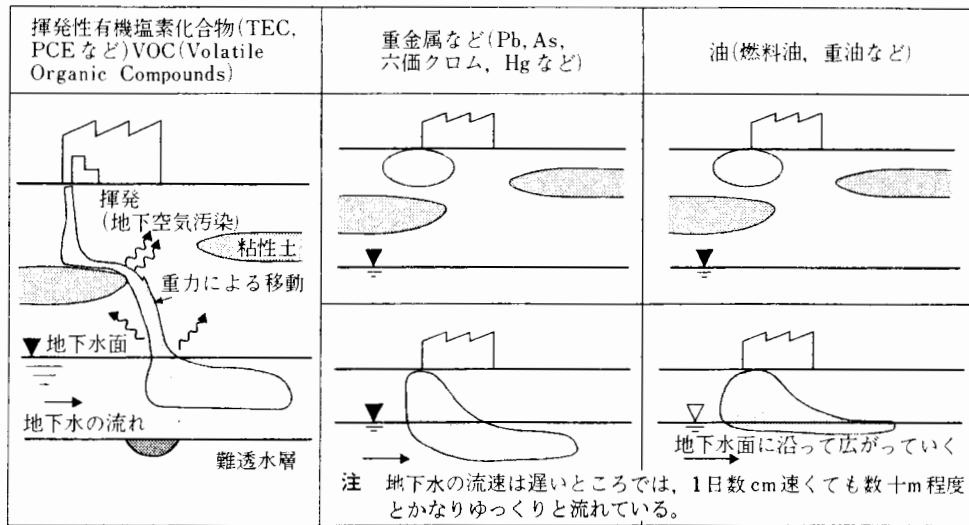


図-1 マクロ的にみた土壌・地下水中での汚染物質の動き

切な取扱いによる漏出や、これらを含んだ排水を地下に浸透させたことなどが主な原因である〔図-1¹⁾〕。

VOCは非常に水に溶けにくく、かつ比重が大きく粘性が低い液体であるので、多くの量が地中に浸透すると土壌粒子の間げきをすり抜け、地下水にまで到達して地下水汚染を引き起こす。流速の非常に遅い地下水に浸入した場合、VOCは帯水層の底部にたまることもある。重金属などは土粒子が有するイオン交換能、取着能により土壌中に保持されるが、その能力を超える量の重金属などが浸入し続けるとやがては地下水に溶解して地下水汚染を引き起こすことになる。軽油や重油などが土中に入ると、土粒子の間げきにとどまっているが、浸入し続けるとやがては地下水の水面にそって広がっていく。油は特定有害物質ではなく規制対象ではないが、土地取引上は浄化が求められることが多いのが現状である。とにかく、土壌から油臭・油膜が認められなくすることが求められる。

このように土壌はいったん汚染されると、汚染物質が蓄積し、汚染が長期にわたるといった特徴がある。地下水にまで汚染物質が溶解すると汚染が拡散し、周辺にまで影響が広がることもある。

1.2 汚染の現況

環境省は、都道府県および政令指定都市が把握している土壌汚染調査事例を統計結果として公開している。最新の報告(2005年12月)によれば、1975年より2003年度までの調査事例の累計は2802件で、そのうち超過事例は1458件と報告されている。超過事例とは土壌環境基準が設定された後に、または法の指定基準が設定された後に、基準には適合しないことが判明した事例である¹¹⁾。

(1) 基準項目と超過事例件数

超過事例件数1458件における重金属などは鉛、ヒ素、

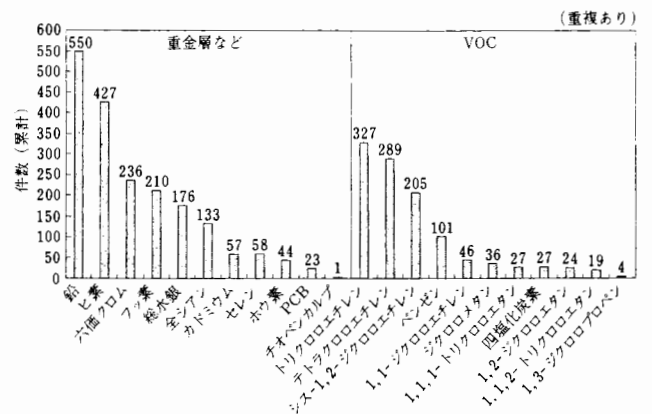


図-2 指定基準項目および土壌環境基準項目別の超過事例件数(累計)(環境省平成15年度土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果の概要より作図)

六価クロムの順に汚染が判明することが多く、VOCではTCE, PCE, シス-1, 2-ジクロロエチレンの順に汚染が判明するケースが多いのが現状である〔図-2¹¹⁾〕。

(2) 業種別、汚染物質別超過事例

重金属などによる汚染は金属製品製造業、化学工業電気機械器具製造業に多く、VOCでは電気機械器具製造業、洗濯業、一般機械器具製造業、精密機械器具製造業での汚染が認められている。これらの製造業ではVOCを脱脂用の洗浄溶剤として使用することが多かったからである。

1.3 土地取引と土壌汚染の存在

土壌汚染の調査・対策の実施契機は土地取引にかかわることが多く、これは法的な背景があるためである。

1) 不動産鑑定基準の改定：不動産鑑定士は土壌汚染の有無を確認しなければならず、もし土壌汚染が判明した場合には、対策に要する費用を差し引いて不動産価

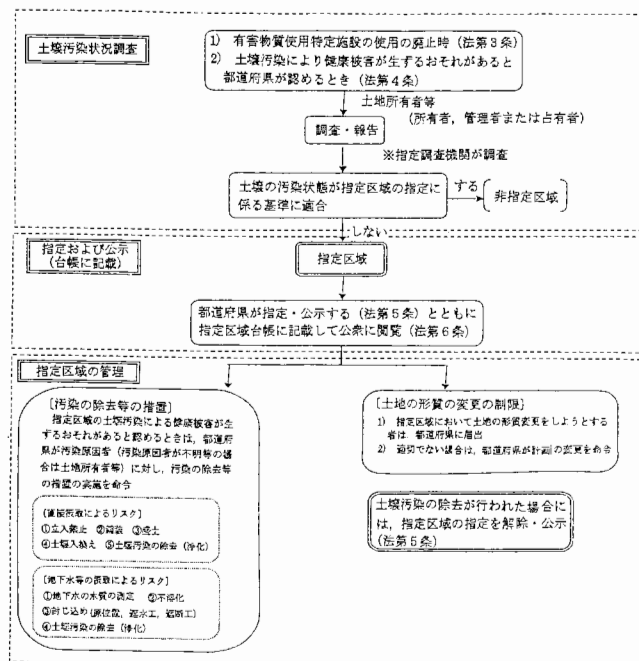


図-3 土壌汚染対策法の概要

表-1 特定有害物質

種別	物質
第1種特定有害物質	トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、四塩化炭素、1,2-ジクロロエタン、1,1-ジクロロエチレン、シス-1,2-ジクロロエチレン、1,1,1-トリクロロエタン、1,1,2-トリクロロエタン、1,3-ジクロロプロペン、ベンゼン
第2種特定有害物質	鉛、カドミウム、水銀、メチル水銀、砒素、六価クロム、セレン、シアン化合物、フッ素、ホウ素
第3種特定有害物質	シマジン、チラウム、チオベンカルブ、有機リン化合物、PCB

判定されると、その土地は自治体により指定区域として公示され、指定区域台帳に記載される。台帳は閲覧可能な状況となる(法第5条、第6条)。

(3) 指定区域の管理

指定区域では、直接摂取および地下水を摂取することによる人への健康リスクを防ぐ管理が求められる。そのための管理として汚染の除去などの措置を講ずること、および土地の形質変更の制限がされる。土壌汚染の除去(浄化)が行われた場合には、指定区域の指定は解除され、その旨公示される(法第5条)。

(4) 特定有害物質

“土対法”で対象とされる特定有害物質とは、“それが土壌に含まれることに起因して人の健康に係わる被害を生ずる恐れがあるもの”をいい、25種の化合物が3分類に分けて定められている。

第1種特定有害物質として“揮発性有機塩素化合物”11種が定められている。第2種特定有害物質として“重金属類”10種が、第3種特定有害物質としては“農薬など”5種が定められている(表-I)。

3. 土壌環境修復エンジニアリング

標準的な土壌環境修復エンジニアリングフロー(図-4)で、ステップごとの内容を簡単に説明する。調査ならびに対策技術などについては、“土壌汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説¹²⁾”に詳しく解説されている。

3.1 資料等調査(フェイズI)

本調査は、土壌環境修復エンジニアリングのスタートといえる。本調査では土壌のサンプリングはせず、関係者への聞き取り調査、既往資料(空中写真、登記簿謄本、生産フロー、生産品など)を収集し、それらから過去の土地の

値を算定する。

- 2) “宅地建物取引業法”の改正：不動産の売り手は土壌汚染の有無を重要事項項目とし、土壌汚染の有無を買い手に通知しなければならない。
- 3) 民法709条：土壌汚染を知らながら、土地を販売した場合で、健康被害や資産価値の低下が生じたときは不法行為責任が問われ、その損害を賠償しなければならない。
- 4) 民法570条：知っていたか知らなかったかを問わず(過失の有無を問わず)、土壌汚染についての瑕疵担保責任が問われる。

2. 土壌汚染対策法

2.1 “土対法”の概要

“土対法”は、有害物質を取り扱っている工場・事業場が土壌汚染の有無が不明のまま放置されたり、そのまま住宅や公園などのように不特定の人が立ち入ることができる土地用途に転用され、人への健康影響が生じることを防ぐことを目的としている。“土対法”の概要が図-3⁶⁾である。

(1) 土壌汚染状況調査

汚染の可能性の高い土地について、特定有害物質を使用する特定施設の廃止時(法第3条)に調査を実施する。その結果土壌汚染が判明し、それによって人の健康にかかわる被害が生じる恐れのある場合には、必要な措置を講じなければならない。

(2) 指定および公示

土壌汚染状況調査結果⁷⁾の基準に照らし、汚染があると

表-2 対策技術選定マップ

浄化技術の分類と概要			土壌・地下水適用性		対象汚染物質の適用性			サイト条件からの適用性	
原理	名称	適用	土 壌	地下 水	揮発性有機化合物	油	重金属	原位置浄化	掘削浄化
遮断・遮水	隔離封じ込め	コンクリート槽へ封じ込め、遮水	○	×	×	○	○		○
	原位置封じ込め	地盤汚染部分を鋼矢板・鉄筋コンクリート壁により遮水	○	○	×	○	○	○	
		地盤汚染部分をモルタル連続壁により遮水	○	○	×	○	○	○	○
固化・不溶化	固化	セメントなどによる原位置あるいは掘削土壌をかくさん固化	○	×	×	△	○	○	○
	化学的不溶化	水に不溶性の物質へ変換(酸化・還元反応利用)	○	×	×	×	○		○
熱分解・固化	熔融固化	熔融スラグ化による汚染物質揮散と固形化	○	×	○	○	○		○
	ガラス固化	原位置あるいは掘削土壌での電極による溶解ガラス固化	○	×	○	○	○	○	
分解・除去	焼却	ロータリーキルンなどによる焼却・揮散	○	×	○	○	○		○
	化学的酸化・還元	フェントン氏試薬(酸化)または鉄粉(還元)などによる分解	△	○	○	○	×	○	○
	バイオレメディエーション	微生物による分解(土着微生物を活性化、特定微生物添加)	○	○	○	○	×	○	○
	透過性浄化壁	地下に構築した鉄粉を含む浄化壁、杭により脱塩素	×	○	○	×	×	○	
分離抽出洗浄	土壌掘削除去	汚染土壌の除去・敷地外での最終処分、セメント原料へ利用	○	×	○	○	○		○
	地下水揚水・水処理	汚染地下水を揚水、汚染物質に適した水処理で除去	×	○	○	○	○	○	
	土壌洗浄	掘削汚染土壌を酸、界面活性剤により洗浄	○	×	×	○	○		○
	土壌洗浄・浮上	土壌洗浄後、遊離物を浮上除去	○	○	×	○	○		○
	原位置地盤洗浄	原位置で水注入・揚水により洗浄	○	○	△	○	○	○	
	加熱吸引	生石灰、アルミの酸化反応熱による揮発性物質の抽出	○	×	○	△	×		○
	土壌ガス吸引	地盤中のガスを真空吸引し、汚染ガスを抽出・吸着・放出	○	×	○	△	×	○	

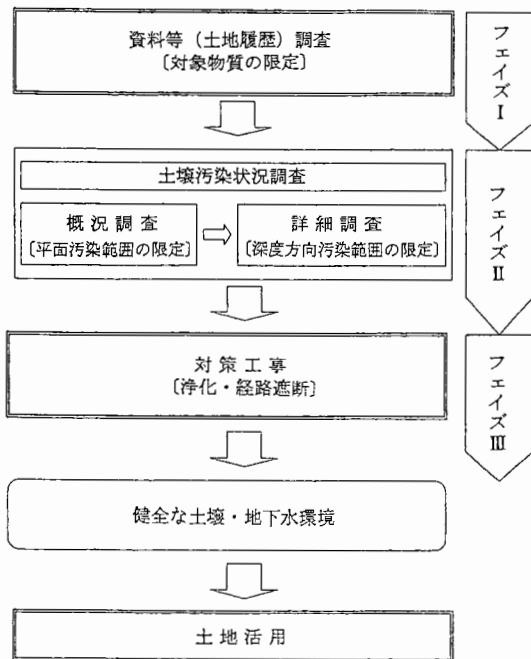


図-4 土壌・地下水汚染調査・対策フロー

利用履歴や有害物質の取扱い状況を把握して、人為的な土壌汚染の可能性を評価するとともに、土壌汚染の可能性のある場所・範囲を特定する。

3.2 概況調査(フェイズⅡ)

本調査は、前の資料など調査で把握した土壌汚染の可能性の場所をベースに調査範囲を決め、調査を行う。

本調査においては、第1種特定有害物質(VOC)を対象とした土壌ガス調査、第2種および第3種を対象とした表層土壌の溶出および含有量試験を行い、当該調査地の汚染発生の有無を平面的に把握する。

3.3 詳細調査(フェイズⅡ)

詳細調査は、前の概況調査で基準を超えていることが確認された特定有害物質についてボーリング調査や地下水調査を行い、深度方向の汚染を定量的に確認し、汚染の範囲を三次元的に把握する。

本調査は、当該地の汚染が周辺環境へまでも影響を与えているのかを判断する、および対策の必要性を評価する調査でもある。

3.4 対策工事(フェイズⅢ)

対策工事の段階で、まず対策技術の選定を行う。対策技術は、前ステップの土壤汚染状況調査の結果と対策実施者の対策後の土地利用計画、対策実施者が望む対策期間ほかの対策実施者の技術に対する要求を勘案して対策技術候補を選定する。対策技術を大まかに選定することができる技術マップを表-2に示すので、汚染は土壌か地下水か、対象汚染物質は何かを決め、汚染土壌は掘削除去をするのか、それとも掘削をしないで原位置で浄化するののかを決めれば、適用可能な対策技術候補を選定することができる。表-2からもわかるように、バイオレメディエーションは、化学的分解手法と双壁となる浄化技術といえる。

4. 汚染土壌のバイオレメディエーション

バイオレメディエーションとは、微生物などの働きを利用して有機性汚染物質を分解・除去する浄化技術である。本方法は多様な汚染物質の分解に適用が可能であり、投入エネルギーは少なく、多くの場合、浄化コストは低廉という特長がある反面、浄化期間が長期となることや低温時期には適用が難しいというほかに、特にバイオパイルやランドファームングでは、浄化スペースの確保という適用上の制約がある。

バイオレメディエーションは利用する微生物により、バイオスティミュレーションとバイオオーグメンテーションに分類されている。ここでは、好気性微生物によるバイオレメディエーションを取り挙げる。

4.1 バイオスティミュレーション

バイオスティミュレーションとは、分解対象の汚染物質が存在している土壌中に、自然に生息している微生物(土着微生物)を利用して汚染物質を分解する方法をいう。例えば、油は土中の好気性微生物により資化され、水と二酸化炭素に分解される(図-5)。添加された栄養物質あるいは酸素の供給が停止する、あるいは油そのものがなくなれば微生物は減少する。

4.2 バイオオーグメンテーション

バイオオーグメンテーションとは、自然環境から分離・選択し、培養された特定の微生物を意図的に汚染物質が存在している場所に導入して、汚染物質を分解・除去する方法をいう。

本方法は、特定の微生物を土中に導入するため、生態系や人に対して有害な影響を与える恐れがないとはいえないので、あらかじめ安全性の評価を実施してから利用しなければならない。この方法を行う事業者は、“微生物によるバイオレメディエーション利用指針(告示)¹²⁾”に従った浄化事業計画を作成して経済産業大臣および環境大臣の審査を受けなければならない。本指針でいう特定微生物とは、

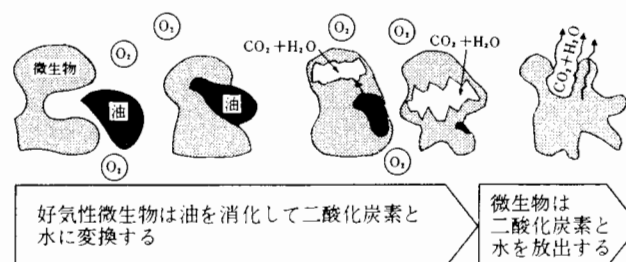


図-5 土に含まれている油の好氣的分解の模式図

分離・同定された単一の菌が対象であるので、一般に汚染土壌の浄化に用いられている“複合微生物製剤”は特定微生物に該当しないので、審査の対象外である。

4.3 バイオレメディエーションと微生物

バイオレメディエーションは、単一微生物だけでは汚染物質を無機化(最終的に水と二酸化炭素まで分解)するまでには分解できないので、多様な微生物群が必要である。

例えば、A という微生物が汚染物質の分解に関与して代謝物質を生産すると、他のB という微生物がその代謝物質を分解し、さらにその代謝物質をC という微生物が分解するという微生物反応を順次繰り返し、最終的に無機化にいたる。分解の過程で毒性の持つ代謝物質が生成された場合には、他の微生物がその毒性物質を分解してしまい、トータルとして無機化へいたる。

4.4 バイオレメディエーションの制御・管理条件

土中での微生物分解は微生物と汚染物質の接触機会が多くなれば、それだけ分解は順調に進行する。接触機会を増大させるには汚染物質の移動性を高くして、さらに微生物を増殖させてその数を増大させることである。

汚染サイトでは長期の汚染が多く、その環境の汚染物質に馴化した微生物は少なからずすでに存在している。このことにより、ほとんどのバイオレメディエーションでは土着の微生物で微生物分解ができる可能性があり、より順調に微生物分解を行わせるための環境条件を制御・管理することが重要になる。

制御・管理条件は当該地の汚染土壌を用い、事前にバイオトリータビリティ試験(生物分解の適用可能条件をあらかじめテストをする)により決める。

(1) 微生物量の監視

バイオレメディエーションは、汚染物質を分解できる微生物の存在と適切な微生物量が維持できていることで成立する。酸素と汚染物質(基質)が存在している間、微生物量は時間経過とともに増加を続け、分解が進み汚染物質(基質)が減少するに従い、微生物も減少傾向をたどり一定状態となる。この現象は5.で紹介する実施例の中でも確認されている。

管理指標としては、培養法に基づいた微生物の計数法で

ある MPN 法 (Most Probable Number) がよく用いられているが、最近では遺伝子の塩基配列を決める手法 (PCR-DGGE: Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) が提案されている。

(2) 電子受容体としての酸素の管理

エネルギーが生じる生物反応はすべて酸化還元反応であるため、電子受容体あるいは適切な電子供給体が存在しないと、バイオレメディエーションは進行しない。バイオレメディエーションにおける電子受容体としては、酸素 (O_2) 濃度が制御・管理項目となる。実際には、コンプレッサなどで強制的に空気を土壤中に送気する、または油圧ショベル (バックホーなど) や耕運機などで地上に薄く積み上げた汚染土壌を定期的に耕すことにより、土粒子の間げきを新鮮な空気で満たすようにする。

(3) 水分と pH の管理

- 1) 水分: 水分が少ない状態では、細菌の運動性や代謝反応が抑えられ細菌の活性が低下するので、含水率 (重量%) は 10~20% 程度となるようにする。水分調整は、定期的に土中に水を注入するか散水をする。バイオパイルの場合、含水率の高い状態ではパイル中に酸素を送気しにくく、ランドファーミングでは酸素を供給するために行う土を耕す作業性を悪くする。
- 2) pH: 微生物の細胞機能、物質の膜輸送、酵素反応の平衡はすべて pH に影響される。ほとんどの細菌は、中性から微アルカリ性までが至適 pH 範囲であるので、pH 5~9 程度にコントロールする。

(4) 温度

温度は、汚染物質の分解速度に大きく影響する。分解速度は温度が下がるに連れ遅くなるといわれ、15℃ における分解速度は 25℃ の約 1/2~1/2.5、10℃ では 25℃ の 1/3 となることが報告されている¹³⁾。バイオレメディエーションは、外気温が下がる冬期には不向きな技術といわれてきたが、最近では、低温期でも微生物分解が進む加温管理型のバイオレメディエーションが開発されている。

(5) 栄養

一般に菌体の組成式は " $C_5H_7O_2N$ " で表現されるが、この元素のほかに必須元素としてリン元素 (P) がある。バイオレメディエーションでは、微生物は炭素元素 (C) を汚染有機物から、水から水素 (H) と酸素 (O) を、窒素元素 (N) とリン元素 (P) は無機体あるいは有機体物質のいずれから得ている。

実際の浄化での栄養塩 (窒素、リン) は農業で用いられている窒素肥料、リン酸肥料を水溶液あるいは顆粒状で使用する。水溶液の場合は、土中に注入または表層に散水、顆粒状では機械的に土壌と混合かくはんして用いている。

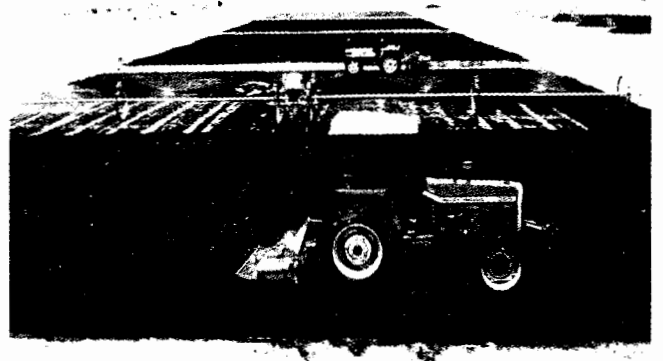


写真-1 土壌のすき返し風景

5. バイオレメディエーションの実施例

5.1 日本におけるバイオレメディエーション実績

環境省の調査報告¹⁴⁾では 1975~2003 年までに汚染土壌を掘削してその汚染土壌を敷地内でバイオレメディエーションを行った事例は 7 件で、割合では 5.5% (7 件/127 件) である。

汚染土壌を掘削しないで原位置でバイオレメディエーションを行った事例は 22 件で、原位置除去 241 件の 9% である。これは汚染対策事業者が自治体に報告した事例数で、多くの汚染対策事業者が自主的に対策を行った事例は環境省の調査結果には含まれていない。したがって実態は、環境省の調査事例よりは多くの対策が行われているだろう。

現在、土地取引に伴う対策の場合、短期の対策完了が求められるケースが多く、浄化期間が長いバイオレメディエーションは敬遠されることがある。

5.2 実施例の紹介

ここでは、これまでに実施されたバイオレメディエーションの中でも、トラディショナルおよびイノベティブな実施例を紹介する。

(1) ランドファーミング

ランドファーミングの実施例として、先の湾岸戦争におけるクウェートでの原油汚染土壌に対してバイオレメディエーションを適用して、原油で汚染した土壌を浄化した事例を紹介する。

a 技術の概要

掘削した汚染土壌を地表に 1 m ほどの厚さに広げる。広げた土壌中の酸素を微生物分解可能な程度に保つように、定期的に油圧ショベルや耕運機などで土壌を切り返す [写真-1¹⁵⁾]。土壌の含水率を 20~30% 程度となるように、土壌を切り返す際に水を散水する。表層土壌汚染に対しては、その場所で土壌を機械で耕してランドファーミングを

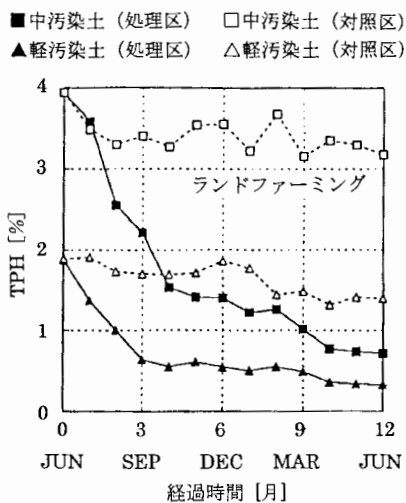


図-6 時間経過に伴うTPH減衰

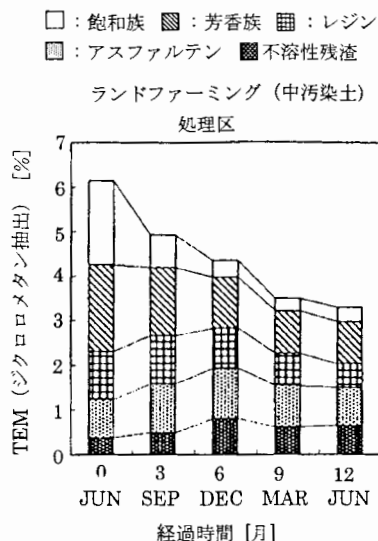


図-7 TPH構成物質の経時変化

行うことがある。

ランドファームは、別にバイオフィーミングということがある。

b 浄化効果

中汚染区域においては、ランドファームの実施により初期に約4%あったTPH(Total Petroleum Hydrocarbonの略で総石油系炭化水素を意味し、ここでのTPHはフロン抽出-赤外吸収測定による油分)を含有する汚染土壌は、15箇月後ではTPHは0.8%(80%分解除去)にまで減衰している。軽汚染区域では、約2%のTPHは0.5%程度まで減衰し、上述の中汚染区域と同程度の分解除去を示している[図-6³⁾]

分解初期と3箇月ごとで、TPH油分を構成している飽和脂肪族(パラフィン系)炭化水素、芳香族炭化水素、アスファルテンおよび不溶性残渣の時間経過に伴う構成成分の分解性をみると、減衰しているのは飽和脂肪族炭化水素と芳香族炭化水素であり、その他のアスファルテンと不溶性残渣はほとんど分解されていない[図-7³⁾]。アスファルテンと不溶性残渣は高分子量の樹脂分であるため、生物にとっては難分解性なのである。

(2) バイオパイル

バイオパイルとは掘削した汚染土壌に栄養塩を散布し、それを台地状に盛土(これをパイルという)する。そのパイル底部には空気が供給できる配管を敷設して強制的に空気をパイル中に送気しながらパイル中の微生物を活性化させ、汚染物質を浄化する技術である。空気供給は吸気タイプでもよく、以下に紹介する事例は吸気タイプの方式である。

本法は、国内では実績のあるバイオレメディエーションで、比較的高濃度の汚染物質の分解除去に適用することができる。バイオパイルは別名、ソイルパイルあるいはソ

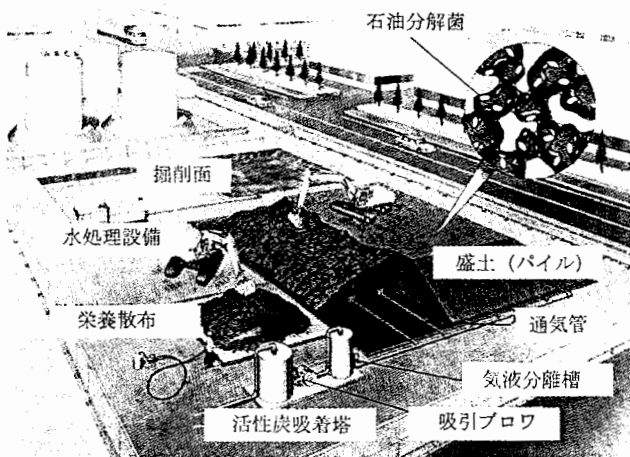


図-8 オンサイトバイオパイル工法の模式図

リッドフェーズバイオレメディエーションと呼ばれることがある。

a 技術概要

1~5mの高さの盛土の底部に通気管を設け吸引ブロウよりパイル中のガスを吸気すると、パイル外から新鮮な空気がパイル中に吸引され、パイル中の酸素は豊富な状態となる。パイルからのガス中には水分と汚染物質由来の臭気を含んでいるために、気液分離塔で水分の除去を、活性炭吸着塔で臭気を吸着除去する[図-8⁴⁾]。降雨時対策としてパイルの周囲には排水溝を設け、パイル周辺への汚染物質の流出防止のため水処理設備を付設する。

b 浄化効果

初期に油分含有濃度が4000mg/kgであったA重油汚染土壌は、50日後には油分は約900mg/kgまで減衰している(図-9⁴⁾)。スタートから10日までの油分減衰は、吸引により沸点の低い油分が揮発したと思われる。

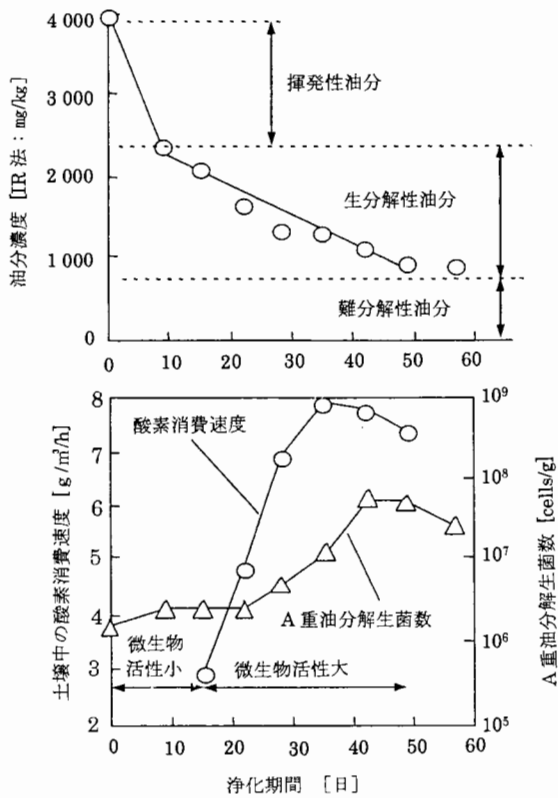


図-9 経過時間とA重油の減衰

油分減衰傾向と微生物活性をみると、15日後からA重油分解生菌数と酸素消費速度は増加し、微生物が盛んにA重油を分解していることがうかがわれる(図-9⁴⁾)。50日以後、油分濃度と生菌数の両方が減少傾向であることは、パイル中には油分量に見合った微生物量が存在するという平衡状態となっていることを意味している。

(3) 注水バイオスパーキング

従来の汎用技術であるバイオスパーキング法とは、汚染範囲に適当な間隔で空気供給井戸(スパーキング井戸)をつくり、帯水層に空気を吹き込み、地下水中に溶け込んでいる有機物質などを帯水層の土着微生物で分解する原位置バイオスティミュレーションである。

ここでは改良バイオスパーキング法を紹介する。

a 技術概要

注水バイオスパーキング工法は、栄養塩(窒素、リン)を供給できるスパーキング井戸を帯水層にまで立て込み、空気と栄養塩溶液を同一の井戸から供給できることを特長としている(図-10⁵⁾)。注水に用いる溶液は揚水した汚染地下水を処理して再利用するため、地盤内の代謝産物の蓄積を防ぎ、微生物の分解活性を長期間維持することが可能である。

b 浄化効果

本法が適用された汚染サイト工区(約7000m²)では、第1帯水層および第2帯水層の両帯水層においてベンゼン汚

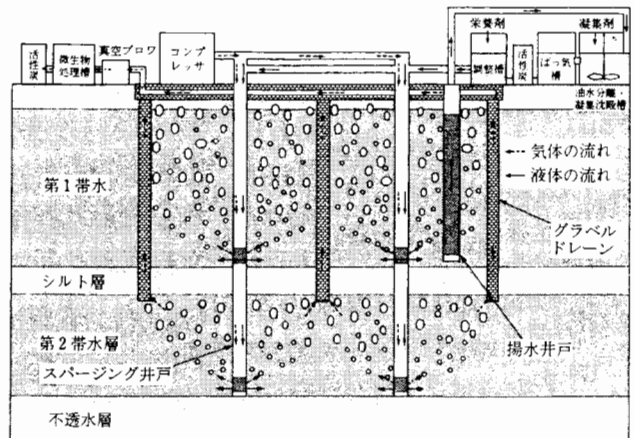


図-10 浄化施設の設置概念図

染が認められている。深度の異なる帯水層で、空気および栄養塩が供給できる2重スパーキング井戸を7000m²の工区に239本設置している。2005年7月にスパーキングを開始し、8箇月後の2006年4月にはベンゼン濃度は一部を除き環境基準以下(0.01mg/l以下)となっている(図-11⁵⁾)。

6. 今後の展望

2003年には“土対法”が施行され、2005年3月には“微生物によるバイオレメディエーション利用指針”が告示され、2006年3月には“油ガイドライン”が環境省より示された。土壤環境修復世代を1990年より2002年まで約10年間を発展期とすれば、2003年“法”の施行以降を成長期といえるだろう。

独断的ではあるが、成長期へ向けたバイオレメディエーションの展開において二つのトレンドがあると考えられる。一つは増大するであろう油汚染浄化ニーズに対するバイオレメディエーションの採用、もう一つは発展期に浄化を開始したが、いまだに浄化を続けている汚染状況に対し新しい浄化工法をもって解決を図ることである。

燃料油や潤滑油などの石油製品による汚染サイト数は相当な数に上り、この汚染対策としてバイオスティミュレーションを適用する機会も相当でてくるだろう。バイオパイルやランドファームは実績ある技術であるので、大いに活用すべきと考える。これからは原位置浄化に対するニーズが高まり、原位置バイオレメディエーションが囑望されるだろう。

汚染対策実施者は、さまざまな汚染状況や要求品質に合致できる技術メニュー揃いを期待している。ガソリンスタンドなどの小規模油汚染に対する低廉で、短期浄化が可能なバイオレメディエーションも期待される技術の一つである。

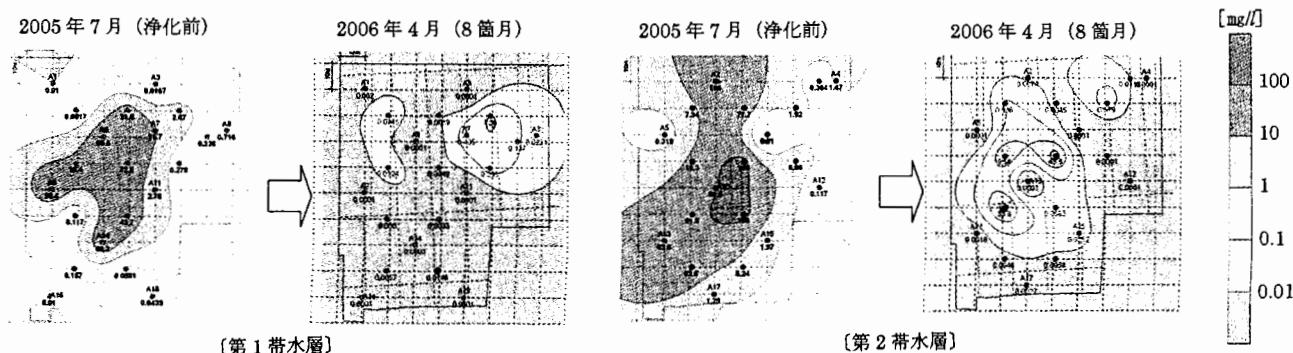


図-11 地下水中のベンゼン濃度の推移

VOCによる土壌地下水汚染についていえば、現在、土着の嫌気性脱塩素微生物であるデハロココイデス属細菌を利用するバイオスティミュレーション研究と実施の動向があるので、VOCの深部あるいは広げた汚染ケースに対してはバイオスティミュレーションの適用を検討すべきであると考えている。

バイオレメディエーションは、土壌生態系の健全性を確保・保全できる環境にやさしい技術であるので、さらなる発展が期待される。

引用文献・参考文献

- 1) 大澤武彦：VOC及び油系汚染物質の汚染対策工法の概要，建築技術，No.634(2003-4)，p.134
- 2) 環境省：土壌汚染対策法のしくみ(冊子)
- 3) 千野裕之ほか：油汚染土のバイオレメディエーションに関する研究(その2)，大林組技術研究所報，No.54(1997)，p.106，p.108
- 4) 高畑陽ほか：石油汚染土壌のバイオレメディエーションにおける現状と今後の展開，環境技術，34-4(2005)，pp.243，244(環境技術学会転載許可済)
- 5) 高畑陽・桐山久：注水バイオスパーキング工法による原位置バイオレメディエーションの最新事例，土木施工(2006-8)，p.47
- 6) 環境省：土壌汚染対策法(2003-2/15)
<http://www.env.go.jp/water/dojo/honbun.pdf>
- 7) (社)土壌環境センター編：油汚染対策ガイドライン—鉱油類を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対応の考え方(2006-5)，化学工業日報社
- 8) 大澤武彦：汚染地盤の浄化技術—日米の比較，基礎工，27-2(1999-2)，p.14
- 9) 西村実：バイオレメディエーション—微生物による環境汚染浄化—，土と微生物，No.46(1995)，p.21
- 10) 経済産業省・環境省：微生物によるバイオレメディエーション利用指針(2005-3/30)
<http://www.meti.go.jp/policy/Cartagena/bairemekai setsu.pdf>
- 11) 環境省：土壌汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要—平成15年度—(2005)

<http://env.go.jp/water/dojo/chosa.html>

- 12) (社)土壌環境センター：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説(2005-3)
- 13) 四本瑞世ほか：油汚染土のバイオレメディエーションに関する研究(その6)—分解微生物の有効性の評価方法と浄化処期間の短縮化技術の開発—，大林組所報，No.67(2003)，p.3

(2006/11/22 原稿受理)

Bioremediation of Contaminated Soil

Takehiko Osawa*

Synopsis This paper contains the summary of "Soil Contamination Countermeasures Law", the present conditions of soil pollution, and the practice of remediation engineering for soil environment.

Bioremediation will be a major remediation technology in the near future. Technologies using bioremediation treatment include biostimulation and bioaugmentation. The former technology is expected to clean up oil-contaminated soil.

As examples of bioremediation, Landfarming and Biopile, Biosparging are introduced in this paper.

(Received November 22, 2006)

* In Situ Solutions Co., Ltd.



大澤武彦 おおさわたけひこ
昭和18年生まれ/出身地 東京都/最終学歴 東京理科大学大学院理学研究科化学専攻/学位 修士