

油分汚染土壌のバイオレメディエーション

—ランドファーミングとファイトレメディエーション—

田崎 雅晴・浅田 素之

油分汚染土壌の浄化方法は汚染濃度や油種により選択される。その中で燃料油系で低中濃度の汚染にバイオレメディエーション（生物浄化）が良く用いられる。特にランドファーミングは低コストであり操作性も良いことから採用されることが多い。しかし、バイオレメディエーションを適用する際には、その特徴と適用性について十分に検討して、最適な管理条件を見出して実施しなければならない。本報ではこれらを踏まえたバイオレメディエーションの概要を、特にランドファーミングと最近適用が検討されてきているファイトレメディエーションについて報告する。

キーワード：油汚染土壌，バイオレメディエーション，ランドファーミング，ファイトレメディエーション，トリタビリティテスト

1. はじめに

バイオレメディエーションには、バイオスティミュレーションと言われる浄化対象サイトにもともと生息している微生物（群）を活性化させて浄化する方法と、有能な微生物を別途培養して汚染サイトに導入するバイオオーグメンテーションがある。バイオオーグメンテーションの技法を適用するためには経済産業省や環境省の定めるガイドラインに則った微生物（群）の申請が必要になる¹⁾。これは導入しようとする微生物がサイト周辺の環境へ悪影響を与えないことを、事前に詳細な微生物的検討を行い証明することを求めている。国内においてのバイオオーグメンテーションの実用例は少ないが、主に揮発性有機塩素化合物による汚染サイトに用いられている。

油分汚染サイトの場合、ほとんどはバイオスティ

ミュレーションで行われている。図-1に各種バイオレメディエーションの例を示したが²⁾、油分汚染土壌で主に用いられるのはランドファーミングである。特にランドファーミングは燃料系（A重油系）油分に汚染された土壌に対して、コスト的にも安価であるために、頻繁に適用されるようになってきた。これは土着微生物の活性を効率的に上げる浄化管理を行えば、特殊なシステムや機器を必要としないため、コスト的にも現場作業的にも効率の良い工法となるためである。

一方近年、植物を用いた環境浄化技術の研究開発も進んでいる。植物を用いた汚染土壌・地下水の浄化手法であるファイトレメディエーションは、草本類や木本類の植物、根圏微生物を用いて、土壌や地下水等の汚染物質を固定化、あるいは低減する方法であり、浄化期間に余裕のある土地でのメンテナンス費用のかからない経済性の高い浄化技術として期待されている。

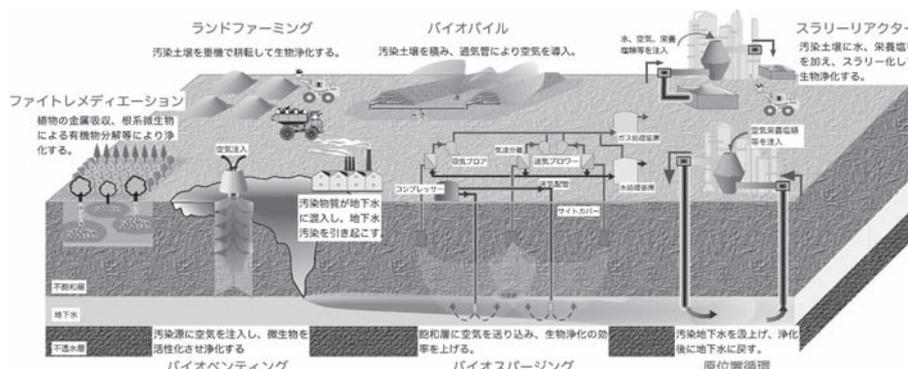


図-1 様々なバイオレメディエーション技術の概要

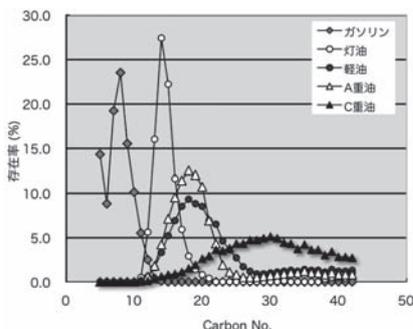
ファイトレメディエーションは当初、水溶性の重金属等を植物体に吸収、濃縮させることを原理として開発されてきた。一方、植物による直接吸収ではなく、根圏微生物による汚染物質分解を期待した油汚染土壌浄化の研究が進んできている^{3)・4)}。

本稿では各種の油汚染土壌に対するバイオレメディエーションの対応例を挙げながら、主にランドファーマリングとファイトレメディエーションによる浄化効果を報告する。

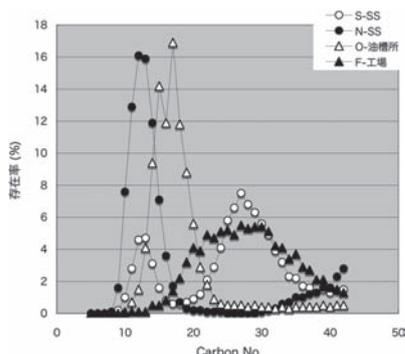
2. 油汚染とその油種

油分と一言で表しても、燃料油だけでもガソリン、灯油、軽油、A重油、C重油等と多種存在し、またそれぞれも単一な成分ではなく、多種の炭化水素が混合されて成り立っている（図—2参照）。燃料油以外にも食用油、潤滑油、防食油、ワックスや、ナフタレンやピレンに代表される多環芳香族油分など、多種多様なものが存在している。

汚染サイトも、扱われていた油種（汚染源油種）によりその状況も様々である（図—3参照）。ガソリンスタンドでは、ガソリンや軽油など比較的軽い油を多く扱っているために、その汚染土壌の油種は図—3のNガソリンスタンド汚染土壌（図中のN-SS）の様に、軽油やA重油に似たC15前後にピークを持つ油



図—2 各種油における構成油種の違い



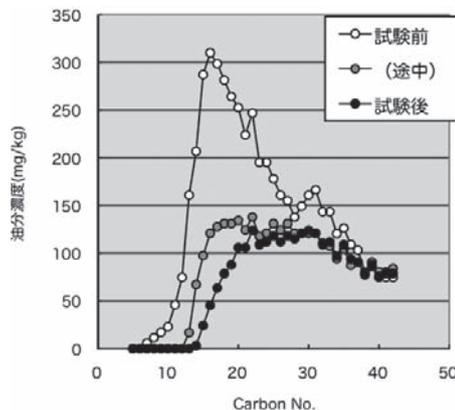
図—3 事業形態別の汚染油種の違い

種が主となる。しかし併設された整備工場からの潤滑油の汚染を受けるとSガソリンスタンド（図中のS-SS）のように潤滑油由来の分子量の大きなピークも共存する場合がある。また、通常工場跡地ではそこで多量に使用／製造していた特徴的な油分のピークを示す。例えばA重油を中心に貯蔵していたタンクの周辺は、図中のO-油槽所の結果のようにA重油由来のピークが大きく、潤滑油を使用していた工場跡地ではF-工場のように比較的高分子の油分が検出される。

3. 油汚染の生物分解

油汚染土壌のバイオレメディエーションは文字通り生物により油分を分解させて浄化を図るため、その浄化効率には生分解性に依存する。一般に微生物が油分を分解する際、低分子の油分ほど分解しやすく、分子量が大きくなるに従い分解しにくくなり、その効率も低下していく。

図—4にC重油汚染土壌の浄化試験における炭素数組成の推移を示した。この試験に用いたC重油には比較的軽い油種（C15程度）も含まれており、試験開始時にこのC15付近からC30を超える高分子量の油分まで含まれていることが解る。この油分が生物分解を受けると徐々に分子量の小さな油分から分解され、試験後にはC15までの油分は殆ど分解されていることが確認された。一方C30以上の高分子油分は殆ど分解されていないことが解る。すなわち通常の生物分解ではC20程度の油分までは効率良く分解され、C30を超えると極端に生物分解効率が低下することが予測される。詳細な油分分解の検討や、これまでの浄化工事の知見から、通常のバイオレメディエーションではA重油レベルの汚染では80～90%、C重油レベルの汚染になると50%程度の浄化率になることが知られている⁵⁾。



図—4 C重油の生物分解過程における炭素数組成の推移

4. 生物浄化のトリタビリティーテスト

どのような工法であっても浄化工事を行う際には事前にトリタビリティーテストを行うことは必須であるが、これはバイオレメディエーションにおいても同様である。また土着の生物を利用するバイオスティミュレーションは、そこに存在する有効な微生物の活性をいかに効率良く活性化させ、能力を引き出させるかが重要となるために、通常の物理化学的な処理の試験よりも、その対象サイト特有の条件を導き出す必要がある。

トリタビリティーテストは現地汚染状況調査や汚染物質の物理化学的分析とともに、実際の汚染土壤を使用して、効率の良い浄化条件を導き出すための一連のテストである。図-5はある汚染サイトを生物浄化する際に実施されたトリタビリティーテストの中のひとつである。この結果だけからも、このサイトで生物浄化を行うには最低限の窒素とリンの添加が必要であることが解る。また、効率を上げるためには添加剤の使用も有効であることが読み取れる。この場合の添加剤は一般に、微生物の活性を上げるための栄養剤（ある種の有機物）が多く、採用には添加量（濃度）、添加による外部環境への影響、浄化コスト等を考慮する必要がある。また時々、万能添加剤などと称して販売されているものもあるが、一般には他の添加剤に比較しても顕著に有効性が認められるものは少なく、また中にはバイオオーグメンテーションに該当するような微生物製剤もあるので、その採用には慎重な検討が必要である。筆者の経験上、トリタビリティーテストを実施した上で、そこから得られた情報に基づいた浄化管理をしっかりと行えば、窒素やリン、最低限の栄養剤程度で十分な浄化効果が得られる。砂地など微生物量の極端に少ないサイトでは微生物源としての周辺の表土等を添加することも有効である。いずれにしても、トリタビリティーテストにより適切な浄化条件を設定することが、確実に効率な浄化の定石である。

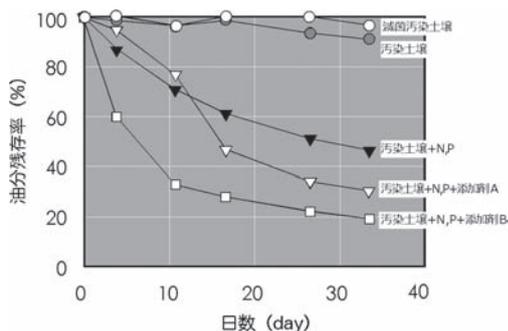


図-5 トリタビリティーテストの一例

5. ランドファーマーミング

(1) 空気の供給

ランドファーマーミングは油汚染土壤の浄化に良く用いられるバイオレメディエーションのひとつである。汚染土壤を掘削して、トリタビリティーテストの結果より得られた浄化条件に従い、耕耘管理を実施することにより、土壤中の油分分解微生物の活性が上がり、油分が分解し浄化される。物理化学的な浄化や特殊な装置を使用するバイオスパーキング等と比較して、管理がしやすく、またコストが低く抑えられるために低中濃度の油汚染浄化に有利な工法として採用されることが多い。

ランドファーマーミングによる浄化効率の律速となるのは汚染土壤中の空気の供給である。微生物は空気中の酸素を利用して油分を二酸化炭素に分解して行くため、その酸素（空気）を充分に行き渡らせることが重要である。通常は写真-1に示したように、重機を用いて土壤の耕耘を行い全体を通気する。

図-6はA重油系の油分で汚染された土壤を、写真-1の様な重機を用いたランドファーマーミングで浄化している期間中における油分濃度と土壤中の酸素及び二酸化炭素濃度の推移である。土壤中のガス濃度は、それぞれ重機による耕耘前に測定した値を示している。グラフから解るように、油分の分解（浄化）が盛んな浄化初期において、土壤中の酸素濃度が非常に低

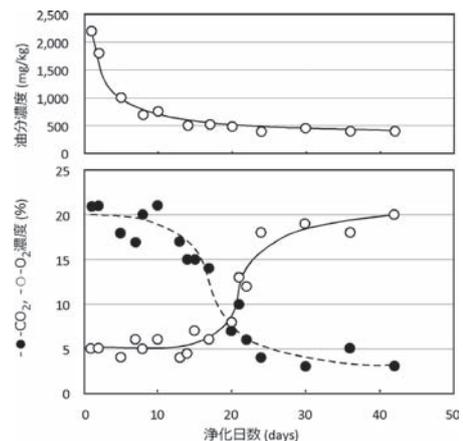


図-6 浄化中の油分濃度と土壤ガス濃度の推移



写真-1 ランドファーマーミングによる浄化の様子

く、二酸化炭素濃度が上昇していることが解る。土壌中の微生物が酸素を利用して油分を二酸化炭素に分解していることを示しており、この現象からも油分分解が活発な浄化初期には十分な耕耘を行い、土壌中に酸素を供給することが重要であることを裏付けている。また耕耘の効果は酸素の供給を行うと同時に、発生した二酸化炭素の土壌からの除去に繋がる。二酸化炭素が高濃度に土壌中に留まると、土壌の pH が低下し浄化が進まなくなる恐れがある。

空気供給のための耕耘の管理を効率的に行うには、浄化中の土壌ガス濃度を適時モニタリングすることによってその適切なタイミングを図ることが重要である。それにより無駄な耕耘作業等を省くことが出来て浄化費用の低減に繋がる。

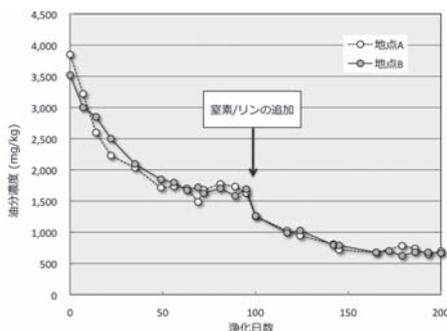
(2) 浄化助剤の必要性

ランドファーマリングを行っている途中、浄化効率が低下する場合がある。この原因は、期間中の降雨等により土壌中のミネラル分（主に窒素、リン）が流出してしまったことに起因することが多々ある。

ランドファーマリングをはじめ生物浄化は生物が働かないと進まないが、その生物には必須のミネラルが存在する。浄化対象の土壌にはじめから存在すれば問題はないが、そうでない場合はトリタビリティーテストの結果から、浄化開始時に適切な量のミネラル分を適切な形態で添加する。しかし予期せぬ多量の降雨によりそれが失われてしまうこともある。

図一七はこのような状況になったサイトでの油分濃度推移である。浄化効率が低下したため約 100 日後に再びミネラル分を添加することにより浄化が復活した。

このようなことを防ぐためには、添加するミネラル製剤を徐放性のもの（徐々に溶けるように工夫された薬剤）を用いることや、大雨の際の確実なシート養生も有効である。最初から高い濃度で添加すると、逆に微生物活性を阻害したり、アンモニア臭等の異臭発生の原因になるので注意が必要である。特に有機性の添



図一七 浄化過程での窒素・リンの追加の効果

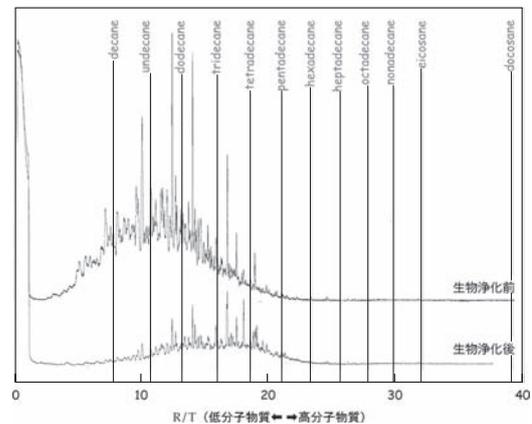
加剤を併用する時には、土壌の嫌気化や腐敗臭の発生が生じ、浄化が進まないだけでなく、近隣環境へも多大な影響を与える可能性がある。

(3) ランドファーマリングの特徴

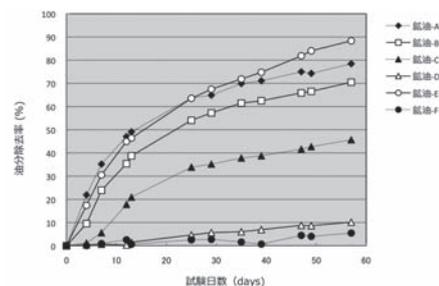
ランドファーマリングで油分汚染土壌の浄化を実施すると、洗浄や熱処理などの物理化学処理と比較して、浄化後の土質や物性に与える影響は小さい。そのため浄化後の土地利用に対する制限も殆どなく、ほぼ浄化前の状態で利用できる。

燃料油（A 重油が主たる汚染源油種）で汚染されたサイトでの、バイオレメディエーション前後の土壌に含まれる油種の GC/MS 分析結果を図一八に示した。浄化前に存在していた油分が顕著に減少したことが確認される。また残存する油分は浄化前に比べて分子量が大きい油種となっていることが確認できる。これは前記したように、分子量の小さな油分の方がより生物分解を受けやすいためである。

ただし気をつけなければならないことは、あくまでも燃料系油分での実例であり、特殊な潤滑油や切削油などの場合は、単純に炭素数（分子量）の大きさからは判断できない。特に品質維持のために薬剤が混入されたり物性を化学的に変化させたオイル製品等は、炭素数組成が小さくとも生物浄化が難しい場合がある。図一九に各種鉱油の生分解性を示したが、製品によ



図一八 ランドファーマリング前後の油種の変化



図一九 各種鉱油の生分解性の違い

り分解性が異なることが顕著に出ている。このことから浄化方法を検討する際には詳細な事前分析とトリタビリティーテストの重要性が挙げられる。

6. ファイトレメディエーション

ランドファーミング等のこれまでのバイオレメディエーションは、物理化学的な浄化技術よりは低コストであるものの、最低限の土壌の掘削や定期的な耕耘が必要とされる。

これに対してファイトレメディエーションは最低限の散水、施肥を実施すれば良いため、ランドファーミングより低コストで実施できる可能性が高い。また基本的に掘削や耕耘の必要がないために、ランドファーミングと比べてさらに近隣環境に与える影響は低く、また浄化中の景観も良い（写真—2参照）。これらのメリットは、油汚染によりブラウンフィールド化されている土地に対する対策に、極めて有効な浄化技術であると言える。



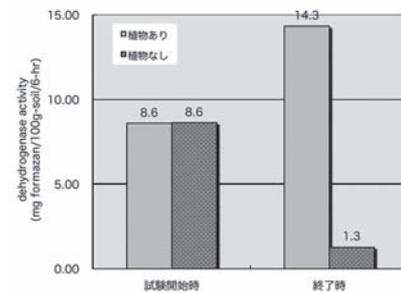
写真—2 ヒマワリを用いたファイトレメディエーション試験の様子

一方、植物を利用するために、その浄化期間は他の生物浄化よりも長くなり、また植物の根が届く範囲が浄化範囲であると考えられている。そのためファイトレメディエーションを適用するには、その対象となる土地の汚染状況や拡散防止対策、今後の利用予定等を考慮しなければならない。

ファイトレメディエーションは図—10に示したように、植物への吸収蓄積、植物を通しての気散、根の周りの土壌微生物による分解による効果を期待するものである。油分汚染浄化は植物自体の油分吸収よりも、その植物根圏周辺に生息する微生物の働きが大きいと言われている。植物の根圏からの分泌物や、根が張ることによる通気性の向上が土壌微生物の活性を上げている。図—11はポット試験において、試験開始直後と終了直前の土壌中の微生物活性を測定した結果である。植物を植えていない系と比較すると、植物が存在することにより土壌中の微生物活性が顕著に上昇し



図—10 ファイトレメディエーションのイメージ



図—11 植物の存在による土壌微生物活性の違い

ていることが確認された⁶⁾。

ファイトレメディエーションの場合、浄化深度が根長に依存し年単位の工期がかかるうえ、気候の影響を受けやすく浄化効果を保証しにくい。そのためか油汚染に対する日本での浄化工事としての適用例の報告はまだない。しかし筆者らが数箇所の屋外実サイトで実証した結果、日本でも適用出来る可能性があることが示唆されている。

写真—3は汚染サイトでの実証試験の様子である。



ファイトレメディエーションを行うのは、その地域の気候に合った植物で、更に汚染油種や濃度に耐え得る種類を選択する必要がある。また、出来るだけ根系が広く深く生育する種が有利と考えられる。そのため浄化を検討する際には、そのサイト周辺の植生調査を行い、適用可能な植物を検索することが望ましい。写真の試験では、選択された植物の他に、そのサイト周辺の緑地や森林の表土を用いて浄化試験を実施した。また、ファイトレメディエーション効果を実証するために、防根板（周辺から植物の根の侵入を防ぐ）を設置して植物が生育しないコントロール区（非植栽区）を設けて比較した。

結果の一例を図-12及び図-13に示した。このサイトは重質油で汚染されていた土壤中、長い間更地として管理されていた。ファイトレメディエーションを適用すると、図-12から解るように、植物を生育させた区画は、非植栽区と比較して明らかに油分濃度が低下している。またその時の油種の推移は、低分子油分から分解されていることが解る（図-13）。これは前述したようにランドファームと同様に生物浄化に特徴的な現象である。

この結果からも解るように、浄化の期間は通常のバイオレメディエーションよりも非常に長くかかっている。図-12の結果は東北地方での実績であり、その

ため植物が晩秋から初春にかけて草本類の生育は期待できない。しかし何もせずに管理していた場合（非植栽区）では油分濃度にも変化がないが、植物を生育させることにより約2年で重質油が半減した事実は、ブラウンフィールドのような用途の限られる土地には有効な技術であると言える。

7. まとめ

油汚染土壌の生物浄化は、その管理やコストが有利なため、条件さえ合えば非常に有効な浄化手法である。しかしこれまで述べてきたように、十分な事前調査とトリタビリティテストを実施して、対象サイトに合致した条件設定を行うことが重要である。その浄化特徴を十分に把握して適用することが、効率良く低コストに浄化を実施するための前提となる。また、浄化を急がない土地についても、ファイトレメディエーション技術を適用するなどして、早いうちに対策を開始することが、将来の本格浄化を実施する上にも有利となると考えられる。

JICMA

《参考文献》

- 1) 経済産業省、環境省：告示第四号（微生物によるバイオレメディエーション利用指針）（2005）
- 2) 清水建設技術研究所編集委員会：環境創造テクノロジー、イブシロン出版、2006
- 3) 池上雄二・角田英男訳：ファイトレメディエーション-植物による土壌汚染の修復-、シュプリンガー・フェアラーク東京、178p、(2001)
- 4) 浅田素之、海見悦子：植物を用いた浄化手法（ファイトレメディエーション）実用化の展望、環境技術、Vol.34, No.4, P24-31、(2005)
- 5) 田崎雅晴、岡村和夫、黒岩洋一：油汚染土壌でのバイオレメディエーションにおける微生物の挙動と油分分解特性、第12回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会（2006）
- 6) 田崎雅晴、浅田素之、米村惣太郎：ファイトレメディエーションによる油分汚染土壌の浄化試験、第13回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究会（2007）

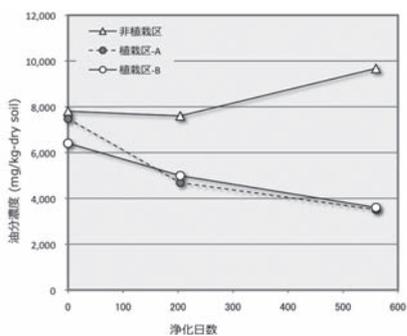


図-12 ファイトレメディエーション実証サイトでの油分濃度の推移

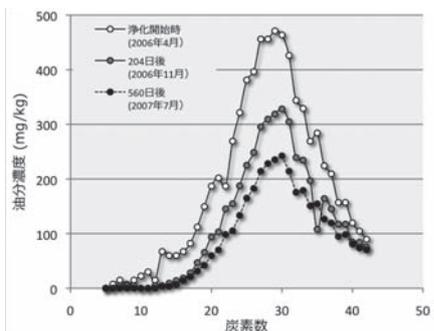


図-13 ファイトレメディエーション実証サイトでの油種の推移

【筆者紹介】



田崎 雅晴（たさき まさはる）
清水建設
技術研究所 地球環境技術センター
環境バイオグループ グループ長



浅田 素之（あさだ もとゆき）
清水建設
技術戦略室 企画部
主査