

# 燃料油による汚染土壌のバイオレメディエーション技術の開発

## Development of Bioremediation for Fuel Oil Contaminated Soil: a Laboratory Evaluation

西村 咲希*1	田中 宏幸*1	中島 卓夫*1
Saki Nishimura	Hiroyuki Tanaka	Takuo Nakashima
西村 良平*1	仲 賢*2	堤 純一郎*3
Ryohei Nishimura	Satoshi Naka	Junichiro Tsutsumi

### 要旨

各所で顕在化している油汚染土壌に対し、微生物を利用した安価で環境低負荷な浄化技術としてバイオレメディエーションが注目されている。当社はこれまで、軽油や重質油に汚染された土壌に対するバイオレメディエーションの適用について検討を行ってきた。本開発では、燃料油で汚染された土壌のバイオレメディエーションによる浄化効果を把握し、適用可能な汚染濃度や処理方法を検討するために、灯油を添加した模擬汚染土壌を用いた室内試験を行った。その結果、全石油系炭化水素が1,000 mg/kg-dry程度の灯油汚染土壌に栄養塩を添加した系において、酸素の供給や含水率の保持を適切に行うことで、初期値の油臭3から浄化目標である油臭1までの低減を約1ヶ月間で達成し、浄化完了となることを確認した。

キーワード：油汚染土壌 バイオレメディエーション 燃料油

## 1. はじめに

近年、顕在化している事業所や工場跡地における油汚染土壌に対し、微生物の力を利用して浄化するバイオレメディエーションの適用が期待されており、実工事での実績も増加している<sup>1), 2)</sup>。バイオレメディエーションは熱処理や封じ込めといった処理方法と比較すると安価であり、工事に伴う廃棄物の発生や使用するエネルギーが少ないため、環境への負担も軽減することができる。しかしながら、高濃度の油汚染土壌を対象とした場合、時間の経過とともに浄化速度が停滞し、浄化目標値まで濃度低減できない場合があるなど、油種や油分濃度、土質の状態によって浄化効果に差異が生じる。そのため、バイオレメディエーションを適用するためには、対象とする土壌において処理可能な汚染濃度や、微生物による浄化を促す環境条件を事前に把握することが重要となる。

以上の背景から、当社ではこれまで砂質土の軽油汚染土壌に関するパイロット試験<sup>3)</sup>や、重質油模擬汚染土壌に関する処理検討<sup>4)</sup>を行ってきた。本報告では、沖縄県特有の粘性土である島尻マーグを用いた油汚染土壌に対して、バイオレメディエーションの適用可能な汚染濃度や、処理条件を検討するために行った室内試験の結果の一部について報告する。

## 2. バイオレメディエーションの概要

### 2.1 バイオレメディエーションの原理

バイオレメディエーションは、汚染された土壌や地下水中に生息する微生物が、エネルギーの要求や、生育を阻害する物質を除去するために、汚染物質を分解する作用を利用した浄化方法である。対象とする汚染物質は様々であるが、代表的なものとしては油および揮発性有機化合物が挙げられる。

バイオレメディエーションには好気性処理と嫌気性処理があり、これらは各種汚染物質を分解する微生物が呼吸等の代謝に必要なとする電子受容体の違いにより分類される。

一般的に油汚染土壌に対しては好気性処理が適用されるが、その際の電子受容体は酸素であるため、土壌中に酸素供給を適切に行うことが重要となる。また、微生物による分解を促進させるためには酸素だけでなく、適切な含水率、pH、温度および栄養塩量を管理する必要がある。特に含水率については蒸発や降雨の影響により変化しやすく、乾燥して含水率が低下すると菌数が減少する恐れがあり、逆に上昇した場合、土質によっては酸素が均等に供給されないために浄化速度の低減を起こす可能性がある。したがって、バイオレメディエーションを適用する際には、含水率、pHおよび栄養塩量等の環境条件を考慮した設計を行わなければならない。

\*1 土木事業本部 技術部

\*2 九州支店 沖縄営業所

\*3 琉球大学 工学部 環境建設工学科

## 2.2 バイオレメディエーションの適用方法

油汚染土壌のバイオレメディエーションには、ランドファーマーミング (図1) とバイオパイル (図2) が用いられる。いずれも汚染土壌を掘削し、地上で適量の栄養塩等を添加・混合した後に、土壌をパイル状に堆積して微生物による浄化を行う方法である。

ランドファーマーミングは厚さ 50 cm 以下<sup>5)</sup>で土壌を堆積させ、バックホウやトラクター等による定期的な攪拌を行うことで土壌中に酸素を供給し、微生物による浄化を促す方法である。

バイオパイルは汚染土壌を 1~2 m 程度<sup>6)</sup>に盛土し、その中に埋設した配管からブロワーを用いて空気を吸引することにより、土壌中へ強制的に酸素の供給を行い、微生物による浄化を促す方法である。そのため、バイオパイルはランドファーマーミングと比較して少ない面積での浄化が可能であり、土壌中における環境条件の制御と排ガス・排水の管理が容易である。

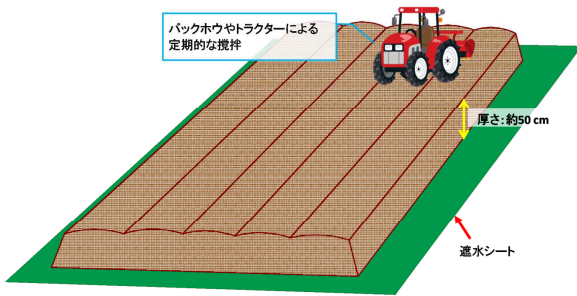


図1 ランドファーマーミングの概要

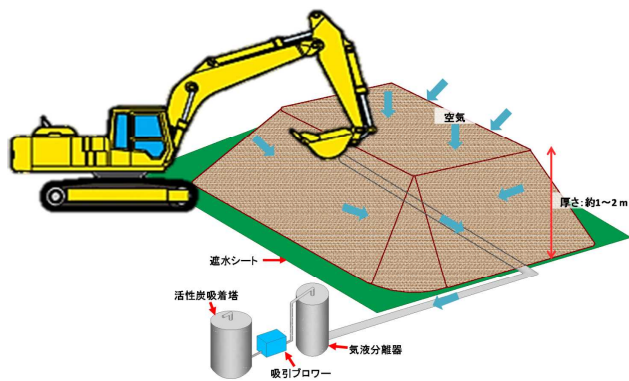


図2 バイオパイルの概要

県特有の粘性土である島尻マーグを使用した。模擬汚染土壌は、図4に示すコンテナ容器に島尻マーグ 2 kg を量りとり、土壌に灯油を添加し、油分が均等に分散するように混合した後に、所定の含水率に調整するため水または栄養塩溶液を添加して作製した。表2には試験条件を示している。2系列のうち、一方は比較のために水のみを添加したコントロールとし、もう一方は塩化アンモニウム ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) とリン酸水素二カリウム ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) をそれぞれ所定の濃度となるように添加した微生物分解を促進させる系 (以下、促進系と略す。) とした。

表1 島尻マーグの土質

項目	単位	測定値	分析方法
含水比	%	21.3	JIS A 1203
含水率	%	17.6	
土粒子密度	$\text{g}/\text{cm}^3$	2.728	JIS A 1202
pH		7.6	JGS 0211

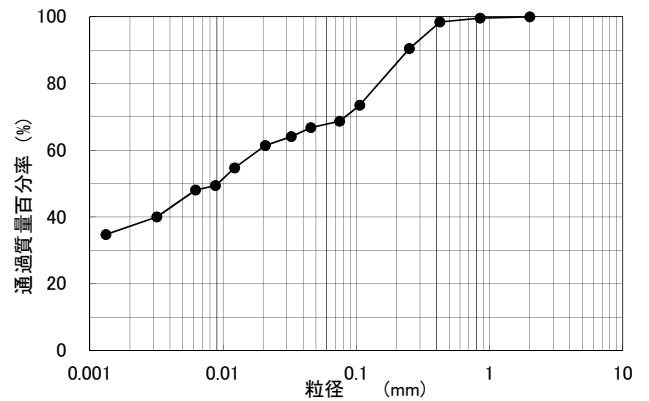


図3 島尻マーグの粒径加積曲線 (JIS A 1204)

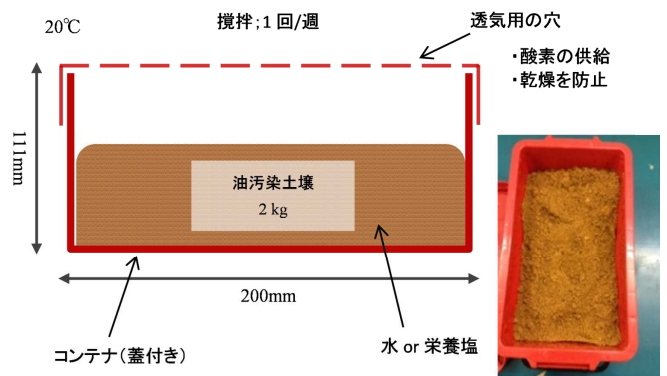


図4 試験装置概要

## 3. 試験方法

### 3.1 試験装置および条件

模擬汚染土壌作製に用いた油種は燃料油の一種である灯油とし、母材には表1や図3に示すような土質をもつ沖縄

表2 試験条件

系列	油種	初期値の油分濃度 (mg/kg)	含水率 (含水比)	栄養塩種類
コントロール	灯油	1,100	約20%	窒素、リン
促進系		1,200	(約25%)	

コンテナ容器には図5のように穴の開いた蓋を被せ、土壌の過度な乾燥を防止しつつ通気ができる状態にし、週一回の攪拌を行うことで土壌中への酸素の供給と均一化を促した。また、適切な含水率を維持するために、攪拌を行う際に土壌の含水率を確認し、適宜水の添加を行った。試験装置は気温20℃の条件下で静置し、土壌のpHについては、初期値から大幅に変化していないことの確認を行った。浄化目標は、「油臭 1 (人の嗅覚でやっと感知できるにおい) 以下」、かつ「油膜なし」と設定し、浄化完了の4週間後まで分析を行った。



図5 実験の様子

### 3.2 分析方法

分析項目は、全石油系炭化水素、油臭、油膜、生菌数、pHの6項目とした。

全石油系炭化水素については、油分濃度を迅速に把握するために溶媒抽出赤外線分析法(以下、TPH-IRと称す)と、油汚染対策ガイドラインに沿った分析方法である「GC-FID法によるTPH試験法」<sup>7)</sup>(以下、TPH-GCと称す)の2種類で分析を行った。TPH-IRは、油分濃度計OCMA-350(堀場製作所製)を使用した。

油臭、油膜については油汚染対策ガイドラインに記載された「油臭及び油膜の測定方法」<sup>7)</sup>に基づいて分析を行った。

生菌数については、灯油を唯一の炭素源とした寒天培地を作成し、平板希釈法<sup>8)</sup>により測定した。pHは地盤工学会基準(JGS 0211)<sup>9)</sup>に準拠し、土壌試料と水の質量比が1:5となるように検液を作製して測定した。

## 4. 試験結果と考察

### 4.1 TPH-IRおよびTPH-GC

図6にTPH-IRの分析結果を示す。初期値に約1,000 mg/kg-dryであったTPH-IRは、8週目にはコントロールと促進系のいずれの系列についても初期値の1/10である100 mg/kg-dry以下まで減少し、20週目には促進系において1/100となる10 mg/kg-dry以下まで減少した。通常、栄養塩を添加した促進系の方が、水のみを添加したコントロールと比較して浄化速度は高いが、TPH-IRの結果からは顕著

な差は確認できなかった。これは、攪拌等における揮発の影響が大きかったこと、および土壌に元々含有されている栄養塩類によって、コントロールでも油分解菌が活性化されたことが推測される。

一方、TPH-GCによる分析の結果、初期値は約400 mg/kg-dryであったが、いずれの系列についても定量下限値以下(100 mg/kg-dry)まで浄化され、順調に浄化できたことを確認した。なお、TPH-IRとTPH-GCの分析値に差が生じている要因としては、TPH-IRと比較してTPH-GCの前処理操作における軽質分の揮発が大きいことが推測された。

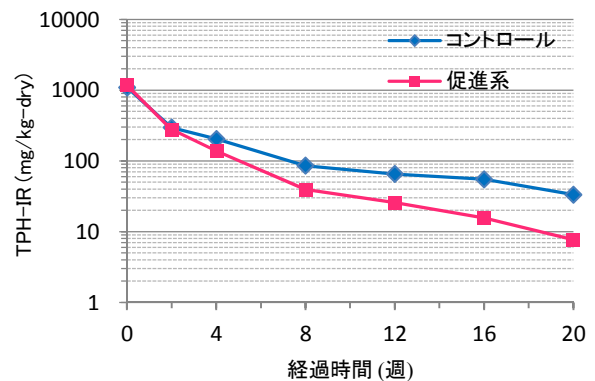


図6 TPH-IRの分析結果

### 4.2 油臭・油膜

図7に油臭の分析結果を示す。初期値はいずれの系列についても油臭3(人の嗅覚で楽に感知できるにおい)であったが、促進系については4週目に浄化目標である油臭1を達成し、それ以降も目標以下を維持していた。それに対しコントロールでは16週目ようやく浄化目標である油臭1に達した。TPH-IRの結果からは栄養塩を添加した促進系での浄化速度の顕著な差は確認できなかったが、油臭の結果では顕著な差を確認することができた。

なお、初期に確認されていた油膜は、20週目の時点ではコントロールと促進系のいずれについても確認されなくなり、浄化目標を達成した。

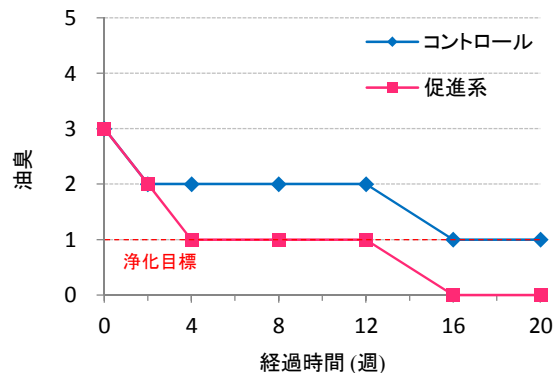


図7 油臭の分析結果

### 4.3 含水率および pH

実験期間中の模擬汚染土壌の含水率は、適宜水分調整を行うことで、いずれの系列についても実験期間中は 15～20%程度を維持していた。また、pHについても中性（7.0 前後）を維持していた。このことから、本実験での含水率および pH は微生物の生育に問題の無い状態を維持していると判断できる。

### 4.4 生菌数

図 8 に生菌数の分析結果を示す。初期値と比較すると、生菌数は 8 週目までいずれの系列でも増加傾向にあるが、促進系については一段と生菌数の増加が進んでいる。したがって、栄養塩の添加により油分解菌がさらに活性化されたことが確認できた。また、8 週目以降にはいずれの土壌についても生菌数が低下しているが、これは油分濃度の低減に伴い油分解菌が減少したためと考えられた。

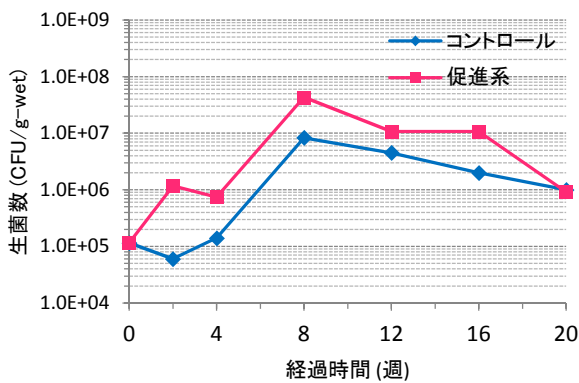


図 8 生菌数の分析結果

## 5. まとめ

本試験では、沖縄県特有の粘性土である島尻マージを母材とした灯油の模擬汚染土壌に対して、バイオレメディエーションの適用条件に関する検討を行った。その結果、全石油系炭化水素（TPH-IR）についてはコントロールと促進系の浄化速度に顕著な差は確認されなかったものの、促進系では浄化が停滞することなく、20 週目には初期値約 1,000 mg/kg-dry の 1/100 である 10 mg/kg-dry 以下まで低減した。また油臭について、初期値に油臭 3 であったものが促進系では 1 ヶ月（4 週目）で浄化目標である油臭 1 を

達成したのに対し、コントロールでは目標達成に 4 ヶ月間を要する結果となり、栄養塩添加の効果が確認された。油膜は、いずれの系列についても 20 週目の時点には確認されなくなった。以上の結果を通して、灯油で汚染された島尻マージを対象としたバイオレメディエーションについて、適用可能性および酸素の供給と含水率の保持を適切に管理した条件下での浄化期間に関する知見が得られた。

今後は、灯油以外の油種に対する浄化効果の確認と、実証試験による実工事を想定した規模での適用性を評価する予定である。

### 参考文献

- 1) 田中宏幸、笹本譲：原位置バイオレメディエーション工法による油汚染土壌・地下水の浄化技術、土壌・地下水汚染の浄化および修復技術、エヌ・ティー・エス、pp. 161-174、2008. 4
- 2) 田中宏幸、吉浪賢史、松久裕之：不飽和層の油汚染に対する原位置浄化、土木学会第 70 回年次学術講演会、pp. 181-182、2015. 9
- 3) 窪原拓馬、田中宏幸、川西順次、笹本譲、鴻野雅一、達貴浩：軽油汚染土壌に対するバイオレメディエーションパイロット実験、地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会 第 10 回講演集、pp. 542-545、2004. 7
- 4) 田中宏幸：油汚染の自主対策としての原位置浄化技術、環境浄化技術 2013. 9-10、Vol. 12、No. 5、2013. 9
- 5) ジョン・T・クックソン Jr.：バイオレメディエーションエンジニアリング～設計と応用～、エヌ・ティー・エス、pp. 300-306、1997. 1
- 6) 平田健正、前川統一郎：土壌・地下水汚染—原位置浄化技術の開発と実用化—、シーエムシー出版、pp. 106、2004. 4
- 7) 中央環境審議会土壌農薬部会・土壌汚染技術基準等専門委員会：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—、<http://www.env.go.jp/water/dojo/oil/>、2006. 3
- 8) 田中宏幸、松久裕之、野村暢彦、中島敏明、内山裕夫：重油に対する原位置バイオレメディエーションにおける微好気帯の浄化効果に関する検討、環境バイオテクノロジー学会誌、Vol. 12、No. 2、pp. 147-153、2012. 5
- 9) 公益社団法人地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説—二分冊の 1—、丸善出版、pp. 310-316、2009. 11