

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（その2）

Development of Bioremediation for Fuel Oil Contaminated Soil: a Pilot Scale Evaluation

田中 宏幸*¹ 西村 咲希*² 中島 卓夫*¹
Hiroyuki Tanaka Saki Nishimura Takuo Nakashima
西村 良平*¹ 仲 賢*³ 堤 純一郎*⁴
Ryohei Nishimura Satoshi Naka Junichiro Tsutsumi

要旨

油汚染土壌に対して行うバイオレメディエーションは、処理施設までの運搬が不要となり環境負荷軽減や経済性の観点から普及が期待されている技術である。ただし、土壌の種類、温度等の環境条件や、油の種類、濃度の汚染条件によって浄化速度が異なるため、それぞれの汚染土に対しては適用性を診断するうえで事前の検討試験が必要であり、実際に現地で浄化処理を行ったデータの蓄積も望まれている状況にある。本報告では、灯油の模擬汚染土壌を対象としたバイオパイルとランドファームのパイロット試験の結果について紹介する。TPH-GCが1,000 mg/kg、油臭3~4の汚染土壌を2ヶ月で油臭1まで低減し浄化することができ、適切な処理条件の維持によって実施工において適用可能であると評価した。

キーワード：油汚染土壌 バイオレメディエーション オンサイト処理

1. はじめに

我が国における油汚染土壌問題に対しては、油汚染対策ガイドライン¹⁾を参考にした対応が一般的となっている。その浄化方法は、掘削除去、原位置処理およびオンサイト型処理に大別される。微生物の活性を促進させて汚染物質を浄化するバイオレメディエーションは、原位置処理あるいはオンサイト型処理といった処理方法として実施可能で、経済的で環境負荷の少ない方法である。掘削が可能で、浄化にある程度の時間が許容される場合には、バイオパイル（以下、BP）やランドファーム（以下、LF）といったオンサイト型のバイオレメディエーションの適用が期待できる。

これまでに、当社では軽油で汚染された砂質土を対象にしたパイロット試験²⁾や、重質油の模擬汚染土壌に対する室内試験³⁾に取り組んできた。

前報告⁴⁾では、BPやLFを想定した処理における適用性を判断するために灯油汚染土を対象として実施した室内試験の取組みを紹介した。その試験では、5,000 mg/kg-dry以下の汚染濃度の場合、適切な含水率の管理と酸素供給および栄養塩の添加によって、2ヶ月で油臭1まで浄化可能という結果が得られた。

このような背景から、本報告では前報告と同様の土壌を対象としてオンサイト型処理のパイロット試験を実施したので、その結果について報告する。

2. 実施方法

2.1 模擬汚染土壌

本試験には、表1および図1に示すような性状をもつ沖縄県産の粘性土である島尻マーゴと山砂を使用した。これらの土壌に対し現地でバックホウを用いて灯油を混合して、

表1 島尻マーゴおよび砂の性状

項目	単位	測定値		分析方法
		島尻マーゴ	砂	
含水比	%	21.3	5.6	JIS A1203
含水率	%	17.6	5.3	
土粒子密度	g/cm ³	2.728	2.745	JIS A1202
pH	—	7.6	9.3	JGS 0211

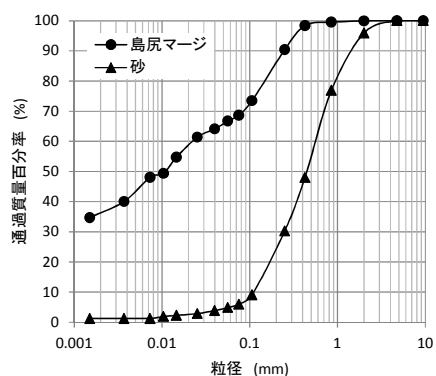


図1 島尻マーゴおよび砂の粒径加積曲線

*1 技術統括本部 環境エンジニアリング部 *2 東京本店 土木部 *3 九州支店 沖縄営業所 *4 琉球大学

模擬汚染土壌を調製し、その後、微生物の分解活性を促進させる実験系（以下、促進系）には栄養塩として窒素化合物とりん化合物を溶解した水を、微生物の分解活性を促進させないコントロール系では水のみを添加し、攪拌によって均一化を促した。

2.2 処理形態と実施条件

屋外で実施したパイロット試験の処理形態は、BP、LFの2通りとし、表2に示す条件で処理を行った。図2にBPおよびLFの設備概要を示す。

BPは、掘削した汚染土壌に地上で適量の栄養塩等を添加・混合した後に、パイル状に形成して土壌の中に埋設した配管からブロワーを用いる空気の吸引により、外気から土壌中へ強制的に酸素の供給を行い、微生物の分解活性を促す処理方法である。本試験では、1 m³程度の堆積させた土壌中に有孔管を埋設し、土壌全体をシートで養生したうえで空気を吸引した。

LFは、盛土厚50 cm以下で土壌を堆積させ、バックホウ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工法である。今回は、土壌を養生したシートの端部にホースを挿入し、ガス化する油成分の拡散を防ぐために養生シート内の空気を常時吸引した。

また、模擬汚染土壌の調製に伴い発生したやや高濃度の油汚染土壌を島尻マージおよび砂のコントロール系とし、栄養塩を添加した促進系と比較するために定期的な分析を行った。

なお、これらの島尻マージおよび砂のコントロール系は、フレキシブルコンテナバッグに詰めた状態で現地に保管し、実験期間中の攪拌および含水率の調整は行わなかった。一方、BPやLFにおいては、バックホウを使用し、BPでは1回/週、LFは3回/週の頻度で攪拌を実施した。

2.3 分析方法

分析項目は、全石油系炭化水素（TPH：Total Petroleum Hydrocarbon）、油臭、油膜、生菌数、pHとした。このうちTPHについては、浄化の進行を速やかに把握するための赤外線分析法による簡易的なTPH-IRと、油汚染対策ガイドラインに沿った評価としてガスクロマトグラフ/水素炎イオン化型検出器（GC-FID）を使用したTPH-GCという2種類の試験法で分析を行った。

油臭、油膜については油汚染対策ガイドライン¹⁾、生菌数については田中ら⁵⁾の方法、pHについては地盤工学会⁶⁾の方法に基づいて分析を行った。

これらの分析項目に加えて、データロガー付き測定器を用いて温度と湿度の測定を行った。測定深度は、BPでは

表2 パイロット試験の実施条件

系列	油種	初期値の油分濃度 (mg/kg)	土壌	栄養塩の添加	ガス吸引の実施
島尻マージ BP	灯油	3,000	島尻マージ	窒素、リン	土壌間隙
島尻マージ LF					養生シートと土壌の空間
砂 LF		3,000	砂	窒素、リン	養生シートと土壌の空間
島尻マージ CTL		4,000	島尻マージ	なし	なし
砂 CTL		7,000	砂	なし	なし

※ CTL：「コントロール系」の略記

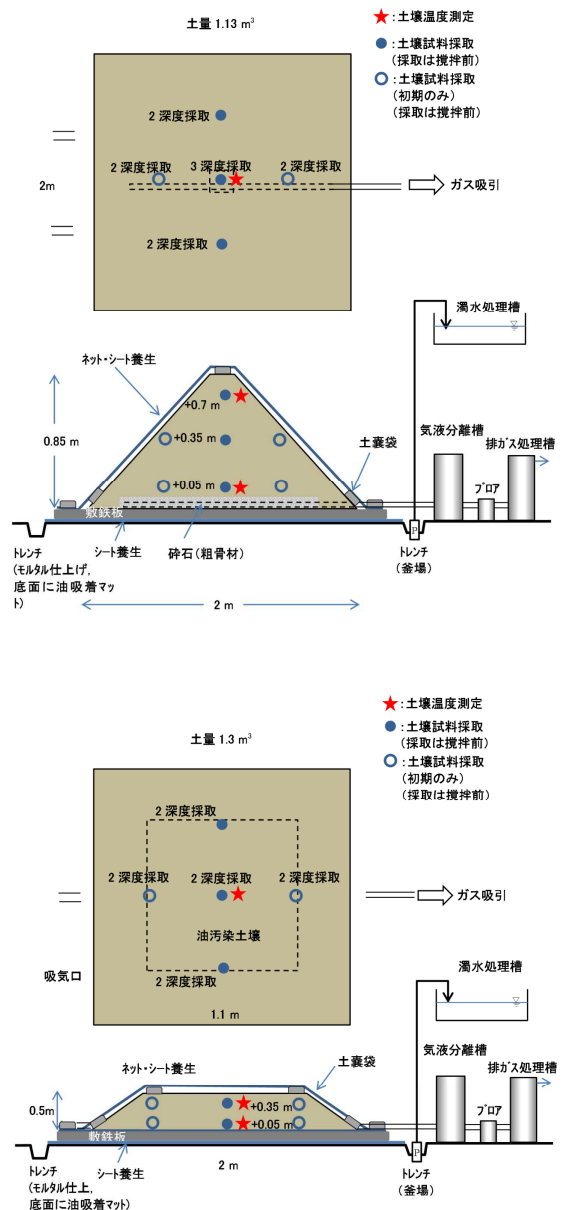


図2 パイロット試験の実施装置
(上：バイオパイル、下：ランドファーミング)

GL+0.05 m、GL+0.35 m および GL+0.7 m、LF では GL+0.05 m および GL+0.35 m とした (図2 参照)。外気に対しては、試験敷地内で屋外の日陰となる地点にデータロガー付き測定器を設置した。

なお、浄化目標は TPH-GC については 1,000 mg/kg 以下、油臭については臭気強度 1 以下を 1 ヶ月以上維持する状態と設定した。

3. 結果および考察

3.1 TPH

図3にTPH-IRの結果を示す。いずれの土壌においても減少傾向を示しており、4週目には浄化目標値である1,000 mg/kg-dry 以下に達していた。また、砂のLFについてはBPよりも大きく低減していた。

図4にTPH-GCの結果を示す。いずれの土壌でも順調に低減し、8週目には定量下限値である100 mg/kg-dry 以下となった。

TPH-IR と TPH-GC のいずれにおいても島尻マーヅより砂のほうが浄化は速かった。この要因としては、砂では粘性土の島尻マーヅと比較すると油分が吸着されにくく、分解微生物と接触しやすいために分解が促進されたことが考えられる。また、島尻マーヅについてはBPよりもLFの浄化速度が速かった。この結果から、バイオレメディエーションの促進において、盛土厚が小さく攪拌回数が多いLFがBPよりも有利であると考えられる。

3.2 油臭および油膜

図5に油臭の結果を示す。いずれの土壌においても8週目には浄化目標値である油臭1以下に達したが、TPH-IRの結果と同様に、浄化が最も速い土壌は砂のLFであった。一方で、島尻マーヅおよび砂のコントロール系では、12週を経過後も油臭3を示しており、BPやLFにおける浄化促進効果を確認することができた。

表3に油膜の結果を示す。砂のLF以外の土壌では初期値から油膜が検出されず、2週目以降にはBPやLFのいずれの土壌についても油膜が確認されなかった。島尻マーヅのBPおよびLFにおいて初期値から油膜が検出されなかった要因としては、島尻マーヅは油分を吸着しやすい土質であるために、土を水に浸した際にも油膜が生じにくい傾向があると推測される。

3.3 その他の項目

図6に生菌数の結果を示す。砂のLFで菌数が著しく上昇し、4週目以降は常に一番高い値を示していた。これは、

TPH-IR や油臭で一番浄化が速かったことを裏付ける結果となった。ただし、砂は比表面積が小さく微生物が定着しにくい土質であるため、分析の前処理として行う水との攪拌工程で微生物が土壌から脱離されやすく、見かけ上の生菌数が高くなった可能性もある。また、4週目以降にいずれの土壌でも生菌数が減少しているが、これは油分濃度の低下に伴うものと推測される。島尻マーヅのコントロール系と促進系、砂の促進系については、開始前から多少の増減はあるものの 10^7 cfu/g の水準で推移していた。

含水率については、浄化に適した状態を保持しており(デ

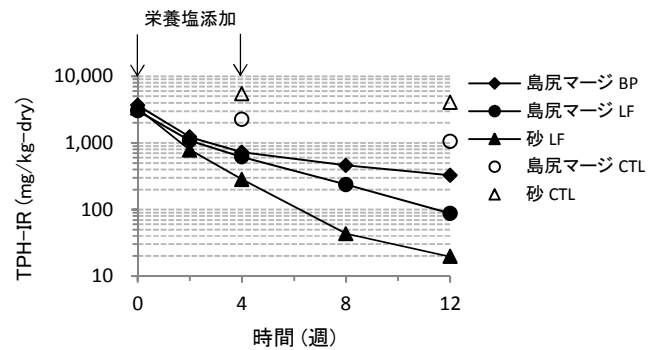


図3 パイロット試験における TPH-IR

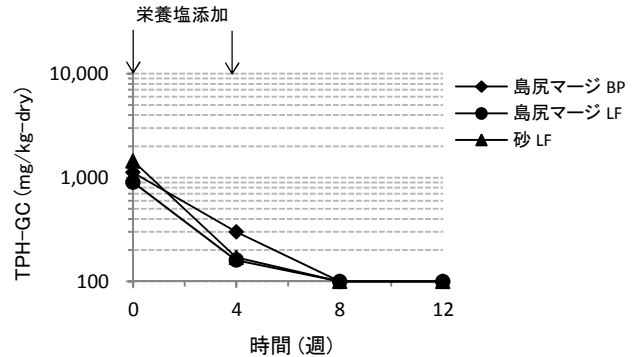


図4 パイロット試験における TPH-GC

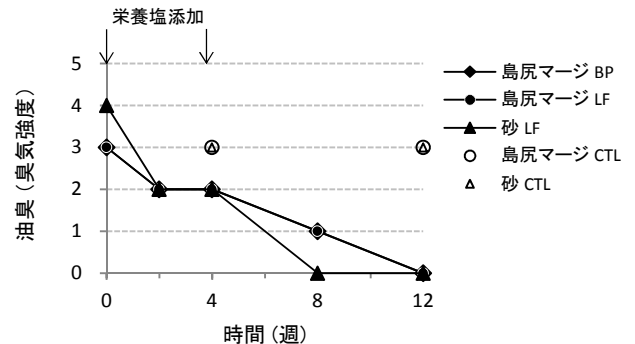


図5 パイロット試験における油臭

表3 パイロット試験における油膜

時間(週)	0	2	4	8	12
鳥尻マーヅ BP	無	無	無	無	無
鳥尻マーヅ LF	無	無	無	無	無
砂 LF	有	無	無	無	無
鳥尻マーヅ CTL	-	-	無	-	無
砂 CTL	-	-	有	-	有

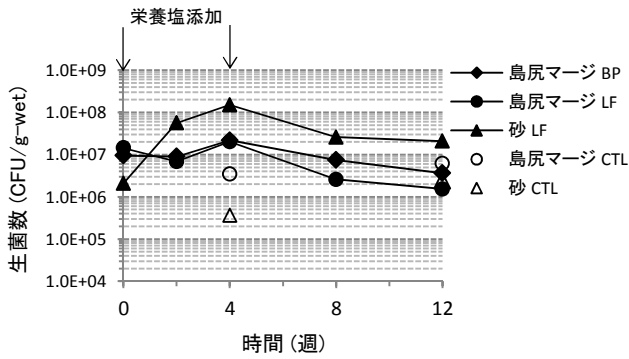


図6 パイロット試験における生菌数

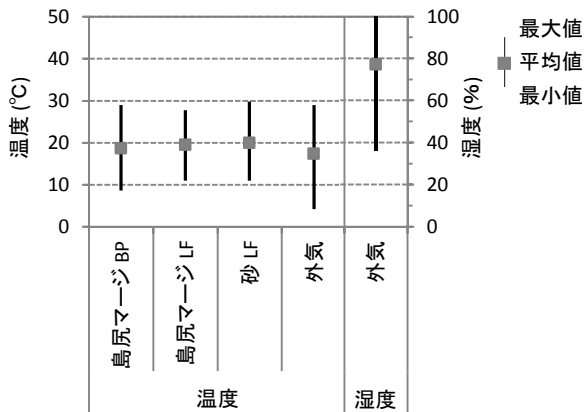


図7 パイロット試験における土壌の温度および外気の温度・湿度

ータ未記載)、攪拌による酸素供給あるいは均一化と、含水率の管理が菌数の維持に有効であったと考えられる。

図7には、鳥尻マーヅのBPおよびLF、砂のLFにおける土壌温度の平均値および最大・最小値、さらには外気温度および湿度の結果を示す。いずれの土壌温度についても最低値の約10℃から最高値の30℃弱の間で変動しており、おおよそ外気と同じ挙動をしていた。また、それぞれの土壌内温度における平均値は、いずれも約20℃と微生物の活動に適した水準になっていた。

pHについては、鳥尻マーヅのBPおよびLFでは、非汚染土壌から大差なくpH7.0~8.0前後を維持していた。ただし、

砂のLFについては搬入前の性状に由来してpH9.0以上の条件(表1参照)であったが、今回の結果からは微生物の分解活性への顕著な悪影響は確認されなかった。

4. まとめ

TPH-GCで1,000 mg/kgとなる灯油の模擬汚染土壌を対象とした本試験においては、含水率の管理と攪拌等による酸素の供給を行うことで、BPとLFのいずれにおいても2ヶ月で浄化目標値に達し、3ヶ月で浄化完了となった。なお、最も浄化速度が速かったのは砂のLFであった。

以上のような試験結果から、今回の実施条件下に対応するBPやLFは、実工事においては適用可能なオンサイト型処理方法であると評価できた。

沖縄県米軍基地返還環境対策ガイドライン⁷⁾によると、今後は油汚染土壌への対応に際して、油汚染対策ガイドラインで取りあげられている油膜・油臭のほかにも土地の利用用途に応じたTPH濃度を浄化目標とする場面も想定される。したがって、法規制等の枠組みについての動向も視野に入れた柔軟な対応が可能でより優れた効果を発揮できるような浄化技術の開発を、今回の結果をふまえて努める所存である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 窪原拓馬、田中宏幸、川西順次、笹本謙、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会集 第10回講演集、pp.542-545、2004.7
- 3) 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、pp.32-39、2013.9
- 4) 西村咲希、田中宏幸、中島卓夫、西村良平、仲賢、堤純一郎：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、鴻池組技術研究報告、vol.26、pp.9-12、2016.6
- 5) 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
- 6) 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—、pp.310-316、丸善出版、2009.11
- 7) 沖縄県：沖縄県米軍基地環境調査ガイドライン、2017.3