

# 微生物分解による油汚染土壌の浄化

木村啓一郎\* 埜本雅春\* 今西雅義\*  
 小西正郎\*\* 白石祐彰\*\* 武笠伯太郎\*\*\*

## 1. まえがき

近年、各方面で土壌の油汚染が顕在化している。油汚染は植物の成長の妨げや油臭の発生、あるいは多環芳香族炭化水素類による発ガン性など、汚染によって様々な障害を引き起こす可能性があるが、油汚染に対する法的規制はごく一部の規程に留まっている。

油汚染土壌の処理に際して、ある機関の集計によると、実際の処理工事で採用した方法のうち、除去や封じ込めといった方法が約 73%を占め、洗浄や熱処理、微生物分解処理といった“浄化方法”は僅か 27%程度であったというのが日本の現状である<sup>1)</sup>。また各機関から微生物分解の実験結果が報告されているが、実汚染サイトでの実証試験結果の報告例は少ない。

このような背景から著者らはC重油模擬汚染土、潤滑油系油及び灯油系油で汚染された実土壌を用いた微生物分解による浄化について、トリータビリティー試験、小規模実証試験、原位置実規模浄化試験と順を追って行った。

上記の試験より得られた油の濃度・種類の相違、また浄化期間の相違等による浄化効果をまとめたのでここに報告する。

## 2. 試験土壌について

試験等に用いた土壌の物性を表-1に示す。

表-1 試験土壌の物性値

項目	試験名 土壌種類	トリータビリティー 小規模実証			
		模擬土壌試験 C重油 模擬汚染土	低濃度潤滑 油系汚染土	高濃度潤滑 油系汚染土	浄化事業B 灯油系 汚染土
土粒子密度 $\rho_s$ g/cm <sup>3</sup>		2.50	2.68	2.67	-
自然含水比 $w_n$ %		11.1	22.2	19.6	31.4
石分(75mm以上) %		0	0	0	0
礫分(2~75mm) %		85	21.9	34.9	7.1
砂分(0.075~2mm) %		15	42.3	43.6	40.3
シルト分(0.005~0.075mm) %		-	21.1	14.1	51.6
粘土分(0.005mm未満) %		-	14.7	7.4	-
分類名		砂まじり礫 (川砂)	細粒分質礫 質砂	細粒分質礫 質砂	礫まじり細粒 分質砂
分類記号		G-S	SFG	SFG	SF-G

次にそれぞれの土壌の油分含有量初期値を表-2に示す。表に示すように汚染土壌の油種はC重油、潤滑油及び灯油の3種類である。C重油模擬汚染土は川砂とC重油を用い7%程度の油汚染となるように作製した<sup>2)</sup>。

表-2 試験土壌の油分測定値(初期値)

項目	土壌種類	C重油 模擬汚染土	低濃度潤滑 油系汚染土	高濃度潤滑 油系汚染土	灯油系 汚染土
油分濃度(S316) mg/kg		41000	7800	43800	870
油分濃度(n-Hex) mg/kg		1900	3900	21700	213
TPH (C <sub>9</sub> -C <sub>10</sub> ) mg/kg		1730	38	1320	20
" (C <sub>10</sub> -C <sub>28</sub> ) mg/kg		19600	1150	27600	1150
" (C <sub>28</sub> -C <sub>44</sub> ) mg/kg		7080	924	28200	53
イアトロスキャン(飽和分) %		9.6	73.3	83.1	-
" (芳香族分) %		60.9	16.3	15.6	-
" (ジソ分) %		17.4	8.8	1.6	-
" (7&7アルケン分) %		12.1	1.6	0	-

※C<sub>9</sub>-C<sub>10</sub>:ガソリン相当分、C<sub>10</sub>-C<sub>28</sub>:軽質油相当分、C<sub>28</sub>-C<sub>44</sub>:重質油・潤滑油相当分

ここに油分は S316 (ポリクロロトリフルオロエチレン) で抽出して赤外線吸光法で測定したもの、ノルマルヘキサンによるソックスレー抽出物を公定法で測定したもの (n-Hex)、二硫化炭素抽出物のガスクロマト分析結果から測定した値 (TPH)、及び4種類の展開液による薄層クロマトグラフィー分析結果 (イアトロスキャン) で得られた値を示す。また、油種の判定は、ノルマルヘキサン抽出物をガスクロマトグラフィーで定性分析した結果に基づいた。

## 3. 試験方法

### 3.1 トリータビリティー試験の方法

トリータビリティー試験は、低濃度潤滑油系汚染土とC重油模擬汚染土の2種類の土壌と平底の容器を用いて実施した。低濃度潤滑油系汚染土壌の試験は4.75 mmふるいにかけて通過した土壌約 10 kg を用い、微生物活性剤を 0.8 wt%及び 0.4 wt%添加し、2~3日に1回程度の頻度で攪拌し、3週間後に浄化状況を測定した。

\*東京支社環境プロジェクト部 \*\*技術研究所 \*\*\*東京支社土木部

C重油模擬汚染土は微生物活性剤を 0.8wt%添加したケース、0.8wt%+N (250 mg/kg) +P (50mg/kg) を添加したケース、及び攪拌のみとするケースを実施した。この攪拌頻度は当初2ヶ月間では2週間に1回程度とし、その後は放置した。

### 3.2 小規模実証試験の方法

小規模実証試験は、屋外において低濃度潤滑油系土壌 (約 1m<sup>3</sup>) を用いて実施した。試験ケースは微生物活性剤を 0.8wt%添加したケース、及び攪拌のみとするケースを実施した。この攪拌頻度は2週間に1回を原則としてミニバックホウで攪拌を行った (写真-1 参照)。



写真-1 小規模実証実験の攪拌状況

試験は6月中旬から9月末の約3ヶ月間とし、赤外線吸光法による油分含有量測定の外に生菌数を評価するためにATPを測定した。

ATPとはアデノシン三リン酸のことで細菌が必ず持つエネルギー貯蔵物質のことである。菌が死滅すれば細胞内の分解酵素によりATPは急速に分解されるためATP濃度を測定すれば生菌数だけを算出することが可能とされている<sup>3)</sup>。

### 3.3 実規模浄化試験の方法

実規模浄化試験における汚染土壌は約 6,000 m<sup>3</sup> であり、汚染物質は潤滑油系油である。そこで高さ1mのパイル (野積みした状態)<sup>4)</sup> を形成し微生物分解による土壌の浄化を7月から約4ヶ月間に亘って行った。

このうち、浄化試験は低濃度潤滑油系土壌 (200 m<sup>3</sup> 規模) と高濃度潤滑油系土壌 (100m<sup>3</sup> 規模) の2ブロックで行い、それぞれ微生物活性剤を 0.8wt%添加し、3日に1回の頻度で重機攪拌する方法で実施した。

また、別のサイトでは灯油系油で汚染した土壌 (約 100 m<sup>3</sup>) を対象とし、1月末~3月末の約2ヶ月間、同様の方法 (微生物活性剤 0.8wt%を添加して重機攪拌) で実証試験を行った。

### 3.4 高濃度汚染土壌を用いた活性剤増量試験の方法

実規模浄化試験のうち高濃度潤滑油系土壌 (100 m<sup>3</sup> 規模) においては図-1に示すように更に約 20 m<sup>3</sup> ずつ5ケースに分割し、微生物活性剤等を追添加して油分含有量及びATPを測定した。

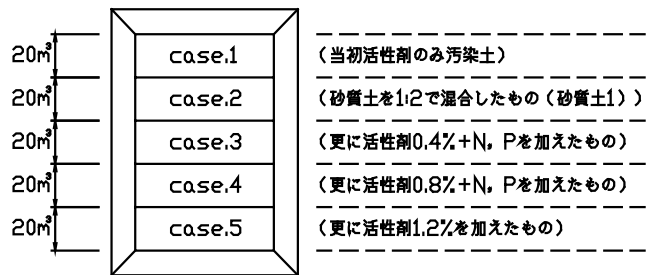


図-1 試験ブロックとケース

case.1 については深度方向の浄化効果確認を行うため、図-2に示すように30 cm毎に合計4点の油分濃度の確認を行った。

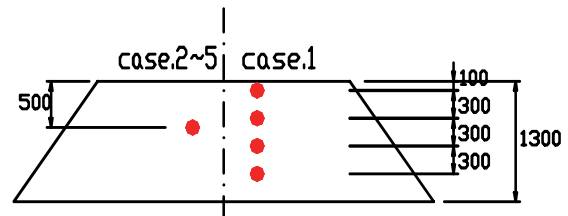


図-2 サンプル位置標準断面

また、同時に油臭を測定することによって油分含有量との相関関係を調べた。油臭の測定機械としては高感度酸化錫 (SnO<sub>2</sub>) 系熱線型焼結半導体を利用したポータブル臭いセンサーを使用し、油臭は相対値ながら0~2,000の値として出力される。

## 4. 試験結果と考察

### 4.1 トリータビリティ試験の結果

#### a. 低濃度潤滑油系油汚染土壌における試験結果

トリータビリティ試験の3週間後の油分濃度測定結果を図-3に示す。

どちらのケースにおいても初期濃度 1,100 mg/kg の

低濃度潤滑油系油汚染土壌が3週間後には 200 mg/kg 以下に低減している。微生物活性剤添加率 0.4wt% という少量においても浄化効果がある結果が得られたが、これは土壌量が少なく攪拌効果が十分に発揮されたことに起因していると考えられる。

次に油成分別の変化量を図-4に示す。

図より、ガソリン相当成分はもとより軽油相当成分、潤滑油相当成分も大きく低減していることがわかる。この試験結果も微生物活性剤添加による浄化方法が潤滑油系油にも適用できることを示している。

以上の結果から、低濃度潤滑油系油で汚染された土壌サイトの浄化をする際は、微生物活性剤の添加とパイルを作成しての重機攪拌による分解処理の適用が可能であると判断できる。また、十分な攪拌が実現できる場合には、微生物活性剤の添加量は 0.4wt% でも支障はないと考えられる。しかし、実サイトへの適用時は、攪拌混合性の低下を考慮して 0.8wt%程度を選択することが望ましいと考えられる。

b. C重油模擬汚染土壌の試験結果

C重油模擬汚染土壌によるトリータビリティー試験結果を図-5に示す。

どのケースにおいても緩やかな油分含有量の低下が見受けられ、また活性剤等の添加効果も確認できる。

しかし浄化率について、どの結果も1年間で 25%~55%程度であり、低濃度潤滑油系油汚染土壌におけるトリータビリティー試験と比較して満足のいく結果とは言い難い。

これは、実際の汚染土壌が自然環境下に長期間存在しているのに対して、自然条件を受けにくい環境にあった事と攪拌曝気作業が最初の2ヶ月間だけであり微生物が好む好気性の状態を持続的に形成できなかったことが一因であると推測される。

4.2 小規模実証試験の結果

小規模実証試験における油分含有量の試験結果を図-6に示す。

図より、どちらのケースも開始6週間までに急激な油分含有量の減少が見受けられる。

微生物活性剤の添加無しではほぼ満足できる程度の浄化まで6週間かかり、14週経過時点で初期値 7,800mg/kg が 685mg/kg まで油分含有量が減少している。

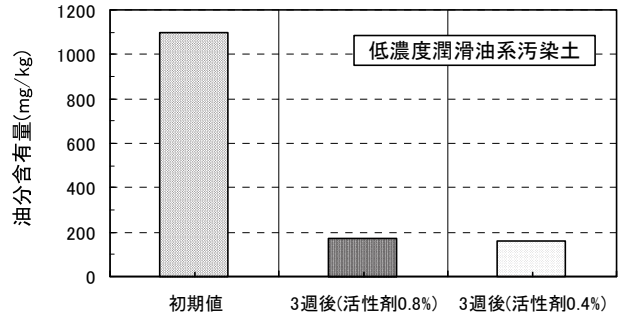


図-3 トリータビリティー試験における油分含有量の変化

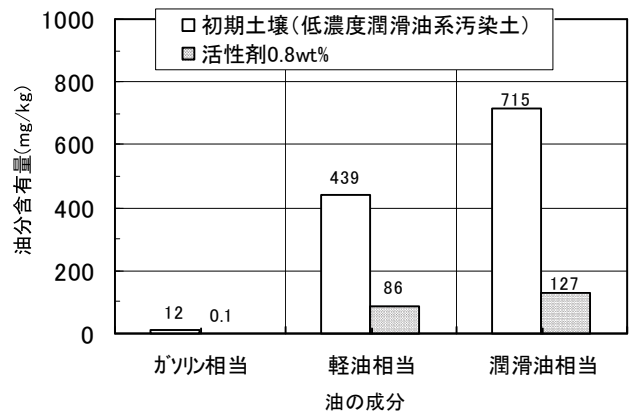


図-4 トリータビリティー試験における油成分の変化

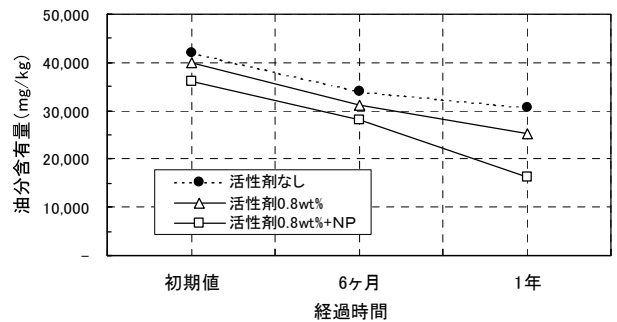


図-5 C重油模擬汚染土壌試験における油分含有量の推移

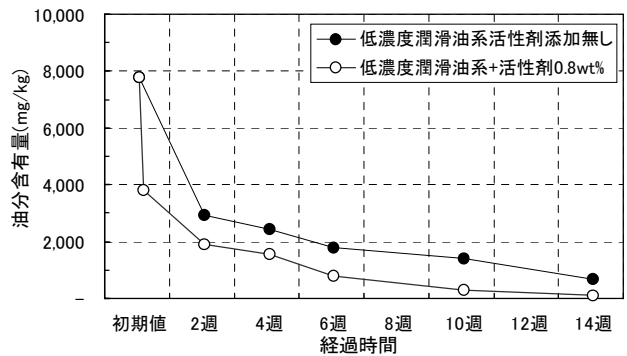


図-6 小規模実証試験における油分含有量の推移

一方、微生物活性剤を添加したケースでは急速に 3,800mg/kg まで低下し、2週間でほぼ満足できる程度まで浄化が進んでいる。また、14週目の計測では 123mg/kg まで油分含有量が減少した。

次にATPの測定結果を図-7に示す。

微生物活性剤を添加したケースではバラツキが大きいものの、分解促進が得られた4週までは添加無しのケースよりも大きな値を示し、分解時に微生物活動が活発化したことを反映した結果と推測される。

以上の結果から、低濃度潤滑油系油汚染土壌において微生物活性剤の添加と攪拌曝気作業は油成分分解の進行を促し、浄化速度を促進させる効果があると言える。

### 4.3 実規模浄化試験の結果

#### a. 潤滑油系汚染土壌サイトの試験結果

原位置で実施した実規模の潤滑油系汚染土壌浄化試験結果を図-8に示す。

図より、初期値が20,000mg/kgを下回るような低濃度潤滑油系油汚染土壌に対しては6~8週間で満足できる程度まで浄化が進んでおり、その後も僅かにではあるが浄化が進行している。

しかし、初期値が30,000mg/kgを超えるような高濃度潤滑油系油汚染土では6~8週間で20,000mg/kg程度まで浄化するものの、その後の変化はあまり無く、この浄化条件下での浄化は難しいと考えられる。

このような、高濃度潤滑油系汚染土壌に対して活性剤を増量した試験結果を図-9~11に示す。

まず、case. 1における深度別の油含有量の変化を図-9に示す。ここで、GL-90cm及びGL-120cmのデータが3週で途切れているのは、4週目に浄化ヤードを拡張して汚染土壌を薄く広げたことにより汚染土壌の厚みが70cm程度となったためである。

図より、各深度とも同様の油含有量の低下傾向が見受けられ、深度による油含有量の違いは無いと考えられる。この結果、パイル作成による攪拌曝気作業が円滑に行われ、深度方向における浄化は均一に効果をあげていることがわかった。

次に case. 1~5の油含有量の経時変化を図-10に示す。

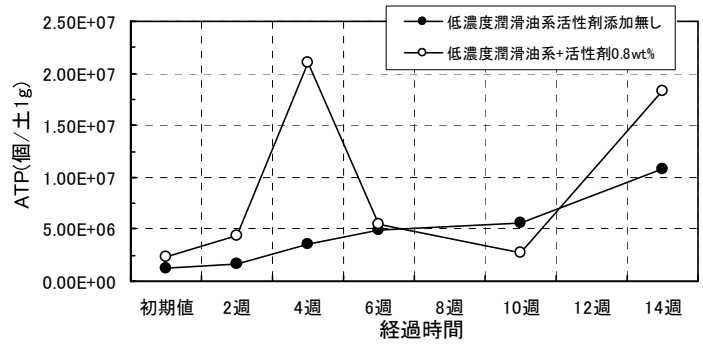


図-7 小規模実証試験におけるATPの推移

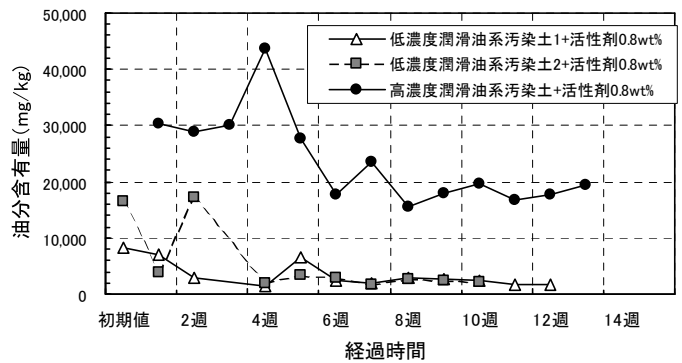


図-8 実規模浄化試験における潤滑油系油含有量の推移

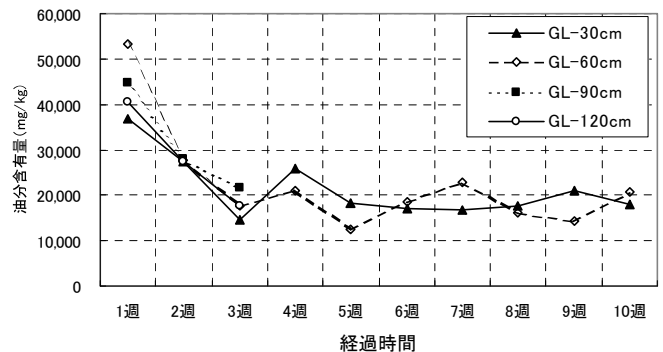


図-9 高濃度潤滑油系汚染土壌における深度別油含有量の推移

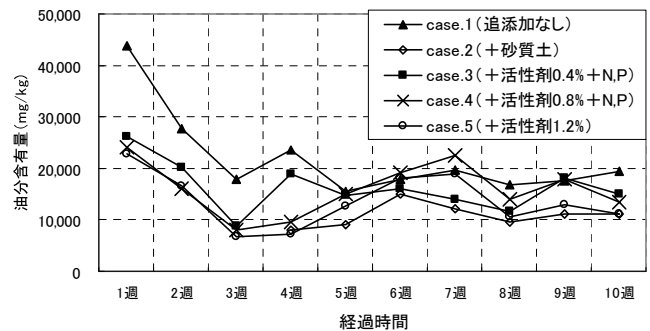


図-10 高濃度潤滑油系汚染土壌における油含有量の推移

図より、僅かではあるが case. 2 (砂質土を混合したもの) 及び case. 5 (活性剤 1.2% 追添加したもの) の油分減少量が大きく、浄化に有効であることが読み取れるがその傾向は顕著ではない。どのケースにおいても初期値 43,800mg/kg が 3~5 週間で 10,000~20,000mg/kg に減少しただけでその後は低下傾向が現れているとは言い難い。同様に ATP 測定値の経時変化を図-11 に示す。バラツキはあるものの全体の傾向としては、追添加後一度減少しその後増加するという現象を示しているが、8 週間前からまた減少しはじめるという複雑な挙動が確認された。追添加なしの場合と比較し菌体数の増加が大きかったのは、case. 2 (砂質土を混合したもの) 及び case. 5 (活性剤 1.2% 追添加したもの) であった。case. 2 については、砂質土の混合による好気性状態の持続が要因であり、また、case. 5 についてはやはり微生物活性剤の増量が要因であると考えられる。

この 2 つの試験結果から、case. 2 及び case. 5 の条件が浄化に対して有効であることがわかったがその有効性は他のケースと比較してさほど大きなものではなく、微生物活性剤の追添加が有効であると結論付けるまでには至らなかった。

以上のことから、高濃度潤滑油汚染土に対して微生物活性剤を増量すれば一定の浄化までは至るが、10 週程度で十分な浄化を達成するのは困難であり、更に長期的な処理等が必要になると考えられる。

b. 灯油系汚染土壌の試験結果

灯油系油汚染土壌約 100 m<sup>3</sup> を対象とした浄化処理結果を図-12 に示す。

図より、僅か 1 週間で初期濃度 600mg/kg の灯油系汚染土壌が 86mg/kg まで浄化されており、灯油系油に対しても活性剤添加と攪拌による浄化手法が有効であると言える。

また、活性剤添加後灯油系の油臭が急激に軽減されたことから、油臭の低減という観点からも微生物活性剤は有効であると考えられる。

4. 4 高濃度汚染土壌を用いた活性剤増量試験の結果

臭気センサーによる臭気測定値を図-13 に示す。

油臭については case. 5 (活性剤 1.2% 追添加したもの) の減少量が一番大きく、次いで case. 4 (活性剤 0.8% + N、P を追添加したもの)、case. 3 (活性剤 0.4% + N、P を追添加したもの) の順となった。

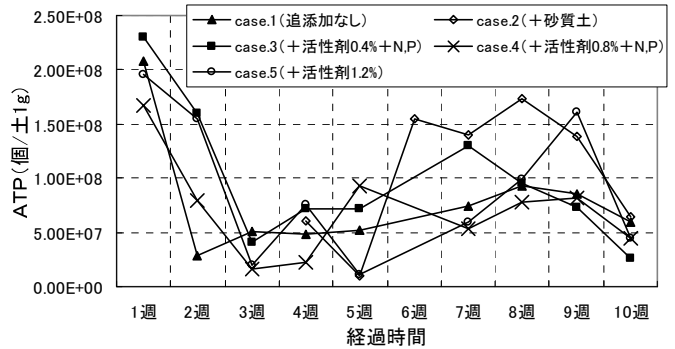


図-11 高濃度潤滑油系汚染土壌における ATP の推移

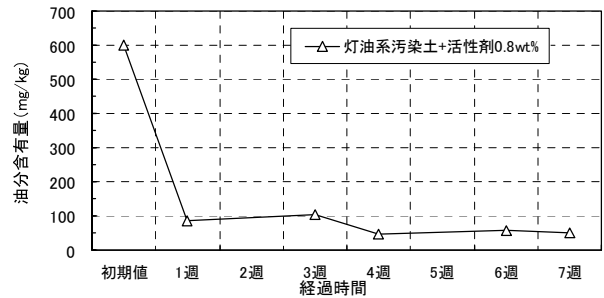


図-12 実規模浄化試験における灯油系油分含有量の推移

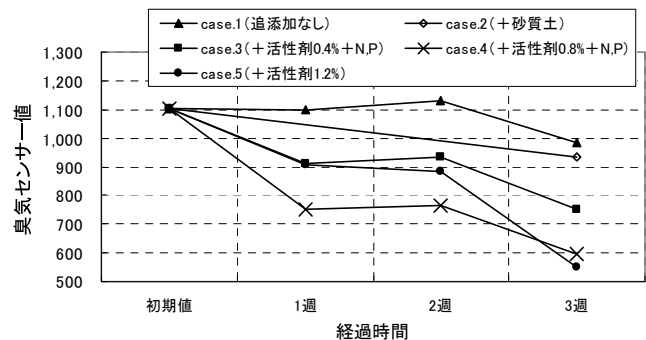


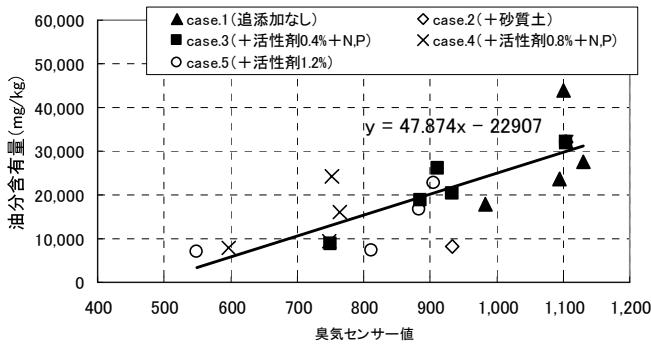
図-13 高濃度潤滑油系汚染土壌における油臭測定値の推移

この結果より微生物活性剤の添加による油臭の減少は添加量に比例すること、更に栄養塩の添加も油臭の減少に効果的であることが推測できる。

次に油臭と油分含有量の相関関係を図-14 に示す。対象サイトの汚染土壌においては油臭のほかにもヘドロ臭が含まれていたため、油臭以外の臭気も採取してしまい若干バラツキが出たが、ある程度の相関関係があることは確認できた。

今後の課題として油成分と油臭の関係評価やデータ蓄積を行う必要はあるが、油汚染土壌の評価方法として有効な手段となると考えられる。





図一14 高濃度潤滑油系汚染土壌における油分—油臭相関関係

## 5. まとめ

本試験では、C重油、潤滑油系油及び灯油系油の3種類の油で汚染された土壌を使用して微生物分解処理試験を行い、油種や濃度の相違による適用性を把握した。その結果をまとめれば以下のようなものである。

### a. トリータビリティ試験の結果

低濃度潤滑油系油汚染土壌を使用し、微生物活性剤添加量0.4wt%及び0.8wt%にて試験を行った結果、どちらのケースにおいても油分濃度が3週間で1,100mg/kg から200mg/kg 以下に低減した。

一方、C重油模擬汚染土壌においては微生物活性剤添加無しのケースと比較して微生物活性剤の有効性は確認できたものの、その浄化率は1年間で約55%と決して満足のいく結果は得られなかった。これは、模擬汚染土壌であることや攪拌曝気作業条件の違いによると考えられるが、その差異の発生原因については今後の課題である。

### b. 小規模試験の結果

低濃度潤滑油系油汚染土壌を使用しての1m<sup>3</sup>規模の試験では、トリータビリティ試験結果と現場での攪拌性を考慮して微生物活性剤の添加率を0.8wt%に設定した。その結果、微生物活性剤添加無しの土壌では油分初期濃度7,800 mg/kg であったものが14週間で685mg/kg までしか低減しなかったのに対し、微生物活性剤を添加した土壌は123mg/kg まで低減した。この結果は微生物活性剤添加により油分解速度の促進が得られたと判断できる。

### c. 実規模浄化試験の結果

潤滑油系実規模汚染サイトでは、トリータビリティ試験や小規模試験結果を考慮して微生物活性剤を0.8wt%添加した。その結果、油分濃度初期値8,500

～16,500mg/kg の低濃度汚染土壌では7週間で1,800～1,900mg/kg まで浄化が進んだ。しかし、初期濃度30,400mg/kg の汚染土壌は13週間で19,500mg/kg までしか低減できないという結果が得られた。また活性剤を追添加する試験も行ったがその有効性を確認するまでには至らなかった。従って、油分含有量3%を超えるような高濃度汚染土壌に対して、微生物分解処理には限界があり、加熱処理や簡易洗浄処理等と組み合わせる工事計画が必要であると考えられる。

灯油系油で汚染されたサイトでは微生物活性剤0.8wt%を添加することで、僅か1週間で初期濃度600mg/kg が86mg/kg まで浄化された。また、微生物活性剤を添加することにより油臭が低減される事も確認された。

以上のことから油分濃度や油種を考慮すれば、微生物活性剤を用いた分解処理浄化は有効であると言える。

### d. 高濃度汚染土壌を用いた活性剤増量試験の結果

今回の試験では油臭をポータブルタイプの測定器で観測したが、高濃度汚染土壌に対して高い油臭測定値を示す等、油分含有量と油臭相関関係にあることを確認した。今後は他種の油においても油臭を測定すること等のデータを蓄積すれば油汚染土壌の有効な評価手段となり得るものと考えられる。

## 【参考文献】

- 1) 土壤環境センター、「WG調査結果」  
[http://www.gepc.or.jp/doc\\_pub/book2-11-08](http://www.gepc.or.jp/doc_pub/book2-11-08)
- 2) 小西正郎ほか、「微生物分解と洗浄による油汚染土壌の浄化」、土壤環境センターニュース、2003
- 3) 土壤標準分析・測定法委員会、「土壤標準分析・測定法」、博友社、p302、1986
- 4) 小暮敬二、「地盤環境の汚染と浄化修復システム」、技報堂出版、p160、2000