

油汚染土の短工期・低コストバイオ処理工法

石川洋二¹・小松透²・高田尚哉³・小峰法子⁴・椎葉究⁵・長谷川清⁶

¹正会員 工博 株式会社大林組 土木技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

²正会員 株式会社大林組 広島支店 (〒730-0041 広島県広島市中区小町1-25)

³株式会社大林組 土木技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

⁴日清製粉株式会社 つくば研究所 (〒300-2611 茨城県つくば市大久保13番地)

⁵農博 日清製粉株式会社 つくば研究所 (〒300-2611 茨城県つくば市大久保13番地)

⁶日清製粉株式会社 営業本部エコチーム (〒101-8441 東京都千代田区神田錦町1-25)

顕在化しつつある鉱物油による汚染に対して、加熱処理や洗浄処理以外に、近年、生物学的処理が注目され始めている。油汚染土の生物学的浄化手法とは、酸素、栄養、水分などを土に提供することにより、通常汚染土に生息している油分解微生物を活性化させ、油分の生分解を促進しようとするものである。今回、易分解性物質を含む小麦由来の有機資材を汚染土に添加し、酸素を供給するために通気しながら養生しておくことにより発酵熱が発生し、その結果、微生物数が増加すると同時に微生物活性も上がるという効果を利用するバイオ処理工法を考案した。実証試験を実施し、実施工においても効果を確認したので報告する。

キーワード：土壤汚染，油，微生物，温度，資材

1. はじめに

油汚染とは、通常鉱物油を含む土が生活環境上の支障をもたらす場合を指す。現行の土壤汚染対策法では、油分そのものは有害物質とは特定されていない。したがって、その浄化にあたっての目標は一律ではなく、その場合ごとに決められる。油膜・油臭の除去や、油分濃度のある数値までの減少、あるいは、油分に含まれるベンゼンを土壤環境基準以下に低減することが目標とされることが多い。掘削した土を処理する油汚染土浄化技術には、バイオ処理、加熱処理、洗浄処理がある。バイオ処理は、他の方法の1/3～1/5のコストで済む低廉な工法なので、適用可能な油汚染に対しては他工法より優位な工法となる。バイオ処理とは、微生物の作用により油分中の生分解可能な成分を分解することである。生分解可能な成分が比較的多く含まれている軽質油に対してバイオ処理は特に有効である。一方で、油が土粒子の間に塊で存在するような、油分濃度が数%以上の濃い汚染に対しては、微生物は入りこめずバイオ処理は適さない。従って、バイオ処理は、軽油、灯油、あるいは、一部の重油などの比較的軽質油の、かつ、油分濃度の低い油汚染に適していると考えられる。油は生分解できる成分が限られているので、

バイオ処理の浄化目標は油分濃度を零に近づけることではない。しかし、一般に油臭や油膜をもたらす成分は生分解されやすいので、油臭や油膜の除去には有効である。

一方、油汚染土のバイオ処理を行う場合の欠点として、浄化完了まで時間がかかること、分解速度が温度に強く依存し冬季や寒冷地ではほとんど適用が不可能であることが挙げられる。バイオ処理の長所である低コストという特徴をさらに生かすためにも、工期が短縮でき、冬季や寒冷地でも適用可能なバイオ処理の開発が望まれている。そこで、油汚染土の浄化期間短縮、および、低温環境下での浄化促進を目的に、特殊資材を添加することにより温度を上昇させ、バイオ処理に最適な環境を作ることによる浄化促進方法を考案し、現地実証試験にて実証した。また、実施工への適用性とその制御技術を検討し、その結果に基づき施工を実施した。

2. 温度制御を特徴とするバイオ処理の考え方

汚染土中に存在する好気性微生物を活性化するバイオスティミュレーションの手法は、油汚染土浄化に数多く適用されている。分解速度（油分分解量／

時間)に及ぼす温度の影響について、四本¹⁾は、養生温度を固定したプラスチック内の油汚染土からの二酸化炭素発生速度の計測、および、養生温度を固定した油汚染土のポット試験における油分含有量の減少速度の計測を行い、検討した。その結果、15℃における分解速度は25℃の約1/2~1/2.5、10℃では25℃の約1/3であることを見出した。また、4℃では油分の減少が見られなかった。掘削した油汚染土を現場でバイオ処理する場合には好気条件を維持するために頻りに攪拌することがあり、その場合土の温度が気温に近くなる。気温が低い場合には土の温度も低下するため微生物による油分の分解速度が減少し、生分解可能な油分が完全に分解されるまでの浄化期間が長くなることになる。

そこで、バイオ処理を適用する場合に土中温度を上昇させることができれば冬季や寒冷地でもバイオ処理による浄化が促進される。さらに、温度が自在に制御できれば、浄化効率の最適化も図ることが可能となる。

バイオ処理期間中に土中温度を上昇する方法は従来も提案されている。たとえば、敷地内に温室を設置し、その内部の温められた空気を養生汚染土内に通気し、好氣的分解を促進する方法がある。しかし、天候の影響を受けたり、夜間には昇温しない可能性が考えられた。そこで、筆者等は、昇温の方法として、堆肥化による発酵熱に着目した。従来のバイオスティミュレーションにおいても、栄養やおがくずなどの土壌改良資材を汚染土に添加混合するが、その添加資材に発酵を促す資材を加えるだけで、発酵熱による昇温が可能となるような維持管理が容易で低コストの方式が期待できると考えた。

堆肥化を利用するバイオ処理については、石川²⁾は、多環芳香族炭化水素(PAHs)分解能を持つ堆肥を選抜し、そこでの複合微生物の働きにより、堆肥を添加混合した汚染土中のPAHsを効率良く分解することを見出している。また、牛糞などの有機資材の堆肥化過程熱を利用した冬季施工の現場実証試験を実施し、気温に対して8℃の温度上昇を認め、また、油分の経時的な減少を確認し、その減少速度が速いことを見出している¹⁾。すなわち、発酵熱による温度上昇により分解促進効果が期待できることが分っていた。

一方で、微生物環境の好気性を維持するために空気(酸素)を供給する必要があるが、その方法として、定期的な攪拌、あるいは、連続的な通気が従来適用されてきた。攪拌する場合、好氣的な環境を形成するためには頻りに攪拌が必要であるが、冬季などの気温の低い条件では攪拌により土中の温度が下

がり、昇温効果が相殺されてしまう場合が多々ある。このため、資材添加による昇温を図る場合には通気による空気の供給が有利な方法となる。

今回、牛糞などの有機資材に代わる特殊資材を利用し、通気により酸素を供給する加温バイオ処理技術を考案した。この特殊資材は、「ヒートコンポ」と名づけられたもので、黄緑色の軽量の粉体であり、小麦に含まれるアラビノキシランを主体とする天然資材である³⁾。微生物に対する選択的栄養効果と活性効果を持ち、バイオレメディエーションにおいては早期の微生物増加と処理期間中の活性維持を狙うと共に、この特殊資材の分解熱による土壌昇温による浄化促進が期待できる。なお、この特殊資材には効率良く発酵を促すため微生物の栄養源となる窒素、リン化合物を添加している。ただし、微生物は含んでいない。

本報では、昇温による浄化促進を目的とした温度管理が可能な新規バイオ技術として、この新しく開発した特殊資材「ヒートコンポ」を適用し、通気を制御することを特長とする技術について報告する。

3. 室内試験

(1) 試験方法

適正な資材配合量、通気制御方法の違いによる油分分解効果を検証するため、室内試験を実施した。試験装置としては、大規模堆積による発酵過程を小容量(1L)で再現性良く捉えることのできる小型発酵リアクターを使用した⁴⁾。このリアクターでは、発酵槽内部の試料土壌に対し発酵槽容器の温度を追随させることで大規模堆積と同様の熱収支を反映させることができる。試験土量は1Lとした。土壌中を通気可能であり、通気量は可変である。また、試験中には土の攪拌を行っていない。油分濃度の測定は、S-316 溶媒で油分を抽出後、非分散型赤外線分析計(堀場製作所製 OCMA-350)にて測定、得られた値をOCB 混合標準物質に換算したものを油分濃度とした。微生物数の分析は日本土壌協会「堆肥等有機物分析法」に基づき希釈培養法によりコロニー数をカウントした。一般生菌は標準寒天培地、糸状菌はローズベンガル寒天培地、放線菌はスターチカゼイン培地を用いた。試験土は、第4章、第5章での実証試験、実施工の現場から採取したものであり、A 重油系およびC 重油系の二種類の油分で汚染された礫混じり粘性土質砂汚染土(油分濃度約1,400mg/kg)である。

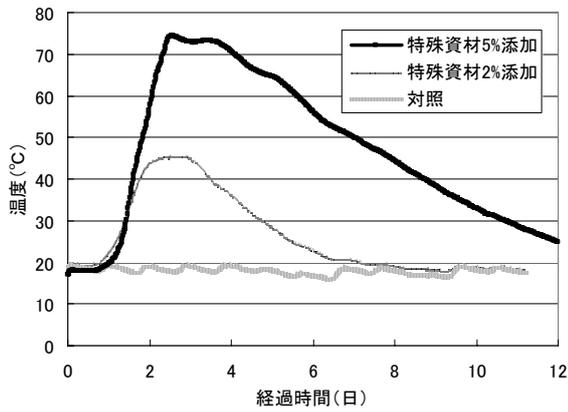


図-1 特殊資材添加量と土中温度の上昇量

(2) 特殊資材添加効果

油汚染土に対し特殊資材を 2%または 5%添加して試験を行なった。特殊資材を添加しない区を対照区とした。いずれも通気量は 25mL/min であり、試験装置の置かれた実験室の室温は 20°Cに保持した。図-1 に示すように、いずれの添加量においても土中温度昇温が見られ、添加量が多い方が温度上昇の程度も高くなった。特殊資材 2%添加では、40°C以上、5%添加では 70°C以上に達している。リアクターの仕込時と試験後(10 日後)の各種微生物の測定結果を表-1 に、油分濃度の測定結果を表-2 に示す。リアクター処理後のサンプル中の微生物数は特殊資材を添加することで増加することが示された。また、10 日処理後の油分濃度は対照と比べて特殊資材を添加した土の方が、著しく低くなる結果となり、添加量の多い方が減少率は高い結果となった。しかしながら、微生物数は添加量によっても大差が無いことからコストを踏まえ、2%程度の添加で十分であると考えられた。

(3) 低温環境での特殊資材添加効果

試験装置の置かれた実験室の室温を 5°Cに保持した試験系における特殊資材添加試験を実施した。この時の最高到達土壌温度を表-3 に、微生物測定結果を表-4 に示す。

その結果、特殊資材を添加していない対照区では土壌温度の上昇が見られず、微生物数にも変化が見られないのに対し、特殊資材を添加した区では土壌温度の上昇や微生物数の増加が確認された。また、これらの効果は特殊資材添加量に従い顕著に見られ、低温環境下においても特殊資材の効果が有効であることが示された。

表-1 各種微生物数の変化 (単位はいずれも cfu/g)

添加量	仕込時			試験後		
	一般生菌	糸状菌	放線菌	一般生菌	糸状菌	放線菌
0%	1.0E+07	1.0E+04	9.5E+06	1.8E+06	8.0E+03	8.1E+06
2%	5.0E+07	1.1E+04	1.0E+07	1.9E+08	1.0E+05	6.1E+08
5%	3.7E+06	4.0E+03	2.0E+07	1.2E+09	2.3E+05	8.2E+05

表-2 油分濃度の変化

	油分濃度(mg/kg)		減少率(%)
	試料土	試験後	
0%(対照)	1,407	1,329	5.6
2%添加		1,141	18.1
5%添加		905	35.8

表-3 最高到達土壌温度

	土壌温度(最高到達)
対照	6.0°C
2%添加	13.9°C
5%添加	41.8°C

表-4 各種微生物数の変化

添加量	仕込時			試験後		
	一般生菌	糸状菌	放線菌	一般生菌	糸状菌	放線菌
対照	6.0E+05	<10 ³	6.0E+03	1.2E+06	<10 ³	1.0E+03
2%	3.5E+04	<10 ³	1.5E+04	6.7E+09	2.2E+06	8.0E+05
5%	6.8E+04	<10 ³	2.1E+04	5.8E+09	3.0E+07	1.1E+08

4. 現地実証試験

(1) 目的と方法

実証試験は、春季および冬季に実施した。春季試験の目的は、特殊資材の添加効果確認、通気方法の比較である。冬季試験の目的は、低温時期における添加効果確認である。ともに、同一の現場で実施した。試験土は、複数の油分で汚染されたと考えられる礫混じり粘性土質砂汚染土であり、20%程度の細粒分を含んでいる。透気係数は 10E-1cm/sec のオーダーだった。油分の画分は、脂肪族炭化水素が 50~60%、芳香族炭化水素が 20~30%、レジン分が 2~20%、アスファルテン分が 1%以下だった。GC クロマトグラムは、比較的ピークの少ない二つのこぶを示した。汚染物質はこのこぶのクロマトグラムでの位置から A 重油系と C 重油系の 2 種類の油分の混合したものと推測され、ピークが少ないことから変成

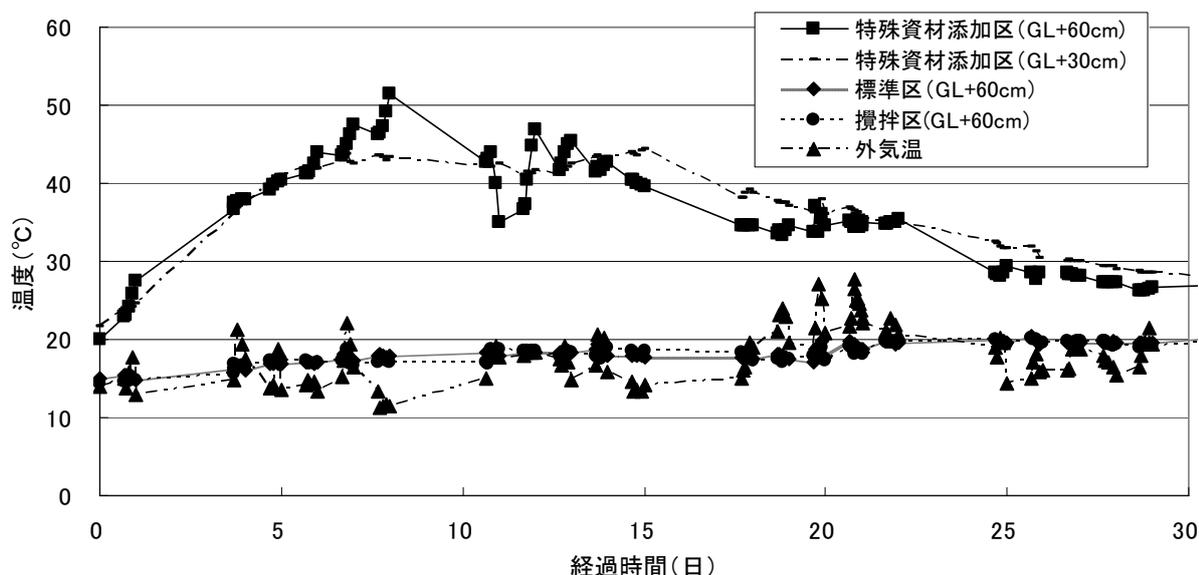


図-2 春季実証試験における土中温度変化（送気型タイプにおける比較）

表-5 春季実証試験の試験区

区	酸素供給法	添加物
特殊資材添加	送気	特殊資材(2%), 栄養
	吸気	特殊資材(2%), 栄養
標準	送気	堆肥, 栄養
	吸気	堆肥, 栄養
攪拌	攪拌(1回/週)	堆肥, 栄養

を受けたものと考えられた。なお、この実証試験において浄化目標は定めていない。浄化にあたっては、いずれの区も約 2m の高さの畝を形成しての養生とし、温度は畝の所定の高さに設置した熱電対により測定した。油分濃度の分析は、いわゆる TPH（全石油系炭化水素）を測定する方法（GC-FID 法）と、S316 溶媒で抽出した油分を非分散型赤外線分析計にて定量する方法（S-316 法）によった。石油資化性菌数は、ヘキサデカン分解菌として希釈培養法により MBM 培地で培養したコロニー数をカウントした。粉体である特殊資材の混合には、所定添加量を対象土の上に撒いた後、土と特殊資材の混合物をスクリーンバケットにより解砕、混合し、充分特殊資材が土に漉き込まれるよう配慮した。

(2) 春季実証試験

3 月から 4 月にかけて実施した試験の試験区を表-5 に示す。

特殊資材添加区では、2% (w/w) の特殊資材とともに、窒素、リンの栄養分も加えている。標準区、攪拌区では通常量の堆肥、栄養を加えた。攪拌区は、

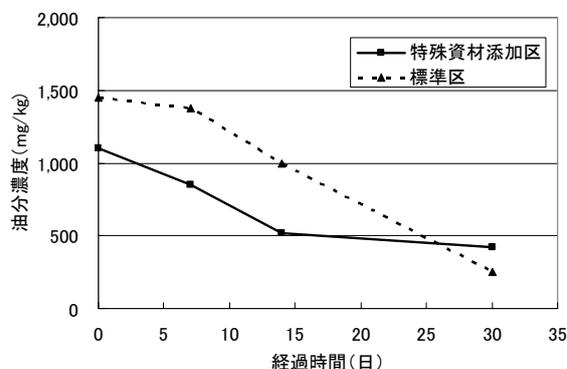


図-3 春季実証試験における油分濃度変化

従来のバイオ処理の方法である。この試験での初期油汚染濃度は、約 1,500 mg/kg (GC-FID 法, S316 法) である。温度上昇の結果を、特殊資材添加区（送気型タイプ）について図-2 に示す。外気温、標準区（送気型タイプ）、攪拌区の結果も併せて示す。標準区と攪拌区は、GL+0.3m と GL+0.6m とほぼ同じ結果だったため、GL+0.6m のデータのみ示した。特殊資材添加区では、土中温度が 1 週後に 40~50°C に達し、その後ゆるやかに低下していくが、1 ヶ月後も外気温よりも高い温度を保っていた。畝の高さが 2m であるのに対し GL から 0.3m、および 0.6m の結果とも相違はなかった。外気温が試験期間中には 15~20°C の範囲で推移しており、それに対して、最大 30°C の温度上昇が認められている。一方、標準区・攪拌区ともにほとんど外気温と同じであった。石川²⁾は、以前、牛糞や牛糞堆肥を添加資材としたバイオ処理を実施しているが、気温に対する温度上昇は 8°C であり、今回の特殊資材の昇温効果がより高いことが分った。

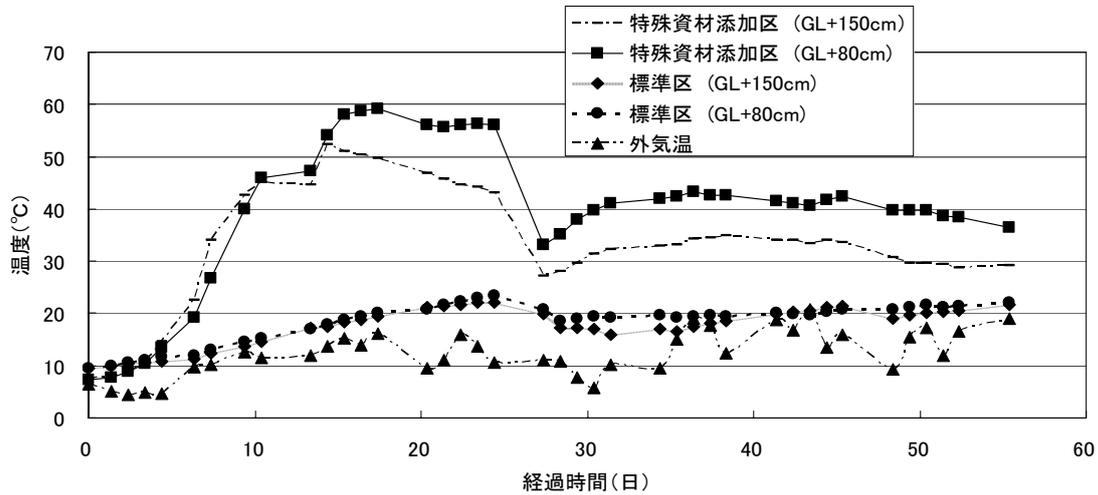


図-4 冬季実証試験における土中温度変化

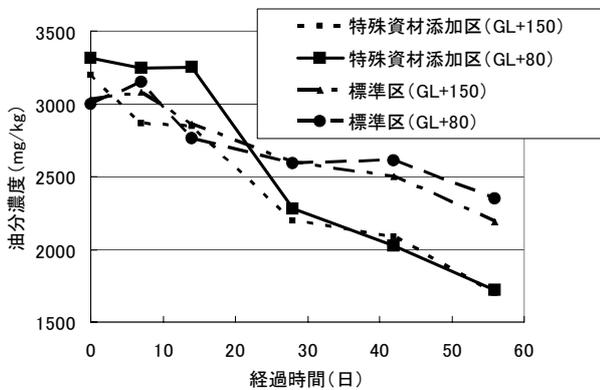


図-5 冬季実証試験における油分濃度変化

油分濃度の変化について、特殊資材区と標準区の結果を図-3に示す。ここでは、吸気型タイプのGC-FID法の結果を示している。標準区では初期にゆっくり油分が減少し、その後1ヶ月後まで減少が継続したのに対し、特殊資材添加区では、2週目までに急激な減少が見られた後、1ヶ月目までは油分変化が観察されなかった。この区では2週目までに急激に温度が上昇するため、これに対応して微生物活性が高まり油分分解が促進されたと推測できる。また、吸気法と送気法はともに1ヶ月後までの油分減少率が約40%と油分分解効果については差が見られなかった。しかし、資材添加区では約1週後に発酵臭が発生するため、少なくとも油臭や発酵臭の多い1～2週目までは臭気を拡散しないという点で吸気法に利点がある。

春季実証試験の結果として、特殊資材添加により温度上昇が見られ、その昇温期に油分が減少していることが確認された。吸気法と送気法の比較では、特殊資材を添加する場合には臭気対策の点で吸気法を採用するべきであると考えられる。

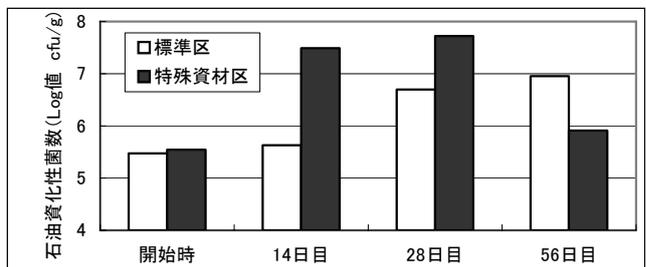


図-6 現地実証冬季試験における石油資化性菌数変化

表-6 冬季実証試験の試験区

区	酸素供給法	添加資材
資材添加区	吸気	特殊資材 (2%), 栄養
標準区	吸気	堆肥, 栄養

(3) 冬季実証試験

春季試験を経て、低温時期における試験を実施した。通気法としては、臭気を発散させない利点を持つ吸気型のみの試験とした。表-6に試験区を示す。

図-4に特殊資材添加区のG1+1.5mとGL+0.8mの土中温度の変化を示す。比較のため、標準区および外気温のデータを併せて示す。外気温は当初5°C程度であったが、その後10°Cを超えた。この間、特殊資材添加区では、2～3週後に50～60°Cに達した。1ヶ月目に切り返しをしたため一時的に低減したが、その後、30～40°Cを維持して2ヶ月近く推移した。標準区でも温度上昇効果が認められたが、外気温に比して10°C程度に留まっていた。油分濃度の変化を図-5に示す。当初3,000～3,500 mg/kgの濃度だったものが、標準区では約2ヶ月で2,200～2,300 mg/kgまで低減しているのに対し、特殊資材添加区

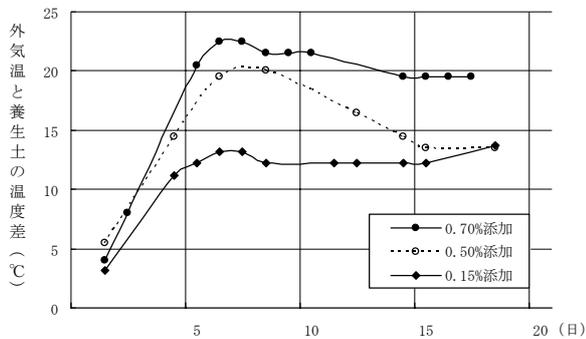


図-7 特殊資材添加量と温度上昇効果

では、当初の1ヶ月で同程度まで下がっており、その後の2ヶ月目で減少速度は若干低下したが、それでも1,700 mg/kgまで減少していた。またこのときの石油資化性菌は、特殊資材区では14日目から28日目にかけて菌数が大きく増加し、特殊資材による微生物活性効果がうかがえる。(図-6)

以上述べたように、気温の低い冬季であっても温度をバイオ処理に適した温度にまで昇温することが確認され、冬季などの浄化促進に資することが明らかになった。

5. 実施工

(1) 施工方法

実証試験を経て当技術を実施工に適用した。施工現場は、実証試験実施場所と同一であり、土質、油種は共通である。油分濃度は掘削場所により数100mg/kgから数1,000mg/kgの範囲にあった。

主たる施工パラメータは、バイオ処理進行中の土の内部温度、および、畝への通気量である。

土の内部温度としては、微生物の活性が十分働くように、25°C以上に維持することを目標とした。また、不必要に温度を上昇することによるコスト負担を考慮すると、養生温度の上限としては40°Cと設定することが望ましいと考えられた。したがって、目標温度は25°Cから40°Cの範囲とした。土の温度を設定温度に制御するためには、特殊資材の添加量を最適化する必要がある。図-7に、実施工規模の試験で得られた特殊資材の添加量と土中の上昇温度の関係を示す。いずれも場合にも約1週間前後で温度上昇はピークを迎え、温度上昇量は添加量に応じて変化することがわかる。季節により添加量を増減する必要があるが、特殊資材の添加量の目安としては0.5%と決定する。

畝への通気量については、①処理に伴う酸素の消費、②過剰通気による温度低下の防止、の相反する

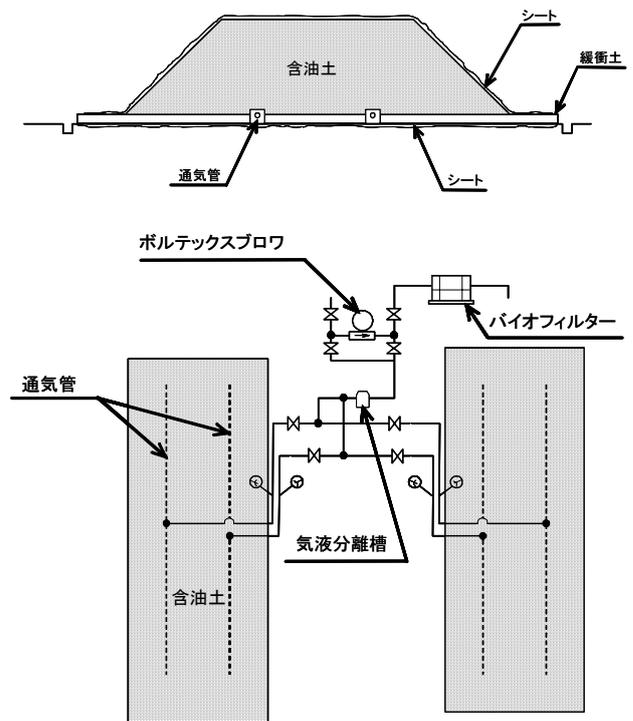


図-8 畝の形状

2つの条件を考慮して決定した。結論として、実施工では畝のなかの酸素が欠乏しないことを確認しつつ、通気量は3.0 L/min/m³を標準として1~5 L/min/m³の範囲でインバーター制御した。(図-8)

(2) 施工結果

資材添加状況を写真-1に示す。また、施工風景を写真-2に示す。図-9に11月~12月の寒冷期に実施した施工例における土中温度、二酸化炭素濃度の変化を示す。この場合の特殊資材添加量は0.5%だった。微生物の活性を示す土中の炭酸ガス濃度は7日目が最高値を示し、土中温度は10日目が最高値となっている。また、20日目以降は安定期となり、30日目以降は温度上昇と炭酸ガス発生量はほとんど見られない。図-10に示すように、n-ヘキサン抽出物質で表した油分濃度は、最初の2週間での減少が大きい。すなわち、畝のなかの二酸化炭素濃度や温度が最大値をとる7日ないし10日目の時期に土壌微生物の活性が高まり、その結果、油分の生物分解が促進されたことが推測される。また、1ヶ月の浄化期間を経た土は、油膜も油臭も消失していた。通常3ヶ月程度を要していた1サイクルの施工期間が約1.5ヶ月に短縮された。なお、当技術の適用によりこの現場にて設定されていた浄化目標値は充分達成できた。



写真-1 特殊資材混合状況



写真-2 バイオ処理養生状況

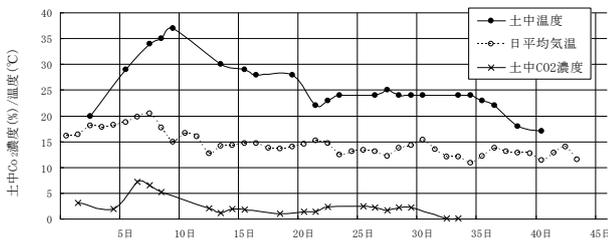


図-9 実施工での土中温度、二酸化炭素濃度の変化

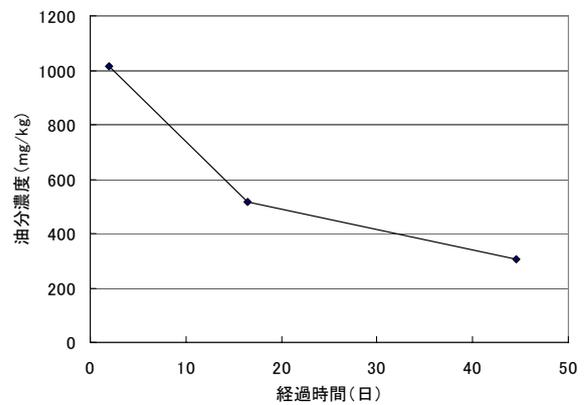


図-10 実施工での油分濃度の変化

表-7 本技術と他の技術の比較

技術名	特徴と課題	コスト
特殊資材利用バイオ処理	短工期、かつ冬季、寒冷地でも施工が可能。	低い。
通常のバイオ処理	比較的工期が長い。 冬季や寒冷地では浄化が困難。	比較的低い。
加熱処理	短工期。高価。	高い。
洗浄処理	完全に油分を除去できない。	比較的高い。
原位置処理	完全な浄化が困難。	比較的低い。

7. まとめ

掘削した油汚染土に特殊な資材を添加し、通気しながら敷地内に畝（うね）状に細長く積んでおくだけで、汚染土の中の微生物が活性化し、油分分解を促進することが可能となった。バイオ処理期間中の浄化効率を最大にするために、特殊資材添加量、通気空気量を調節することにより、土中の温度をバイオ処理に最適な温度に保ち、従来浄化効率の低かった冬季においても施工が可能となった。浄化期間が短縮することにより、人件費、重機費用が低減し、著しくコストが削減される。資材添加、設備設置に

関わるコストは人件費や重機費に比べて大きくないので、結果的にトータルコストは削減される。油汚染土に対する浄化技術として、本技術は有効である。

本技術と他の技術の比較を表-7に示す。本技術は、通常のバイオ処理と比較しても、工期が短くて済み、また、冬季や寒冷地でも施工を可能としている。通常低コストとみなされるバイオ処理のなかでも、本技術の適用により、さらに低コストとなることが期待される。

参考文献

- 1) 四本瑞世, 千野裕之, 石川洋二: 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), 大林組研究所報, No. 67, 2003.
- 2) 石川洋二, 千野裕之, 辻博和: 油汚染土のバイオレメディエーション技術の高度化 (その1), 大林組研究所報, No. 63, pp. 81-84, 2001.
- 3) 椎葉究: バイオマス資源のコンポスト化技術, 木村俊範監修, シーエムシー出版, pp195-200, 2003.
- 4) Shiiba, K, Komine, N, Kanzaki, K, and Kimura, T.: Changes in Microorganisms Flora during Cattle Manure Composting, Pocessing by Small-scale Composting Reactor, Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery, Vol.66, No.1, pp. 75-81, 2004.