

平成 25 年度低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査結果

代表機関名		技術の名称	
住友林業株式会社		日本シバによる油汚染土壌の ファイトレメディエーション	
技術の概要			
調査／対策	技術の区分	実証試験の対象物質	実証試験の場所
対策	浄化	鉱油類	現場内

(技術の原理)

本提案技術は、高濃度油汚染土壌にも生育する耐油性・耐乾燥性の強い日本シバ品種（名称：バーニングフィールド）を用いる油汚染土壌浄化工法（ファイトレメディエーション）である。

植物の根が土壌中にスパイク状に侵入し、根から分泌されるタンパク質や糖、アミノ酸、有機酸等の化合物を栄養分にして油分分解能力を持つ根圏微生物が増殖することにより、土壌中の油分が分解され浄化される。

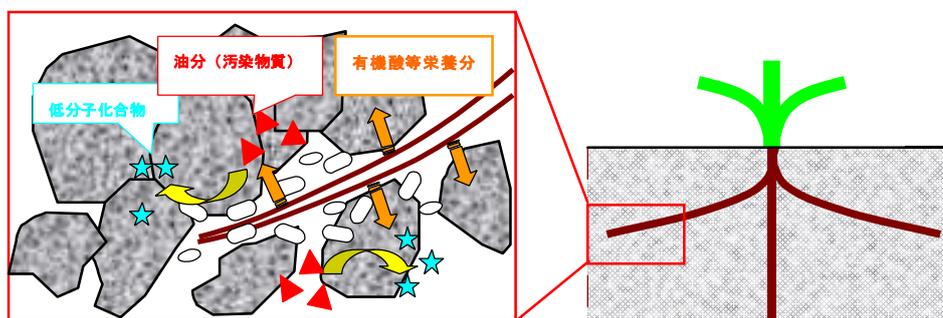


図1 ファイトレメディエーション概念図

技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方

(コストについて)

○他の油汚染対策と比較して低コストで、特に長期間かけての高濃度汚染対策として実施する場合、掘削除去と比較して、最大で 20 分の 1 のコストで浄化できる。

(環境負荷について)

- 植物の生育に必要な太陽光・雨水があれば浄化可能、浄化にエネルギーを必要としない。
- 処理土の埋立処分や埋戻し用の土砂の採取が不要で、周辺環境への負荷が少ない。
- 植栽やメンテナンスはほぼ人力施工で、施工中の騒音、振動、悪臭、排ガス、排水、残渣が少ない。
- 処理量単位の二酸化炭素排出量は、従来技術の約 40 分の 1～20 分の 1 に削減が見込める。  
(汚染土を掘削運搬し浄化ヤードを造成する場合は土木工事による環境負荷が発生する。)
- 日本シバは生態系への悪影響や花粉症などの原因にもならず、関係自治体や住民の理解を得やすい。

調査結果の概要

(1) 実証試験方法

①実証試験条件

表 1 に示す、条件が異なる 3 サイト（高濃度汚染への適用を検証する高濃度サイト（S サイト）、土壌中の水分の低下対策を検証する土壌水分低下対策サイト（K サイト）、及び土壌化学性の改善による浄化効果の安定化を図る低濃度サイト（T サイト））において試験を実施した。それぞれのサイトの特徴と、地点ごとの測定項目と灌水、施肥等の処理条件は表 2 に示すとおりである。

表1 各サイトの特徴

分類	実汚染サイト	Sサイト	Kサイト	Tサイト
既存対策と課題	植栽済みシバ面積 これまでの対策 上記課題点	3,300 m <sup>2</sup> オンサイト・残土集積場張り芝 (2012年6月)、 無管理 高濃度汚染に対する浄化	1,300m <sup>2</sup> オンサイト・浄化ヤード張り芝 (2011年6月)、 無管理 水分の低下に伴う土壌固結などの生育環境の劣化	900 m <sup>2</sup> 原位置張り芝 (2012年11月)、無管理 (天地返し2011年10月) 過湿、貧栄養環境下における効果の安定化
計画	主な実証項目 実証区画面積 モニタリング期間	高濃度汚染土での効果を発揮する改善対策 81 m <sup>2</sup>	土壌水分の改善による効果の安定化 246 m <sup>2</sup> 2013年6月～2016年2月	土壌化学性の改善による浄化効果の安定化 81 m <sup>2</sup>
気象条件	4-10月 (生育期間) 年平均気温 (°C) 4-10月 (生育期間) 平年月降水量 (mm) 8-9月 (盛夏生育期間) 平年月降水量 (mm)	18.7 (低い) 144 177	20.7 (高い) 207 157 (少ない)	20.0 (中) 146 194
汚染物質	汚染物質・濃度 (測定時期) 油種及び比率 汚染の由来	鉱油類 55,000 mg/kg (2012年6月) ガソリン(C 6-C12) : 0 軽油(C12-C28) : 1 残油(C28-C40) : 1 震災	鉱油類 8,900 mg/kg 及び 2,540 mg/kg (2012年10月) ガソリン(C 6-C12) : 0 軽油(C12-C28) : 1 残油(C28-C40) : 1 漏洩等	鉱油類 3,000 mg/kg (2011年11月) ガソリン(C 6-C12) : 4 軽油(C12-C28) : 4 残油(C28-C40) : 1 漏出
土地条件	地盤 土質 地下水位 土地履歴	盛り土 砂質土 実質なし 製油所	盛り土 (舗装されたヤード上) 砂質土 なし 製油所跡地	自然地盤 砂質土 やや高い GL-1.0m 前後 ガソリストッド跡地
	対照区の施工	非植栽の法面	既存シバを除草剤で枯らす (2013年6月)	既存シバを除草剤で枯らす (2013年7月)

※ Tサイトの油種については、本調査開始時には、ガソリン成分は殆ど残留していなかった。

表2 地点ごとの測定項目と灌水、施肥等の処理条件

サイト		Sサイト				Kサイト					Tサイト						
実証区/対照区		実証区				対照区		実証区					対照区				
処理条件	施肥	0回	1回	2回	—	0回	1回	2回	—	0回	1回	2回	—				
	灌水	無	無	無	—	無	有	無	有	無	有	—	無	無	無	—	
油分	GC-FID法	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
	重量法	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	—	—	—	—
	油膜油臭	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
根の深さ・密度		●	●	●	—	●	●	●	●	●	●	—	●	●	●	—	
微生物	次世代シークエンス法	●	●	●	●	●	—	●	—	●	—	●	—	—	—	—	
	PCR-DGGE法	●	●	●	●	●	—	●	—	●	—	●	—	—	—	—	
	希釈平板法	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
土壌化学性		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	

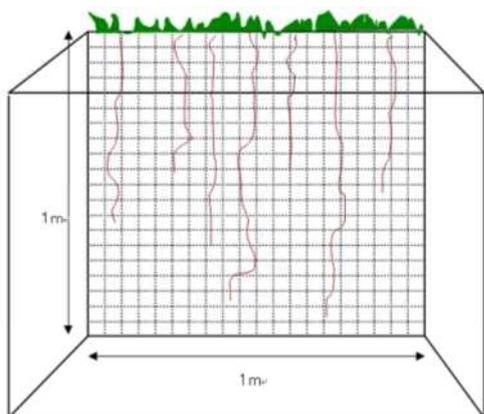
②調査時期

モニタリング期間は6～7月及び11月に各月1回、合計年2回とし、6～7月の調査結果を初期値、11月の調査結果を最終値とした。

③モニタリング方法

トレンチ調査

- ・ 土壌サンプリングのための調査トレンチ（約1.0m角、深さ約1.0m）を各汚染サイトの実証区ごとに各1ヶ所掘削し、下図のとおり土壌断面における根の深さ・及び根系密度調査を行った。
- ・ 上記調査トレンチにおいて図2のとおり土壌断面における根の深さを調査した。



●根の有効深さ

1.0m×1.0mの土壌断面について5cm×5cmのメッシュで根の本数を計測し、1/3以上の有効グリッドで有効深さを評価する。

●根の最大深さ

深度1.0mまで根の深さを把握する(1cm単位で実測)。

図2 調査トレンチにおける土壌断面における根の深さ

(油分分析・微生物分析・土壌化学性分析)

・ 深さごとの平均的な結果を得ることを目的として、奥行約3cm、高さ約3cmの帯状に採取した(図参照)。採取した土壌は、内蓋付き褐色瓶に入れ、4～10℃にて保存後分析に供した。各サイトの分析項目とサンプリング深度の関係は表3のとおり。

表3 各サイトのサンプリング深度と分析項目

サイト名	Sサイト	Kサイト	Tサイト
油分分析 (TPH、油膜、油臭)	3深度 5cm 10cm ○ 20cm ○ 50cm ○	2深度 5cm 20cm ○ 40cm ○	4深度 5cm 20cm ○ 30cm ○ 50cm ○ 80cm ○
微生物分析 (次世代シーケン法 PCR-DGGE法 希釈平板法)	4深度 5cm ○* 10cm ○ 20cm ○* 50cm ○	3深度 5cm ○* 20cm ○ 40cm ○	5深度 5cm ○* 20cm ○* 30cm ○* 50cm ○* 80cm ○*
土壌化学性分析	1深度 5cm ○ 10cm 20cm 50cm	1深度 5cm ○ 20cm 40cm	1深度 5cm ○ 20cm 30cm 50cm 80cm

\* : 希釈平板法のみ

(2) 浄化対象土壌量及び性状等

- ①土壌量 : S サイト 81m<sup>3</sup> (81m<sup>2</sup>×深さ 1.0m)  
           K サイト 123m<sup>3</sup> (246m<sup>2</sup>×深さ 0.5m)  
           T サイト 81m<sup>3</sup> (81m<sup>2</sup>×深さ 1.0m)
- ②土 質 : 3 サイトとも砂質土
- ③初期油分濃度 : S サイト 16,000mg/kg K サイト 1,100mg/kg T サイト 100mg/kg

(3) 結果

1) 試験状況

浄化期間中は施肥・灌水作業を除き、人為的作業を行っていない。施肥・灌水条件は表 4 に示すとおりである。

表 4 サイト毎の施肥・灌水条件

サイト名	S サイト	K サイト	T サイト
施肥	0 回区 : - 1 回区 : 7 月 2 回区 : 7 月、9 月	0 回区 : - 1 回区 : 6 月 2 回区 : 6 月、9 月	0 回区 : - 1 回区 : 7 月 2 回区 : 7 月、9 月
灌水	- (自然降雨のみ)	無灌水区 : - (自然降雨のみ) 灌水区 : 1 回/週、5L/m <sup>2</sup> /回 (梅雨明け(7/8)~9 月末)	- (自然降雨のみ)
降水量*	139mm	241mm	252mm

\* 降水量 : 2013 年生育期(4~10 月)の月平均降水量

K サイトの連続した降雨も灌水もない最大日数は、灌水区 6 日、無灌水区 26 日

2) 有効性について

○根の有効深さ

本実証技術の原理から、浄化機能はシバの根の侵入、伸長状況に影響を受ける。根の有効深さは表 5 に示すとおりであり、すべてのサイトで根の伸長が認められたと考えられる。S サイトでは、施肥回数を多くした方が根の伸長量が大きかった。K サイトでは灌水を行った方が無灌水より根の伸長量が大きかった。ただし、K サイトは盛土高が浅く、根が底面(コンクリート面)に近接してきていることが結果に影響している可能性がある。T サイトでは、施肥、灌水と根の伸長の関係性は認められなかった。

表 5 根の有効深さ

S サイト				T サイト			
	施肥 0 回	施肥 1 回	施肥 2 回		施肥 0 回	施肥 1 回	施肥 2 回
初期値	10cm	10cm	10cm	初期値	15cm	20cm	10cm
最終値	15cm	15cm	25cm	最終値	40cm	25cm	20cm
伸長量	5cm	5cm	15cm	伸長量	25cm	5cm	10cm
施肥効果	0 回<2 回			施肥効果	認められない		

	無灌水			灌水		
	施肥 0 回	施肥 1 回	施肥 2 回	施肥 0 回	施肥 1 回	施肥 2 回
初期値	30cm	50cm	35cm	30cm	35cm	25cm
最終値	30cm	45cm	35cm	40cm	60cm	35cm
伸長量	0cm	▲5cm	0cm	10cm	25cm	10cm
盛土高	55cm	50cm	45cm	75cm	70cm	45cm
施肥効果	認められない			認められない		
灌水効果	無灌水<灌水					

○油分低減率

油分低減率は初期値と最終値の油分濃度を比較することにより評価した。分析方法は重量法及びGC-FID法を採用した。

- ・油分濃度による評価（表6参照）

Sサイトは対照区と比べて実証区における油分低減率が高かった。油分低減率の目標値20%を達成している地点は根の有効深さ内（10cm、20cm）において、施肥条件（施肥0回～3回）の全6地点中、5地点であった。

Kサイトは、採取深度20cmと40cmとで対照区同士の低減率の差が大きかったが、それぞれ同深度の実証区と対照区を比較すると、概ね実証区における油分低減率が高かったと考えられる。同じ施肥条件下では灌水時の低減率が高く、このことから灌水の効果が表れている可能性が示唆された。灌水時の施肥1回区については240%増であったが、初期濃度が低く、最終値は他地点と同等であるため特異点として除外した。

Tサイトは、初期濃度がほとんどの測定地点で定量下限未満であったため、評価できなかった。

表6 根の有効深さ付近における油分低減率

Sサイト		単位：mg/kg（重量法）			
採取深度	項目	対照区	施肥0回	施肥1回	施肥2回
10 cm	初期値	—	46,000	42,000	40,000
	最終値	—	24,000	43,000	26,000
	低減率	—	48%	▲2%	35%
20 cm	初期値	35,000	54,000	37,000	62,000
	最終値	38,000	29,000	27,000	33,000
	低減率	▲9%	46%	27%	47%
シバの効果		対照区<実証区			
達成度		6地点中5地点で目標（20%減）達成			

Kサイト

単位：mg/kg（重量法）

採取深度	項目	対照区	無灌水			灌水		
			施肥0回	施肥1回	施肥2回	施肥0回	施肥1回	施肥2回
20 cm	初期値	1,200	2,300	2,700	2,500	7,400	500	4,200
	最終値	2,800	2,800	1,800	2,200	1,500	1,700	1,200
	低減率	▲133%	▲22%	33%	12%	80%	▲240	71%
40 cm	初期値	4,200	1,400	2,200	4,700	17,000	1,500	2,700
	最終値	2,800	2,300	1,300	2,400	5,200	200	700
	低減率	33%	▲64%	41%	49%	—	87%	74%
シバの効果		（概ね）対照区<実証区の傾向が認められる						
達成度		特異値を除く10地点中7地点で目標（30%減）達成						

■：初期値が高すぎるあるいは低すぎるため、特異値と考えて除外。

表 7 根の有効深さ付近における油分低減率 (GC-FID 法)  
S サイト 単位 : mg/kg (GC-FID 法 (C6-C44))

採取深度	項目	対照区	施肥 0 回	施肥 1 回	施肥 2 回
10 cm	初期値	—	22,000	18,000	13,000
	最終値	—	8,700	15,000	9,100
	低減率	—	60%	17%	30%
20 cm	初期値	14,000	32,000	16,000	31,000
	最終値	16,000	13,000	6,900	13,000
	低減率	▲14%	59%	57%	58%
シバの効果			対照区<実証区		
達成度			6 地点中 5 地点で目標 (20%減) 達成		

K サイト 単位 : mg/kg (GC-FID 法 (C6-C44))

採取深度	項目	対照区	無灌水			灌水		
			施肥 0 回	施肥 1 回	施肥 2 回	施肥 0 回	施肥 1 回	施肥 2 回
20 cm	初期値	1,000	1,600	2,200	1,400	4,600	500	1,900
	最終値	1,600	1,300	800	1,200	1,200	1,100	800
	低減率	▲60%	19%	64%	14%	74%	▲120%	58%
40 cm	初期値	2,100	1,300	1,800	3,300	18,000	600	1,500
	最終値	1,100	1,700	800	1,200	2,700	700	800
	低減率	48%	▲31%	56%	64%	85%	▲16%	47%
シバの効果			概ね、対照区<実証区の傾向が認められる					
達成度			特異値を除く 9 地点中 7 地点で目標 (30%減) 達成					

■ : 初期値が高すぎるあるいは低すぎるため、特異値と考慮除外。

・油膜・油臭による評価

T サイトにおける有効深さ内の油膜・油臭の結果は表 8 に示すとおりである。油膜は対照区、実証区とも「なし」であり評価できなかった。油臭は施肥 2 回区において油臭の程度の段階の初期値 2 (何のにおいであるかがわかる弱いにおい) または 3 (らくに感知できるにおい) から、最終値 0 (無臭) となった。また施肥 0 回区の採取深さ 30cm において油臭の程度の段階が 1 (やっと感知できるよわいにおい) から 0 (無臭) へと減少したが、対照区においても同様であった。

S サイト、K サイトにおいては油膜・油臭とも明確な低減効果は確認できなかった。

表 8 T サイトにおける油臭試験結果

採取深度	項目	対照区	施肥 0 回	施肥 1 回	施肥 2 回
20cm	初期値	1	1	0	3
	最終値	0	1	0	0
	低減率	▲1	0	0	▲3
30cm	初期値	—	1	—	2
	最終値	—	0	—	0
	低減率	—	▲1	—	▲2
シバの効果			関係性は認められない		
達成度			明確に油臭が確認された 2 地点中 2 地点とも減少		

・微生物活性化の評価

Sサイト（深度 10cm、50cm）及びKサイト（深度 20cm、40cm）では、次世代シーケンス法と PCR-DGGE 法により微生物活性状況の検討を行った。その結果、Sサイトでは根の有効深さ内（深度 10cm）とその他（根の有効深さ外（深度 50cm）、対照区）とで微生物数（真正細菌数）に違いが認められた。Kサイトは 20cm、40cmとも根の有効深さ内と考えられるため、実証区と対照区とで比較を行った。その結果、明確な違いは認められなかった。油分低減率と油分解微生物数の相関は確認できなかったが、次世代シーケンス法により Sサイトの油分解微生物の存在比を確認すると、根の有効深さ内（10cm）と有効深さ外（50cm）とで菌叢に違いが認められた（図 3 参照）。

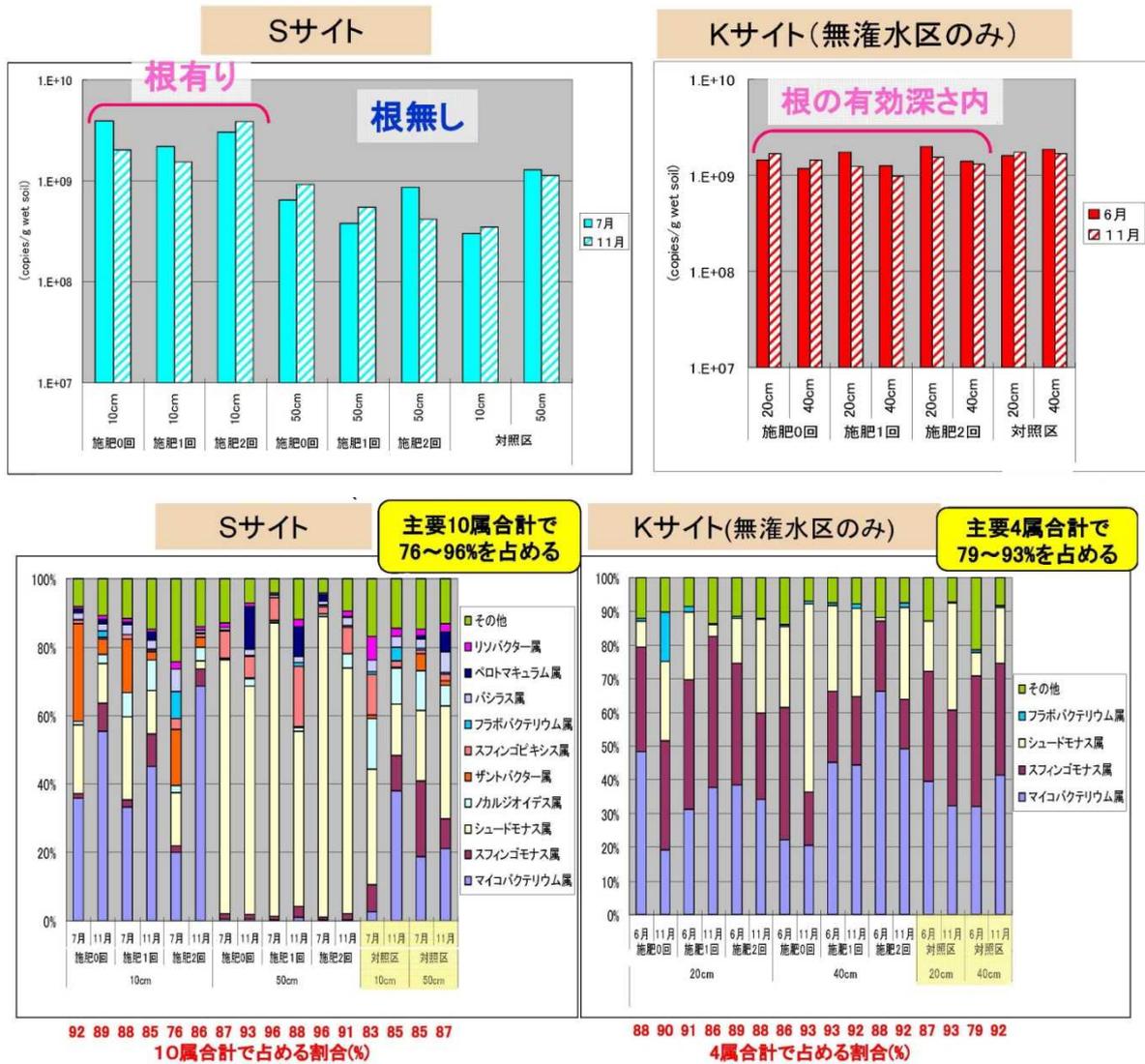


図 3 油分解微生物活性化の試験結果

2) 実用性について

①安定性

実証試験期間を通して、地上部の芝の生育状況は安定していた。

根の伸長状況については、前述のとおり。

②安全性

芝張り工、施肥、散水とも特殊な工事の必要性はなく、危険な工程はない。

### 3) 経済性について

本技術における土壌 1 m<sup>3</sup>当たりの対策費用は、原位置において本試験と同様の浄化効果を得られると仮定した上で、対象深度 0.5m、汚染濃度 5,000 mg/kg (鉍油類) の条件下で 10 千円/m<sup>3</sup>と試算された。

### 4) 周辺環境への負荷

#### ・二酸化炭素排出量

本技術における土壌 1 m<sup>3</sup>当たりの二酸化炭素排出量は、原位置において同様の浄化効果を得られると仮定した上で、対象深度 0.5m、汚染濃度 5,000 mg/kg (鉍油類) の条件下で 93.5 kg/m<sup>3</sup>と試算された。

## 検討会概評

本技術は、ガソリンスタンド跡地及び工場跡地の油汚染土壌を浄化する際に、本ファイトレメディエーション工法の適用範囲を明らかにし、コスト面・環境負荷面での優位性を他工法と比較し位置付けることにより、工法としての技術の成熟と普及促進のための実証データを得ることを目的として実施された。実証試験の目標値及び評価を表 9 に示す。

実証試験では、汚染濃度、気候条件等の異なる 3 サイトにおいて試験を実施し、目標とする低減率が達成された区画が 14 地点 (S サイト 5 地点、K サイト 7 地点、T サイト 2 地点)、達成できなかった区画が 4 地点 (S サイト 1 地点、K サイト 3 地点) であった。しかし、すべてのサイトにおいて根の伸長が認められ、総じて根の有効深さ内において目標とする油分低減率が達成されたと考えられる。本技術の適用条件については、高濃度条件下のサイトにおいて根の伸長が認められ、また、高濃度条件下において施肥が根の伸長に有効となる可能性が示唆された。さらに、土壌水分の低下対策を検討したサイトでは灌水が根の伸長を促進する可能性が示唆された(ただし、このサイトは盛土厚さが薄く、根が底面(コンクリート面)に近接したことが結果に影響している可能性がある)。

一方で、本試験では地点ごとのばらつきを踏まえた油分低減率の定量的評価には至らなかった。今後は、サンプリングのばらつきを統計的に評価できる調査手法を計画する必要がある。また、根の存在と真正細菌数に関係があることが判明したが、油分低減が微生物による油の分解によるものであること、及び根の伸長による微生物の活性化と油分低減率の関係の証明までには至らなかった。さらに、事業化の際には原位置で用いられることが本技術の特徴を生かせるとも考えられるため、自然地盤での適用についても実証していくことが望まれる。

本実証試験では油分解微生物と油分低減率の相関は検出できなかったが、シバによる一定の油分低減効果が期待される結果が得られた。さらに、本実証では数%の油分濃度条件下においても試験に用いたシバ(バーニングフィールド)が生育しており、高濃度汚染土壌への適用についてさらなる検証が期待される。

表 9 実証試験の目標値及び評価

目的	実証項目	評価項目	目標値	評価
適用環境条件の把握	条件別油分低減率の把握	油分濃度、油膜、油臭	油分濃度低減 (高濃度サイト 20%減) (土壌水分低下対策のサイト 30%減) 油膜あり地点の減少 油臭の程度の段階の低減	油分濃度は、高濃度サイトにおいて、6地点中5地点達成した。土壌水分低下対策サイトにおいて10地点中7地点達成した。 油臭は、低濃度サイトにおいて、明確に油臭が確認された2地点中2地点達成した。
適用環境条件の把握	条件別有効深度の把握	根の有効深さ 根系密度 土壌微生物活性化	根の有効深さ 高濃度サイトで20cm、低濃度サイトで60cmに達する区画が少なくとも1箇所(Kサイトは根が最深部に到達していたので目標設定せず) 根系密度の増大及び根の有効深さでの油分解微生物群の活性化を確認	高濃度サイトの施肥2回区において根の伸長25cmで目標達成。 低濃度サイトでは根の伸長は20~40cmとなり、目標に到達しなかった。 油分解微生物の活性化は確認できなかった。 高濃度サイトにおいて根の有効深さ内外及び実証区と対照区との間で真正細菌数の違い及び菌叢の違いが確認された。
	サイト間の比較	気温、降水量、地盤(地下水)	分解微生物と推定される微生物群が増加する区が存在	高濃度サイトにおいてマイコバクテリウム属の増加傾向が認められた。 灌水条件による微生物数等への影響は確認できなかった。
	施肥管理条件	施肥回数		
	灌水管理条件	散水有無		
経済性の改善	従来技術との比較	処理コスト	同条件とのコスト比較	本技術を原位置浄化に適用するとした際の土壌対策費用は10千円/m <sup>3</sup> であり従来工法(ランドファミング)、従来技術(掘削除去)に対する優位性が示された。 浄化期間中は無管理という条件で試算を行っているため、経費は初期費用のみとしている。 しかし、本技術は一定の浄化期間が必要となる技術であるため、実際には維持管理費等が必要となるわけではないことに留意が必要となる。 また、他技術であればその期間は土地を活用して事業を実施できる時間になるという観点があることにも留意が必要となる。
	施肥・散水管理条件との関係	条件別処理コスト	経済性の改善度	
環境負荷	従来技術との比較	二酸化炭素	検証区画ごとに評価	二酸化炭素排出量は、条件を揃えて93.5 kg/m <sup>3</sup> と試算され、従来工法であるランドファミング及び掘削除去に対する優位性が示された。