

好気性微生物による油汚染土壌対策

－原位置バイオレメディエーションによる油汚染土壌浄化技術－

柴野 一則* 伊藤 浩* 虫明 晋哉*

要約： 某事業所でタンク配管からの重油の漏洩による土壌・地下水汚染が判明し、敷地外への拡散防止対策が必要となった。当初計画の油回収工を実施したが改善効果が見られないため、バイオレメディエーション（バイオオーグメンテーション）による原位置浄化工法を提案し実施している。本工法は微生物を原位置で井戸から注入する方法であり、全国でも事例の少ない方法である。本報では原位置で行うバイオレメディエーション工法による浄化状況について報告する。

室内試験の結果、原位置で採取した油の汚染土壌は、使用した微生物製剤で分解することが可能であることが確認された。浄化期間は約3年程度と推定されるが、原位置の汚染された重油の量が多いため、浄化期間を要する。

キーワード： 土壌汚染、バイオレメディエーション、好気性微生物、モニタリング

目次：	1. はじめに	4. 原位置浄化
	2. 汚染状況	5. まとめ
	3. トレサビリティ試験	

1. はじめに

平成14年に土壌汚染対策法が施行されたが、同法で網羅できなかった油による土壌汚染に関する「油汚染対策ガイドライン」（以下、「ガイドライン」）¹⁾が平成18年度に環境省から公表された。この「ガイドライン」の汚染度評価手法は主観的であり、評価者によって結果が大きく左右される側面をもつため、適切な理解のもと運用する必要がある。

一般的に油汚染土壌とは、タンクや配管の破損等の事故による漏洩あるいは人為的に繰り返された油の撒き散らし等の原因により油分が過剰に、許容範囲を越え土壌内へ浸透した結果生じたものである。

油種全般の傾向として、例えば土壌汚染対策法の対象となっている、カドミウム、砒素、等々のいわゆる特定有害物質と比較すると、人の健康に影響を与える毒性は低いことが知られている。このため、基準値が設定されないまま推移してきたが、従来から“油臭”による不快感は認められてきた。また、井戸水などにみられる“油膜”についても、通常は極めて薄い油の層であり、そのような井戸水を摂取する際の毒性、あるいはその健康影響は必ずしも大きくないが、こちらは誰もが不快と感じるものである。このように、対象地での“油臭・油膜”の存在、あるいは地下水の移動等に伴う周辺部での油臭・油膜の存在を、油汚染土壌とするのが合理的と考えられ、「ガイドライン」でも取り入れられている。

操業中の事業所敷地内で、地下施設からの油漏洩によ

る土壌・地下水汚染が判明し、敷地外への拡散防止対策が必要となった。当初計画では、敷地内に油回収用井戸を新設し、既設井戸等も併せて専用回収ポンプを使用して地中に存在する油の回収を実施したが、予想以上に油の回収が難しく、敷地境界部での汚染状況の改善が認められないことから、他の有効な対策工法の検討を行った。対策工法として、掘削除去工法、化学的酸化分解工法、バイオレメディエーション工法等を比較検討した結果、状況の改善には比較的長期間を要するが、現地条件や拡散防止効果およびコスト面から、原位置で行うバイオレメディエーション（オーグメンテーション）工法を採用した。

本工法は、油分解能力をもつ微生物を原位置で井戸等より注入して浄化を進めるもので、建物などがあっても施工でき、全国でも事例のほとんどない工法である。本報では、好気性微生物を用いたバイオレメディエーション工法の浄化効果を報告する。

2. 汚染状況

現地での表層土壌ガス調査およびボーリング調査の結果から推定した油汚染状況推定平面図を図1に、断面図を図2に示す。観測井戸および揚水・注入井戸としてドライエリア側3箇所（D1、D2、D3）と敷地境界側3箇所（K1、K2、K3）に設置した。

油種は重油であり、過去に地下タンクの配管等から漏洩したものと考えられる。汚染状況は、ドライエリア側

* 土木総本部 環境技術部

に高濃度の油汚染部分が集中しており、それが地下水面に沿って敷地境界側まで広がっているものと考えられる。また、地下水位変動が原因と考えられる鉛直方向の広がりも見られる。また、原位置の地下水流向を図 3 に示す。地下水流向は、ドライエリア側から敷地境界側向かう流れになっていることが確認された。

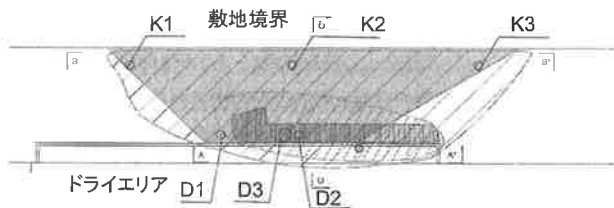


図 1 油汚染状況推定平面図

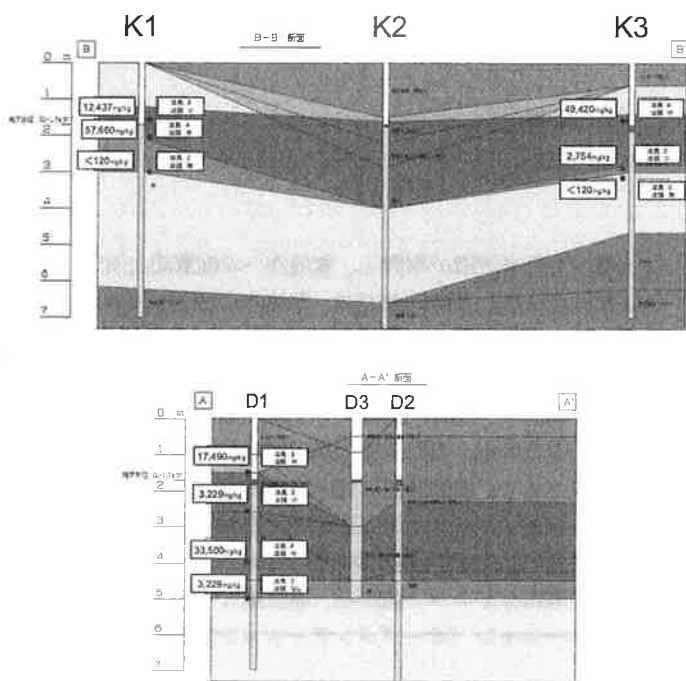


図 2 油汚染状況推定断面図
(上：敷地境界側、下：ドライエリア側)

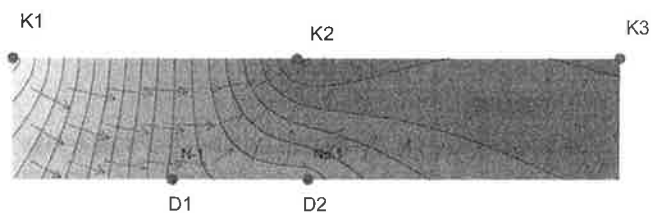


図 3 地下水流向

3. トレサビリティ試験

油汚染土壌の微生物処理を行うにあたり、微生物処理の適合性（処理対象土壌（油）の微生物に対する毒性および増殖阻害の有無）を確認するためトレサビリティ

試験を行った。その際に原位置で採取した地下水中の油を用いて、模擬汚染土の初期油分濃度を高く設定し、原位置の汚染状況に近づけ分解状況を確認した。

3.1 試験方法

1) 地下水の油分解試験方法

地下水の油分解試験は、表 1 に示すような薬剤の配合で行った。複合微生物製剤は、微生物の増殖ラグタイムをなくすため、原位置で使用する通常使用量の 10 倍量で添加した。複合微生物製剤 2.0g を入れ、油 0.2g を添加した。栄養剤水溶液、微生物活性化水、地下水の合計 100ml をフラスコに注ぎ、混合し、120rpm で 3 日間振とう培養した。pH、油臭油膜、TPH (Total Petroleum Hydrocarbon : 全石油系炭化水素量) を分析した。

表 1 薬剤の配合（地下水油分解試験）

項目	
油分	0.2g
複合微生物製剤	2.0g
栄養剤	2ml
微生物活性化水	20ml
地下水	80ml

2) 土壌中の油分解試験方法

土壌中の油分解試験は、表 2 に示す薬剤配合で行った。浄化処理対象とする土壌は、原位置で採取した地下水中の油を 20g、均一になるように十分に混合した。栄養剤を微生物活性化水に溶かし、複合微生物製剤土壌に添加し、十分に攪拌した。なお、試料は、1 回/日攪拌し、適宜水分を補給し、3 日後に追加の栄養剤を加えた。1 週間後、油臭・油膜は、処理前後の土壌 5g をビーカーにとり、水 50 ml を加えてよく攪拌し、静置後浮上してくる油膜を観察し、pH、油臭油膜、TPH を分析した。

表 2 薬剤の配合（土壌油分解試験）

対象土壌	1kg
油分	20g
微生物製剤	20g
栄養剤（窒素・リン）	4g
栄養剤	2g
必須元素水溶液	1ml
微生物活性化水	100ml

3.2 結果

1) 地下水

地下水の油分解試験結果は図 4 に示す。初期の地下水中の総油量は、1,200mg/L であり、微生物処理を行うと 3 日間後で約 100mg/L まで油分の減少が確認された。成分毎の減少率を見ると、 C_6 - C_{10} （ガソリン相当部分）は 99% 減少し、濃度としては検出限界以下まで低減していた。また、 C_{10} - C_{28} （軽油相当部分）が約 93%、 C_{28} - C_{44} （重油・潤

滑油相当部分) が約 90%減少し、全体では初期濃度の約 93%が減少した。当該微生物によって分解させることが可能であることを示唆している。

油臭・油膜は、表 3 に示す油臭・油膜の評価基準で判断した。初期の油臭は、段階 5 (強烈な臭い) であった。7 日後の油臭は、段階 2 (何の臭いであるかが分かる弱い臭い) まで低減していた。

また、初期の油膜は、段階 3 (黒色の油) であり、7 日後は段階 2 (薄い油膜) まで低減していた。目視による状態観察の結果、分解した試料溶液に汚泥の生成も確認されたことから、微生物の増殖は良好と言える。

従って、対象油の当該微生物による地下水処理は可能であると判定した。

2) 土壌

土壌中の油分解試験結果は図 5 に示す。土壌の TPH の初期濃度は、約 20,000 mg/L であり、微生物による 7 日後の土壌で約 6,200mg/L の油分の減少が確認された。成分毎の減少を見ると、C₆-C₁₀ (ガソリン相当部分) は検出限界以下まで、C₁₀-C₂₈ (軽油相当部分) が約 36.4%、C₂₈-C₄₄ (重油・潤滑油相当部分) が約 22.9%減少し、全体では初期濃度の約 33.2%が減少した。

さらに、大幅な油膜の減少も確認されたことから、微生物による分解が進んでいることを、目視によっても確認できた。従って、対象油における当該微生物による処理は可能であり、浄化効果が充分期待できるものと判定した。また、処理前の土壌の油膜は段階 3 であり、黒色の油が表面に浮上する様子が見られた。しかし、処理 7 日後には黒色の油は浮上しなくなり、段階 2 (薄い膜状) まで軽減が認められた。処理前の油臭は、段階 5 の強烈な臭いであったが、処理 7 日後の油臭は、段階 2 (何のにおいであるかわかる弱い臭い) となり、油臭も軽減されていた。従って、対象油の当該微生物による土壌処理は可能であると判定した。

4. 原位置浄化

原位置浄化は、微生物の存在、水分状態、環境指標等を調査し、本工法が適用可能なことを確認した。注入箇所は、図 6 に示した 26 箇所の井戸を使用し、薬剤類を注入した。

4.1 浄化方法

薬剤類注入用に井戸を設置して井戸内の油相厚の測定を行い、油相が確認された井戸は注入前に油の回収を行った。その後、注入井戸から、薬剤類を注入した。以下に各工種の概要を記す。

①薬剤類注入井戸設置工

敷地境界側とドライエリア側の道路に沿って概ね 2m 間隔で注入井戸を設置した。敷地境界側は、深度 3m の注入井戸を 14 箇所、汚染源と考えられるドライエリア側

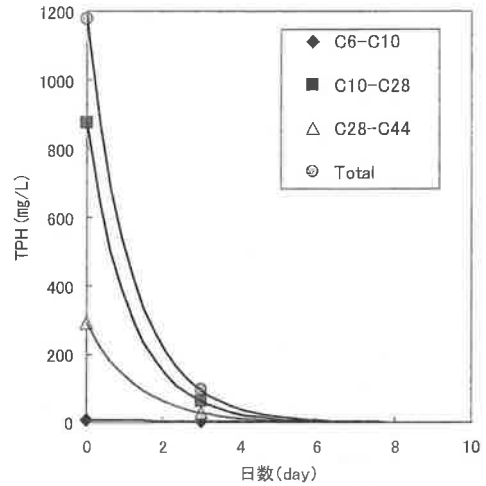


図 4 地下水中の油分分解濃度

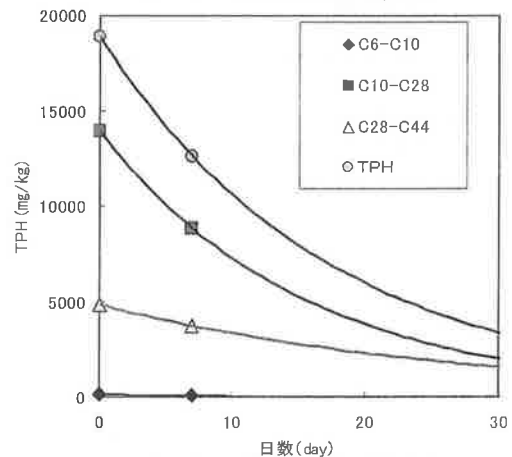


図 5 地下水中の油分分解濃度

表 3 油臭・油膜の評価基準¹⁾

油臭の段階	内容
0	無臭
1	やっと感知できる臭い (検知閾値濃度)
2	何の臭いであるかが分かる弱い臭い (認知閾値濃度)
3	らくに感知できる臭い
4	強い臭い
5	強烈な臭い

油膜の段階	内容
0	なし
1	ところどころ点状に油膜あり
2	薄い油膜 (すじ状~虹色の油膜)
3	茶色い油膜

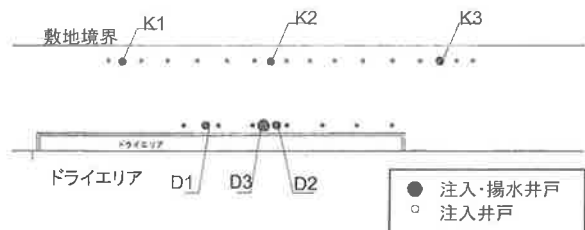


図 6 注入・揚水井戸の配置図

には、深度 5m の注入井戸を 7 箇所設置した。

②油相厚測定及び油回収工

注入井戸、既設の観測井戸の油相厚をインターフェイスメーターで測定した。油相が認められた箇所では、専用ポンプを使用し、油分の回収を行った。

③薬剤注入工

注入する薬剤は、表 4 の配合で行った。

表 4 薬剤の配合

項目	
対策容積	200m ³
複合微生物製剤	40kg
複合微生物製剤テラタイム	200kg
栄養剤	400kg
必須元素水溶液	10 L
微生物活性化水	800L

4.2 モニタリング方法

土壌・地下水浄化の速度は、微生物の活動に影響される。微生物の生育状況及び活性化状況を把握するため、表 5 に示す項目について測定を行った。

表 5 モニタリング項目

目的	名称	性状・指標 等
環境指標	水素イオン濃度 (pH)	中性域 (微生物生育)
	酸化還元電位 (ORP)	還元状態 (マイナス領域)
	電気伝導度 (EC)	水中のイオン量の目安
微生物	微生物数	菌数測定
浄化対象	油	油臭・油膜

4.3 モニタリング結果

2006 年より 2008 年 2 月 28 日までの間に、計 6 回のモニタリングを実施した。ここでは、油の量的な指標である油相厚の推移および油臭・油膜について記す。

4.3.1 油相厚の推移

1) ドライエリア側 (観測井戸 D1、D2)

ドライエリア側の油相厚の推移を図 7 に示す。油漏洩源と考えられるドライエリア側の観測井戸 D1 では、注入前の初期油相厚が 16cm であったのに対し、注入 18 日後で 2cm 油相厚が減少したが、28 日後より油相厚の増加が確認され、59 日後では初期値から比べ 28cm 増の 44cm の油相厚を計測した。この井戸については、過去の 2005 年 11 月の調査の際には 1.49m の油相厚が確認されており、その後の回収作業で油は除去されているものの、油自体の回収量が予想よりも少ないことから、回収工の影響範囲が小さく、周辺にはまだ多量の油が存在すると考えられる。

また、D2 では、注入前の初期油相厚が 15cm であったのに対し、注入 18 日後で 14.5cm 減少したが、28 日から 59 日後で、D1 と同様に油相厚が 9cm~17cm と増加する傾

向が確認された。

これらの変動は、連続的な油回収作業により、井戸の比較的近傍の油分については除去され、井戸内の油相厚が一時的に薄くなってきたものの、回収作業を一旦中断し、またその後、微生物製剤等の注入作業を行ったことなどにより、物理的に地中の油の動きに変化が起きたことが要因の一つとして考えられる。

また、注入した油分解菌に含まれる酵素が土壌に付着した油分を剥がし地下水中に溶出し、油が動きやすくなっている可能性もある。油相厚は減少傾向にあるが、依然として多量の油が存在していると考えられる。

2) 敷地境界側 (観測井戸 K1、K2、K3)

敷地境界側の観測井戸 K1 では、注入前の初期油相厚が 5cm であったが、注入 18 日後から油相が確認されなくなった。この傾向は、注入 116 日後まで継続している。

また K2 では、注入前の初期油相厚が 18cm であったのに対し、注入 18 日後から油相が確認されなくなった。また、K3 では、注入前の初期油相厚が 0.5cm であったが、注入 18 日後から油相が確認されなくなった。この傾向は K1 と同様に、注入 116 日後まで継続している。

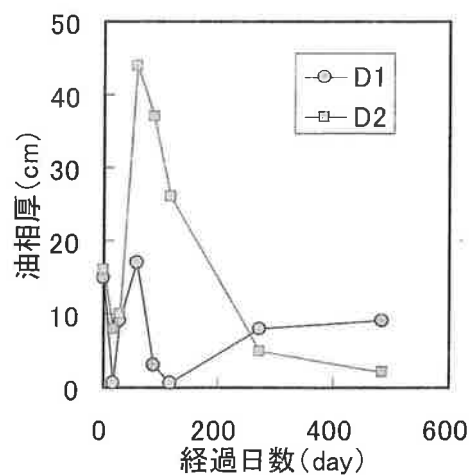
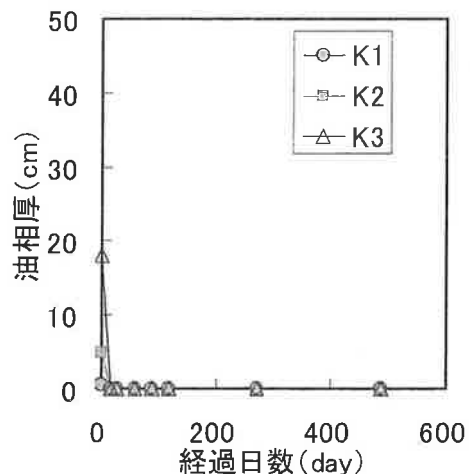


図 7 油相厚の推移

(上：敷地境界側、下：ドライエリア側)

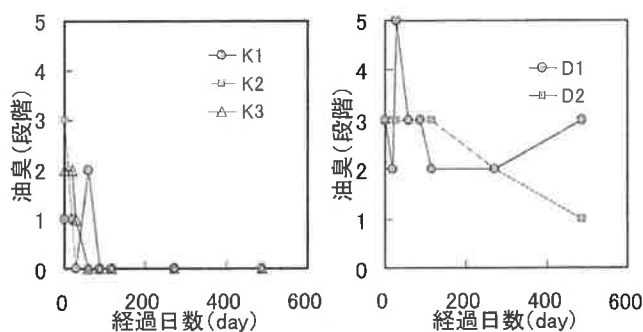


図8 油臭の推移

(左：敷地境界側、右：ドライエリア側)

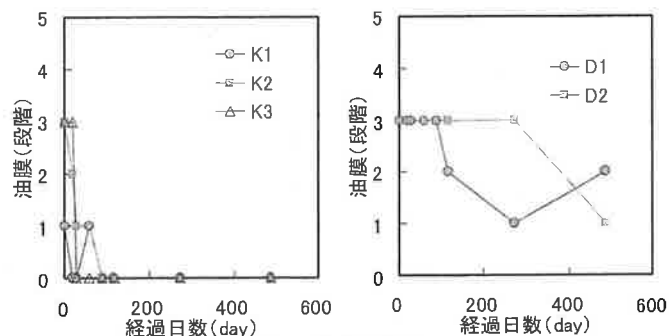


図9 油膜の推移

(左：敷地境界側、右：ドライエリア側)

4.3.2 油臭・油膜の推移

各モニタリング地点の油臭・油膜の測定結果を図8、図9に示す。ドライエリア側の観測井戸D1、D2、敷地境界側の観測井戸K1、K2、K3の油臭・油膜の測定状況は次の通りである。

汚染源と考えられる観測井戸D1では、注入前の初期測定で油臭段階3、油膜段階3の評価であった。ここでは、油相測定から、油が依然として多量に存在しており、その後の状況に変化はなかった。

一方、敷地境界側の観測井戸K1では、注入前で油臭段階3、油膜段階3であったが、注入88日後より油臭・油膜とも確認されない状態になった。この傾向は注入116日後以降でも継続している。

4.3.3 水質変化

水質のモニタリングを行った。まず、原位置で計測されたpHの変化を図10に示す。環境のpHは、微生物の増殖や生産される代謝産物の種類や量に重要な影響を及ぼすことが知られている。微生物の増殖できるpH範囲は比較的広範囲のpH5~9であり、そのうち最適範囲は6.5~7.5である。原位置のpHは、7付近と微生物育成に最適な条件であることが確認できる。

次に、微生物の酸素に対する要求性は、酸化還元電位(Eh)によって示される。一般的に好気性微生物の良好な育成環境は、酸化還元電位が+800mV~+300mVである²⁾。図11に原位置の酸化還元電位の変化を示す。酸化還元電位は、ドライエリア側、敷地境界側の両方とも一時的に低下したが、ほぼ+300mV程度で推移し、好気性微生物の適性領域にあると判断できる。

電気伝導度(EC)は、土壌の塩類濃度の指標として使われる。原位置のECの濃度変化を図12に示す。浄化開始直後は、栄養剤の投入によりECが高濃度となっている。その後、経過時間とともに栄養剤は消費され安定した値となった。

原位置の地下水中の全菌数変化を図13に示す。添加した微生物製剤は適性に増加し、菌数は約 1×10^7 cells/ml程

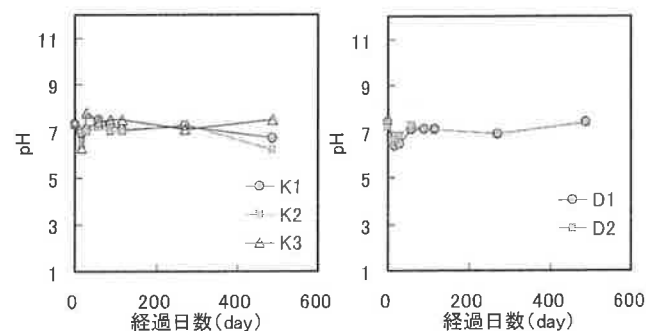


図10 地下水中のpH濃度の変化

(左：敷地境界側、右：ドライエリア側)

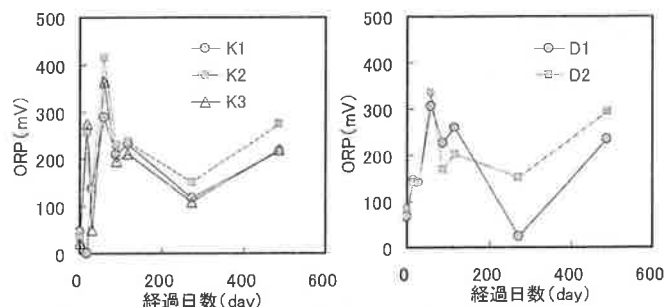


図11 地下水中のORP濃度の変化

(左：敷地境界側、右：ドライエリア側)

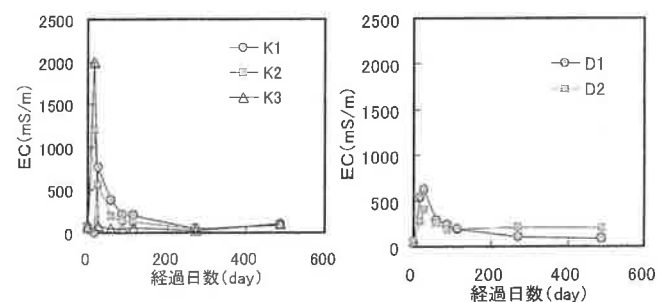


図12 地下水中のEC濃度の変化

(左：敷地境界側、右：ドライエリア側)

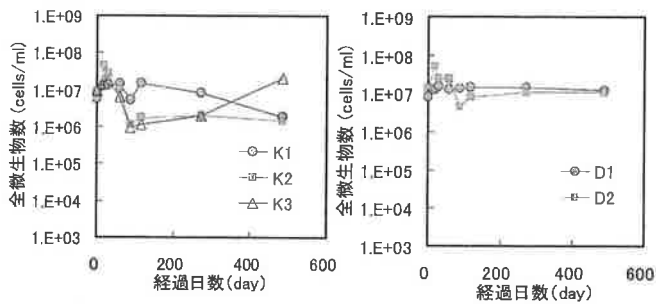


図 13 地下水中の全菌数の変化
(左：敷地境界側、右：ドライエリア側)

度で安定した菌数を保持している。これは油自身がまだ完全に浄化されずに残油量を保持していることを示唆している。

5. まとめ

本報では、地下重油タンク等から漏洩し、経年で土壌・地下水に拡散した油分の拡散防止を目的にバイオレメディエーション工法による浄化を実施した。

バイオ製剤の注入した結果、敷地境界側の観井戸では油相がなくなり、最終的に油臭・油膜も確認されない状態になった。一方、油漏洩源と考えられるドライエリア側の観測井戸 2 箇所では、注入直後に一時的な油相厚の上昇（リバウンド）が認められた。しかし、その後時間とともに油相厚は減少し、徐々に浄化が進行しているものと推定される。

ここでは、示していないがトレスピリティー試験から予測した浄化期間よりも浄化速度は緩やかであり、現状で把握されている残油量の場合、浄化が終了するまでには少なくとも 3 年以上かかるものと推定される。

本報では、2007 年度までの結果を記したが、2008 年度も対策を継続し、さらに薬剤注入方法を改良し、分解促進を図っている。今後もモニタリングを継続してデータ収集を続け、操業中の事業所や工場等の油汚染原位置対策技術の確立を目指したい。

謝 辞

本データ収集にあたり、施主・現場担当者・協力業者の方々に多大なるご協力をいただきました。末筆ながら関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 油汚染対策ガイドライン、環境省水・大気環境局土壌環境課、平成 18 年 3 月
- 2) 応用微生物学、村尾澤夫、荒井基夫、培風館

A CASE STUDY OF IN-SITU REMEDIATION BY BIOSTIMULATION METHOD IN SOIL CONTAMINATION

K.Shibano H.Ito S.Mushiake

In underground water and soil contamination site by oil, we remediated by in-situ bioremediation, which is one of the bioaugmentation methods. In this method, the bio-agent makes underground environment to aerobic and activate microbe, so the oil are disassembled by aerobic bacteria. It takes a long term to complete remediation, comparatively. And the progress of remediation is influenced in accordance with underground condition, so it is important to manage appropriately, such as monitoring throughout the remediation period that appropriate management by monitoring under remediation.