

# 原位置バイオレメディエーションに係る 水平井戸の施工と栄養塩類の注入に関するフィールド実験

村上順也\* 門倉伸行\* 佐々木静郎\* 土路生修三\* 渡辺則雄\*\*

建屋下地盤の油汚染に対しては、井戸埋設時の困難さや地下水近傍で平面的に広がる油特有の汚染形態等を考慮すると、鉛直井戸より水平井戸を施工することが浄化対策上有利と考えられる。本報では、水平削孔により井戸管を埋設し、菌や栄養塩類を注入する原位置バイオレメディエーションの工法確立のために行った非汚染地盤でのフィールド実験の結果について報告する。本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「大学発事業創出実用化研究開発事業」の補助を受け、立命館大学と星和電機と当社で実施された共同研究の一部である。

キーワード：油、水平井戸、注入、原位置バイオレメディエーション

## 1. はじめに

平成 15 年 2 月に施行された土壌汚染対策法では、法規制対象の有害物質（特定有害物質）の中には、鉱物油（以降、油と記す。）は、油に含有することの多い「ベンゼン」が第 1 種特定有害物質として指定されるのみで、油としての規制はなされていない。

そのような中、平成 18 年に「油汚染対策ガイドライン」が環境省から公表され、一般的な工場・事業場の敷地や市街地などでの鉱物油を含む土壌（油含有土壌）に起因した油臭や油膜が人の生活環境保全上の支障を生じさせていること（油汚染問題）への対策に関する基本的な考え方が示された。

また、法契機以外の自主的な調査・対策（条例・要綱を契機としたものを含む）の汚染物質種別件数は、（社）土壌環境センターが会員企業の協力を得て行っている調査・対策の受注件数の実態調査<sup>1)</sup>によると、調査・対策共に油類は第3種の10倍程度、第1種及び第2種の3分の1程度と一定の割合の件数がある（Table 1）。特に、平成 19 年度の調査件数は特定有害物質の件数が前年度と比べ減少する中、油類の件数は増加しており、今後更に油類による土壌汚染の調査・対策への社会的関心は高まるものと考えられる。

Table 1 法契機以外による調査・対策における汚染物質の種類別受注件数

	第1種特定有害物質	第2種特定有害物質	第3種特定有害物質	油類	ダイオキシン類	
調査	平成十九年度	1,071	1,988	23	587	59
	平成十八年度	1,280	2,110	68	499	63
	平成十七年度	964	1,633	60	369	57
	平成十六年度	762	1,261	29	530	44
対策	平成十九年度	1,152	1,150	24	363	38
	平成十八年度	1,108	1,106	35	429	33
	平成十七年度	689	905	15	349	38
	平成十六年度	456	755	11	269	37

(社)土壌環境センターの実態調査を元に作成。  
第1種特定有害物質：揮発性有機化合物 11物質  
第2種特定有害物質：重金属等 9物質  
第3種特定有害物質：農薬、PCB 5物質

\* 技術研究所 地球環境研究部  
\*\* 技術研究所 地盤基礎研究グループ

本研究は、油による土壌汚染に着目し、低コストで低環境負荷な浄化方法として、汚染現場敷地（原位置）で微生物による油の分解除去（バイオレメディエーション）を行うシステムの開発に取り組んだものである。研究は、①微生物による油分解挙動の解明並びに効率化のラボスケール実験、②地盤中の油汚染挙動に関するシミュレーション、③実汚染地盤に適用するための総合的な工法の開発、の3テーマに大別して進められた。

本報は、総合的な工法開発の部分で、従来の鉛直井戸に替わり水平井戸を用いる原位置バイオレメディエーションの工法確立を目指し、実規模での施工性を確認するために行ったフィールド実験の結果について報告するものである。

なお、本報は新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「大学発事業創出実用化研究開発事業」の補助を受け、立命館大学、星和電機並びに当社とで実施された共同研究の成果の一部である。

## 2. 水平井戸管を用いた原位置バイオレメディエーション工法

### 2.1 背景

土壌汚染が明らかとなる状況として、工場等が解体・撤去された更地の場合と、工場等の建屋のある場合の2種類が考えられる。後者は、今後事業主の自主的な調査を契機として土壌汚染が発見されることが多くなると予想されるケースである。後者の対策工事を行う場合、建屋が障害となるため、汚染土壌を掘削除去する方法や、地盤中へ鉛直に井戸を設置し行う浄化方法は採用しづらい。このようなケースには、障害物である建屋を回避して、地盤中の汚染箇所へアプローチし浄化が行える方法が求められる。

他方、今回対象とする油類すなわち、ガソリン、灯油、軽油並びに重油等の燃料油や鉱物系の機械油は、主成分が種々の炭化水素の混合物つまり有機物の液体であり、

一般に水よりも比重が小さいため、地盤中では主に地下水面上に浮いて漂う汚染形態をとると考えられる。

## 2.2 工法の特徴

上記のような、鉛直方向へのアプローチが困難な状況下で、地下水面上に広がる形態をとる汚染に対して効率的な浄化対策工法として、以下の方法を考えた。

Fig.1 に本工法のイメージ図を示す。建屋の脇の地上部から斜めに削孔を行い、続けて汚染箇所を水平に貫くように削孔を行い、その削孔軌跡上に井戸管を埋設する。当該井戸管には浄化工程での揚水／注入作業に供するためのストレーナやパッカーをあらかじめ装備しておく。そして、埋設した井戸管を用いて、鉛直井戸による汚染浄化方法同様に、油分解菌や栄養塩類の注入等の作業を行い浄化を実施する。本工法により、建屋に影響を受けず、かつ、鉛直井戸よりも汚染部分に効率的に井戸（水平井戸）を配置できる。

なお、本工法は汚染地盤上部に構造物が存在しない状況下でも適用可能である。例えば掘削除去／場外搬出の方法での搬出時の長距離運搬に要するエネルギーや最終処分場の逼迫の問題も考慮すると、本工法は低環境負荷な工法としても期待される。

本工法の課題としては、以下の点が挙げられる。

- ・水平削孔の施工性（地質条件、敷地条件、近接施工）
- ・水平井戸による揚水／注入作業の効率性（注入量、圧力、影響範囲）

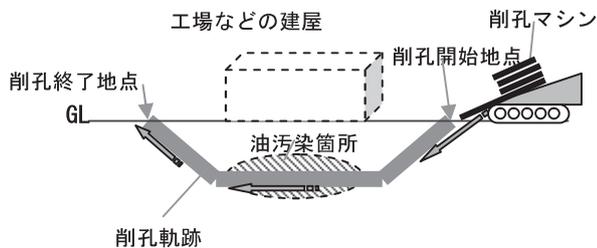


Fig. 1 水平井戸管を用いた原位置バイオレメディエーション工法のイメージ図

## 3. フィールド施工実験概要

### 3.1 目的

上述の、水平井戸管を用いた原位置バイオレメディエーションのシステムを確立するために、実規模での施工性を確認することを目的としてフィールドでの施工実験を行った。

施工性を確認する工程は、実際の浄化対策工事を想定して水平削孔、井戸管埋設、揚水、栄養塩類注入、エアレーション、モニタリングといった、原位置バイオレメディエーションの一連の工程である。

なお、今回は非汚染フィールドでの実験であり、汚染

の浄化は検証項目としていない。

### 3.2 実施概要

施工実験を行ったフィールドの概要を以下に示す。

- ・所在地：茨城県
- ・地質：粘土、細砂など (Fig. 8 参照)
- ・汚染種類：なし
- ・透水係数：約  $4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  (敷地内 GL-4m~6m の砂層)
- ・地下水位：約 GL-1.1m (被圧)
- ・流向流速：南東に 0.02cm/min
- ・規模：南北 48m 東西 48m
- ・想定汚染領域：敷地中央部で GL-5m を中心に、(W) 8m × (D) 5.5m × (H) 3m の領域

Fig. 2 にフィールド実験の概要図を示す。敷地中央の GL-5 m を中心に幅 8 m × 奥行き 5.5 m × 高さ 3 m の領域（図中「水平区間」と記した領域）に油汚染が存在すると仮定した。約 48 m 四方の敷地の南西端から北東端へ向かう対角線に水平削孔を行い合計 3 本のポリエチレン製井戸管を埋設する計画とした。井戸の両端は地上部にあり、最深部は「水平区間」8 m にわたり、GL-5m 又は GL-6.5m で水平となるように埋設する計画とした。

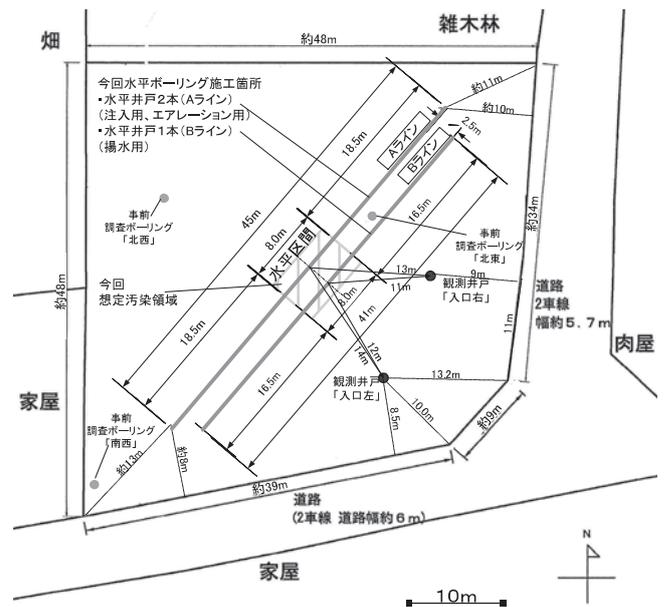


Fig. 2 フィールド施工実験概要図

井戸管埋設後、当該水平区間に設けたストレーナ部から地盤中への栄養塩類の注入実験を行い、埋設導電率センサーで浸透状況を確認した。注入実験後、オールコアボーリングによる地質確認や土中菌数測定、観測井戸での水位変動や水質変動を観測した。また、当該水平井戸を用いて揚水、エアレーションの各種操作を試行しその実現性を確認した。Fig. 3 に工程を示す。

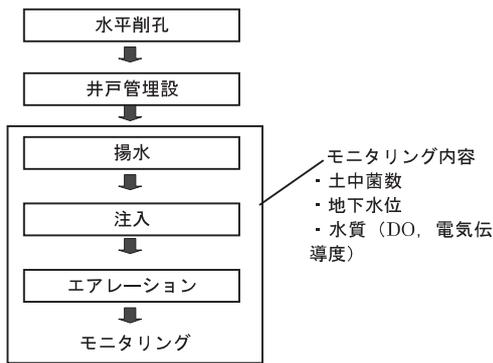


Fig. 3 フィールド施工実験工程

## 4. 実験内容及び結果

### 4.1 水平削孔及び井戸管理設 (推進工事)

#### 4.1.1 目的及び方法

Fig. 4 に井戸管の水平区間 (Fig. 2 の斜線で示した区域) の拡大図を示す. A ラインには GL-5.0 m に注入用井戸管, GL-6.5 m にエアレーション用井戸管を計画し, A ラインから 2.5 m 離れた B ラインには GL-5.0 m に揚水用井戸管を埋設する計画とした.

注入用井戸管には, 全長の中心部に ctc2.5 m 間隔で 3 か所の吐出口 (ストレーナ部) をあらかじめ設けてある. 前述の「水平区間」に当該吐出口が位置するように水平削孔, 埋設を行うのがポイントである. 同様に, 揚水用井戸管には吸込口, エアレーション用井戸管には空気吐出口がそれぞれ設けてある.

これらの配置は, 後述の注入実験で半径 1.5 m の球状で地盤中へ浸透注入すると仮定した場合, 仮定した汚染領域をカバーできる計画となっている. つまり, 汚染領域がこれより広い場合にはこれらの位置関係で吐出口や

井戸管本数を増やすことで対応できる. 本実証実験ではこのような吐出口や井戸管相互の距離が比較的近接した位置関係で, 実際に埋設施工できるかがポイントである. また, ストレーナ部の前後には地山との密着を確保するための地山パッカーを設けてある.

井戸管理設は注入用井戸管, エアレーション用井戸管, 揚水用井戸管の順に行った. 埋設方法は, まずパイロット削孔し反対側へ掘り抜いた後, 口径拡幅しながら井戸管を埋設する引込み法で行った. また, 後述の揚水工程での油回収効率の向上を意図し, 揚水用井戸管理設時にアニオン系界面活性剤を口径拡幅リーマーから地盤中へ噴射, 投入した. 井戸管の鉛直及び水平位置の確認は, 地上部から磁力線を利用したロケータにより行った.

#### 4.1.2 結果

Photo. 1 に削孔状況を示す. Fig. 5 の上段に削孔の計画ラインを示し, 中, 下段にロケータにより計測した実際の削孔ラインを示す. 長手方向最大 70m の敷地条件下で, 計画した所定位置へ計 3 本の井戸管を精度良く埋設することができた.



Photo. 1 削孔状況

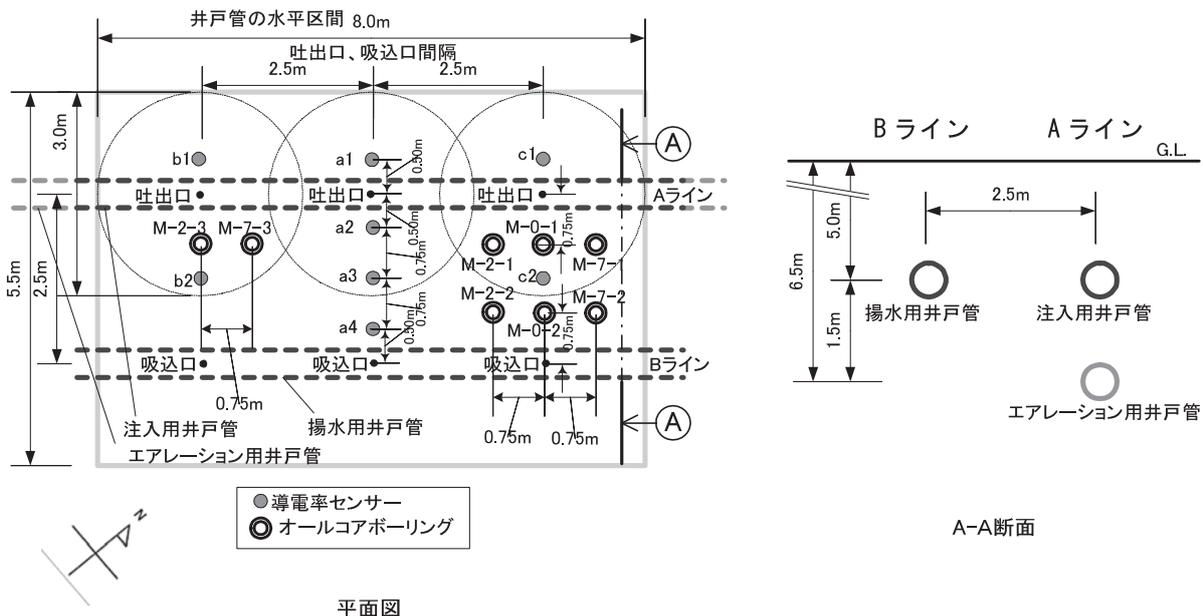


Fig. 4 井戸管の水平区間拡大図

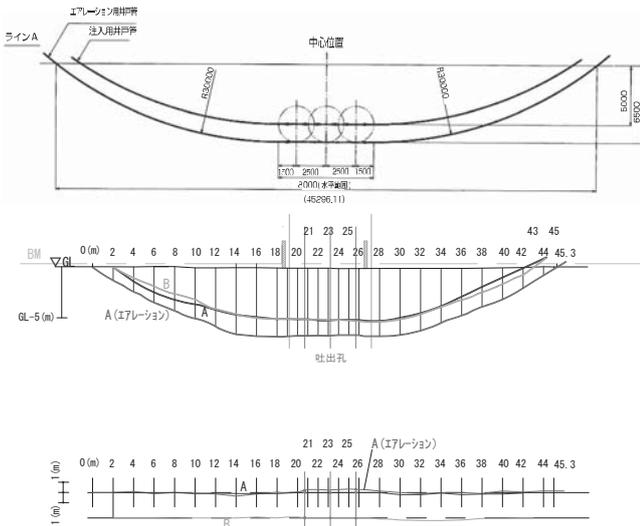


Fig. 5 水平削孔計画図及び実績図  
(上：計画(断面図) 中：実績(断面図) 下：実績(平面図))

## 4.2 揚水

### 4.2.1 目的及び方法

油汚染地盤での地下水水面付近の油回収を想定し、水平井戸管による揚水実験を計画した。

本フィールドは非汚染地盤であり、かつ被圧帯水層を有する地盤であるため、本揚水実験では地下水水面付近ではなく当該帯水層中に水平井戸管を設置し、地下水の揚水並びに供給した界面活性剤の回収を目的とした。地盤は概略 GL-4 m までが不透水層、それ以下は砂層である。揚水用井戸管設置深度である GL-5.0 m は被圧帯水層にあたる。

揚水方法は、真空ポンプにつながったサククションホースを揚水用水平井戸管に挿入し、3 か所あるストレーナ部のうち中央のストレーナ位置にホース先端を設置した後、ウェルポイント用の揚水ポンプ(揚水量 1.2 m<sup>3</sup>/min, 動力 11 kW, 全揚呈 18 m) で吸引した。揚水開始からの観測井戸「入口右」、「入口左」の水位を水位センサーとスケールを使用して測定した。

### 4.2.2 結果

揚水ポンプを稼動して1~2分後、急激に数 10L/min の流量で揚水され、その後1~2分間で突如揚水できなくなった。30分程度時間をおいてから稼動させたところ、同様に揚水された後1~2分間で揚水が止まった。一回の揚水では100L程度揚水されていた。回収した水には泡立ちがみられ、投入した界面活性剤が回収されていることを確認した。(Photo. 2)

3回にわたり上記の揚水作業を実施したときの観測井戸「入口右」と「入口左」の水位変化を Fig. 6 に示す。観測井戸の仕様を Table 2 に示す。両井戸は Fig. 2 に示すように、揚水地点から11~12m 離れている。1回目は装置の都合により、揚水開始後ポンプが一時停止し、約 6

分後に再稼動したが、これらは「1回目」の中に入れてプロットした。両井戸とも、3回とも揚水開始後10分以内に1cm程度の水位が低下した。この水位の測定結果からも、揚水作業により確実に周囲から水を引いていることが示唆された。揚水が途中で止まってしまうのは、30分程度おくとまた揚水ができることから、当該地盤の透水係数が  $4 \times 10^{-3} \text{cm/s}$  とあまり大きくないために、地盤中から揚水用井戸管への地下水の供給が揚水量に追いつかなかったことによるものと考えられる。

以上のように、地上からウェルポイント用ポンプで揚水が可能であることが確認できた。地盤条件が良ければ、すなわち透水係数が  $10^{-2} \text{cm/s}$  のオーダーくらい大きい地盤であれば定流量で連続揚水できると思われる。

Table 2 観測井戸の仕様

地点名	掘削深度 (m)	ストレーナ箇所 GL-(m)	ストレーナ箇所の地質	井戸内径 (cm)
入口右	8	4.0~6.0	細砂	10.15
入口左	7	5.0~6.0	砂混じりシルト	10.15
M-0-1	7	4.0~7.0	細砂	10.15
M-0-2	7	4.0~7.0	細砂	10.15

- ・孔壁は、ストレーナ位置には砂砂を充填し、上部はベントナイトペレット、モルタルで止水した
- ・M-0-1、M-0-2の両井戸は注入実験終了後に作成
- ・プラスチック(PVC)製。Φ50。表中の井戸内径は、井戸孔壁の直径。



Photo. 2 揚水実験状況

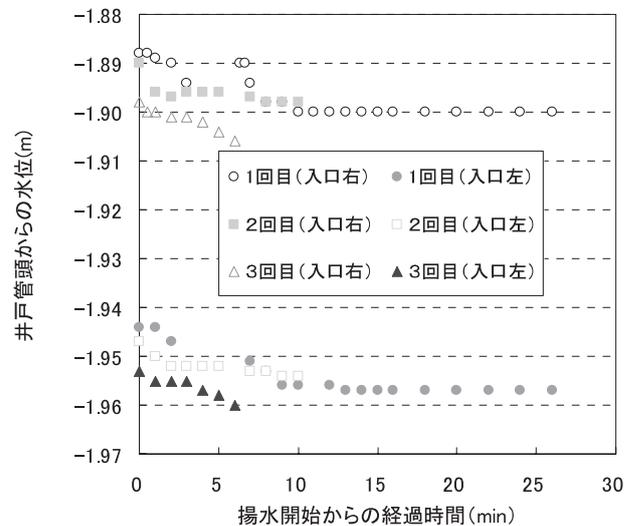


Fig. 6 揚水時の観測井戸の水位変化

### 4.3 注入実験

#### 4.3.1 目的及び方法

実汚染地盤では浄化に際し、油分解菌と栄養塩類を注入するが、本サイトは非汚染地盤であることから注入実験では栄養塩類のみの注入を計画した。あらかじめ導電率センサーを埋設しておき、注入工程中のセンサー応答値の推移を観測することで栄養塩類の広がりを把握し、また注入工程後に土壌をサンプリングし土着菌の増減を測定すること等で間接的に栄養塩類の広がりを把握する計画とした。導電率センサー及びオールコアボーリングの位置は前掲の Fig. 3 に併せて示す。

本工法では、共にストレーナおよびパッカーを有する外管（井戸管）と内管を用い、外管内の内管を移動させ、内管のストレーナ位置を外管のストレーナ位置に合わせることで、任意の箇所から地盤中への注入を行える<sup>2)</sup>。前回のフィールド実験<sup>2)</sup>では、外管のストレーナ 1 か所からの注入実験を行ったが、今回は内管を改良し外管のストレーナ 3 か所からの同時注入を実施したのが大きな変更点である。なお、外管（井戸管）の地山パッカーに挟まれた吐出口 1 か所のストレーナ長は 1.2 m である。

注入方法は次のように行った。地上に置いた注入ポンプに内管を接続し、北東側から外管内に内管を挿入し所定位置でパッカーを膨らます。タンクに調製した栄養塩類を流量制御しながら吐出する。

まず、地盤の間隙率 30%としたときに所定の領域をカバーする半径 1.5 m の球 3 個分に相当する 13 m<sup>3</sup>弱の容量の栄養塩類を注入した。次に、流量を上げ、より圧力の高くなる条件での注入を試行した。

導電率センサーの出力値は注入実験中にリアルタイムでデータロガーに記録した。土中菌数は、栄養塩類注入後に土を採取し、土 1 g に蒸留水 10 mL を加えて振とうし、プレート培養法でコロニー数を計測した。

注入液浸透状況の検証の一つとして、深度毎に採取した湿潤土について、水溶性成分試験を実施した。注入実験で用いた注入液には水溶性の成分が含まれているため、注入液が浸透している領域であれば、本成分含有量が周囲の地点と比べて高い値を示すと考えられる。そこで本試験により浸透状況を検証できると考えた。分析方法は土質工学会基準 JSF T 241-1990 土の水溶性成分試験方法を基に試料分量や検体量等に若干の修正を加えて行った。本試験で求まる水溶性成分含有量(%)は、試料の湿潤土に含まれる「間隙水に含まれている溶解成分」と「土粒子から水に比較的容易に溶解する成分」とを合わせたものを土の炉乾燥質量当たりの割合(%)で表したものである。

#### 4.3.2 結果

##### 1) 注入実績

注入実績を Table 3 に示す。Run 1 では 0.15 MPa の圧力で 25 L/min の流量で所定容量を約 9 時間かけて地盤中

に注入することができた。流量を増やした Run 2 及び Run 3 ではそれぞれ 0.22 MPa で 35 L/min, 0.33 MPa で 46 L/min の注入を行うことができた。比較のために行った Run 4 の 1 か所注入では 19 L/min と低い流量で 0.15 MPa まで達した。実汚染現場に適用する際に目安となる注入データが得られた。

Table 3 注入実績

Run	注入方法	注入日	注入時刻 (注入時間)	最大流量 (L/min)	最大吐出圧力 (MPa)	注入総量 (m <sup>3</sup> )
1	3か所同時注入	平成20年11月27日	10:05~18:50 (530分)	25	0.15	12.5
2		同 11月28日	11:20~15:28 (248分)	35	0.22	8.0
3		同 11月29日	8:40~10:15 (95分)	46	0.33	3.9
4	1か所注入 (南西側)	同 11月29日	11:26~13:32 (126分)	19	0.15	1.7

##### 2) 導電率センサー

Run 1 の注入時間帯と注入停止後の導電率センサーの応答結果について、Fig. 7 と Table 4 に示す。図の縦軸はセンサーの出力値であり、導電率とほぼ比例の関係にある。水中に栄養塩類のように電離する成分があると電気が流れやすくなり、導電率センサーの出力値も高くなる。なお、注入前の出力値を 0 としてプロットしている。

注入中、吐出口設置深度である GL-5 m の、最も北東側吐出口に近い c1 の位置（以降 c1-5 のように記す。）で最も早く応答があった。約 1 時間遅れて a1-5 が上昇した。約 7 時間経過後 a2-5, c2-6, a2-5.5, a2-6 の順に応答した。注入停止後には c1-5, a1-5, a2-5 は上昇せず、a2-5.5, a2-6, c2-6 は上昇を続けた。他方、c2-5 は応答がなかった。

以上のように、平面的には c1-5, a1-5 といった北寄りの地点、断面的には a2-6, c2-6 といった深い地点で、応答が早期に出るあるいは注入停止後の増加が大きいといった傾向がみられた。

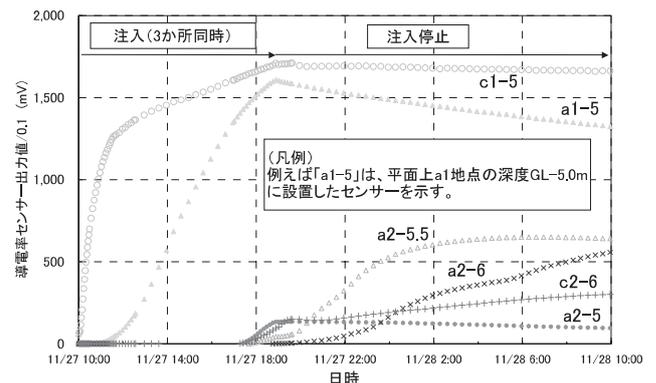


Fig. 7 注入実験での導電率センサーの応答 (Run 1)

Table 4 注入実験での導電率センサーの応答まとめ

導電率センサー 設置深度 GL-(m)	地点							
	a				b		c	
	1	2	3	4	1	2	1	2
5.0	◎	○	△	×	△	△	◎	△
5.5	-	○	△	△	-	-	-	-
6.0	-	○	△	△	-	△	-	○

◎: センサーの応答が早期に強く現れたもの  
 ○: センサーの応答が比較的早期に強く現れたもの  
 △: センサーの応答が大きくは現れなかったもの  
 ×: センサー不具合により観測不可能なもの  
 -: センサー非設置

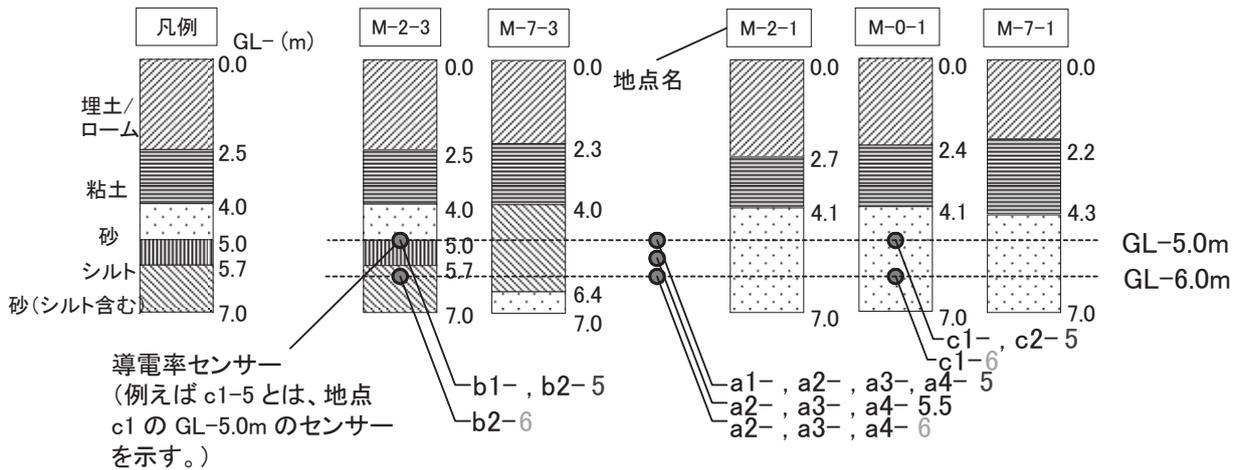


Fig. 8 注入領域の各地点の地質と導電率センサーとの位置関係

3) 地質状況

Fig. 8 に注入領域の地質と導電率センサーの設置位置の関係を表した模式図を示す。右方向が北東側、左方向が南西側である。ここで、試料名の中央の数値はサンプリング日が、注入終了後、0 : 0.5 週目, 2 : 2 週目, 7 : 7 週目であることを示す。例えば「M-0-1」は 0.5 週目である。

北東側の吐出口周辺つまり M-0-1 周辺は 4 m 以深は砂層であるのに対し、南西側の吐出口周辺つまり M-2-3 周辺では 4 m 以深にシルト層が入り込んでおり、導電率センサー b1-5, b2-5, b2-6 などシルト層など透水性の悪い地層に導電率センサーが埋まっている可能性がある。また、「北東」、「北西」、「南西」、「入口左」、「入口右」といった周辺領域 (Fig.2 参照) で別途行ったボーリング調査からも、南西側に寄るほどシルト層が厚く入り込んでいる傾向にあり、注入実験での導電率センサーの応答が北寄りの地点で良かったのはこうした場所による地質、透水性の違いが影響した可能性がある。

一方、深い地点で応答が良かったのは、栄養塩類が溶けた水は密度が水よりも大きいことに加え、GL-4 m 以浅に堆積する粘土層が上方への水の移動を妨げることにより、注入された栄養塩類の下方への移動が多かったものと推察される。

他方、数値シミュレーションにより、ポンプにより近い吐出口の方が地盤への注入量が他の吐出口より相対的に大きくなる結果も出ており、地盤中への注入状況に関しては更に詳細な解析を行う必要がある。

4) 土中菌数

本注入実験に先立ち「入口右」の地点で事前に測定した微生物数は、GL-4~6 m の深度で  $10^5$  CFU/g-wet soil (以降、単位は省略する) オーダーであった。栄養塩類を注入して 0.5 週目 (M-0-1, M-0-2), 2 週目 (M-2-1, M-2-2, M-2-3) 及び 7 週目 (M-7-1, M-7-2, M-7-3) の GL-3.0~7.0 m の間の 50cm 毎に採取した土の土中菌数の測定結果を Fig. 9 に示す。

0.5 週目では、注入口から遠い側にある M-0-2 では  $10^6$  未満であり、事前測定すなわちバックグラウンド値と同等であったが、近い側である M-0-1 の GL-5.0 と 5.5m では  $10^7$  オーダーであり明らかに菌数が多かった。以上のことから、注入作業により栄養塩類が確実に地盤中に注入され、土着の微生物を増殖させるのに有効にはたらいことが示唆された。2 週目では、M-2-1 に  $10^6$  オーダーの菌数が観測され、その他の時期、地点では  $10^5$  オーダー未満という結果であった。

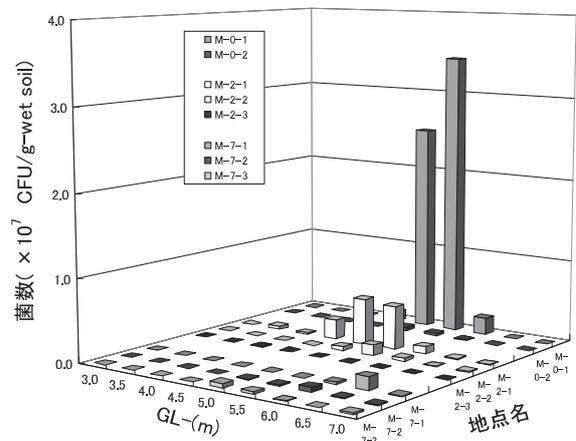


Fig. 9 栄養塩類注入後の土中菌数

5) 水溶性成分

試験結果を Table5 に示す。0.5 週目の結果では、吐出口に最も近い M-0-1 の GL-5.0m と -5.5m で他の地点より高い数値を示し、この深度範囲には注入液が浸透していることが示唆された。一方、2 週目の M-2-1 では GL-5m 近辺に若干量観測されていた。この傾向は、土中菌数の高かった地点の結果とも符合していた。M-7-1 では観測されなかったことから、時間の経過にともない、移流・拡散により当該地点の水溶性成分含有量が低下したものと推察される。また、M-2-3 では観測されず、このこと

は導電率センサーb1の結果とも附合する。この範囲に注入液の浸透が少なかったのは、地質の影響か、ポンプより遠い地点であったためあるいはその両方の影響と考えられる。

Table 5 深度別土壌中の水溶性成分含有量(%)

GL-(m)	試料名							
	M-0-1	M-0-2	M-2-1	M-2-2	M-2-3	M-7-1	M-7-2	M-7-3
3.0	-	-	-	-	-	-	-	-
3.5	-	-	-	-	-	-	-	-
4.0	-	-	-	-	-	-	-	-
4.5	-	-	0.1	-	-	-	-	-
5.0	0.3	-	0.1	-	-	-	-	-
5.5	0.3	-	0.1	-	-	-	-	-
6.0	-	-	-	-	-	-	-	-
6.5	-	-	-	-	-	-	-	-
7.0	-	-	-	-	-	-	-	-

(注) 0.1%未満を「-」と表記した。

#### 4.4 エアレーションおよびモニタリング

##### 4.4.1 目的及び方法

今回の実験では、注入用井戸管の直下にエアレーション用井戸管を計画した。これは注入用井戸管周辺といった栄養塩類が豊富な領域に、豊富にエアが行き渡るように配慮したものである。前述の注入実験後、エアレーションを2週間断続的にを行い、その前後に、前掲のTable2に示す4か所の観測井戸において、溶存酸素濃度(Dissolved Oxygen: DO)、電気伝導度といった諸量を測定し、その推移から、栄養塩類やエアレーションの到達の度合いや土着菌の活性の度合いを推定する一助とすることを目的として行った。

エアレーションにはコンプレッサーと、注入実験に使用した3か所同時注入用内管を使用した。DOは投げ込み式DO電極を観測井戸に挿入しDO計で測定した。電気伝導度はペーラーを用いて観測井戸中の地下水をビーカーに採取し、電気伝導度計を用いて測定した。いずれの測定も観測井戸内ページ後に行い、水深3~7m(一部8m)の1m毎の値の平均値をとった。

##### 4.4.2 結果

###### 1) 溶存酸素濃度(DO)の推移

Fig. 10にDOの推移を示す。入口右と入口左のDOは、エアレーションの有無に関わらずほぼ1~2 mg/Lで推移した。これがバックグラウンド値と考えた。M-0-1とM-0-2とを比較すると、前者がほぼ0 mg/Lで推移したのに対し、後者は高い値を示した。これは、前者は先の注入工程で吐出口に近い地点であり、注入された栄養塩類が豊富で土着菌による酸素の消費が多かったためと推定される。一方、後者は注入口から遠く、逆にこのDOの結果から、この地点までは栄養塩類の到達が多くはないことが示唆された。なお、エアレーション前にM-0-2のDOが4.5 mg/Lとやや高いのは、当該井戸が前日に作成されたことが何か影響したのではないかと推測される。

また、エアレーション期間中において、M-0-1はエアレーション用井戸管に近く、より多くの酸素が供給されていると考えられるにもかかわらずDOが低いということは、それ以上に酸素が消費されている、すなわち土着菌が活性化しているものと推察された。一方、M-0-2近傍はエアレーション用井戸管から離れているにもかかわらずM-0-1よりもDOが高いということは、土着菌による酸素消費が少ないことが推察される。以上より、土着微生物が活性化するだけの栄養塩類がM-0-1周囲には多く、M-0-2周囲には少ないことを間接的に確認した。

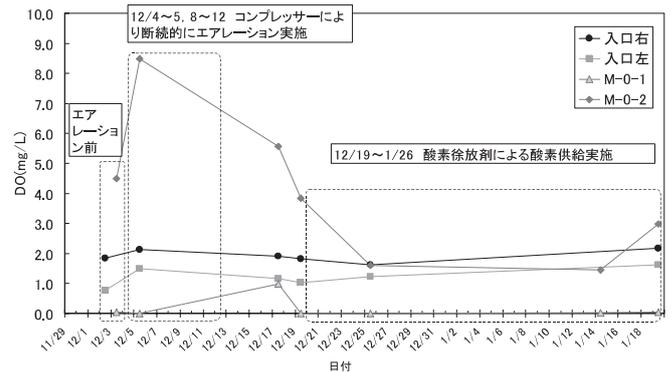


Fig. 10 栄養塩類注入後の溶存酸素濃度の推移

###### 2) 電気伝導度の推移

Fig. 11に電気伝導度の推移を示す。注入実験の領域から十分離れた地点である入口右と入口左では0.2 mS/cm程度で推移した。これがバックグラウンド値と考えた。

エアレーション前には、M-0-2では0.3 mS/cmであったのに対しM-0-1は3 mS/cmを超えており、注入した栄養塩類がより多く行き渡っていると考えられる。その後の推移をみると両者とも電気伝導度は低下しほぼバックグラウンド値と同等となった。これは、土着微生物が栄養塩類を消費したこと、地下水流により通常の地下水が入り込み薄まったことあるいは密度差により下方に移動したことが可能性としては考えられる。

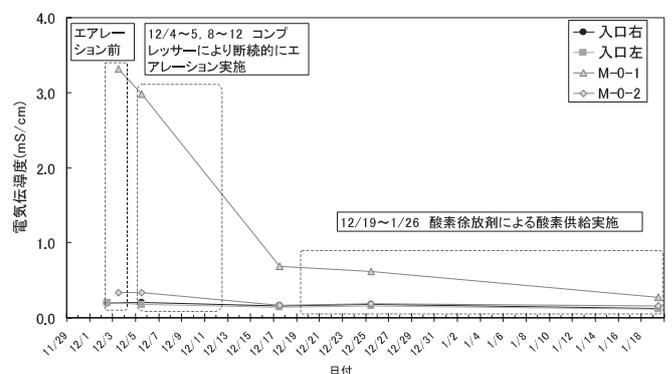


Fig. 11 栄養塩類注入後の電気伝導度の推移

## 5. まとめ

建屋下での油汚染を対象とし、水平井戸を用いた原位置バイオレメディエーションの一連の工程について実規模でフィールド施工実験を行い、以下のことを確認した。

- ・砂及びシルト質の被圧帯水層において、地盤面下 5m 及び 6.5m の深度に、水平区間 8m を有する水平井戸を、長手方向最大 70m の敷地条件下で精度良く埋設施工できた。
- ・上記水平井戸を 2.5m の間隔で 2 本平行に並べて施工できることを確認した。（地盤面下 5m）
- ・半径 1.5m に相当する 12.5m<sup>3</sup> の栄養塩類を透水係数  $4 \times 10^{-3}$  cm/s の地盤中に浸透注入することができた。
- ・ストレーナ部が 3 か所の同時注入システムで注入作業ができることを確認した。
- ・種々のモニタリングにより、栄養塩類の地盤中への浸透を間接的に確認した。

以上の結果より、水平井戸の施工や水平井戸からの地盤中への注入については実用的な精度で実施できることが確認された。一方、揚水については、地盤の透水性に大きく影響を受けることが示唆され、今後エアレーショ

ンとともに種々の地盤において実測データを収集する必要があると考えている。

今後は、今回得られた情報とともに数値シミュレーションの手法を組み合わせることで、複数の吐出箇所からの吐出割合を把握し、注入手法の最適化を図っていきたいと考える。また、建屋下の狭隘な環境下での地盤中のモニタリングの手法も合わせて開発し、原位置バイオレメディエーションシステムとして充実を図っていきたいと考える。

## 謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構「大学発事業創出実用化研究開発事業」の補助を受けて実施されたものである。この場を借りて謝意を示します。

## 参考文献

- 1) (社) 土壌環境センターホームページ  
<http://www.gepc.or.jp/>
- 2) 村上順也, 渡辺則雄, 門倉伸行, 佐々木静郎, 土路生修三, 久保幹: 原位置バイオレメディエーションを想定した水平ボーリングによる注入実験, 第 14 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, pp748-751, 2008.6

---

## Practical experiment of laying horizontal well and injection of nutrient for in situ bio-remediation

Junya MURAKAMI, Nobuyuki KADOKURA, Shizuo SASAKI, Shuzo TOROBU and Norio WATANABE

### Abstract

Purification of oil contaminated ground by using horizontal well has an advantage over that by using traditional vertical well in efficiency, because oil spreads over the surface of the groundwater in such ground. And, a building will be an obstacle and a vertical well can't be laid in oil contaminated ground which a building mounts on. A series of process of in situ bio-remediation including laying horizontal well and injection of nutrient using the horizontal well was experimented in non-contaminated site for testing practical workability of this method. Three horizontal wells were laid at GL-5m and -6.5m and nutrient was injected to the ground whose hydraulic conductivity was  $4 \times 10^{-3}$  cm/s in success.

Keywords: Oil, Horizontal well, Injection, In situ bio-remediation

---