原 著 論 文(通常論文)

# 重油に対する原位置バイオレメディエーションにおける 微好気帯の浄化効果に関する検討

# Efficiency in Microaerobic Zone with In-Situ Bioremediation for Heavy Oil Contaminated Aquifer

田中 宏幸<sup>1,2</sup>\*, 松久 裕之<sup>2</sup>, 野村 暢彦<sup>1</sup>, 中島 敏明<sup>1</sup>, 内山 裕夫<sup>1</sup> Hiroyuki Tanaka<sup>1,2</sup>\*, Hiroyuki Matsuhisa<sup>2</sup>, Nobuhiko Nomura<sup>1</sup>, Toshiaki Nakajima<sup>1</sup> and Hiroo Uchiyama<sup>1</sup>

 1 筑波大学大学院生命環境科学研究科 〒 305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1
2 鴻池組土木事業本部環境エンジニアリング部 〒 530-8517 大阪府大阪市北区梅田 3-4-5 毎日インテシオ \* TEL: 06-6343-3154

TEL. 00-0343-3134

 \* E-mail: tanaka\_hy@konoike.co.jp
<sup>1</sup> Graduate School of Life and Environmental Science, University of Tsukuba, 1–1–1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305–8572, Japan

<sup>2</sup> Konoike Construction CO., LTD. Civil Engineering Department Environmental Services Division, 3–4–5 Umeda, Kita-Ku, Osaka 530–8517, Japan

(原稿受付 2012年8月20日/原稿受理 2012年10月18日)

This paper describes efficiency of in-situ bioremediation for oil contaminated aquifer. In this experiment, the column simulated aquifer was used. The target of purification was A heavy oil, and the solution of oxygen and nutrition salts supplied for 132 days. As a result, oil in contaminated soil was decreased 55% of initial concentration as total petroleum hydrocarbon (TPH) 868 mg/kg\_dry. Dissolved oxygen (DO) was consumed by passage in soil porosity, and microaerobic zone which cannot fully maintain aerobic conditions was formed. It was confirmed that tendency of large variation of oil in this zone. In order to grasp the uncertainty of this purification effect, the probability density distribution of oil concentration was evaluated. The result showed that reduction of 50% could be expected from median, but, there is possibility of low reduction effect. Accordingly, it is necessary to consider microaerobic zone at the design of in-situ bioremediation.

**キーワード**:原位置, バイオレメディエーション, 油, 好気性, 土壌カラム **Key words:** in-situ, bioremediation, oil, aerobic, soil column

# 1. はじめに

土壌地下水汚染の原因物質のひとつである油分の影響 には、発がん性、非発がん性としての毒性をあげること ができ、欧米では土地利用形態別の規制値が設定されて いる<sup>10</sup>。日本においても法規制ではないが油汚染対策ガ イドライン<sup>8)</sup>が策定されており、生活環境上の観点から 油膜・油臭が問題とされている。

油汚染の対策方法には、熱分解,洗浄,化学的酸化分 解,生分解(バイオレメディエーション)が主な処理法 として知られている。このうち生分解は最も経済性に優 れているうえ,化学的酸化処理とともに原位置処理とし て適用が可能な工法である。

飽和帯水層の油汚染を対象とした原位置バイオレメ ディエーションは、積極的なバイオスパージングと、促 進型 MNA のような消極的な方法に分類される。MNA とは科学的自然減衰(Monitored Natural Attenuation) と訳され,汚染サイトの帯水層で地下水中の汚染物質 が,吸着,揮発,分解等により自然に低減する過程の科 学的な管理を汚染サイトの対策に含める概念で,これら の自然の汚染低減作用のうち分解作用を助長させる手法 を促進型 MNA としている。積極的および消極的のいず れの浄化方法においても,酸素と栄養塩等を地盤に供給 し,分解微生物を活性化させるものであるが,前者では 酸素の供給量は多いものの気泡による土壌間隙の閉塞が 課題となっており,また一方で後者では浄化速度が低い という難点がある<sup>9,13</sup>。

油の好気性原位置バイオレメディエーションについ て,現場における研究は1990年代から取り組まれてお り,例えば,Hunkelerら<sup>2)</sup>の地下水中の油分や電子受 容体の濃度分布,Machackovaら<sup>9</sup>の浄化対象範囲全体 の油分や分解速度の推移の調査があげられる。制約の多 い現場での研究を補うべく詳細な浄化機構を解明するた めに,現場の条件を再現した室内試験による研究も取り 組まれている。Hess ら<sup>4</sup>は,軽油を対象に電子受容体 として酸素と硝酸イオンの消費量と形態別の有機分の増 減をもとにして,微生物活性の物質収支を試みている。 また,Richardson ら<sup>13)</sup>は,多環芳香族炭化水素(PAH) を対象に酸素,PAH,微生物の経時変化について非促 進系との比較評価を行った。油汚染に対する原位置バイ オレメディエーションでは好気性の処理が主流と考えら れるが,油種,濃度,栄養性物質等によって浄化効果は 異なるうえ,種々の指標による検討は充分とはいえない 状況である。

以上をふまえ本報では、A 重油汚染において地下水の 移動に応じた酸素消費の挙動と、それに伴う油分の低減 効果について検討を行った。また、報告例の少ない油臭 を汚染の指標に含め、油分濃度と油臭の関係についても 把握を試みた。

### 2. 実験方法

#### 2.1 カラム

実験には、長さ100 cm、厚さ5 mm、内径 66 mm の アクリル樹脂製のカラムを使用した(Fig. 1)。培養液を 通水させるために、通水する入口側から送液ポンプまで を内径 4.5 mm、厚さ1 mm、長さ30 cm のバイトン製 チューブを接続した。ポンプから培養液の貯留槽までは 内径 0.5 mm、厚さ1 mm、長さ1 m のバイトン製チュー ブを使用した。出口側では、内径 6 mm、厚さ1 mm、 長さ20 cm、次いで内径 1.5 mm、厚さ1 mm、長さ1 m のバ イトン製チューブを接続した。送液には、チュービング ポンプとして Cole-Parmer Instrument Co. 製 7553-70 型 を所定の流量に設定のうえ使用した。また、カラム側面 には、10 cm 間隔でサンプリングポートを設置した。こ れらの位置は、流向軸を中心に 45° ずつ場所をずらすよ うにした。



Fig. 1. Schematic of column set-up.

#### 2.2 土壌

カラムに充填した土壌には、ふるいによって105~ 800 µm の粒径のものを分取した川砂を使用し、このと き JIS A 1204<sup>12)</sup> に従って測定した粒径分布は Fig. 2 に 示すものとなり、底質調査方法<sup>7)</sup> に従い測定した有機物 量は 1.1%、 蛍光 X 線分析法による元素組成は Table 1 に示す通りであった。

上記の砂に A 重油を 1,000 mg/kg となるように混合 して作製した模擬汚染土壌を,カラムに充填する際には 仮比重を 1.7 とし,カラムの蓋と土壌の間には圧縮後に 約 5 mm 厚となるようにグラスウール製の不織布を挟み 込んだ。土壌の充填後,地盤工学会  $^{5,17}$ の方法を参考に 測定した透水係数は  $1.1 \times 10^2$  cm/sec で, NaCl のトレー サーの破過曲線から推定  $^{5,17}$  される間隙率は 0.4 であっ た (Table 2)。A 重油は軽油の一種で,芳香族と脂肪族 炭化水素がほぼ同比率で含まれ,油臭の強い特性を有す る。

さらに充填前に, 植種源として, 酵母エキス 1g, A 重油 100 μL, 1,000 mL に pH 6.8 となるように溶解させ, さらに大阪市某所で採取した油分等の使用履歴のない表 土を 10g 添加し1週間好気的に振とう培養した溶液の 上清を 20 mL 混合した。



Fig. 2. Particle size distribution of soil <sup>12</sup>).

Table 1. Elemental composition of soil with X-ray fluorescence analysis.

Element	wt%_dry
Na	_
Mg	1.1
Al	9.8
Si	65.1
Κ	7.4
Ca	2.1
Ti	1.1
Mn	0.3
Fe	13.2

Table 2. Terms and conditions of soil for column test.

Index	Value
Soil quality	Sandy soil $~(105{\sim}800~\mu m)$
Organic matter content <sup>10</sup>	1.1%
Bulk density	1.7
Coefficient permeability 11,12)	$1.1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$
Porosity <sup>11,12)</sup>	0.4

# 2.3 培養条件

カラムには、酸素や栄養塩の溶液を連続的に上向流で 通水した。酸素は、培養液貯留槽の中にエアーポンプを 用いた曝気によって溶解させた。栄養塩溶液は、NH4Cl 0.1 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.1 g, 酵母エキス 0.1 g, 微量金属濃縮 液1mL, ビタミン類濃縮液1mL, 水道水1,000mL, pH 6.8 に 調 製 し た。 微 量 金 属 濃 縮 液 の 組 成 は, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 3.0 g, MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.5 g, NaCl 1.0 g, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.1 g, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 0.1 g, CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 2.0 g,  $ZnCl_2 0.1 g$ ,  $CuSO_4 \cdot 5H_2O 0.01 g$ ,  $AlK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ 0.001 g, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.001 g, Na<sub>2</sub>Mo<sub>4</sub> • 2H<sub>2</sub>O 0.01 g, (NH4)2Ni(SO4)2·6H2O 0.02g, 滅菌蒸留水 1,000 mL とし た。ビタミン類濃縮液の組成は、ビオティン2mg、葉 酸 2 mg, ピリドキシン・塩酸 10 mg, チアミン・塩酸 5 mg, リボフラビン5 mg, ニコチン酸5 mg, DL-パン トテン酸カルシウム 5 mg, ビタミン  $B_{12}$  0.1 mg, p-アミ ノ安息香酸 5 mg, 滅菌蒸留水 1,000 mL とした。

カラムと培養液貯留槽は 20℃ の暗所に設置し,上記 の溶液の通水量は,通水流量と間隙率から算出される実 流速を概ね 0.03, 0.3, 1.0, 0.1 cm/min の順とし,それ ぞれ約 20 日以上となるように維持させた。

#### 2.4 分析方法

各サンプリング・ポートから採取した間隙水の溶存酸素(DO)は、堀場製作所製測定器 D-25 及び電極 9520 型を使用した隔膜電極法によって測定した。このとき、 カラムでの通水を継続させた状態で 22 mL 容量の樹脂 製容器に満たした検液に電極を浸漬させ、マグネティッ クスターラーにより緩やかに撹拌しながら指示値の安定 した時点で読み取った。

油分は、二硫化炭素抽出液をガスクロマトグラフで分 析する EPA 8015B<sup>15</sup> に従った全石油系炭化水素(TPH) として定量した。

油臭は、油汚染対策ガイドライン<sup>8)</sup>に従い、25℃でのヘッドスペースガスに対する人間の嗅覚による0~5の6段階の臭気強度として評価した。

菌数は、平板希釈法により測定した。寒天培地は、 NH<sub>4</sub>Cl 1.0 g, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 0.34 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 0.5 g, Agar 15 g, 蒸留水 1,000 mL, pH 6.8 に調整後, A 重油を 100  $\mu$ L 添 加しマグネティックスターラーで撹拌しながらホモジナ イザーで5分間乳化処理した溶液を 121  $\mathbb{C}$  で 20 分間, 加圧蒸気減菌し、さらに上述の微量金属濃縮液 10 mL, ビタミン類濃縮液 10 mL を混合したうえでシャーレに 分注固化させて作製した。

# 3. 結果

カラムの入口側からの距離に応じた DO の変化を, 平均流速条件ごとに分類して Fig. 3 に示す。これによる と,流入孔からの距離(通過距離)の増加につれ DO は土壌中で指数関数的に消費され低下したことがうかが える。また,流速の増加に伴い,DOの到達距離は大き くなった。流速が 0.01 cm/min, 0.1 cm/min, 0.3 cm/ min の場合には,流入した DO は 20 cm までで急速に 消費され,40 cm 以降での消費は緩やかになった。1.0 cm/ min で,経過日数とともに DO の到達距離は大きくな り,0.01 cm/min,0.1 cm/min,0.3 cm/min のときには 反対の傾向を示した。

土壌の油分では、全体として処理前と較べてカラム全体で55%と低減しているが、通過距離との関係性は明確ではなかった(Fig. 4)。

土壌の油臭では,処理前のTPH 868 mg/kg\_dryのと きに臭気強度4であったのに対し,132日目の20 cm と 40 cm では4,60 cm では2,80 cm では3,100 cm では 2 であった。TPH で最も低かった20 cm では油臭の低減 が確認できず,20 cm よりも高いTPH の存在する40~ 100 cm のほうが油臭が低い結果となった(Fig.5)。

また,各ポートからの間隙水では開始前に4であった 油臭は,49日目で20~100 cm のいずれでも確認されな くなった。その間,通過距離と油臭の低減傾向には正の 相関があった(Fig.6)。

菌数は, 土壌では開始前で 1×10<sup>6</sup> cfu/g 程度であった が, 132 日目では 10 倍以内の僅かな増加が確認された (Fig. 7)。各ポートからの間隙水では, 開始前から 1× 10<sup>5</sup>~1×10<sup>6</sup> cfu/mL で増減の傾向は明確ではなかった (Fig. 8)。

# 4. 考 察

20 cm までの通水距離と 40 cm 以上での DO の消費速 度の違いの原因には,供給される DO の大きさ,すな わち酸素と呼吸酵素の基質親和性の影響と考えられる。 硫酸還元菌における硫酸イオン濃度と活性の関係<sup>3)</sup>とし て報告されていることもこうした現象の根拠のひとつに あげられる。

しかし、今回の実験結果で認められた 0.03~0.3 cm/ min と 1.0 cm/min の場合とで相反する経時的な DO の 消費の挙動に関しては、Richardson ら<sup>14)</sup> による DO の 消費速度は経時的に小さくなったとの報告では説明でき ないもので、消費速度の傾向が一定ではないことを示唆 している。つまり、低流速では微生物や土壌中の鉄分の ような還元性成分による消費が供給速度を上回り、高流 速になるにつれて供給が卓越することを裏付けている。 Fig. 8の各ポートからの間隙水における生菌数が, 1.0 cm/min の流速条件の期間(48 ないし 62 日)には低 減傾向にあり、微生物による DO の消費量が低下した と考えられる。しかし, 著者らが実施した実験結果にお ける生分解の非促進系の DO 消費の傾向から、今回の ような処理条件では還元性成分による消費が微生物由来 を上回ることが確認されており(データ未記載), 高流 速条件における微生物消費の増減の影響は小さいものと



Fig. 3. DO profiles column over time at rate of flow 0.03 cm/min (a), 0.1 cm/min (b), 0.3 cm/min (c) and 1.0 cm/min (d).



Fig. 4. TPH in soil before and after 132 days of column operation.

考えられる。

各ポートからの間隙水では,49日目で油臭が検出さ れなくなったが,土壌では132日目でも臭気強度2~4 で検出されていた。各ポートからの間隙水における油臭 は連続して行った通水に伴う希釈効果も含まれており, 処理の停止により油臭成分が再び間隙水に溶出する可能



Fig. 5. Relation between TPH and oil odor of soil.  $\bigcirc$  , 0 day ; lacksquare , 132 days.

性がある。日本の油汚染対策ガイドラインに沿った対応 では、地上での油臭が1~2以上で問題であるとされて いる。不飽和層に油分が存在しない場合、飽和層の油臭 成分が減衰せずに地表面の大気に侵入するというのが、 油分による影響を考えるうえで安全側のシナリオとなる

田中 他



Fig. 6. Oil odor profiles in effluent water from sampling ports of column over time (a) and by distance (b).

が、TPH で 868 mg/kg\_dry の A 重油汚染に対し、4.5 ヶ 月以上の処理が必要であるといえる。日本では浄化目標 を 500~2,000 mg/kg とする施工例が見受けられるが、 A 重油は油臭の強い成分を多く含むため、浄化目標を 500 mg/kg 以下とする場合も考えられる。

油臭の原因となる成分は、A 重油では、1~3 環の芳 香族有機化合物質としてベンゼン、トルエン、エチルベ ンゼン、キシレン、ナフタレン、フェナントレン、アン トラセン等が考えられる。とりわけ、臭質や嗅覚閾値か らナフタレンの寄与が大きい<sup>11)</sup>と推定できるものの、 それらの存在量については分析を行っておらず、また、 TPH のクロマトグラムからも増減についての情報を得 ることはできなかった。その一方で、各ポートからの間 隙水中に 0~20 mg/L 検出(データ未記載)されていた 全有機炭素量(TOC)には、通過距離と正の相関を見 出すことができ、また、実験期間中の各ポートからの間 隙水の臭質の変化が観測されたことから、通過距離の増 大に伴い生物活動に関連して発生した臭質の異なる物質 による油臭の掩蔽も示唆される。

油臭の低減効果に関する研究は多くないものと考えら れ,既往研究との比較による実験結果の妥当性の検証に





Fig. 8. CFU over time in effluent water from sampling ports of column.

は至らなかった。著者らが、これまでに油臭と TPH の 関係を検討した複数の事例においても、強い相関性を見 いだせない場合があり、人間の嗅覚による評価で油種や 諸条件によって臭気の強度や臭質が異なることからも、 定量的な評価とするには課題は多く、今後もデータの蓄 積が必要である。

浄化事業の計画には、油臭よりも定量的な TPH が施 工管理上の指標に適しているが、今回の結果からは、通 水距離、すなわち DO 消費量と TPH の関係は強いもの とはならなかった。こうした傾向は、著者らの関東ロー ム汚染土による別の実験(データ未記載)でも確認され ており、好気性ではないが Hunkeler ら<sup>1</sup>によっても示 されている。また、Hess ら<sup>4</sup>の研究では、カラム内の 酸化還元的環境を好気帯、微好気帯、嫌気帯の3種類に 分類しており、微好気帯は DO を 0.3 mg/L 未満と定義 している。Fig. 3 によると、今回の実験では流速 1.0 cm/



Fig. 9. Addition amount of supply of DO in the soil of a column.

min の場合を除くと 40~100 cm を徴好気帯とみなすこ とができる。この 40~100 cm では部分的に高い DO を 示した地点もあるが, Fig. 9 に示した DO の積算供給量 からも 40~100 cm は 20 cm とは異なる DO 供給条件に 属し, 微好気帯と分類することとした。

この微好気帯でのばらつきの原因には、まず油分分布 の不均一、そして酸素や栄養塩の供給の不均一をあげる ことができる。

前者については, 模擬汚染土の処理前で TPH 754~ 890 mg/kg\_dry, 標準偏差 68 mg/kg\_dry (n=3) のばら つきを含む油分を処理対象としたものであったが, 徴好 気帯でのばらつきは汚染の過程に由来する不均一を上回 るものといえる。

また,後者では,細粒分を除いた砂質土の使用により 1.1×10<sup>-2</sup> cm/sec という透水係数が得られており,水み ちに起因して不均一な物質供給の生じる可能性としては 大きいとはいえない。ちなみに,原位置浄化に適するの は一般に 1×10<sup>-2</sup>~1×10<sup>-3</sup> cm/sec の条件とされているこ とから,今回の通水条件は良好な透水性を維持できてい たことになる。実態としての物質供給の不均一性の把握 には至らなかったが,Fig.3 (d) に示した 1.0 cm/min の 場合の 40~100 cm における DO の挙動では規則性を逸 脱する傾向が認められており,流速の増大に伴い水みち の形成された可能性は否めない。

第3の要因として,生物活性の不均一性が考えられる が,今回の菌数の結果からは生物活性の変化の情報は得 られなかった。また,カラムからの流出水の栄養塩濃度 からは消費量に対して充分な供給を維持していた(デー タ未記載)が,嫌気的な呼吸や発酵に必要な電子受容体 の濃度を測定しなかった。しかし,Hunkeler ら<sup>3)</sup>の報 告から,好気性分解以外の生物活性の影響は少なからず 生じていたものと推定できる。

さらに、この微好気帯では TPH のばらつきが大きく、 浄化の不確実性の一因となることが懸念されるため、吉 田と中西<sup>16)</sup>の方法を参考に、表計算ソフト EXCEL2010 の NORMINV 関 数 及 び RAND 関 数 を 利 用 し、40~ 100 cm の TPH における幾何平均値と幾何標準偏差をも とに 100 回の乱数処理を行うことにより、確率密度分布



Fig. 10. Uncertainty of the oil decrease in microaerobic zone. Error bar indicates the standard deviation derived from triplicate samples.

を推定した。その結果を Fig. 10 に示すが、微好気帯で の 132 日 目 の TPH は、95 % 845 mg/kg\_dry, 中央 値 430 mg/kg\_dry, 5% 188 mg/kg\_dry となった。中央値か らは好気帯の 20 cm における低減率の 0.63 倍が見込め るものの、95%値では開始前から顕著な低減効果の得ら れない部分の生じる不確実度の予測が可能となった。

本研究では、飽和帯水層の油汚染を対象とした原位置 浄化を想定したカラム試験を行い通水に伴う油分の低減 効果と DO 消費の傾向を把握した。第一の結論は、132 日の好気性処理によって TPH が 868 mg/kg\_dry から平 均で55%低減した一方で、微好気帯ではばらつきの大 きい傾向が確認されたことである。この現象についての 乱数処理による解析の結果、微好気帯では顕著な低減傾 向の得られない可能性が示唆された。また、各ポートか らの間隙水の油臭は49日目で感じられない水準となっ たものの、土壌の油臭は0~5の6段階の臭気強度で開 始前の4から処理後で2~4と幅があり,また TPHの 相関は低かった。さらに、DO は通過距離の増加につれ 消費されたが、DO の低い場合の消費は高 DO の条件下 より緩やかであった。さらに流速 0.03~0.3 cm/min の 場合には経時的に消費速度が高くなる一方で, 1.0 cm/ min では反対の傾向が確認された。

原位置バイオレメディエーションに伴い DO と栄養 塩の溶液を連続して供給することで得られる油分の低減 効果には,生分解と希釈が含まれる。今回は,生分解の 非促進系との比較による希釈作用の把握はできなかっ た。希釈作用によって油分は下流側へ拡散していくと考 えられるが,今回の実験による油分の低減が全て希釈す なわち洗浄作用によるものと仮定すると,油分の除去量 と積算通水量から算出できる単位通水量に対する TPH の平均除去量は 5.2 mg/L となった。しかし,実験中に 数回測定した各ポートからの間隙水の TPH ではいずれ も定量下限(1 mg/L)未満であったため(データ未記 載),希釈作用による低減量の把握には至らなかった。

今回の結果から、確実に好気性分解の効果を得ること

ができるのは, 0.3 mg/L 以上となるような DO を安定 して供給できる範囲といえる。微好気帯で確認された浄 化効果の不均一性は局部的な発生の可能性を示唆するも ので,全体としては浄化が進行することには変わりはな い。また,このような現象への対策としては,処理期間 の増加,あるいは DO 供給量の増大から浄化の確実性 を向上させることが可能となる。こうした改善法の確立 のためには,長期間の室内実験や実施工による油分挙動 の経時的な変化の検証が今後の課題といえ,今後も,合 理的で適切な汚染低減に貢献できるよう努める所存であ る。

#### 文 献

- Hunkeler Daniel, Dominik Jörger, Katharina Häberrli, Patrick Höhener, and Josef Zeyer. 1998. Petroleum hydrocarbon mineralization in anaerobic laboratory aquifer columns. Journal of Contaminant Hydrology. 32: 41–61.
- Hunkeler Daniel, Patrick Höhener, and Josef Zeyer. 2002. Engineered and subsequent intrinsic in situ bioremediation of a diesel fuel contaminated aquifer. Journal of Contaminant Hydrology. 59: 231–245.
- 3) Vroblesky Don A., Paul M. Bradley, and Francis H. Chapelle. 1996. Influence of eletron donor on the minimum sulfate concentration required for sulfate reduction in a petroleum hydrocarbon-contaminated aquifer. Environ. Sci. Technol. 30: 1377–1381.
- Höhener Hess, P., D. Hunkeler, and J. Zeyer. 1996. Bioremediation of a disel contaminated aquifer: simulation studies in laboratory aqufer columns. Journal of Contaminant Hydrology. 23: 329–345.
- 5) 地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会編. 2004. 4.4.3 調査・解析手法の評価, pp. 803-804. 地盤調査の方法と解

説, 地盤工学会.

- 6) Machackova Jirina, Zdena Wittlingerova, Kvetoslav, Jaroslav Zima, and Ales Linka. 2008. Comparison of two methods for assessment of in situ jet-fuel remediaion efficiency. Water Air Soil Pollut. 187: 181–194.
- 7) 環境省. 2001. p. 21. 底質調查方法.
- 8) 環境省. 2006. 油汚染対策ガイドライン.
- Shukla Keshav Prasad, Nand Kumar Singh, and Shivesh Sharma. 2010. Bioremediation : developments, current practices and perspectives. Genetic Engineering and Biotechnology Journal 2010: 1–20.
- Massachusetts Department of Environmental Protection. MCP Method 1: Soil Category S-2 Standards. http://www. mass.gov/dep/cleanup/laws/0975\_6b.htm
- 永田好男,竹内教文. 1990. 三点比較式臭袋法による臭気 物質の閾値測定結果. 日本環境衛生センター所報. 17:77-89.
- 12) 日本工業規格. 2008. JIS A 1204 土の粒度試験方法.
- 13) Brown Richard A., Robert E. Hinchee, Robert D. Norris, and John T. Wilson. 1996. Bioremediation of petroleum hydrocarbons : a flexible, variable speed technology. Remediation. summer 1996 : 95–109.
- 14) Richardson Stephen D., Maiysha D. Jones, David R. Singleton, and Michael D. Aitken. 2012. Long-term simulation of in situ biostimulation of polycyclic aromatic hydrocarboncontaminated soil. Biodegradation. 23: 621–633.
- United States Environmental Protection Agency. 1996. SW-846 method 8015B Total petroleum hydrocarbons (TPH) as gasoline and diesel.
- 16) 吉田喜久雄,中西準子. 2006. 疑似的なモンテカルロ・シ ミュレーション法による HQ の推定, pp. 60-62. 環境リ スク解析入門 [化学物質編],東京図書.
- 17)「続・土壌・地下水汚染の調査・予測・対策」編集委員会. 2008. カラム試験による移流分散特性評価法, pp. 59-61. 続・土壌・地下水汚染の調査・予測・対策 1, 地盤工学 会.