

油汚染土壌バイオパイル処理における効果的な酸素供給方法の解析的検討

株式会社熊谷組 正会員 ○河村 大樹 正会員 佐々木 静郎
 正会員 村上 順也 正会員 門倉 伸行
 立命館大学 石森 洋行

1. 目的

油汚染土壌の微生物分解処理は油の酸化反応であり、その処理効率は、この酸化反応に要する酸素を適切に供給できるかどうかで左右される。本研究では油汚染土壌全体に均質に通気するためのシステムと運転条件を検討するために、地盤工学に基づく油汚染土壌内の物質移動と、流体力学に基づく暗渠内の物質移動を連成した数値シミュレーションを行った。その方法と得られた知見について、以下に報告する。

2. 実験概要

バイオパイルに用いる模擬汚染土壌は、現地土壌に対して所定の A 重油、栄養塩や有機資材、及び微生物を投入して混合することにより作製した。好気性微生物のためのエア供給は、パイル内に予め設置した有孔管を通して空気を吸引することで、パイル内に周囲の空気を取り込む吸気方式で実施した。また、パイル内には、土中酸素濃度を計測するための酸素センサーを上端から 30cm 地点に埋込み、連続計測を行った。実験条件は、(a)模擬汚染土壌のみを盛土したバイオパイル(コントロール)、(b)模擬汚染土壌に栄養塩を添加し、土壌微生物を活性化する、スティミュレーション条件のバイオパイル、(c)模擬汚染土壌に栄養塩と石油分解菌 *Rhodococcus sp.*NDKK6 株を添加したオーギュメンテーション条件のバイオパイル3種類を検討した。¹⁾図-1には、バイオパイルに埋設した酸素センサーから得た酸素濃度を示した。本研究では、微生物分解が顕著であった実験開始後 40 日間の酸素濃度プロファイルに着目し、そのデータから数値解析により、酸素消費速度を見積もる。

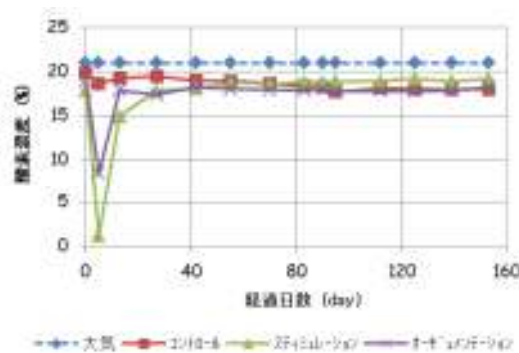


図-1 全期間中における土中酸素濃度

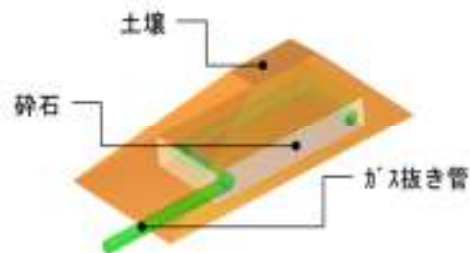


図-2 解析空間

3. 解析方法

バイオパイル内の酸素の挙動をシミュレートするためのモデルとして(1)土壌中

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g S_g) + \nabla \cdot \left[-\rho_g \frac{k_{rg} k}{u_g} (\nabla p_g + \rho_g g \nabla z) \right] = 0 \quad (1)$$

のガス流れを表すダルシー則(2)碎石層内のガス流れを表すブリンクマン方程式、(3)

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g u_g) = 0 \quad \frac{\rho_g}{\phi} \frac{\partial u_g}{\partial t} + \frac{u_g}{k_{rg} k} u_g = \nabla \cdot \left[-\rho_g I + \frac{1}{\phi} \left[u_g (\nabla u_g + (\nabla u_g)^T) \right] \right] + F \quad (2)$$

有孔管内のガス流れを表すナビエ-ストークス方程式及びこれらから求まる流れ場にして(4)大気中の酸素成分が輸送されるのを表す移流拡散方程式を用いた。

$$\phi \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g u_g) = 0 \quad \rho_g \frac{\partial u_g}{\partial t} + \rho_g (u_g \nabla) u_g = \nabla \cdot \left[-\rho_g I + u_g (\nabla u_g + (\nabla u_g)^T) \right] + F \quad (3)$$

$$\frac{\partial (c_{O_2} \theta_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (-\theta_g D_e \nabla c_{O_2} + u_g c_{O_2}) = -\lambda \frac{S}{1+S} c_{O_2} \quad (4)$$

ここで、 ρ_g :ガスの流体密度 (= 1.0 kg/m³)、 S_g : ガス飽和度、 k_{rg} : 透気係数比、 K : 固有透過度 (m²)、 μ_g : ガスの粘性係数 (= 1×10⁻⁵ Pa・s)、 p_g : ガス圧 (Pa)、 ϕ : 土の間隙率、 u_g : ガス流速 (m/s)、 F : 体積力 (N/m³)、 C_{O_2} : 酸素濃度 (mol/m³)、 θ_g : 体積気相率、 D_e : 実効拡散係数 (m²/s)、 λ : 酸素消費速度係数 (1/s)、 S : 基質濃度 (mg/kg) を表す。解析空間を図-2 に示す。バイオパイルの寸法は、底辺 2m×2m、高さ 75cm で、実験対象であるバイオパイルの左右対称性を利用し、その半分を解析空間とした。初期条件は、バイオパイル内のガス圧は大気圧であり、ガス流速はゼロ、また酸素濃度を 21%とした。またガス抜き管の先端には、実験を行った時の吸気速度を与えた。境界条件は、バイオパイル表面ではガス圧を大気圧、酸素濃度を 21%とした。

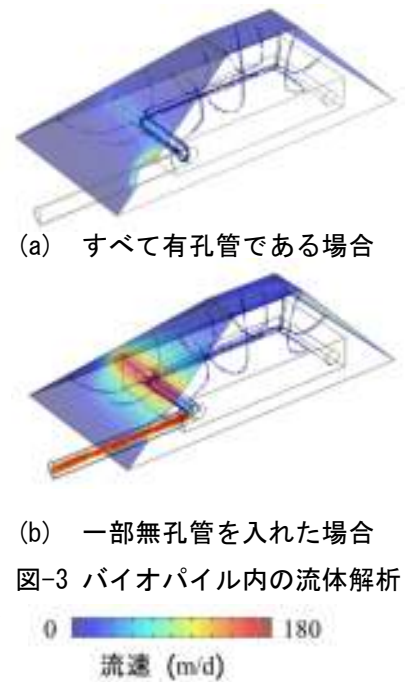
キーワード 油汚染土壌, 数値シミュレーション, 微生物分解, 土中酸素濃度, バイオパイル処理,

連絡先 〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1043 株式会社 熊谷組 技術研究所 TEL 029-847-7505

4. 解析結果

(1)有孔管の影響

図-3 は、図中の吸気箇所から 220L/min で吸引した場合のバイオパイル内に侵入する大気の流れ速度分布を表す。コントラストは速度の絶対値を表し、軌跡は流線を示す。流線を見ると、バイオパイル表面から侵入した大気は、バイオパイル内を移動し、碎石層内に埋設されたガス抜き管を通して吸引箇所まで誘導されていることがわかる。この時ガス抜き管をすべて有孔管にするか一部無孔管にするかによって地表面からの大気の侵入速度に著しい違いが現れる。図-3(a)の場合では、バイオパイル表面から出ているガス抜き管のみを有孔管(ストレーナあり)にすると、負圧がバイオパイルの深部に伝わらず、吸引箇所から遠い位置の大気は、引き込めていないことが図中のコントラストから読み取れる。一方、図-3(b)の場合では、バイオパイル表面から出ているガス抜き管のみを無孔管(ストレーナなし)にすると、吸引箇所が高められた負圧が消散することなくその負圧をバイオパイル中心部に与えることができているので、結果としてバイオパイルのどの表面からも均等に大気を吸引できる。



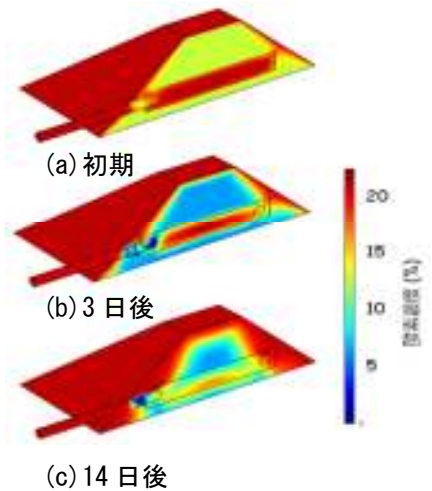
(a) すべて有孔管である場合

(b) 一部無孔管を入れた場合

図-3 バイオパイル内の流体解析

(2)酸素消費速度から見た最適な吸引量の検討

実験開始から 40 日までの酸素濃度プロファイルから、酸素消費速度を逆解析し、次に該当バイオパイル中で発生している酸素消費速度を上回るような最適大気吸引速度を評価した。実験結果である酸素濃度プロファイルから酸素消費速度を求めるために、式(4)中の酸素消費速度係数 λ を未知数として、数値シミュレーションから計算される酸素濃度が図-1 の実験値に合うような λ を同定した。このとき、式(4)中の基質濃度 S については実験期間中におけるバイオパイル内の油分濃度を代入した。図-4 に、酸素消費速度係数 $\lambda=0.5d^{-1}$ の場合におけるシミュレーション結果を示す。実験開始直後では、図-4(a)に示すようにバイオパイル内の酸素濃度は大気中のそれと同じ 21% であるが、実験開始 3 日後には、油の微生物分解が進むにつれ、バイオパイル内の酸素濃度が消費されて、図-4(b)に示すような油汚染土壌中心部の酸素濃度は 5% 程度まで低くなる。さらに油の分解が進むにつれて基質濃度(すなわち、油濃度)の低下に伴い微生物分解の活性も低下する。酸素消費速度は少なくなるので、結果として大気からの酸素供給量が上回ることとなり、図-4(c)のようにバイオパイル内の酸素濃度は上昇する。図-5 には、このシミュレーションにおける酸素濃度の時間変化を示した。実際の実験結果であるスティミュレーションまたはオーギュメンテーション時における酸素濃度のモニタリング結果と同様のプロファイルを予測計算できていることがわかる。



(a) 初期

(b) 3 日後

(c) 14 日後

図-4 バイオパイル内の酸素濃度分布シミュレーション

5. まとめ

本研究では、地盤工学と流体工学を組み合わせた解析を行うことにより土壌層、碎石層、ガス抜き管までの一連となったシミュレーションが可能となり、ガス抜き管のストレーナの有無によるバイオパイルの通気特性が異なることを表現できた。また、バイオパイル表面から出ているガス抜き管を無孔管にすることで、バイオパイル全体から均質に吸気できることも分かった。

参考文献

1)村上順也他：沖縄県内土壌を用いた模擬汚染土壌のバイオ浄化処理実験土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集 157-158 (2013)

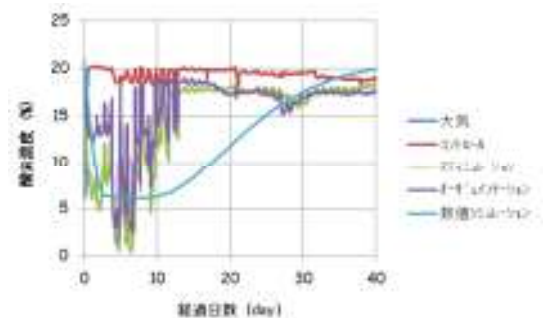


図-5 土中酸素濃度の
実験値と計算値の比較