

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 (その2)

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は油の酸化反応であるため、その処理効率は適切に空気を供給できるかに左右される。本研究では、簡易かつ確実に酸素を供給するために、バイオパイルを油圧ショベルなどによって切り返すことを想定し、バイオパイル内に所要の酸素濃度を維持するための最適な切り返しのタイミングを把握するためのビーカレベルでの実験を行った。その方法と得られた知見に関して、以下に報告する。

2. 研究方法

2.1 酸素消費速度試験

土壌(砂壤土)に対して、所定量のA重油、栄養塩、有機資材や石油分解菌(*Rhodococcus erythropolis*.NDKK6株)を投入し混ぜ合わせることで模擬汚染土壌を作製し、酸素消費速度試験に供した。1,000 mL容のポリ瓶に模擬汚染土壌を約250 g入れ、ボールバルブを取り付けたキャップで密閉した(図-1)。それぞれの模擬汚染土壌につき供試体を7つ作製し、温度20℃、湿度80%の条件で養生した。所定日数の経過ごとに、ポリ瓶内に含まれるガス濃度の測定(ポータブルガス濃度計(Geotech社:GA5000)、図-2)及び、模擬汚染土壌の油分濃度と石油分解菌数の測定を行った。油分濃度の測定方法はIR法、石油分解菌の測定方法はReal time PCR法である。なお、ガス濃度は、メタン、二酸化炭素、酸素、硫化水素、一酸化炭素、および水素について評価を行った。得られたガス濃度の経日変化から、酸素や二酸化炭素等の発生量(または消費量)を次式により算出した。

$$c_{ij} = \frac{\chi_{ij}}{RT} P \quad (1) \quad r_{ij} = \frac{1}{t_j - t_{j-1}} \left(\frac{c_{ij} V_j}{m_{sj}} - \frac{c_{i,j-1} V_{j-1}}{m_{s,j-1}} \right) \quad (2)$$

ここで、 i : ガスの種類を表わすインデックス、 j : 測定時刻を表わすインデックス、 c_{ij} : ガス種 i の時刻 j 番目における濃度 (mol/L)、 χ_{ij} : ガス種 i の時刻 j 番目におけるモル分率、 P : ガス全圧 (= 101,325 Pa)、 R : 気体定数 (= 8.314 J/mol/K)、 T : ケルビン温度 (K)、 r_{ij} : ガス種 i の時刻 j 番目におけるガス発生速度 (mol/kg/day)、 t_j : 時刻 j 番目までの経過時間 (day)、 m_{sj} : 模擬汚染土壌の乾燥質量 (kg)、 V_j : ガスの体積 (m^3) を表わす。

2.2 数値シミュレーション

バイオパイル内を好気性に維持するための最適な切り返しのタイミングを設定するために、上記で得られた酸素消費速度を考慮してバイオパイル内のガス濃度を数値シミュレーションにより予測した。ガス種には、支配的な成分として二酸化炭素、酸素、および窒素の3成分とした。それぞれ、以下を基礎方程式とした。

$$\nabla \cdot \left(-\rho_g \frac{k_{rg} K}{\eta_g} (\nabla p_g + \rho_g g \nabla z) \right) + Q_g = 0 \quad (3) \quad \frac{\partial c_i}{\partial t} = \nabla \cdot (\phi D_i c_i) + \rho_d r_i \quad (4)$$

ここで、 ρ_g : ガスの流体密度 (kg/m^3)、 η_g : ガスの粘性係数 ($Pa \cdot s$)、 p_g : ガス圧 (Pa)、 k_{rg} : 比透気係数、 K : 固有透過度 (m^2)、 z : 高さ (m)、 g : 重力加速度 ($= 9.8 m/s^2$)、 ϕ : 間隙率、 ρ_d : 土の乾燥密度 (kg/m^3)、 D_i : ガス種 i の拡散係数 (m^2/s) を表わす。また、 Q_g ($kg/m^3/s$) は土の単位時間・単位体積あたりのガスの源泉であり、 $Q_g = \rho_d (M_{CO_2} r_{CO_2} + M_{O_2} r_{O_2} + M_{N_2} r_{N_2})$ として与えられる。なお、 M_i : ガス種 i の分子量 (kg/mol) である。式(3)および式(4)の解析空間は所定の大きさをもつ六面体のバイオパイル、その表面に大気圧・大気濃度の境界条件を与え有限要素法によって数値解を求めた。

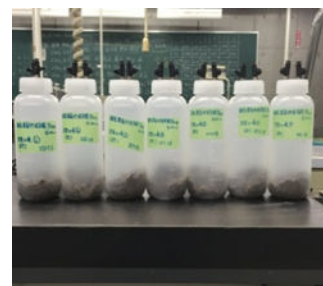


図-1 作製した供試体



図-2 ガス濃度の測定

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、酸素消費速度、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

3. 結果

表-1 模擬汚染土壌のガス種、含水比、油分濃度、および石油分解菌数

経過日数 (day)	試料量 (g-wet)	圧力 (kPa)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	CO (ppm)	H ₂ (ppm)	N ₂ (%)	含水比 (%)	油分濃度 (mg/kg)	菌数 (cells/g)
0.25	250.9	0	0	0.8	20.6	0	1	0	78.7	15.6	5,355	4.2×10 ⁵
0.61	258.3	0	0	3	18.7	0	3	0	78.3	15.7	4,840	6.6×10 ⁴
1.00	257.2	0	0	11	8.9	0	5	0	80.1	17.4	4,800	4.6×10 ⁵
2.00	251.5	0	0	19.2	1.3	6	18	>1000	79.4	17.1	4,704	4.9×10 ⁴
4.02	253.8	0	0	22.5	1.5	88	20	>1000	76.0	18.8	4,778	9.3×10 ⁵
7.23	253.5	0	0	25.9	1.4	173	3	>1000	72.8	17.2	4,517	(未測定)
15.99	251.2	0	0.7	29.2	1.2	137	1	54	68.9	17.0	(未測定)	(未測定)

酸素消費速度試験の結果を表-1 に示す。

初期の土壌には十分な基質(油)と栄養塩があるので石油分解菌は活発であり、油の微生物分解(酸化反応)に伴う酸素消費量は顕著であったと考えられる。また、時間が経過するにつれて、微生物分解の進行とともに酸素濃度は減少傾向を示した。図-3 に、酸素消費速度試験における酸素消費速度と二酸化炭素発生速度の時間変化を示す。模擬油汚染土壌を用いた酸素消費速度試験では酸素消費速度は最大で 0.018 mol/kg/day であった。

酸素消費速度は二酸化炭素発生速度とほぼ同じであり、油分の酸化分解に伴い代謝ガスとして二酸化炭素に変換され放出されたものと考えられる。すなわち代謝ガスである二酸化炭素発生速度は油汚染土壌の浄化速度の指標となる可能性を示唆しており、実験開始から 24 時間目まで急激に増加している。油の分解は効果的に進んでいることがわかる。しかし 24 時間目でピークを迎えた後、その後の二酸化炭素発生速度は低下し、最終的にはゼロとなり油を分解しにくくなる傾向にある。図-3 に示した酸素消費速度を適用して、実現場におけるバイオパイルの処理効果を数値シミュレーションにより予測した。解析結果の一例を図-4 に示す。中心からの長さや、高さを変化させた時のパイル中心部での酸素濃度評価を行い、図-5 で油汚染土壌をバイオパイルによって処理を進めた場合の、バイオパイル中心部における酸素濃度の時間変化を表わし、バイオパイルの盛土体積と高さをパラメータとして酸素濃度に及ぼす影響を示した。このような酸素消費速度をもつ現地のパイルでは、その内部の酸素濃度はパイルの大きさに依存し、パイルの体積(高さ)が 0.49 m³(0.38m)よりも小さい場合では酸素濃度 8.9%以上を維持することができ、繰り返し等の酸素供給は必要ないことがわかった。一方で、体積が 1.16 m³(0.5m)を超える場合ではその体積に応じて酸素濃度は大幅に低下するため、繰り返し等の酸素供給が必要であることを示すことができた。

4. 結び

本研究では、石油分解菌を用いた油汚染土壌のバイオパイル工法において、好気性微生物の支配因子となる酸素濃度の挙動を予測するための数値解析モデルを作製した。その結果、酸素消費速度からパイルの切り替えしのタイミングを評価できるようになった。今後は、実大規模実験によって更なる最適化を目指していきたい。

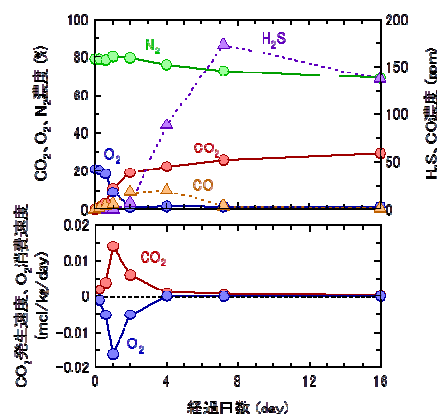


図-3 酸素消費速度試験の結果

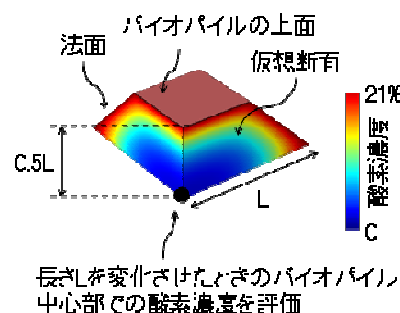


図-4 バイオパイルの解析結果の例

(L = 1.5 m のとき処理開始から

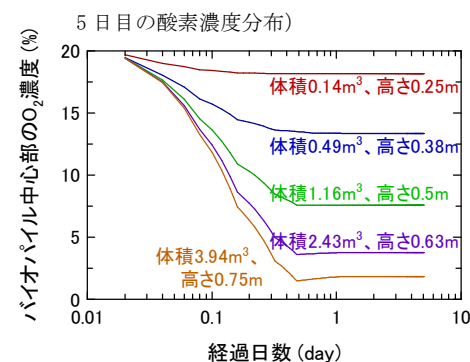


図-5 バイオパイル中心部の酸素濃度に及ぼすバイオパイルの体積と高さの影響