

## 微生物の摂食プロセスを加味した油汚染土の分解シミュレーション技術の開発

琉球大学大学院 学生会員 ○西村 伊吹  
 大林組 正会員 日野 良太  
 大林組 正会員 大西 健司  
 大林組 正会員 西川 直仁  
 琉球大学 正会員 松原 仁

### 1. はじめに

汚染土のバイオレメディエーション技術は、掘削および場外搬出などの従来工法と比べて環境負荷が少ないことから、環境保全型の技術として実現場への適用事例も多く、特に油分の分解に関しては、これに寄与する微生物も特定されつつある<sup>1)</sup>。加えて、バイオレメディエーションを計算機上で再現するための技術として、微生物の増殖を加味した油分の分解シミュレーション手法も複数開発されている<sup>2)</sup>。しかしながら、微生物の摂食や微生物の移動特性、死滅等の影響は考慮されておらず、また、3次元的な分解パターンも捉えられていない現状がある。

そこで本研究では、Michaelis-Menten モデルをベースにし、分解菌の摂食プロセスを加味した新たな数理モデルを提案する。そして、分解菌の動態と油分の分解プロセス、油分の空間分布パターンの関連性を明らかにする。

### 2. 数理モデリング

#### 2. 1 油の摂食・分解プロセス

油汚染土に生息する分解菌は、油分を摂食し体内に取り込む。取り込まれた油分は、酵素反応によって炭素源に変換される。一方、汚染土中の汚染物質の広がり物質拡散に支配される。本研究では、分解菌による接触プロセスについては反応拡散理論、菌体内で行われる分解反応については Michaelis-Menten モデルと反応速度論に従うことを想定する。すなわち、汚染物質および炭素源の経時変化を以下のようにモデル化する。

$$\frac{\partial C_{HC}}{\partial t} = -k_{deg}C_M + \nabla(D_{HC}\nabla C_{HC}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_{HCin}}{\partial t} = k_{deg}C_M - k_{enz}C_M \frac{C_{HCin}}{K_{HCin} + C_{HCin}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_C}{\partial t} = k_{enz}C_M \frac{C_{HCin}}{K_{HCin} + C_{HCin}} - \frac{K_\epsilon C_M}{Y} \frac{C_C}{K_C + C_C} \quad (3)$$

ここで、 $C_{HC}$ 、 $C_{HCin}$ 、 $C_M$ 、 $C_C$ はそれぞれ汚染土中の油分濃度、分解菌に摂食された油分濃度、菌数、炭素源濃度である。また、 $D_{HC}$ 、 $k_{deg}$ はそれぞれ、油分の拡散係数、吸収率(分解率)を、 $k_{enz}$ 、 $K_{HCin}$ 、 $Y$ はそれぞれ、酵素反応における速度係数、Michaelis-Menten 係数、収率を意味する。式(1)の右辺第1項は分解菌により吸収される割合を、式(2)の右辺第1項は分解菌内に取り込まれる割合を意味する。また、式(2)の右辺第2項は酵素反応により使用される割合を、式(3)の右辺第1項は酵素反応により生成される割合を表した項であり、Michaelis-Menten モデルに基づいている。詳細は後述するが、式(3)の右辺第2項は微生物の増殖に使用される炭素源の濃度変化を表す項である。

#### 2. 2 微生物の増殖と移動特性

微生物の増殖を表すモデルの1つである Monod 式に微生物の拡散を加味すれば次式が得られる。

$$\frac{\partial C_M}{\partial t} = K_\epsilon C_M \frac{C_C}{K_C + C_C} + D_M \nabla^2 M \quad (4)$$

ここで、 $K_\epsilon$ 、 $K_C$ は増殖率、半速基質濃度を表しており、 $D_M$ は微生物の拡散係数を意味する。なお、本稿では、理想環境を想定するものとし、分解菌の死滅は考慮しないものとする。

キーワード 土壌汚染、バイオレメディエーション、数値解析、Michaelis-Menten、Monod 式

連絡先 〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町千原1番地 琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース TEL 098-895-8652

### 3. 数値解析例

#### 3. 1 解析モデル

解析領域は $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ cm}^3$ の立方体構造を仮定した。ここでは砂地盤の汚染を想定し、解析領域には、空隙率が46.9%となるように土粒子に見立てた球体を5300個ランダムに配置した。立方体構造の格子点数は2097152、格子点間隔は0.00787 cmである。また、分解菌の動態と油分の分解パターンに関する関係性については、可視性の観点から解析領域の1/8立方体領域を以って評価することとする。なお、各パラメータの具体値は講演時に示す。

#### 3. 2 結果と考察

図-1に時間経過に伴う油分の濃度変化を示す。同図から、油分は時間経過とともに減少している。また、同図にはZhangら<sup>3)</sup>の実験結果も示しており、解析結果はすべてのケースで実験値にほぼ一致している。これは、分解菌が死滅しないような理想的な実験では、実験値を精度よく再現しうることを意味する。図-2に時間経過に伴う油分と分解菌の空間分布の変化を示す。同図(a)から、解析初期段階では油分が空隙に豊富に存在しているが、時間経過に伴って分解され、土粒子(黄色)が露になっている。一方、同図(b)より、分解菌は、解析初期では油分と同様に空隙部に多く存在しているが、時間経過に伴って、領域全体で枝状の分布を呈した。これらの結果から、汚染土の全域に分布する分解菌が、間隙や土粒子表面に存する油分を同時多発的に分解していることが分かる。分解菌が呈する枝状の分布形態は、間隙中に広がるコロニーのようなものだと考えられるが、局所的な集中は認められないことから、分解菌の拡散運動によって領域全体に渡って形成されたと推察できる。

以上のことから、本モデルは、バイオレメディエーションによる油分の分解量や分解パターンについて、理想状態のもとではある程度表現できると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、Michaelis-Menten式とMonod式をベースとした油分の分解シミュレーション技術を提案し、油分の分解量や分解菌の空間分布の変化を計算できることを示した。一般に、微生物は枝状や斑状のコロニーを呈することが知られているが、本研究では、土中におけるコロニーパターンと計算で得られたパターンとの類似性を見出すには至らなかった。また、提案モデルでは、微生物の移動特性や死滅を考慮していないことから、分解菌の個体数の変化が油分の分解パターンに及ぼす影響を評価することは難しい。今後は、これらの影響を考慮できるモデルを構築していくことが望まれる。

#### 参考文献

- 1) Ghazali, F. M., Rahman, R. N. Z. A., Salleh, A. B., and Basri, M. (2004). Biodegradation of hydrocarbons in soil by microbial consortium. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 54(1), 61-67.
- 2) Song, X., and Seagren, E. A. (2008). In situ bioremediation in heterogeneous porous media: dispersion-limited scenario. *Environmental science & technology*, 42(16), 6131-6140.
- 3) Zhang, C., Wu, D., and Ren, H. (2020). Bioremediation of oil contaminated soil using agricultural wastes via microbial consortium. *Scientific Reports*, 10(1), 1-8.

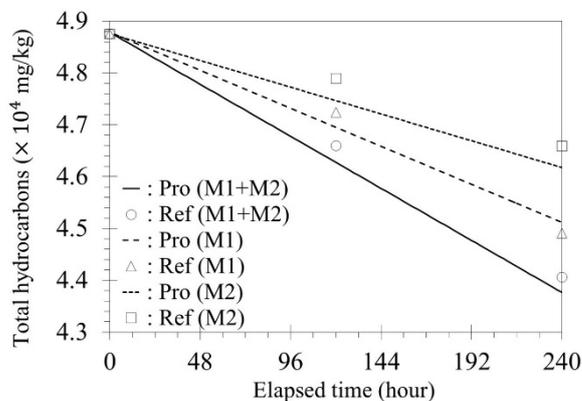


図-1 時間経過に伴う油分の分解量

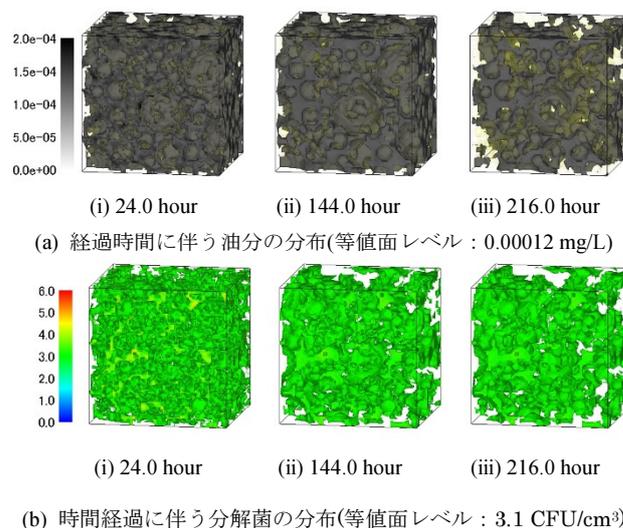


図-2 時間経過に伴う油分と分解菌の空間分布の変化