

氏名	よう えん こく 楊 延 国
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成 12 年 3 月 23 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)地球工学専攻
学位論文題目	多孔質層内における微生物の移動および増殖挙動
指導教官	東北大学教授 千田 侑
論文審査委員	主査 東北大学教授 千田 侑 東北大学教授 榎本 兵治 東北大学教授 洪 承燮 東北大学助教授 新堀 雄一

論文内容要旨

多孔質層内における微生物の移動および増殖挙動の解析は、微生物による石油増回収法(微生物攻法、Microbial Enhanced Oil Recovery)や、微生物による土壌修復(バイオレメディエーション、Bioremediation)などの地下バイオプロセスを検討する上で重要な要素である。本論文は、地下の多孔質細孔内における微生物の移動、分布および増殖挙動に影響を及ぼす諸要因を解明することを目的として、地下バイオプロセスを効率的に実施するための基礎研究を行った。

第1章 緒論

本章では、多孔質層内における微生物の移動および増殖に関する研究の背景を概説し、既往の研究成果および研究例を取り挙げ、これまでこの研究に関する問題点および不足点を検討した。また、本研究の位置付け、目的および主な内容などについて述べた。

第2章 多孔質層内における微生物の増殖挙動

本章では、本研究に使用した充填粒子(珪砂、ガラスビーズ)および微生物(IFO 15883)に関して記述し、流れのない状態での多孔質層内における微生物の最大増殖菌体量や比増殖速度などの増殖挙動に影響を及ぼす諸要因について実験および数学モデルにより検討を行った。

まず、大きさの異なる珪砂 (150~300 μm 、425~600 μm および 850~1080 μm) で構成した三種の充填層を用い、微生物の増殖挙動に及ぼす充填粒子の大きさの影響を検討したところ、その増殖挙動が充填粒子の大きさに強く左右され、充填粒子の大きさが小さい程その最終細胞数および増殖速度が大きいという結果が得られた(図 1)。なお、各充填層における微生物の増殖挙動は、フロック阻害定数を導入した数学モデルの計算結果と良く一致した。

次に、微小間隔で pH 値を二次元的に測定できる光走査型化学顕微鏡 (SCHEM、Scanning Chemical Microscope) を用い、充填粒子の大きさが均一に分布しない場合の多孔質層における微生物の増殖挙動を調べた。本研究では、測定間隔を 400 μm とした。前述の結果と同様に、

充填粒子径が小さい領域での微生物の増殖がより速いことが明らかになった(図 2)。また、ここでは、増殖挙動の局所的な違いにより代謝物の濃度差が生じることを確認した。

次に、大きさがほぼ同じの珪砂 (850~1080 μm) およびガラスビーズ (1000 μm) で構成した充填層を用いた培養実験から、前者の増殖の最終細胞数は後者の約 2 倍であり、微生物の増殖挙動が多孔質層の孔隙の形状や、充填粒子の種類にも強く影響されることを明らかにした。

これらの実験結果の説明として、多孔質層の孔隙の大きさ、形状および粒子の種類が微生物のフロック形成や、微生物の増殖に影響を及ぼすことが想定された。これらの結果は新しい知見であり、実際の地下バイオプロセスにおいて地質状況およびその非均一性が微生物の増殖に及ぼす影響を考慮すべきであることを示唆している。

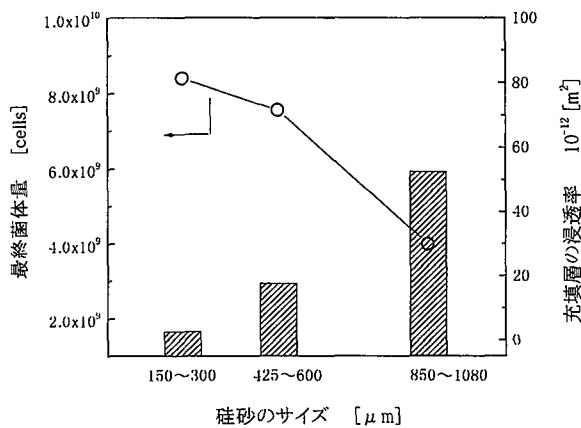


図 1. 充填粒子の大きさの違いによる増殖の最終菌体量の比較

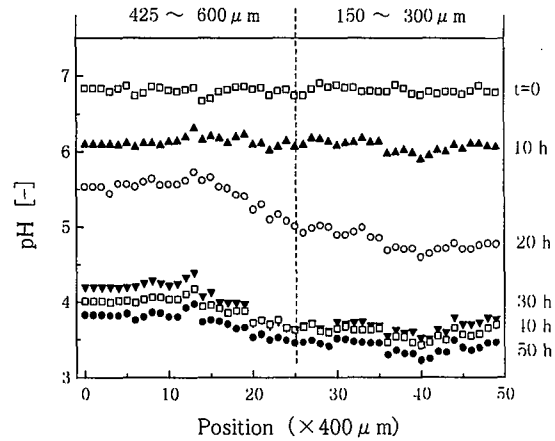


図 2. SCHEM で測定した充填層断面での pH 分布の経時変化

第3章 多孔質層内における微生物およびその栄養塩の移動挙動

本章では、地下帯水層および石油貯留層により近い平板型二次元充填層を用い微生物およびその栄養塩の移行を検討したうえ、その実験結果を密度流の効果および微生物の固体への吸着を考慮した数学モデルにより解析した。

微生物のみの矩形波実験の応答を検討したところ、多孔質層内における微生物の移行、分布および固体への吸着は注入条件(微生物の注入菌体濃度、流速)に強く依存することが明らかになった(図 3)。また、ラングミュア型の吸着速度式を用いて微生物の固体への吸着現象を動力的に解析することができた。一方、栄養塩の移動分布は密度流の効果に強く影響され、注入条件(栄養塩の注入濃度、流速)により算出されるレイリー数を用いて、その影響を整理し(図 4)、栄養塩の移動分布の様子を予測することができた。さらに、また、微生物による石油増回収法のような実際の地下バイオプロセスに対応させて、フラッディング法および単一坑井法のシャットイン期間(Shut-in Period、流動を停止する静止期間)における密度流による栄養塩の移行について考察し、地下バイオプロセスの実施における静止期間の必要性を示した。

また、以上の結果から、地下バイオプロセスの実施領域における微生物およびその栄養塩の分布を、微生物および栄養塩の注入濃度、流速を適切に調整することにより、人為的にコントロールして改善する可能性を見出した。

なお、本章では、密度流の効果または微生物の固体への吸着現象を考慮し流線関数を用いた比較的簡便な数学モデルを構築し、多孔質層内における微生物およびその栄養塩の移動挙動を解析した。図3および図4に示すように、その数値計算結果は実験結果と良く一致したことから、数学モデルの妥当性を確認することができた。

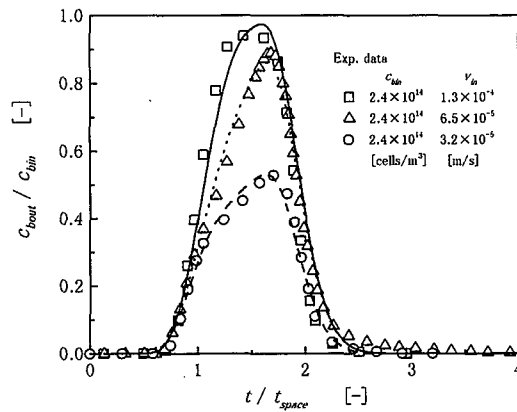


図3. 流速の違いによる微生物の矩形波実験の応答の比較

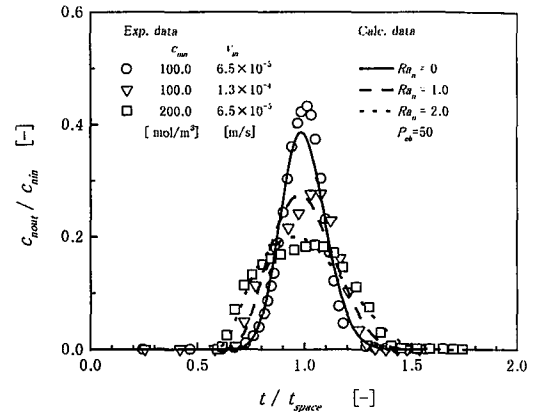


図4. レイリー数の違いによる栄養塩矩形波実験の応答の比較

第4章 数値シミュレーションによるケーススタディ

本章では、第2章および第3章で求めた結果を用いて、実際の地下バイオプロセスの実施状況を想定し、数値シミュレーションによるケーススタディを行った。

まず、第3章の数学モデルを用い、微生物あるいは栄養塩のみ存在する場合、さまざまな注入条件(注入濃度、流速)および微生物の吸着性に対し、微生物および栄養塩の移動挙動を調べた。その結果、地質状況、微生物の吸着性および目的物質(残留石油、汚染物)の分布に応じ、注入条件を調整することにより微生物および栄養塩を適切に分布させることが可能であることを明らかにした。

次に、第2章および第3章の数学モデルをベースとして、微生物の固体への吸着による浸透率の変化を考慮した新たな数学モデルを構築した。それを用いた数値シミュレーションの結果、地下バイオプロセスにおいて浸透率分布による微生物の増殖および移動の違いが無視できず、注入した水が流れやすい領域だけを流れてしまうと言われるフィンギング現象を微生物の固体への吸着によって防止し、多孔質層の鉛直方向における浸透率分布を均一化(改善)するメカニズムを解明した(図5)。

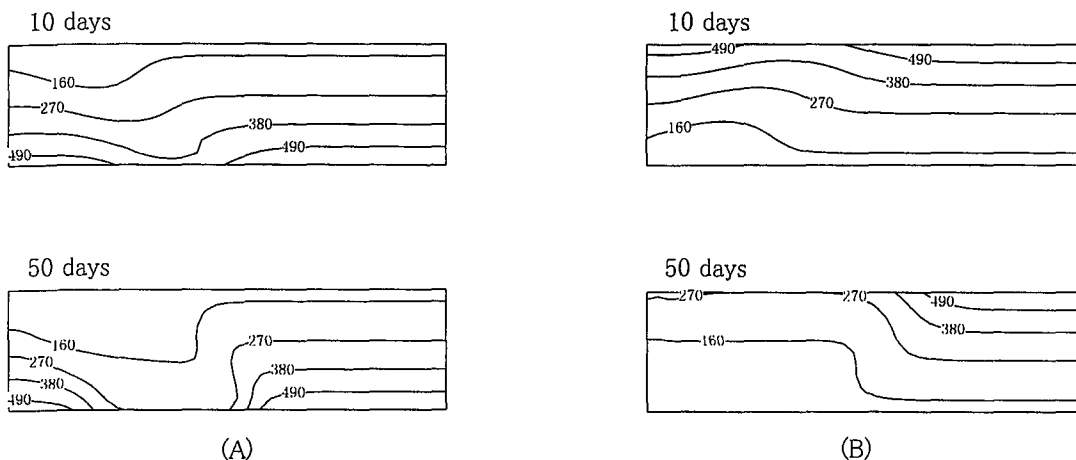


図5. 静止期間における微生物の増殖に伴う浸透率分布の変化

浸透率の初期分布(多孔質層の上部→下部) :

130md→540md (A); 540md→130md (B)

第5章 結論

本論文は、多孔質層内における微生物の局所的な移動および増殖挙動に及ぼす多孔質体の状況、密度流の効果、微生物のフロック形成および固体への吸着などの影響を解明し、地下バイオプロセスにおいて微生物および栄養塩を効果的に分布させることにより、プロセスを効率的に実施する方法を提案した。また、微生物増殖に及ぼす浸透率の分布、栄養塩の密度流効果などの影響は無視できず、地質状況や微生物の吸着性なども重視する必要があることが示された。

審査結果の要旨

多孔質層内における微生物の移動および増殖挙動の解析は、微生物による石油増回収法(微生物攻法)や、微生物による土壌修復(バイオレメディエーション)などの地下バイオプロセスを検討する上で重要な要素である。本論文は、地下の多孔質細孔内における微生物の移動、分布および増殖挙動に影響を及ぼす諸要因を検討し、地下バイオプロセスの効率的な実施方法の検討に関する研究成果についてまとめたもので、全文5章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景、既往の研究および目的を述べている。

第2章では、本研究に使用した充填粒子および微生物に関して記述し、流れのない状態での多孔質層内における微生物の最大増殖菌体量や比増殖速度などの増殖挙動について実験および数学モデルによる検討を行い、多孔質層の孔隙の大きさ、形状および粒子の種類が微生物のフロック形成や、微生物の増殖に影響を及ぼすことを見出している。特に、孔隙径に関しては、本研究の実験範囲内において径が小さい程その増殖速度が大きいという結果が得られている。これは新しい知見である。

第3章では、平板型二次元充填層を用いて矩形波実験を行い、微生物および栄養塩の移行実験の結果を、密度流の効果および微生物の固体への吸着を考慮した数学モデルで解析した結果について述べている。また、流動を停止した静止期間における密度流による栄養塩の移行について考察し、地下バイオプロセスの実施における停止期間の必要性を示している。これは実用上極めて有用な知見である。

第4章では、第2章および第3章の数学モデルを用い、注入条件(微生物および栄養塩の注入濃度、流速)および微生物の吸着性の違いによる微生物または栄養塩の移動分布を調べ、注入条件を調整することにより微生物および栄養塩を適切に分布させる可能性を見出している。また、浸透率分布を考慮し、微生物の固体への吸着により注入した水が流れやすい領域だけを流れてしまうフィンガリング現象防止、浸透率分布改善のメカニズムを示している。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、多孔質層内における微生物の局所的な移動および増殖挙動に及ぼす多孔質体の状況、密度流の効果、微生物のフロック形成および固体への吸着などの影響を解明し、地下バイオプロセスにおいて微生物および栄養塩を効果的に分布させることにより、プロセスを効率的に実施する方法を提案したものであり、環境システム工学および資源開発工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。