

土壌・地下水汚染対策のための 数値シミュレーション技術の開発に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、豊島や青森・岩手県境の不法投棄事例にみられるように、有害物質であるトリクロロエチレン(TCE)等の化学物質(以下 VOC (Volatile Organic Carbon)と記す)による土壌・地下水汚染が緊急的な社会問題となっている。効率的に汚染を修復するためには、汚染機構に基づいた拡散解析を行った上で、その汚染評価と特徴に応じた対策を講じることが極めて重要である。本研究では、その汚染拡散解析手法の一つである数値シミュレーション技術の開発を行うこととした。

1 章と 2 章では、本研究の背景と目的について述べた。VOC による土壌・地下水汚染では、まず水にほとんど溶けない難水溶性液体(Non-Aqueous Phase Liquid: NAPL)が、地表面から地下へ原液のまま浸透し、不飽和帯から飽和帯にまで広く地中に NAPL 原液状の汚染源を連続的に形成する。そして NAPL 原液の溶解に伴い、汚染源の分布や質は経時的に変化し、さらに地下水中にゆっくりと溶け出した成分が地下水流れと共に輸送される。従来のマクロ的な移流分散解析での汚染源は、定常的かつ均質な点源として扱われてきた。従って、汚染源が不飽和から飽和帯にまで広く分布し、かつ溶解によりその汚染源の分布や質が経時的に変化してしまうような土壌・地下水汚染を、従来のマクロ的な移流分散解析で一元的に扱うことには限界がある。つまり、従来のマクロ的な視点に加えて、NAPL 原液による汚染源の形成過程とその汚染源の拡散が土壌・地下水汚染に及ぼす影響を、ミクロ的な視点から新たに考慮する必要がある。

一方、マクロ的な移流分散解析についても、実際の汚染現場への適用例が極めて乏しく、普及が進んでいるとは言えない。これは、調査データの取得が困難なこともさることながら、数値シミュレーション結果と測定値との整合性を評価するプロセスが不明確であり、一部の専門家の経験的知識に頼らざるを得ない部分が多く存在するからである。つまり社会的技術的要請として、数値シミュレーション技術の実汚染現場への適用方法を標準化する必要がある。

よって、本研究では、1)ミクロ的な視点から、長期に滞留する汚染源となる NAPL 原液浸透挙動を表現する数学モデルの基礎的開発を実験的、理論的に行うこと(3 章、4 章)、2)マクロ的な視点において、移流分散方程式を基礎とした数値シミュレーション技術を実汚染現場へ適用し拡散の速度と範囲を予測する方法を、応用的な観点から標準化すること(5 章、6 章)を目的とした。

まず第 3 章では、特性(比重、粘性、界面張力)の異なる NAPL 原液とガラスビーズ層を用いて、一次元及び二次元不飽和・飽和浸透実験を行うことにより、NAPL の鉛直及び水平方向の浸透速度と NAPL 原液の分布の測定を行った。その結果、水より比重の大きい DNAPL(Dense

NAPL)であっても、地下水面よりも上方の毛管帯にかなりの量の DNAPL が停滞し、その停滞量は、NAPL の特性のみならず、注入強度や注入時間によっても異なることを見いだした。これは、毛管帯での DNAPL による圧力の増加速度と間隙水の排出速度のバランスで説明できることを示した。②一方、水よりも比重の小さい LNAPL(Light NAPL)は、全てが地下水面上に停滞するが、季節的な地下水面の上下変動によっては、地下水面よりも下方に存在することを指摘した。これは飽和間隙中の LNAPL 残余量を考慮することにより説明できることを示した。

4 章では、3 章で得られた実験値をベースに NAPL 原液の一次元及び二次元浸透数学モデルの開発と検証を行った。これより、①残余飽和度を考慮した数学モデルが、DNAPL、LNAPL の不飽和一飽和領域の一次元、二次元分布の実験値をよく再現することを示した。②但し、本モデルの適用限界として、濡れ定数 (=水の表面張力-NAPL の表面張力-水と NAPL の界面張力) が負となる NAPL 原液に対しては、前提条件である毛管理論が成立しないため、本モデルの適用はできないことを明らかにした。以上より、ミクロ的な視点において、土壌・地下水層内における NAPL 原液の鉛直一次元、及び二次元浸透実験に基づいた挙動を数学モデルの開発により説明できた。

5 章では、数値シミュレーション技術の適用上の課題を、I 市汚染現場の VOC による地下水汚染の解析を通じて、調査データの充足性、モデルの仮定及びパラメータの妥当性という観点から抽出した。そしてそれらの課題を解決し、一般化した上で、数値シミュレーション技術の適用方法を標準化し、その手順の提案を行った。

6 章では、5 章で提案された数値シミュレーション技術の適用方法を、K 市汚染現場に応用し、その効果を検証した。特に、数値シミュレーション結果と測定値の整合性の評価として、点的なボーリング地点での濃度の測定データだけではなくて、二次元あるいは三次元的な地下水汚染の広がり把握できる比抵抗分布（主に地下水中の塩類等溶存物質の面的な分布）の測定データとの比較も行った。その結果、①準三次元及び三次元の数値シミュレーション結果を、点的な地下水中の汚染物質濃度の測定データと比較したところ、良好な一致が見られた。②さらに、数値シミュレーション結果と面的な比抵抗分布の測定データとの比較により、比抵抗分布の形状が数値シミュレーション結果と同じ傾向にあることが確かめられた。③よって、点的な汚染物質濃度の測定データと面的な比抵抗分布の測定データをつなぐ補間手法として、数値シミュレーションを関係付けることができた。以上より、数値シミュレーション結果と測定値との整合性を評価するプロセスを標準化でき、結果として、5 章で提案した汚染現場への数値シミュレーション技術の適用方法が有効であることを示すことができた。さらに修復効果の予測もでき、遮水壁による汚染拡散防止対策の提案ができることを示した。

7 章は、総括であり、論文全体の成果を要約している。

以上より、汚染源としての NAPL 原液浸透数学モデルの開発と、測定データに対する数値シミュレーション結果の整合性を評価するプロセスの標準化により、汚染機構が極めて特徴的であるため従来の解析手法では困難であった VOC による土壌・地下水汚染の汚染拡散解析を行うための数値シミュレーション技術を開発することができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 古 市 徹
副 査 教 授 田 中 信 壽
副 査 教 授 恒 川 昌 美

学 位 論 文 題 名

土壌・地下水汚染対策のための 数値シミュレーション技術の開発に関する研究

近年、豊島や青森・岩手県境の不法投棄事例にみられるように、有害物質であるトリクロロエチレン(TCE)等の化学物質（以下 VOC (Volatile Organic Carbon)と記す）による土壌・地下水汚染が緊急的な社会問題となっている。効率的に汚染を修復するためには、汚染機構に基づいた拡散解析を行った上で、その汚染評価と特徴に応じた対策を講じることが極めて重要である。本研究では、その汚染拡散解析手法の一つである数値シミュレーション技術の開発を行っている。

1 章と 2 章では、本研究の背景と目的について述べている。VOC による土壌・地下水汚染では、まず水にほとんど溶けない難水溶性液体(Non-Aqueous Phase Liquid: NAPL)が、地表面から地下へ原液のまま浸透し、不飽和帯から飽和帯にまで広く地中に NAPL 原液状の汚染源を連続的に形成する。そして NAPL 原液の溶解に伴い、汚染源の分布や質は経時的に変化し、さらに地下水中にゆっくりと溶け出した成分が地下水流れと共に輸送される。従来のマクロ的な移流分散解析での汚染源は、定常的かつ均質な点源として扱われてきた。従って、汚染源が不飽和から飽和帯にまで広く分布し、かつ溶解によりその汚染源の分布や質が経時的に変化してしまうような土壌・地下水汚染を、従来のマクロ的な移流分散解析で一元的に扱うことには限界がある。つまり、従来のマクロ的な視点に加えて、NAPL 原液による汚染源の形成過程とその汚染源の拡散が土壌・地下水汚染に及ぼす影響を、ミクロ的な視点から新たに考慮する必要がある。

一方、マクロ的な移流分散解析についても、実際の汚染現場への適用例が極めて乏しく、普及が進んでいるとは言えない。これは、データの取得が困難なこともさることながら、数値シミュレーション結果と測定値との整合性を評価するプロセスが不明確であり、一部の専門家の経験的知識に頼らざるを得ない部分が多く存在するからである。つまり、社会的技術的要請として、数値シミュレーション技術の実汚染現場への適用方法を標準化する必要がある。

よって、本研究では、1)ミクロ的な視点から、長期に滞留する汚染源となる NAPL 原液浸透挙動を表現する数学モデルの基礎的開発を実験的、理論的に行うこと（3 章、4 章）、2)マクロ的な視点において、移流分散方程式を基礎とした数値シミュレーション技術を実汚染現場へ適用し拡散の速度と範囲を予測する方法を、応用的な観点から標準化すること（5 章、6 章）を目的としている。

まず第3章では、特性（比重、粘性、界面張力）の異なる NAPL 原液とガラスビーズ層を用いて、一次元及び二次元不飽和・飽和浸透実験を行うことにより、NAPL の鉛直及び水平方向の浸透速度と NAPL 原液の分布の測定を行っている。その結果、①水より比重の大きい DNAPL(Dense NAPL)であっても、地下水面よりも上方の毛管帯にかなりの量の DNAPL が停滞し、その停滞量は、NAPL の特性のみならず、注入強度や注入時間によっても異なることを見いだした。これは、毛管帯での DNAPL による圧力の増加速度と間隙水の排出速度のバランスで説明できることが示されている。②一方、水よりも比重の小さい LNAPL(Light NAPL)は、全てが地下水面上に停滞するが、季節的な地下水面の上下変動によっては、地下水面よりも下方に存在することを指摘している。これは飽和間隙中の LNAPL 残余量を考慮することにより説明できるとしている。

4 章では、3 章で得られた実験値をベースに NAPL 原液の一次元及び二次元浸透数学モデルの開発と検証を行っている。これより、①残余飽和度を考慮した数学モデルが、DNAPL、LNAPL の不飽和一飽和領域の一次元、二次元分布の実験値をよく再現することを示している。②但し、本モデルの適用限界として、濡れ定数（=水の表面張力-NAPL の表面張力-水と NAPL の界面張力）が負となる NAPL 原液に対しては、前提条件である毛管理論が成立しないため、本モデルの適用はできないことを明かにしている。以上より、ミクロ的な視点において、土壌・地下水層内における NAPL 原液の鉛直一次元、及び二次元浸透実験に基づいた挙動を数学モデルの開発により説明できた。

5 章では、数値シミュレーション技術の適用上の課題を、I 市汚染現場の VOC による地下水汚染の解析を通じて、調査データの充足性、モデルの仮定及びパラメータの妥当性という観点から抽出している。そしてそれらの課題を解決し、一般化した上で、数値シミュレーション技術の適用方法を標準化し、その手順の提案を行っている。

6 章では、5 章で提案された数値シミュレーション技術の適用方法を、K 市汚染現場に応用し、その効果を検証している。特に、数値シミュレーション結果と測定値の整合性の評価として、点的なボーリング地点での濃度の測定データだけではなくて、二次元あるいは三次元的な地下水汚染の広がり把握できる比抵抗分布（主に地下水中の塩類等溶存物質の面的な分布）の測定データとの比較も行っている。その結果、①準三次元及び三次元の数値シミュレーション結果を、点的な地下水中の汚染物質濃度の測定データと比較したところ、良好な一致が見られている。②さらに、数値シミュレーション結果と面的な比抵抗分布の測定データとの比較により、比抵抗分布の形状が数値シミュレーション結果と同じ傾向にあることが確かめられている。③よって、点的な汚染物質濃度の測定データと面的な比抵抗分布の測定データをつなぐ補間手法として、数値シミュレーションを関係付けている。以上より、数値シミュレーション結果と測定値との整合性を評価するプロセスを標準化でき、結果として、5 章で提案した汚染現場への数値シミュレーション技術の適用方法が有効であることを示している。さらに修復効果の予測もでき、遮水壁による汚染拡散防止対策の提案ができることを示している。

7 章は、総括であり、論文全体の成果を要約している。

これを要するに、著者は、汚染源としての NAPL 原液浸透数学モデルの開発と、測定データに対する数値シミュレーション結果の整合性を評価するプロセスの標準化により、汚染機構が極めて特徴的であるため従来の解析手法では困難であった VOC による土壌・地下水汚染の汚染拡散解析を行うための数値シミュレーション技術を開発したものであり、廃棄物工学及び環境工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。