

## (論文内容の要旨)

本論文は、塩素化エチレンによる土壌・地下水汚染への対策として三つの原位置浄化技術を取り上げ、その評価と改善を行うとともに、それぞれの技術の位置づけと適用を明らかにし、将来への展望を示したものである。対象とした原位置浄化技術は、物理的抽出法である揚水、化学的分解法である鉄粉混合、微生物的分解法であるバイオスティミュレーションの三つであり、異なる原理をもつものである。論文は8章からなっており、以下に各章の内容を説明する。

第1章は序論であり、土壌・地下水汚染ならびにその対策技術についての現状を整理するとともに、本論文の目的と各章の内容を示している。特に、様々な原位置浄化技術とその適用状況のレビューに基づき、原理の異なる三種類の技術（揚水、鉄粉混合、バイオスティミュレーション）を本研究で取り上げる意義を述べている。

第2章および第3章では、塩素化エチレンの地盤中での挙動の考察に基づいて土壌・地下水汚染の特徴を論じており、第2章では塩素化エチレンの原液を、第3章では地下水に溶解した塩素化エチレンをそれぞれ対象としている。第2章では、帯水層における塩素化エチレン原液の残留挙動を数値解析により検討した結果、既往の研究で示されるよりも高いレベルでの残留飽和度（50%以上）が確認され、長期間にわたって汚染源が残留する可能性を示した。一方、第3章では、地下水に溶解した塩素化エチレンの挙動に及ぼす土壌への吸着や分解などの効果を数値解析事例に基づいて整理した。

第4章から第6章では、本研究で対象とする三つの原位置浄化技術をそれぞれ取り上げて、その評価と改善を議論している。第4章では、地下水揚水における浄化予測が困難である現状を踏まえ、単純に揚水するのではなく、モニタリングによって浄化効果を評価し、対策全体を見直すという戦略の必要性ならびに有効性を示している。特に対策全体を見直す戦略の策定については、二次元平面移流分散解析を実施して、井戸の位置での濃度経時変化を評価する手法を提案した。解析結果からは、低流速部での相対的な浄化の遅れ、汚染源の有無、汚染源の局所性、汚染源対策の妥当性が評価できるという結論を導いている。このような評価結果から、揚水配置の見直し、汚染源対策の実施、低ランニングコストの暴露管理対策への変更といった戦略的な判断が可能となることを示している。

第5章では鉄粉による原位置浄化技術を対象とし、高圧噴射攪拌工法による鉄粉混合の展開を図ることを目的として、そのための課題として鉄粉混合量の設計手法や、鉄粉が不均質に混合された場合の浄化効果への影響を評価している。鉄粉混合量の設計手法については、短期間で地下水水質に合った最適な鉄粉を選定して混合量を設計するのにはバッチ分解試験が有効と考え、設計のための理論式、カラム分解試験との比較、現場実験による検証を行っている。鉄粉が不均質に混合された場合の浄化効果への影響については、三次元移流分散減衰解析により評価している。解析において変動係数が大きくなると浄化効果が低下することから、解析結果を活用して鉄粉混合量の安全率を設定する方法

を示している。

第6章では嫌気バイオスティミュレーションを取り上げている。嫌気バイオスティミュレーションでは、微生物を活性化させるために有機物を主成分とする活性剤水溶液を地盤に注入するが、活性剤が脱塩素反応を促進する一方で、有機酸生成により酸性化し、微生物活性を低下させてしまう恐れがある。このため、本研究では活性剤濃度による浄化効果への影響について検討している。検討は、カラム循環分解実験によって嫌気バイオスティミュレーションを室内で再現することによって行っている。実験結果から、pH を低下させないように低濃度で活性剤を注入することが短期間の浄化を可能にするとともに、使用する活性剤量も少なくできることを示している。

第7章では、第4章から第6章で取り上げた三つの技術の改良について、低コスト化、浄化期間の短縮に関する効果をまとめるとともに、有効な展開先について整理している。揚水については、モニタリング最適化を行うことによる浄化期間の短縮効果と、ライフサイクルコストの試算によるコスト削減効果を評価している。高圧噴射攪拌工法による鉄粉混合については、既存の工法であるオールケーシング工法による鉄粉砂での置換と、機械攪拌工法による鉄粉を混合する場合でコスト比較を行い、それぞれの工法の位置付けを明確にしている。嫌気バイオスティミュレーションにおいては、注入濃度をパラメータとしたコスト試算を行い、コスト削減効果を評価している。これらの技術の展開先としては、揚水は稼働中工場、鉄粉は工場跡地再開発事業など浄化期限が明確な場合、嫌気バイオスティミュレーションは両者の中間的な場合が、それぞれ有効であることを述べている。

第8章では、論文を総括して結論を述べている。

## (論文審査の結果の要旨)

地盤汚染は、人類の「負の遺産」として地球上の様々な国・地域が直面している環境問題であり、浄化期間が短く低コストの汚染対策技術を適用することによって早期の土地利用を実現させることが社会的に求められている。その社会的要求に応えうる担い手としては、技術の成熟化により低コスト化と浄化精度の向上が可能な原位置対策技術が考えられ、特に、原位置対策の可能な揮発性有機化合物質の中で突出して汚染事例の多い塩素化エチレンへの原位置浄化技術の発展と適用普及は、急務の課題であると言える。このような背景を踏まえ、本論文は、塩素化エチレンによる土壌・地下水汚染への三つの原位置浄化技術、すなわち物理的抽出法としての揚水、化学的分解法としての鉄粉混合、微生物的分解法としてのバイオスティミュレーションを取り上げ、その評価と改善を行うとともに、それぞれの技術の位置づけと適用を示したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

第一に、地下水揚水による浄化技術について、モニタリングに基づいた汚染浄化の評価手法と戦略の提案を行った。数値解析により、浄化効果が地下水流速に依存すること、高流速部と低流速部とでモニタリングを行うことで浄化効果を実務レベルで効率的に評価できることを示した。特に、低流速部での浄化の時間遅れ、汚染源の有無、汚染源の局在性などを考慮し、揚水配置の見直しや汚染源対策の実施、暴露管理への変更などといった戦略的判断の根拠を論理的に示した。

第二に、鉄粉を用いた原位置浄化技術の浄化原理、設計手法、施工法を示した。高圧噴射攪拌の技術を適用した鉄粉混合による浄化工法を提案し、バッチ試験に基づいて設計を行うための理論式の検討と、カラム試験や現場試験との比較、さらには、数値解析に基づいた不均質性に関する考察を実施して、安全率を考慮した設計法の根拠を明らかにした。

第三に、嫌気バイオスティミュレーションにおいて、脱塩素反応メカニズムへの影響因子の解明と、効率的な浄化を実現するための設計の考え方を示した。短期間で効率的な浄化を実現するには活性剤の適正な注入量が存在し、その適正量は微生物活性を低下させない pH の範囲を考慮することにより求めうることを明らかにした。

第四に、異なる原理を有する三つの技術、すなわち揚水、鉄粉混合、嫌気バイオスティミュレーションについて、それぞれ第一から第三に述べた改善の効果をコストにより具体的・定量的に示した。さらに、原位置浄化技術を選定するにあたっての指標を整理し、地下水濃度や施工制約などに基づいた浄化技術の適切な展開先を示して、社会的意義の大きい成果を得た。

以上の成果により、本論文は地球環境学、特に地盤環境工学の発展に大きく寄与した。よって、本論文は博士（地球環境学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年2月7日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行った結果、合格と認めた。