

|             |                                                                                                                                             |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名         | い ち お ん え い じ<br>一 恩 英 二                                                                                                                    |
| 学 位 の 種 類   | 博 士 (農 学)                                                                                                                                   |
| 学 位 記 番 号   | 論 農 博 第 2501 号                                                                                                                              |
| 学位授与の日付     | 平 成 15 年 11 月 25 日                                                                                                                          |
| 学位授与の要件     | 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当                                                                                                                     |
| 学 位 論 文 題 目 | Identification of Non-Point Groundwater Contamination Sources with<br>Simulation and Optimization Methods<br>(シミュレーションと最適化手法を用いた地下水汚染面源の同定) |

論文調査委員 (主 査) 教 授 河 地 利 彦 教 授 青 山 咸 康 教 授 三 野 徹

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、世界の多くの地域で耕地に施用される肥料などによる地下水の硝酸汚染の問題が深刻化している。この肥料起源の硝酸汚染は、典型的な面源汚染であることから、汚染は広範囲に及びその修復は極めて困難である。この面源汚染を未然に防止するためには、観測井戸による定期的な水質モニタリングを行うとともに、面源を同定し、その面源において、適切な汚染物質管理を行うことが必要である。本論文は、汚染物質を特定しない一般的な地下水汚染の枠組みの中で、地下水汚染における汚染面源の同定問題を考え、地下水流動に伴う地下水水質変動の数値解析シミュレーションと、最適化手法を用いた新たな同定モデルを開発して、その有効性を検証したものである。最適化手法には、遺伝的アルゴリズム (GA) とニューラル・ネットワーク (ANN) を、また、地下水流動およびそれに伴う地下水水質変動の数値解析には、ガラーキン有限要素法を用いている。

第1章は緒論であり、地下水資源の重要性、近年各地で深刻化している地下水汚染の現状について述べ、本研究の目的と意義を示している。

第2章では、地下水の流動・水質モデル、地下水における溶質移動シミュレーションの手法、さまざまな最適化手法の適用例、並びに地下水汚染源の同定問題に関する従来の研究を総括・整理している。

第3章では、不圧地下水の不飽和領域から飽和領域に流入する面源汚染フラックスの長期変動を、GAと溶質移動シミュレーションの連成によって推定する手法を提示している。すなわち、観測井戸における汚染物質濃度の観測値に基づいて、生物の進化過程を模擬したGAの反復的な操作によって汚染フラックスの値を漸近的に推定する方法を考案している。また、観測井戸の位置および不確定な水文地質定数がフラックス推定の信頼性に及ぼす影響についても検討を行っている。その結果、GAを用いた本手法によれば、面源汚染フラックスの長期変動が安定で精度よく推定できることを明らかにしている。

第4章では、第3章において示した時間ステップごとにGAを適用し最適解を求める反復型GAを用いた手法に加えて、全時間ステップを一括してフラックス推定を行う一括型GA法およびANNを用いる手法を提案し、同一条件の同定問題を解くことによって、これら3手法の特性比較を行っている。その結果、いずれも十分満足できる同定結果を与えるものの、反復型GA法は時間・空間的に変動する問題に適し、一括型GA法は計算負荷を小さくする特性をもち、またANN法は初期値が不明の問題に有用であることを明らかにしている。

第5章では、定常地下水流における汚染面源の探索法について検討している。この探索法では、GAの通常の遺伝的操作である「選択」、「交叉」、「突然変異」に「移動」操作を加えた拡張型GAの導入を試み、二段階で探索する方法を開発している。すなわち、第一段階で、拡張型GAによって汚染面源の中心を探索し、第二段階で、「移動」操作を伴わない通常のGAによってその面源中心要素の周辺で汚染範囲を外側に拡大し、最終的に面源範囲と汚染フラックス値の双方が探索できる方法を考案している。このとき、観測井戸における観測濃度と計算濃度とがよく一致するように、漸近的に汚染源とそのフラックス値を決定している。手法の有効性は、実際の地下水盆を考慮して検証している。この際、仮想的な汚染を溶質移

動シミュレーションによって生起させて観測井戸における観測濃度を模擬発生させている。その結果、本手法によれば、面源数で3程度、総要素数で10程度の面源探索が可能であることを明らかにしている。また、観測濃度に $\pm 5\%$ の誤差を乱数によって与え、探索解の感度分析を行っている。その結果、誤差のない場合の推定結果とほぼ類似の結果が得られることを明らかにしている。

終章である第6章では、これら一連の研究の整理・要約を行っている。結論として、GAやANNなどの最適化手法を用いたモデルが、地下水における汚染面源フラックスの推定や汚染面源位置の同定に有効であり、広域地下水の効果的な水質管理戦略を策定する上で有用であるとしている。また、研究の今後の課題や発展の方向性について論じている。

## 論文審査の結果の要旨

広域地下水における効果的な水質管理戦略を策定するには、点源、面源を含む汚染源の同定が必要である。また、汚染された地下水の修復を行う場合にも、汚染源の同定は不可欠である。しかしながら、点源汚染の同定手法に関する研究は散見されるも、近年各地で顕在化している肥料起源等の面源汚染の同定手法については、ようやく研究は緒についたところであり、その確立が鶴首されている。本論文は、地下水における面源汚染の問題に着目し、地下水水質の数値解析シミュレーションと最適化手法を組み合わせたいくつかの面源同定モデルを開発して、それらの有効性を検証しつつ面源同定の可能性を検討したものである。評価できる主要な点は以下のとおりである。

- (1) 点源を対象としていたこれまでの汚染源同定モデルを発展させ、面源の同定が可能ないくつかのモデルを提示した。このようなモデルを使用することによって、耕地に対する過剰施肥や農薬散布に起因する面源汚染に対して、効率的、経済的に汚染源を同定することを可能にした。
- (2) 飽和帯における汚染物質の溶質移動機構を同定モデル内部に組み込むことにより、不飽和帯の存在を考慮せずに不飽和帯から飽和帯へ流入する汚染フラックスを直接推定することのできる方法論を示した。このことによって、不飽和帯内部における複雑な生物化学的反応を考慮することなく、実用的に意味のある地表・不飽和帯から飽和帯への汚染物質の溶脱率を逆推定することを可能にした。
- (3) 汚染面源フラックスの同定問題に対して、一括型GA法、反復型GA法、ANN法の各手法を提案した。これらの間の特性比較を行い、長期的な時間変動のある面源フラックスの推定には、溶質移動シミュレーションの時間ステップ毎にGAを適用する反復型GA法が有効であることを明らかにした。  
また、ANN法は初期値が不明の問題に適用可能であることを明らかにした。
- (4) 典型的な組合せ最適化問題となる汚染フラックスと汚染面源の位置およびその範囲を探索、同定する問題に対して、通常の遺伝的的操作に加えて新たに「移動」操作を組み入れる拡張型GA法を導入した。地下水分野におけるこの種のアプローチは他に類例がなく、高い新規性と有益性をもった試みとして評価できる。

以上のように、本論文は、地下水流動とそれに伴う汚染物質の動的挙動を考慮し、各種の人工知能技術を援用して、地下水の汚染面源の同定手法に関して新規な方法論を展開するとともに、面源同定の可能性を追求したものであり、水資源工学、環境水理学の発展、並びに環境汚染管理の実際面に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（農学）の学位論文として価値あるものと認める。

なお、平成15年10月23日、論文並びにそれに関連した分野にわたり試問した結果、博士（農学）の学位を授与される学力が十分あるものと認めた。