

論文の内容の要旨

論文題目 水文地質環境モデリング技術の開発とフィールドへの適用

氏 名 伊藤 一誠

地表水、地下水から構成される陸域の水は、我々の生活に欠かすべからざるものである一方、洪水、斜面崩壊、土石流等の多大な被害を及ぼす要因ともなりうる。防災という観点からは、降雨による広域の地表水、地下水の流動状況変化を的確に予測する手法が必要とされている。また、我々は社会生活を営んで行く上で、トンネルやダム等、地下や地上に大規模構造物を建設することによって陸域の水の流れに影響を与えたり、農工業活動によって、河川や地下水を汚染している。

最近の防災、環境に対する社会的な関心の高まりとともに、必要性我々が水循環過程に与える様々な影響に対する定量的な評価手法が必要とされている。本論文では、水文循環過程における地表水―地下水の流動状況、地下水汚染の問題を総合的に評価する事を目的として新しい要素技術の開発を行った。

本論文で特に研究対象としている問題は、(1) 溶解、揮発、吸着現象を含む土壌地下水汚染解析手法の開発、(2) 適切な河道表現による地表水―地下水流動の結合解析手法の開発、(3) 広域を対象とした効率的自動格子生成手法の開発である。本論文では、それぞれの内容に対し、個別の技術の開発と実際のサイトにおける適用を行った。

以下に、個々の事項に関する研究内容および成果を示す。

1. 溶解、揮発、吸着過程を含めた土壌地下水汚染解析手法の開発

土壌地下水汚染においては、地下水中の溶質として移動する物質から、難溶性の NAPL と総称される物質までの様々な汚染物質を取り扱う必要がある。しかしながら、現状では多様な物質を統一的に取り扱うことができる解析手法は存在しない。また、溶解、揮発、吸着に関しても、現状の解析手法では、現象が瞬時に平衡に到達するという仮定に基づいたモデル化がされており、浄化対策等において流速が速い場合には実際の現象を適切に表現しているとは言えない。以上の問題を踏まえ、本論文では、より適用性の広い非定常の溶解、揮発、吸着モデルを組み込んだ土壌地下水汚染解析手法の研究を行った。研究の内容と成果は以下の通りである。

・非定常溶解、揮発、吸着過程を含む解析手法の開発

揮発、溶解、吸着過程に対し、従来の瞬時平衡モデルと異なる非定常拡散型モデルに基づく定式化を行った。また、非定常溶解、揮発、吸着モデルを、多相流解析モデルに導入し、様々な汚染物質による土壌地下水汚染の解析に対応可能な3次元数値解析シミュレータを開発した。

・揮発過程に関する室内実験

揮発過程に関しては、標準砂および Berea 砂岩を対象として、エチルアルコールの1次元的な非定常揮発拡散過程に関する室内実験を実施した。また、室内実験に対して本論文で開発した数値解析を適用し、実験結果と解析結果の比較検討を行った。

その結果、揮発過程においては、非定常拡散型の揮発モデルを用い、瞬時平衡型と比較してより妥当なパラメータの組み合わせによって実験結果を精度良く再現する事が可能であることが示された。また、標準砂中におけるアセトンの非定常揮発拡散過程の実験を実施し、エチルアルコールを用いた実験の解析で求められた標準砂のパラメータと、既知であるアセトンの物性値を用いることで、本モデルによって実験結果を十分に再現することが可能であった。

・吸着過程に関する室内実験

吸着過程に関しては、標準砂およびロームへのアンモニウムイオンの吸着過程のバッチ試験を行った。その結果、吸着過程に関しては、揮発と同様に非定常過程が観察され、解析上は瞬時吸着過程とその後の拡散過程としてモデル化することにより実験結果と整合性の良い解析結果を得た。

・実際の地下水汚染サイトへの適用

本研究で開発した解析手法を、実際に真空吸引および揚水による浄化対策を実施しているテトラクロロエチレンによる汚染サイトに適用した。その結果、汚染物質の飽和帯、不飽和帯のモニタリング点における測定濃度の再現が可能であったとともに、真空吸引および揚水による対策工のデータに関しても実測値をほぼ再現することが可能であった。

結果として、本論文で示した非定常溶解、揮発、吸着モデルを組み込んだ土壌地下水汚染解析

手法は、従来のモデルでは表現が困難であった現象に対しても適切に対応可能であることが示された。

2. 適切な河道表現による地表水-地下水流動の結合解析手法の開発

地表水-地下水流動の結合解析は、広域の水循環問題を取り扱う上で必要な解析手法であるが、現状では方法的に確立されておらず、地下水と地表水を切り離れた解析を行うことが一般的である。また、結合解析に関する研究事例においても、地表流に対しては水路勾配のみを考慮する **Kinematic Wave** 近似で表現することが一般的であるが、河床勾配が変化する場合には解析が不可能となるという問題がある。従って、本論文では地表流をより自然に近い形で表現する解析手法の開発を目的とした研究を行った。研究の内容と成果は以下の通りである。

・地表流の運動方程式として **Diffusion Wave** 近似を用いた結合解析手法の開発

地表流-地下水流結合解析手法における地表流運動方程式として、水路勾配に加え水深勾配を考慮する **Diffusion Wave** 近似と **Manning** の平均流速公式による運動方程式を、地下における多相流の基礎方程式と類似の形に変形し、3次元シミュレータに導入した。

Diffusion Wave 近似の解析精度に関しては特性曲線法による運動方程式の数値解との比較を行い、十分な精度を持つことを確認した。

・室内における水路実験および実スケールでの数値実験

室内における単純水路および複合水路を用いた実験結果を用いた数値解析および実サイトスケールでの数値実験を行った。その結果、**Diffusion Wave** 近似による解析結果は室内実験結果を十分に再現可能であることが示された。また、数値実験の結果、**Diffusion Wave** 近似は、地下への浸透、地表水の流動、湛水、越流という一連の状況に関しても解析可能であることが示された。

・河床部におけるモデル化手法の改良と実サイトにおける流出解析への適用

数値モデル中での河川のより自然な表現を目的として、河道への側方からの地下水の流入をモデル化するため、地表流を複数層で表現する解析手法を開発した。このモデルを実際の流域における流出解析に適用した結果、短期流出過程で得られたパラメータの組み合わせを用いて、長期流出過程も良好に再現可能であることが示された。これから、本研究で開発を行った結合解析手法は、水循環を表現する上で十分な適用性があることが示された。

3. 広域水文解析における空間離散化手法の開発

広域を対象とした解析を実施する際に、現状では解析モデルの作成、特に解析領域の空間的離

散化に多大な時間を要する。機械工学分野では、自動格子生成手法として代数的補間法や偏微分方程式を用いた方法が研究されているが、水文解析においては地形、地質条件を考慮することが重要であるため、それらの手法の単純な適用は困難である。そのため、本研究では、水文解析に適した空間的離散化手法の研究を行った。研究内容と成果は以下の通りである。

- ・ 質点-バネ-流体モデルによる自動格子離散化手法の開発

本論文では、最終格子形状に地形を反映し、かつ解析精度維持の観点から可能な限りの格子平面形状の漸移性、直交性を得るために、質点-バネ-流体モデルの開発を行った。これは、領域内に配置した格子点上に質点を置き、質点間のバネと、格子内の仮想流体の圧力によって質点に作用する力の釣り合いを反復的に解くことによって領域内の最適な格子点配置を求める方法である。このモデルを簡単な領域境界形状を持つ領域における自動格子生成の数値実験に適用した結果、境界形状に関わらず適切な格子が求められることが示された。また、このモデルの適用性を向上させるため、FEMを用いた前処理を付加することで、格子点の初期配置をより適切化することが可能であり、格子形成に要する時間を大幅に短縮する効果が得られる事が明らかになった。また、形成された格子形状の適切性を評価するために、一般座標系の座標変換マトリックスを基に格子の変形度を評価する手法を開発した。

- ・ 実際の流域に対する適用

以上の手法を実際の数百 km^2 オーダーの領域に適用し、解析格子の自動生成を行った。その結果、従来の人力による離散化では数週間を要した格子分割を、数時間で終了することができ、格子の適切性も保証されることが示された。

本論文における成果は、広域の水循環過程から局所的な土壌地下水汚染問題までを統一的、かつ効率的に取り扱うことを目的とした解析の要素技術を開発し、統合したことにある。このため、従来では個別に対処していた問題に対し、格子生成から実際の解析までを一連の手法によって対応することが可能となった。今後、本研究の成果を多くの実サイトに適用することによって、より信頼性を増大させ、水環境評価の有力な手法として行きたい。