

(続紙 1)

京都大学	博士（農学）	氏名	泉 智 揮
論文題目	Inverse Modeling of Variably Saturated Subsurface Water Flow in Isothermal/Non-isothermal Soil (等温・非等温土壌における飽和-不飽和地下水浸透流の逆解析手法)		
(論文内容の要旨)			
現場土壌における地下水浸透現象の把握と精緻な解析は、水資源の有効利用といった効率的な農業生産活動に寄与するだけでなく、農薬や肥料の過剰な投入による水質への影響や塩類集積のような塩分移動を考慮する際の物質輸送問題、すなわち、農業生産活動が環境に与える影響の定量的評価においても重要である。本論文は、このような観点から、現場土壌の特性をよりの確に反映させることのできる、地下水浸透流の支配方程式中に含まれる土壌水理パラメータの同定手法について検討したものであり、以下の7章から構成されている。 第1章は緒論であり、水資源・水環境の現状を概観して農業における持続可能な水資源管理の重要性について述べ、そのための基本として浸透流場の正確な把握、すなわち、精緻な浸透流解析が必要であることを指摘している。そして、浸透現象のモデル化において必須のプロセスであるパラメータの同定の重要性を示し、本論文の目的と意義を述べている。 第2章では、浸透流解析の基礎となる数値モデルの表現形式とその数値モデル化手法、さらには、モデルパラメータである支配方程式中の土壌水理パラメータの関数表現とその同定手法に関する先行研究を整理している。 第3章では、飽和-不飽和地下水浸透流を記述する圧力水頭を状態変数としたリチャーズ(Richards)式に対する土壌水理パラメータ(土壌水分保持曲線、不飽和透水係数)の逆解析による同定手法の開発と検証を行っている。開発した手法では、まず同定すべき土壌水理パラメータの関数表現として、関数形状に高い自由度をもたせた、複数の三次スプライン関数を順次接合させて得られる自由形状関数を導入している。そして、それぞれのパラメータに対して異なる自由形状関数を定義して、これらの関数を、有限要素法により定式化した数値解析(順解析)モデルとレーベンバーグ・マーカート法(Levenberg-Marquardt algorithm)を用いた最適化手法を組み合わせたシミュレーション最適化法により同定している。本手法の有効性を双子実験により検証し、高い精度で土壌水理パラメータが同定できることを明らかにしている。 第4章では、体積含水率を状態変数としたリチャーズ式に対する不飽和透水係数の逆解析による同定手法を提案している。本手法は第3章で提案した手法と同様の枠組みで構成されているが、ここでは、表層土壌における地温の土壌水分移動への顕著な影響を考慮するために、順解析モデルの支配方程式には、リチャーズ式と熱伝導方程式とを連成させた式を用いている。また、同定手法の提案とともに、現場において同定に必要な土壌水分や地温の測定データを収集するための安価で簡便な観測システムを考案している。そして、本手法と観測システムの現場土壌への適用により、土壌水分の脱水過程における観測データの再現性の観点から本手法の有効性を検証している。 第5章では、前章までで扱った圧力水頭や体積含水率を状態変数とするリチャーズ式に			

対して、飽和-不飽和領域に適用できかつ水収支の保存性に優れている、圧力水頭と飽和度を状態変数にもつ混合型のリチャーズ式に対する不飽和透水係数の逆解析による同定手法を提案している。本手法は、第4章の手法と同様、同定手順については第3章の手法を基礎としており、順解析モデルにおける支配方程式を変更したものである。現場土壌における無降雨期間(脱水過程)の観測データに対する同定結果から、本手法は等温場として仮定できる領域において適用可能であることを明らかにしている。

第6章では、第5章の手法を非等温場へ拡張している。すなわち、混合型のリチャーズ式と熱伝導方程式を連成させ、地温による水分移動への影響を考慮した支配方程式に対する不飽和透水係数の逆解析による同定手法を提案している。無降雨期間における現場土壌に対して、本手法と前章の手法を適用し、結果の比較から本手法の有効性を確認している。

第7章では、以上によって得られた知見を整理・要約している。

(論文審査の結果の要旨)

飽和-不飽和地下水浸透流解析において土壌水理パラメータを同定することは、土壌中の水分移動のみならず溶質や熱移動を推定するうえでも必要不可欠なプロセスであり、また同定の信頼性が数値解の再現性を左右することから、解析において最も重要なプロセスともなる。このとき、同定に必要な土壌特性に関する観測データは、乱さない現場(原位置)において取得したものが望ましい。本論文は、現場土壌における精度の高い浸透流解析モデルの構築を目的として、支配方程式中のモデルパラメータである土壌水理パラメータ(土壌水分保持曲線、不飽和透水係数)を関数形状の自由度が高い自由形状関数を用いて表現し、その関数形状をシミュレーション最適化法により同定する逆解析手法を開発したものであり、評価すべき主要な点は以下の通りである。

1. 従来の土壌水理パラメータを表現する代表的な関数モデルは、土壌水分保持曲線関数と不飽和透水係数関数に共通のパラメータを用いて、土壌水分保持曲線関数から不飽和透水係数関数を導くものである。これに対して本論文では、共通のパラメータを用いることに起因する不飽和透水係数の推定誤差を小さくするために、土壌水分保持曲線と不飽和透水係数を異なる関数で定義し、さらに、その関数形状に高い柔軟性(自由度)を確保する目的で三次スプライン関数を接合した自由形状関数を採用している。これにより、浸透流解析の精度が向上することが示されており、従来の関数モデルに対する代替手法となる。
2. 現場土壌において比較的容易に測定が可能な土壌水分や地温の観測データを基にした、数値解析モデルと関数最適化手法を組み合わせたシミュレーション最適化法による土壌水理パラメータの同定手法の枠組み、並びに同定に必要な観測データを得るために考案された安価で簡便な観測システムは、信頼性の高い土壌水理パラメータを得るための経済的かつ効率的な原位置同定法として有用である。
3. 地下水浸透流の支配方程式であるリチャーズ式の3つの表現形式に加えて、表層土壌の地温による水分移動への影響を考慮するためにリチャーズ式に熱輸送式を連成させた支配方程式についても、提案している土壌水理パラメータの同定手法の有効性が示されている。このことから、状態変数の選択や飽和・不飽和、等温・非等温といった現場土壌において想定される幅広い条件の中から、対象土壌の状況に応じた土壌水理パラメータの同定が可能となる。

以上のように、本論文は、種々の条件に対応した飽和-不飽和地下水浸透流基礎式に対して、そこに含まれる土壌水理パラメータの逆解析による同定手法を提案し、それらの有効性を検証したものであり、数値水理学、地下水学、水資源工学の発展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24年2月15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。

要旨公開可能日： 年 月 日以降