

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560058

研究課題名(和文) 多孔性媒質内流れの高精度数値解析による地下水汚染シミュレーション手法の構築

研究課題名(英文) Numerical simulation techniques for groundwater flows with higher accuracy

研究代表者

水藤 寛 (SUITO HIROSHI)

岡山大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：10302530

研究成果の概要(和文):本研究では、地下水の流れを解析するための数値モデルについて調べ、比較検討を行った。地下水の流れに代表される多孔性媒質内の流れ解析については、古くから様々な手法が提案されてきている。本研究では、流れの現象のモデルとして浸透流方程式と Navier-Stokes 方程式を取り上げ、実験結果と比較することで、これらのモデルによる数値計算について検討を行った。

研究成果の概要(英文): Mathematical models describing groundwater flows have been examined from several viewpoints. Numerical results by using different models and different discretizations are compared with experimental results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：応用数学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 工学基礎

キーワード：地下水、Navier-Stokes 方程式、浸透流方程式

1. 研究開始当初の背景

地下水の流れに代表される多孔性媒質内の流れ解析については、古くから多くの研究が行われてきている。Darcyによる研究から始まって、特に土木分野では現場における必要性

から多くのモデルが提案され、実用化されてきている。環境分野においては、特に廃棄物の地下処理に際してその安全性を確保するためなどの目的において、多孔性媒質内の流れ

解析が積極的に進められている。それらの研究においては、支配方程式として飽和・不飽和浸透流方程式と呼ばれるものが用いられていることが多い。これは、より一般的な流れの解析で用いられるNavier-Stokes方程式を簡略化したものと考えることができ、土質中のように流速が非常に遅いところでは妥当なモデルであると考えられている。この解析方法の問題点としては、以下の点が挙げられる。

- (1) 圧力分布が、多孔性媒質内の間隙中の水分量の関数として、実験的に与えられること
- (2) 多孔性媒質内のメニスカス(不飽和領域に存在する多数の微細な気液界面、図1参照)に由来するミクロな流れのメカニズムが方程式中に取り入れられていないこと

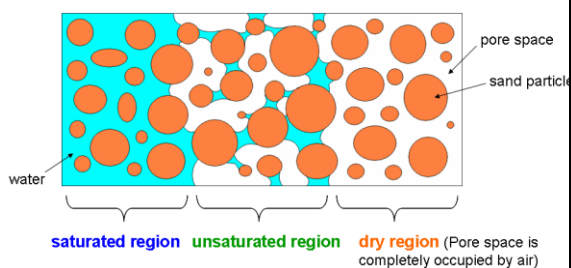


図1：多孔性媒質の模式図

- (3) Navier-Stokes方程式の中で重要な役割を果たしている移流項(非線形項)が無視された形になっていること

これらの問題点により、問題設定によっては対象とする現象を正しく記述していないと思われる状況もあり、環境に大きな影響のある地下水の流れを解析するためには、これらを解決してより信頼性の高い解析手法を構築することが求められている。このような背景の中で本研究を開始した。

2. 研究の目的

背景で挙げた問題点を改善し、より現実に

即した信頼性のあるシミュレーションを行うための数理モデルを構築することを、本研究の目的とした。具体的には、いくつかの異なる数理モデルを適用して比較を行うこと、また、離散化手法についてもいくつかの手法を比較し、適切な手法を選択するための情報を得ることを目指した。

3. 研究の方法

本研究の中心的方法は、計算機を用いた数値シミュレーションである。具体的な手順は下記の通りである。

- (1) 比較の対象とするいくつかの偏微分方程式系を差分法によって離散化する。
- (2) 離散化された方程式を数値計算するためのプログラムを作成し、計算機上で実行する。
- (3) 計算結果を可視化し、物理的妥当性の評価を行う。
- (4) 可能な場合には厳密解を設定し、それと数値解の比較を行う事によって、離散化とプログラミングの正当性を確認する。
- (5) 実験データとの比較を行い、数理モデルの妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) Navier-Stokes方程式を用いた場合の数値シミュレーション

①数値計算プログラムの検証

運動方程式の移流項の離散化にCIP法を適用し、その他の離散化方法、たとえば上流差分法などとの比較を行った。まず、2次元の典型的なテスト問題を用いてプログラムの検証を行い、3次元問題に拡張して質量の保存性についての検証を行った。その結果、すでに多くの論文で報告されているように、CIP法は他の上流差分法系統の方法に比べて質量保存則を高い精度で満たしていることが確認でき

た。

②土層実験との比較

M. Vauclinによって報告されている土層実験結果を用い、同様の条件で数値シミュレーションを行うことによってその結果を比較した。この実験は、 $3\text{m} \times 2\text{m} \times 0.5\text{m}$ の土層を用い、複数の方法で水分を与えた場合の領域内各点における水分飽和度の時系列変化が測定されているものである。図2に、ある条件における計算結果を、水分飽和度の等値面で示す。計算領域左上の流入口から水分が流入し、右下の排水口から流出している様子がわかる。

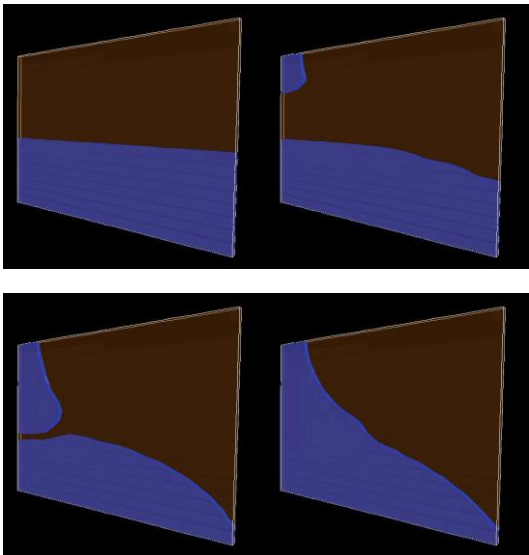


図2：シミュレーション結果例

Vauclinの実験では、初期状態において飽和領域と不飽和領域が混在している。この実験結果に対して、(a)初期状態における水分飽和度分布の考慮の有無、(b)水分量移動の式の離散化方法の違い、を与えて実験における飽和度分布の時間変化とそれに対応する数値シミュレーションによる結果とを比較した。図3に、移流項の離散化にCIP法を用いた場合の数値計算結果と実験結果の比較例を示す。縦軸は鉛直方向の深さ、横軸は水分飽和度を示す。土質の空隙率は0.3である。時間の経過に伴って水分が下方に浸透していく様子がわかる。

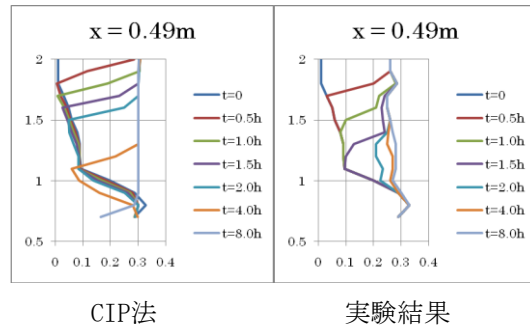


図3：シミュレーションと実験の比較

(a)については、垂直方向の初期飽和度分布が結果に大きく影響した。これは主となる流れが鉛直方向であるため、その考慮の有無が水分移動の速度に大きく関わっているためと考えられる。

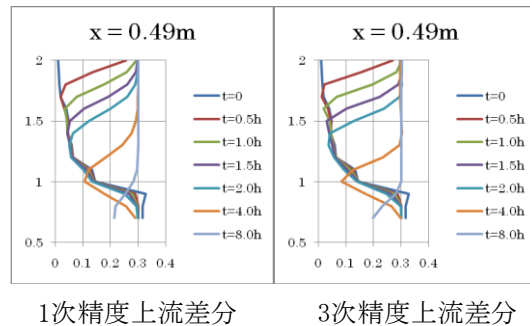


図4：離散化手法による比較

(b)については、移流項の離散化に1次精度と3次精度の上流差分を使用した場合の結果を図4に示す。予想に反してCIP法を用いた場合もその他の上流差分法を用いた場合もあまり大きな違いは得られなかった。これは、元々の現象の特性速度が遅く非線形性があまり強くなかったためであると考えられる。

(2) 浸透流方程式を用いた数値シミュレーション

①数値計算プログラムの検証

地下水流動解析の分野で広く用いられている浸透流解析による数値シミュレーションを行った。まず、3種類の土質からなる1次元の典型的なテスト問題についての厳密解を求め、

プログラムの検証を行った。それにより、格子間隔を小さくしていくことによる厳密解への収束（図5）が確認できた。

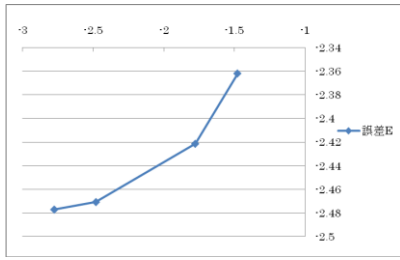
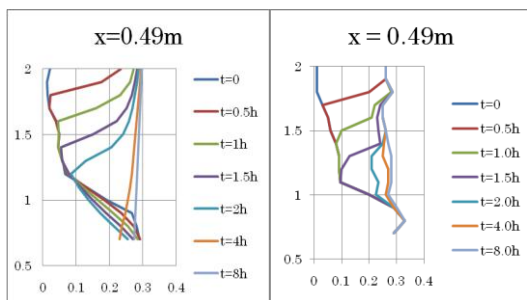


図5：格子間隔と誤差の関係

②土層実験との比較

Navier-Stokes方程式を用いた(1)②の場合と同様に、土層実験との比較を行った。図6に、数値計算結果と実験結果との比較を(1)と同様の形で示す。



浸透流方程式

実験結果

図6：シミュレーションと実験の比較

初期状態における水分飽和度分布の考慮の有無については、(1)②と同様に垂直方向の初期飽和度分布が結果に大きく影響した。

(3) モデリングによる比較のまとめ

地下水流れのモデルとしてNavier-Stokes方程式を用いた場合と浸透流方程式を用いた場合について実験との比較を行ったところ、モデルの違いによる実験との誤差に大きな違いはないという結果が得られた。当初予想していたのはNavier-Stokes方程式を用いることによって精度の向上が実現できるので

はないかということだったが、本研究の範囲内ではそのような結果にはならなかった。これは、対象とした実験が比較的小さな領域内の多孔性媒質中流れであった事とも関係していると思われる。今後の発展としては、より大きな領域での比較を行うことを検討すべきであると思われる。これらの比較等により、多孔性媒質内における流れの数値シミュレーションをより高精度に行い、地下水流動が関わる種々の環境問題の解析に役立てることが可能になると期待される。

5. 主な発表論文等

本研究テーマに関する雑誌論文、学会発表等は、本報告書提出時点では特になし。

6. 研究組織

(1)研究代表者

水藤 寛 (SUITO HIROSHI)

岡山大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：10302530