



# Solute Transport Characteristics in Heterogeneous Porous Media

倉澤, 智樹

---

(Degree)

博士 (農学)

(Date of Degree)

2022-03-25

(Date of Publication)

2023-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8365号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008365>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 博士論文内容の要旨

氏 名 倉澤 智樹

専攻・講座 食料共生システム学・生産環境工学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Solute Transport Characteristics in Heterogeneous Porous Media

(不均質多孔質媒体内における溶質輸送特性)

指導教員 食料共生システム学専攻 准教授 井上一哉

地下水は地球上で最も豊富に存在する淡水資源の一つであり、歴史的に農業や工業、生活用水として利用されてきた。しかしながら、20 世紀後半に入ると、人間活動の影響を受けて、地下水汚染が顕在化し、地下水の質的問題が取り上げられるようになってきた。河川や湖沼のような表流水の汚染とは異なり、地下水の汚染は顕在化した時点で、既に深刻な状況となっていることが多く、有効な対策を講じるには手遅れである状況が様々なサイトで報告されてきた。また、地下水流速は極めて遅いため、汚染物質を除去するために、多大な時間が必要となる。

汚染浄化に当たって、第一に直面する問題は、汚染範囲の特定と物質輸送の将来予測である。これを可能とするために、実サイトでの物質輸送特性を正確に理解することは、最も重要なステップといえるものの、自然地盤は空間的に不均質性を有しており、物質は極めてイレギュラーな挙動を呈する。このため、物質輸送特性の理解は未だ不十分な状況にある。そこで、本博士論文では、水溶性物質、つまり溶質に着目し、不均質多孔質体内での輸送特性の知見を獲得することに加えて、溶質輸送パラメータを定量評価することを目的とした。

まず第 2 章では、溶質の分散挙動と多孔質媒体の不均質性との間にある基礎的な関係性を評価するために、二つの透水係数の異なる土質試料で構成された単純な成層地盤を対象とした。ここで、溶質の分散挙動を高精度に評価するため、画像解析による定量化手法を利用した。この方法を適用するため、前面が透明なガラスで構成された二次元土槽と水溶性色素である Brilliant Blue FCF の水溶液を利用した。実験手順は次の通りである。(1)所定の成層地盤を二次元土層内に構成した。(2)地盤作成後、地盤内に定水頭装置を利用して、定常な地下水流れを導入した。(3)成層地盤に Brilliant Blue FCF 水溶液を注入し、土槽前面から経時的にカメラで撮影することで、溶質の分散挙動を補足した。(4)事前に補足していた色素水溶液と撮影画像のピクセル値との関係性から、経時的に捉えた画像を溶質の濃度データに変換した。(5)物質の分散状況を定量化可能な空間モーメント法を利用して、分散挙動の指標であるマクロ分散長を推定した。結果として、地下水流れ方向への分散挙動を表すマクロ縦分散長は、溶質の輸送距離とともに増加する傾向、いわゆるスケール依存性を示した。フィールド実験や数値計算、理論的な先行研究において、マクロ縦分散長のスケール依存性は確認されてきたものの、ラボスケール実験で確認された事例はほとんどなく、価値あるデータを補足できたといえる。一方、流れと直交方向への分散挙動の指標であるマクロ横分散長は、輸送距離の増加とともに単調な低下傾向を示した。本実験では、流れと直交方向に線状に色素水溶液を配置しており、初期にマクロ横分散長が過大推定され、その影響が残存し続けた結果と示唆される。また、マクロ縦分散長は、成層地盤を構成する二つの土質試料の透水性の差異に依存した。さらに、本章では、溶質の流れ方向へ対し、最も速く輸送されるフロント部と最も遅く輸送されるリア部を定量化した。結果的に、本実験で対象とした成層地盤においては、フロント部とリア部の間の幾何距離は、溶

(氏名： 倉澤 智樹 NO.2 )

質輸送とともに線形的に増加することを確認した。

第3章では、地盤モデルのアップスケールに着目した。自然地盤では空間的に透水係数が変動し、この変動性は溶質の分散挙動に最も影響を与える因子として知られている。つまり、自然地盤における透水係数の空間分布状態を正確にモデル化することは信頼性の高い溶質輸送モデルの構築につながるという。一方、計算コストの膨大さに加え、透水係数分布を高精度に計測することの物理的困難性のため、一般には実サイトよりも解像度の低下したモデル地盤で溶質輸送現象を計算せざるを得ない。このとき、モデル地盤の透水係数分布の解像度を低下させるプロセスのことをアップスケールと呼び、この結果、少なからず真の溶質分散挙動と異なる現象をモデリングすることとなる。そこで、本章では、成層的に透水係数が変動するような比較的シンプルな地盤モデルを対象に、アップスケールが溶質分散性に与える影響を評価することを目的とした。この目的を達成するために、ラボスケールの溶質輸送実験と数値計算を連携した。研究の一連の流れは以下の通りである。(1)オランダのデンハーグに位置する被圧帯水層の透水係数データを参考に、二次元土層内に成層地盤を構築した。(2)第2章と同様の実験プロセスによって、対象地盤での溶質分散特性を評価した。(3)実験と同一条件下にて、ラグランジュ的手法の一つであるランダムウォーク粒子追跡法(RWPT)を利用した数値解析を実行し、溶質分散性を評価した。(4)(2)実験と(3)数値解析の結果を比較することで、RWPTによる数値計算結果の妥当性を確認した。(5)数値計算の妥当性の確認後、対象地盤をアップスケールした地盤にて数値解析的に分散性を評価し、アップスケール度合いと溶質分散の関係性を評価した。結果として、(4)で実行した実験と数値解析の結果の比較では、マクロ縦・横分散長ともに一致し、これよりRWPTによる数値計算の妥当性を確認できた。(5)では、アップスケールによる透水係数分布の平滑化によってマクロ縦分散長は過小推定される傾向にあることがわかった。一方、本章では成層的に透水係数が変動するシンプルな地盤モデルを対象としたため、流れと直交方向の分散性を表すマクロ横分散長には影響しなかった。

第3章では、上述の通り成層的に透水係数が変動するような比較的シンプルな地盤モデルを対象に、アップスケールの影響を評価した。しかしながら、一般に、自然地盤はあらゆる軸方向に対して透水係数が変動する。そこで、第4章では、二次元的に透水係数が変動するランダム場を対象として、アップスケールの影響を実験的に評価した。実験プロセス自体は、第2章、第3章と類似した方法を採用しているものの、注入方法に関してはユニークな手法を採用した。具体的には、二つの注入方法を利用しており、一つは第2章、第3章と類似した方法であり、流れと直交方向に並んだ5つの注入点から同時に注入する線状注入である。もう一つは、5つの注入点のうち一つを利用して注入する点状注入である。線状注入のマクロ縦分散長は、第3章の結果と一致して、アップスケール度合いの増加とともに低下することがわかった。また、線状注入に比べると、点状注入の推定結果は、輸送距離に応じて変動性が高いことが確認された。点状注入では、溶質ブルームが相対的に

(氏名： 倉澤 智樹 NO.3 )

小さいため、局所的な透水係数の不均質性に影響されやすく、結果的にマクロ縦分散長は輸送距離に応じて変動したと考えられる。また、第2章の結果と同様に、線状注入によって推定されたマクロ横分散長は過大推定された可能性があったため、初期の溶質分布の影響を低減する方策として、アンサンブル平均による評価手法を導入した。この結果、マクロ横分散長の推定において、1オーダーもの過大評価を抑制することに成功した。

上述の第2章から第4章では、ラボスケールの実験と数値計算を利用して、不均質多孔質体内での輸送特性の知見獲得を目的としてきたものの、最終的には実際のフィールドで、溶質輸送特性に関連するパラメータを推定することが、正確な溶質輸送モデリングにつながると思われる。そこで、第5章では、実サイトを対象とした溶質輸送パラメータの決定に焦点を当てた。フィールドでのパラメータ推定に当たっては、コストと時間を費やせば、より信頼性の高い推定が可能であるものの、工学的な利用を考慮すると、簡易的に推定する手法の発展は重要である。本章では、一つの観測孔を利用することで、簡易的にパラメータが推定可能な単孔式希釈試験を利用することとした。対象フィールドは、奄美大島の東方20kmに位置する喜界島の南西部とした。本フィールドは、地下水を貯留し、沿岸部からの塩水侵入を防ぐことで、地下水資源を確保する地下ダムが建設される予定地であり、この点からも溶質輸送パラメータを決定することは有意義と考えられる。実際の単孔式希釈試験の手順は次の通りである。(1)観測孔内部の地下水に塩化ナトリウムと均一に投入した。(2)3つの深度においてNaCl濃度を計測し、希釈されていく様子を補足した。(3)所定時間経過後、観測を終了し、濃度の時系列変化データを抽出し、関連する理論解にフィッティングすることで、ダルシー流速やマクロ分散長を推定した。まず、濃度の時系列変化データを確認すると、深部ほど希釈スピードが低減することが確認された。これは、帯水層のうち、深い地点ほど透水係数が小さい可能性を示唆する。また、周辺の地下水の動水勾配と現場透水試験の結果から得られた水平地下水流速と比較すると、単孔式希釈試験から得られた流速の推定値は概ね一致した。これより、単孔式希釈試験から流速を推定することの妥当性を検証できたといえる。また、本試験のマクロ縦・横分散長は既往研究の結果と比べて小さく推定された。一般に、分散長はスケール依存性を呈するものの、本試験では単一の試験孔を利用したためスケールの影響を補足できず、結果的に過小推定された可能性が示唆される。

氏名	倉澤 智樹		
論文題目	Solute Transport Characteristics in Heterogeneous Porous Media (不均質多孔質媒体内における溶質輸送特性)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	准教授	井上 一哉
	副査	教授	河端 俊典
	副査	教授	田中丸 治哉
	副査		
	副査		
要 旨			
<p>地下水は地球上で最も豊富に存在する淡水資源の一つであり、農業用水や工業用水、生活用水として幅広く利用されている。地下水利用の高度化に伴い、地下水の量的課題から質的課題へ地下水環境問題は推移しており、地下水汚染問題においては、溶質輸送理論の深化が求められている。河川や湖沼のような流水に比べると地下水は緩慢に流れることから、汚染された地下水を浄化するには多大な時間と費用を要する。そのため、効率よく、確度の高い溶質輸送特性の抽出・推定や汚染進行の予測が望まれるものの、自然地盤の有する空間的不均質性に起因して、汚染物質はランダム性の高い輸送挙動を呈する。帯水層を構成する透水係数の空間分布はサイトごとに大きく異なり、多様な地層構成と移流分散現象の関係については未だ解明されていない事項が多くある。</p> <p>このような背景を踏まえて本論文では、室内レベルと実サイトレベルの両面から、透水係数の不均質性に応じた移流分散現象について考究している。成層地質やランダム地質を再現した模型実験は従来の研究事例にはない輸送距離の長さや解像度の高さを有している。また、溶質輸送現象の可視化と画像解析の融合、ラグランジュ的数値解析との連携により、不均質多孔質体内における溶質輸送の macroscale 特性を抽出・推定している。さらに、汚染修復策や地下構造物の設計を見据えて、透水係数分布のアップスケールに着目し、実際の透水係数分布と実務的に採用される透水係数分布の解像度の差異が溶質輸送挙動に及ぼす影響について定量的に検証している。加えて、地下ダムサイトを対象として、鹿児島県喜界島の石灰岩地帯の単孔式希釈試験を通じて、簡便な地下水流速の推定方法を提案しており、価値ある実験データを獲得している。以下に、本論文の内容ならびに審査結果について述べる。</p> <p>本論文は6章から構成されており、各章の概要と結論は以下の通りである。</p> <p>第1章では、地下水汚染問題の概要、移流分散方程式のモデリングに関する概説、溶質輸送現象を検討するにあたって必要な事項を研究内容とともに言及している。</p> <p>第2章では、溶質の分散挙動と多孔質媒体の不均質性に対する定量的な関係性を検討するため、青系色素水溶液を水溶性汚染物質の模擬トレーサ、かつ、可視化媒体として採用した。透水係数の異なる土質試料により成層地盤を構成し、色素トレーサによる二次元溶質輸送実験を繰り返し実施した。また、画像解析と空間モーメント解析を連携することにより、溶質分散挙動の指標となる macroscale 分散長を時系列推定した。結果として、地下水流れ方向への分散挙動を表す macroscale 分散長は、溶質の輸送距離とともに増加する傾向、いわゆるスケール依存性が発現することを確認した。また、macroscale 分散長の値は、成層地盤を構成する2つの土質試料の透水性の差異に強く依存する知見を得た。一方で、地下水流れと直交方向への分散挙動の指標である macroscale 分散長は、溶質輸送開始時の初期分布形状に依存する点、輸送距離の増加とともに単調な低下傾向を示す点を明らかにした。さらに、溶質の空間分布において、最も速く輸送されるフロント部と最も遅く輸送されるリア部を定量化した結果、本実験で対象とした成層地盤においては、フロント部とリア部の間の幾何距離は、溶質輸送とともに線形的に増加することを確認した。</p>			

氏名	倉澤 智樹
<p>第3章は、透水係数の空間分布にかかわる解像度に着目し、アップスケールモデルを検討対象とした。自然地盤では空間的に透水係数は変動し、変動特性は溶質の分散挙動に最も影響を与える因子でありながら、実際の透水係数の変動特性を模型実験に反映することは緻密な実験体制が要求されるため、前例は極めて少ない。また、計算コストの膨大に加え、透水係数分布を高精度に計測することの物理的な困難により、一般的には、実サイトよりも解像度の低下した変動特性の下で溶質輸送現象を数値的・実験的に探索している現状にある。そこで、オランダ・デンハーグに位置する被圧帯水層の透水係数データを参考に、二次元土層内に成層地盤を構築し、アップスケールが溶質分散性に与える影響を評価した。第2章と同様の実験プロセスによって、アップスケール度合いの異なる模擬帯水層ごとに溶質分散特性を評価するとともに、ラグランジュ的数値解析手法であるランダムウォーク粒子追跡法にて数値シミュレーションを実施した。その結果、模型実験にて得られた macroscale 分散長の推移を良好に再現することができた。また、アップスケールに伴う透水係数分布の平滑化に対応して macroscale 分散長は過小推定される傾向にあることがわかった。さらに、成層的に透水係数が変動する成層地盤では、流れと直交方向の分散性を表す macroscale 分散長はアップスケールに依存しないことが明らかとなった。</p> <p>第4章は前章にて得られた結果の上積みを図る内容である。第3章では、鉛直方向のみに透水係数が変動する帯水層を対象としてアップスケールの影響を評価したものの、多くの自然地盤は各軸方向に対して透水性は変化する。そこで、第4章では、水平方向への透水係数変動を考慮したランダム場に対するアップスケールの効果を定量的に評価した。地球統計学的手法により計算した透水係数分布を二次元土層内に生成するとともに、これまでの章の実験方法と同じく、鉛直方向、かつ、線状に溶質を配置した初期分布を起点とする溶質輸送現象を捉えた。その結果、アップスケール度合いの増加とともに macroscale 分散長は低下することがわかった。また、線状の初期配置に対する macroscale 分散長の解釈を深めるため、点状に初期配置した溶質輸送現象を複数の点状起点から繰り返して実験する点、個々の解析結果を輸送距離ごとにアンサンブル平均する点を提案した。その結果、macroscale 分散長の推定精度は、特に輸送距離の短い部分において1オーダー以上、向上することを実証した。また、macroscale 分散長に関しては、点状分布の推定結果は線状分布よりも輸送距離に応じた変動性が高いことを明らかにした。</p> <p>第5章では、実フィールドを対象として、溶質輸送特性に深く関与する水平方向の地下水流速の低コスト推定に焦点を当てた。物理的・経済的に制約の強い実フィールドのパラメータ推定の効率化を図るべく、単独の観測孔を利用した単孔式希釈試験に基づく簡易推定手法を開発した。対象フィールドは、奄美大島の東方20 kmに位置する喜界島の琉球石灰岩地域であり、地下水脈を堰き止めて貯留し、農業用水としての水資源を確保する地下ダムの建設予定地である。単孔式希釈試験ではNaClをトレーサとして、観測孔内部の地下水域へ均一に投入し、複数の深度にてNaCl濃度を時系列計測した。観測濃度データを理論解と適合して、ダルシー流速、地下水流速を簡便かつ迅速に推定した。実験の結果、当該地域では帯水層の深部ほど希釈スピードが低減することが確認され、深度とともに透水係数は小さくなることを示唆した。また、周辺の地下水の動水勾配と現場透水試験の結果から得られた水平地下水流速と比較すると、単孔式希釈試験から得られた流速の推定値は概ね一致し、提案手法による地下水流速の推定は一定の信頼性があることを結論付けた。</p> <p>第6章では、本論文の成果と結論をまとめ、今後の研究課題について言及している。</p> <p>上記の通り、本研究は、一連の模型実験、フィールド実験、数値解析を通じて、不均質性の異なる多様な地層構成に応じた移流分散現象について議論しており、溶質輸送特性を定量的に評価している。本研究の成果は、輸送現象論の深化のみならず、地下水汚染サイトにおける汚染進行の予測や浄化時間の見積もり、農業地域における施肥由来の地下水汚染予防策の立案について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者 倉澤智樹は、博士(農学)の学位を得る資格があると認める。</p>	