

令和元年6月13日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K07941

研究課題名(和文)異常輸送現象を伴う溶質輸送シミュレータと地下水硝酸リスクマップの開発・検証

研究課題名(英文) Numerical simulations on anomalous solute transport and risk maps of nitrate nitrogen

研究代表者

井上 一哉 (Inoue, Kazuya)

神戸大学・農学研究科・准教授

研究者番号：00362765

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：硝酸態窒素による地下水汚染のリスクマップを数値解析的に把握・可視化するため、地下水汚染物質が揚水井に流入する領域を集粒域と定義して、実汚染サイトでの溶質輸送挙動をランダムウォーク粒子追跡法により解析した。対象サイトの地質と2か所の揚水候補地点に対して、種々の揚水量条件下における三次元集粒域を空間確率分布として時系列で推定した。並行して、実サイトを想定したモデル輸送実験を実施し、汚染分布の経時変化を考察した。また、集粒域の空間確率分布をエントロピーと関連付けて、揚水量とエントロピーの変化を揚水経過時間に沿って定量評価することで時々刻々と変動する汚染領域を数値的に把握できる手法を開発・検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶質の異常輸送は局所性の高い現象であり、フィールドにて観測することが難しい現象であるため、理論的・数値的検討が多くなされてきた。当該研究では、モデル実験により、異常輸送現象の発現とその伝播をマクロ分散現象の観点から定量化することに成功した点に学術的意義を有している。地下水管理を想定して、地下水揚水に伴う地下水流れと溶質輸送の関係を可視化できる数値シミュレータをランダムウォーク粒子追跡法により開発し、実際の汚染サイトを対象に検証した点は社会的意義を有していると判断される。揚水井を軸として、時々刻々と移り変わる汚染領域の変動をリスクマップとして可視化するシステムを構築した点は当該研究の特徴である。

研究成果の概要(英文)：This study presented a stochastic approach for estimating time-related solute capture zones of two pumping wells in three dimensions in a groundwater contamination site. In order to visualize a contaminated area as a risk map, random walk particle tracking was applied to assess the travel time and subsequent spatial probability distributions of introduced ensemble lattice cells having the probability that particles located initially within cells reach the pumping wells during a certain duration of the pumping. Laboratory tracer experiments were also conducted to elucidate variations of contaminated area. The results demonstrated that weighted volumes of solute capture zones coincide with the total pumping rate and outer solute capture zone in the site evolves deeper areas of inner solute capture zone. Moreover, entropy related to the spatial probability distributions increased with elapsed time, providing a time-related risk map.

研究分野：農業工学

キーワード：異常輸送 硝酸態窒素 溶質輸送 モデル実験 リスクマップ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界保健機関では、水質基準の観点から地下水の硝酸汚染対策の強化を検討している。これは水質の維持や浄化に一層の効率化を要求しており、早急に取り組むべき課題は多く、適切な地下水管理、ならびに、適材適所での地下水浄化に関わる検討が求められている。広範囲に広がる汚染物質の輸送現象において、特に自然地盤内の透水係数分布が大きく変動する部位や亀裂性の間隙充填部における異常輸送現象が汚染の進行や予測の精度に關与するものの、動態を捉えるには至っていない。また、汚染の状況を社会的に認知する上で、水溶性物質による地下水汚染に対する汚染分布やリスク分布など、視覚的にわかりやすい伝達手段が無い点は、新しい知見や成果として求められる項目である。特に、硝酸態窒素による地下水汚染のように揚水井からの地下水の汲み上げを伴う場合には、汚染された地下水の質の回復を図る上でも領域全体を俯瞰できるような成果は貢献度が高いと考えられる。

2. 研究の目的

(1) 帯水層内を移動する水溶性地下水汚染物質の主たる輸送現象は地下水流れに伴う移流現象、土粒子間隙内をランダムに移動する分散現象、溶質の濃度ポテンシャルを駆動力とする拡散現象に大別することができる。一般的に、拡散現象による溶質分布の拡大度合いは分散現象に比べると小さいため、移流と分散の2つの現象は物質輸送現象の根幹と言える。帯水層の透水係数は場所ごとに異なる不均質性を有しており、透水係数に応じた地下水の流向・流速の変化は溶質の輸送経路に大きく影響を及ぼす因子である。間隙内の流路のランダム性に起因する分散はマイクロ分散現象、透水係数の変化による平均的な流速変化に起因する分散はマクロ分散現象と称され、マクロ分散現象はマイクロ分散現象よりも溶質の拡大度合いの大きい現象である。不均質地盤を対象とした実験事例は乏しく、透水係数分布の不均質度や透水係数の空間相関距離、すなわち相関長が軸となる研究例は極めて少ない。そこで本研究では、1 m 長さの土槽による中規模溶質輸送実験を通じて、マクロ分散現象の定量化を試みるとともに、マクロ分散性に及ぼす相関長、不均質度の影響に関する知見を得ることを目的とした。

(2) 帯水層中に侵入した地下水汚染物質の除去手段として地下水揚水法は実用性の高い方法であり、イオン系物質を含めて、地下水に溶解した相の揚水・回収に能力を発揮している。領域の動水勾配や揚水量による地下水流動の駆動力に応じて地下水流速分布は変動するため、地下水揚水法を実施する際には、地質分布に対応した透水係数分布と既定の揚水量を条件として、揚水井へ到達する汚染地下水の空間的な拡がりを見積もることで、浄化可能な地下空間を把握することとなる。また、浄化に要する期間についても揚水稼働に伴うコスト面の検討項目として必要になる。汚染サイトの地質状態を反映した集粒域の推定には至っていない点を踏まえて本研究では、実汚染サイトにおける地下水揚水法の実施を想定して、時系列の確率空間分布として集粒域を三次元的に推定する手法を開発した。溶質輸送解析にはランダムウォーク粒子追跡法を活用し、複数の揚水井からの揚水を考慮することにより、揚水量の差異に応じた集粒域の時系列変動について提示した。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、水溶性汚染物質の輸送挙動を可視化できるように、青系水溶性色素である Brilliant Blue FCF (Color index: 42090) を採用した。実験に供する色素水溶液の初期濃度は、色素混合時の水溶液の比重、ならびに、画像解析の際に重要となるピクセル明度の抽出を勘案して 0.2 mg/cm^3 に調整した。実験土槽内にばらつきのある透水係数分布を実現できるように、まず、平均粒径の異なる5種類のケイ砂を準備した。類似の5種類のケイ砂のみを既定の試料配置に従ってマトリクス状に透水係数分布を形成した実験例はあるものの、透水係数分布の滑らかさの観点では十分とは言い難い。そこで本研究では、5種類のケイ砂をそれぞれのケースにおいて使用する、あるいは、平均粒径の近い2種類を混合することにより、18種類の土質試料を生成した。透水係数は直径5 cm、長さ30 cmのアクリル製円筒カラムを使用して、飽和状態の各試料を密度管理しながら水中充填することにより、所定の動水勾配に伴う排水流量と断面積を基に求めた。試料に拘らず間隙率は0.437に統一して密度管理しており、充填試料の質量とカラム本体の体積から間接的に間隙率を算定した。

溶質輸送実験を実施するにあたり、高さ80 cm、幅100 cm、奥行き3 cmの実験空間を作製した。実験装置本体の前面をガラス板にて構成することにより、溶質挙動を可視化できるようにしており、背面はアクリル板、底部はステンレス材で構成した。上流から下流方向を x 軸、鉛直方向を z 軸として、便宜上、実験装置の上流端最下部を原点とし、実験装置本体の両側面にはステンレス製の定水頭タンクを設置することで既定の水頭を負荷しつつ、水の流入を制御した。実験装置本体と定水頭タンクの連結部分には、内部に充填する土質試料の流出を防ぐ目的でメッシュフィルタを連結断面の全体にわたって貼付した。透水係数分布を形成する18種類の土質試料に関して、透水係数の値を自然対数変換し、算術平均と標準偏差を求めると、それぞれ-2.45、0.554であり、透水係数の幾何平均値は 0.086 cm/s である。透水係数の空間相関は等方として、指数型バリオグラムに従うと仮定した。透水係数の空間相関性と溶質輸送特性の関係を探るべく、相関長を6 cm、12 cm、18 cmに変えた不均質場を対象とした。

疑似的に透水係数分布を生成するブロッククリギング予測の過程では、所定の領域内に一様

乱数にて、250 個のソース点を生成し、各ソース点に乱数により透水係数を発生させて、高さ 48 cm、幅 72 cm の領域に対する透水係数分布を生成した。このとき、1 つのセルサイズを高さ 3 cm、幅 3 cm に定めて、 x 軸方向に 24 セル、 z 軸方向に 16 セルをマトリクス状に配置した不均質空間を生成した。図-1 に実験に採用した不均質透水係数分布の一例を示す。本実験は、飽和状態の帯水層を模擬するため、空気が混入しないように土質試料を十分に飽和させた上で、水中落下法により試料を充填した。試料充填時には、比較的透水性の良い試料を実験装置の底から 7.5 cm の高さまで二層に分けて積み上げた。ブロッククリギングにて得られた透水係数分布を実験空間に形成・再現するため、高さ 48 cm、幅 72 cm、奥行き 3 cm の空間に、既定の土質試料を高さ 3 cm、幅 3 cm、奥行き 3 cm で一層ずつ充填配置した。浸透流を生じさせるため、実験装置両側の定水頭タンクの水压を調整することで動水勾配を与え、5 つの溶質注入孔に、1 孔あたり 20 cm³ の色素水溶液をシリンジポンプに連結した注射針を用いて注入した。実験中は所定の照明のみを点灯させて光量を一定に保ち、実験装置から約 100 cm 離れた位置に設置したデジタルカメラを用いて水溶液の移行過程を一定の間隔で撮影し、画像を取得した。

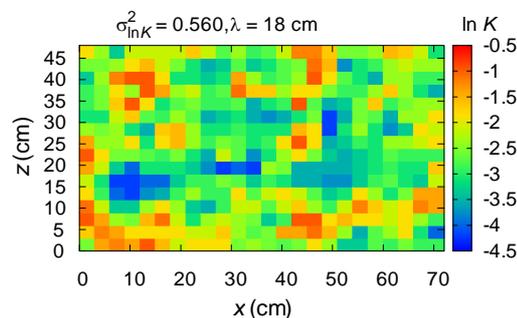


図-1 相関性のある不均質透水係数分布

空間モーメント法は溶質の濃度や質量の空間分布データに基づく、分布状況を解釈する 1 つの手段である。2 次元場における濃度分布の空間モーメントは

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, z) I(x, z, t) x^i z^j dx dz \quad (1)$$

により表すことができる。ここに、 M_{ij} は空間モーメント、 x と z は座標、 t は時間、 i と j は各軸の空間次数、 c は溶質濃度である。本実験では、色素濃度をピクセル明度に関連付けており、 H は 1 ピクセルの面積、 I はピクセルの明度である。マクロ分散長を推定するため、空間 1 次モーメントと空間 2 次モーメントを算出することで、溶質の移行距離に応じたマクロ分散長を推定した。透水係数分布の空間相関性、すなわち、相関長が異なる 3 種類の不均質浸透場において、5 か所の溶質注入孔より線状にリリースした色素水溶液の空間変動の様子を図-2 に示す。溶質注入時の時刻をゼロとして、60 分までの溶質輸送の状態を 20 分間隔で示している。また、図中の黒丸は空間 1 次モーメントとして得られる色素分布の重心位置を示している。

実験的検討に加えて、本研究では画像解析の精度を確認すべく、また異なるアプローチとして、数値解析を用いてマクロ分散長を推定した。対象場は飽和条件下にある、不均質浸透場であることから、浸透流方程式を有限要素法で求解するとともに、移流分散方程式を解くことで実験場の溶質輸送挙動を追跡した。移流分散現象を数値的に求解する手段として本研究では、後述するランダムウォーク粒子追跡法を採用しており、対象物質に見立てた大量の粒子群を領域内に発生させて、粒子位置と質量に対する空間分布変動を時系列で追跡することで、有限要素法などの連続体ベースの手法には無い、マスバランスのロスを伴わない数値計算を実施している。また、ランダムウォーク粒子追跡法に空間モーメント法を組み込むことにより、マクロ分散長の時間発展についても解析できるシステムを構築した。

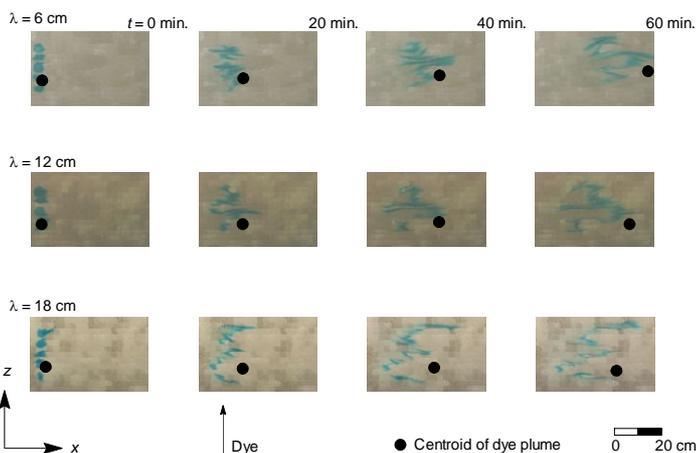


図-2 溶質輸送挙動の一例。

(2) 本研究では、ある地下水汚染サイトを解析対象として、

地下水中に溶解した成分を地下水揚水法により地下水とともに回収することを想定した。現地調査を踏まえて、汚染源ならびに地下水揚水法の実施地点を設定した。揚水井は完全、あるいは、不完全貫入井のいずれに対しても適応できるように、ストレーナ部分を鉛直方向の単一点に限定して、点状の揚水状態を模擬した。対象場の透水係数分布は 3 種類の地質から成る成層地盤としてモデル化した。また、沖積層である点を踏まえて、各層の透水係数に同一の異方性を考慮し、水平方向に対する鉛直方向の透水係数の比を 5 とした。

境界条件として動水勾配が 0.01 となる水頭境界を設け、地質条件を元に地下水の分水嶺として不透水境界を設定した。次式に示す浸透流方程式 (Bear, 1972) を有限要素法により求解す

ることで、すべての有限要素節点において圧力水頭を求めた。

$$\nabla \cdot (K(\mathbf{x})\nabla h) = Q(\mathbf{x}) \quad (2)$$

ここに、 h はピエゾ水頭、 \mathbf{x} は位置ベクトル、 Q は揚水量、 $K(\mathbf{x})$ は透水係数テンソルであり、等方性を仮定した。また、対象領域の有効間隙率を一定とみなし、対象サイトの情報から 0.2 に設定し、求めた圧力分布からダルシー則に従って実流速ベクトル \mathbf{v} の空間分布を求めた。

帯水層内を移動する汚染物質は移流分散現象により時々刻々と変化する。揚水井に至る過程を数値解析で再現するため、本研究ではランダムウォーク粒子追跡法 (RWPT) を用いた。RWPT 過程における主たる移動経路はドリフト成分と確率的分散成分から構成され、

$$\mathbf{X}_p(t+\Delta t) = \mathbf{X}_p(t) + (\mathbf{v} + \nabla \cdot \mathbf{D})\Delta t + \mathbf{B}\boldsymbol{\Xi}\sqrt{\Delta t} \quad (3)$$

にて表される)。ここに、 \mathbf{X}_p は時間における粒子位置ベクトル、 Δt は時間増分、 \mathbf{v} は流速ベクトル、 \mathbf{D} は分散係数テンソル、 \mathbf{B} は変位マトリクス、 $\boldsymbol{\Xi}$ は平均 0、分散 1 の正規乱数ベクトルである。また、粒子追跡過程の精度を維持するため、4 次のルンゲ・クッタ法と二重ステップ法を組み込み、許容誤差を 0.01、安全係数を 0.9 に設定した。

三次元集粒域を推定するにあたり、任意の格子幅から成る仮想格子を導入して領域全体を分割した。格子サイズは解像度に対応するため、すべての格子に対して当該格子が集粒域になり得る確率を導出すべく、NP 個の粒子群を領域全体にランダム配置させて移流分散過程を RWPT により追跡した。すべての粒子が揚水井へ到達するとは限らないことから、揚水井へ到達する粒子と揚水井へ到達せずに領域外へ移動する粒子に区別した。同時に、すべての到達粒子に対して、初期位置座標と揚水井に至るまでのトラベルタイムを記憶した。便宜上、揚水井へ到達する粒子を到達粒子、揚水井へ到達しない粒子を非到達粒子と記す。これにより任意の格子内には到達粒子や非到達粒子が混在し、また、複数の揚水井が稼働している場合、最終的に到達した揚水井を区別できるように、到達粒子は揚水井に属すると見なして、二値関数を用いて粒子到達確率を算定した。各格子内にある到達粒子はトラベルタイムを記憶しているため、既定時間を下回る到達粒子の抽出が可能である。そこで、既定時間以下の到達粒子数に対する格子内の全粒子数の比をとることで、任意の格子が所定の時間内にいずれかの揚水井の集粒域となる確率を求めた。以上により、三次元集粒域の確率空間分布をリスクマップとして時系列で推定可能であり、単一の揚水井に対する集粒域を求める場合には、前述の過程を対象とする揚水井に限定することで対応できる。

4. 研究成果

(1) 色素分布の変動に基づいて、前述した空間モーメント法を応用した画像解析により推定されたマクロ縦分散長の結果を図-3 にシンボルで示す。凡例には対象場の相関長を記しており、溶質注入孔から色素分布の重心位置までの距離を移動距離として算定した値を図の横軸に、その時点の色素分布より推定されるマクロ縦分散長の値を縦軸にプロットしている。いずれの相関長に対してもマクロ縦分散長は移動距離の増加とともに徐々に増加しており、マクロ分散現象に特徴的な距離依存特性である、スケール効果を捉えることができています。また、相関長の大きさに呼応してマクロ縦分散長の値は大きくなる結果が得られている。この傾向は、先行研究において理論的・数値的に指摘している一方で、実験的に定量化した事例はないことから、理論を裏付ける結果と言える。相関長の違いは、最も透水係数の小さいセルから最も透水係数の大きいセルまでの幾何距離と簡略化して考えることができる。相関長の高い不均質場は、相関長の低い場よりも低透水域から高透水域へ徐々に変化するため、低透水域から高透水域への変化が大きい相関長の低い場に比べると、溶質が流れ方向に伸びやすい状態にあると推測される。そのため、色素分布の濃度のばらつきは流れ方向に増加することとなり、空間 2 次モーメントは大きくなる結果、マクロ縦分散長の推定結果に反映されると言える。透水係数の低い領域から高い領域への溶質が移行する時間が長いため、溶質の伸びが大きくなるのが不均質地盤内の輸送特有の傾向であり、透水係数の高い領域にて異常輸送現象が発現している。

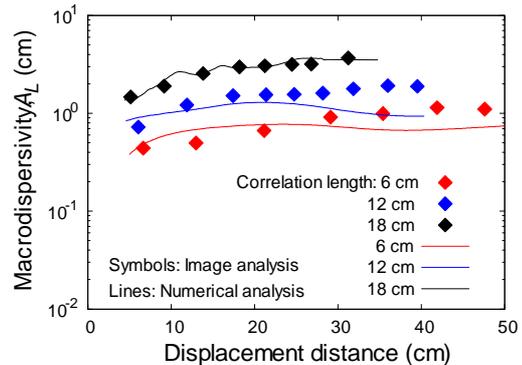


図-3 マクロ縦分散長の推定結果

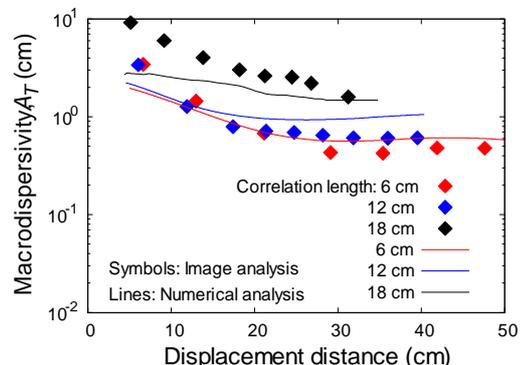


図-4 マクロ横分散長の推定結果

マクロ縦分散長の推定結果と同様に、マクロ横分散長の結果を図-4 にシンボルにて示す。相関長に関わらず、色素分布の移動距離とともにマクロ横分散長は減少する傾向を示している。初期の線状配置はマクロ横分散長の解釈を難しくするものであり、線状配置によって強制的に横方向へ拡大させられた色素分布を定量化の起点としている結果、図に示すように短い輸送距離に対するマクロ横分散長はマクロ縦分散長よりも大きい値として定量化されている。強制的な伸びは、輸送とともに緩和されて自然な状態に戻っていくため、移動距離とともに減少するマクロ横分散長の傾向は、本実験では妥当な傾向である。各相関長に対する値の推移に見られるように、一定の移動距離を経て漸近する値が場全体のマクロ横分散長と推測される。溶質輸送実験において得られた推定結果の妥当性について検討するため、ランダムウォーク粒子追跡法にて数値解析的に推定したマクロ縦分散長とマクロ横分散長の結果をそれぞれ図-3 と図-4 に実線で描く。溶質は5か所から線状にリリースしており、いずれのケースについても概ね一致した結果であることから、本実験の推定結果は一定の妥当性を有していると判断される。数値解析上、各セルに設定する透水係数の値が実際に充填されているセルの真の透水係数と差異が生じている可能性、あるいは、平均粒径の小さいセルにて部分的に発生している吸脱着の可能性が一部、実験結果と数値解析結果に相違のある要因として推測されるものの、複雑な輸送特性を示す実験状況をうまく再現できる解析手法が構築できていると判断される。

(2) 図-5 と図-6 には、実サイトの地下水揚水を想定した数値解析手法の結果の一例として、揚水開始から780日、1500日後に対応する揚水井1と2のリスクマップの進展結果を示す。各格子のプロットは青系から赤系に移るほど集粒域確率が高いことを意味し、浄化対象エリアである確率が高い、言い換えると低リスクエリアとなる。同時に、三次元形状の内部を観察しつつ、格子間の確率の差異を明確にするため、各格子にて得られた集粒域確率と格子サイズの積を球体の直径とすることにより、直径の大きさに呼応した集粒域の確率空間分布として描画している。揚水性の位置に応じて、確率の空間分布形状は大きく異なり、成層地盤であるとモデル化した当該サイトでは、階段状に空間分布が分布していることが特徴的である。

単独ではなく、いずれかの揚水井に到達する確率として推定された集粒域の結果を図-8 に描画する。図は揚水開始から1500日経過時点の結果であり、左岸側の集粒域分布を観察する反射壁、上下流方向への集粒域全体の射影像を観察する壁をそれぞれ対象領域の左岸と最下流端に設置している。動水勾配や揚水井の設置位置の設定上、左岸と右岸で対称の立体構造になる一方で、透水性の変化する成層地盤であることに起因して、鉛直方向には非対称となる。また、揚水井1から2にかけて、帯水層の深い部分は地下水揚水可能なゾーンであることがわかる一方で、浅い部分の溶質は回収できないことを示唆している。三次元で動的に任意の揚水時間経過に対する集粒域を確率空間分布として認識できる点に当手法は優位性があり、地下水揚水法の計画立案への適用が期待される。特に、硝酸態窒素のような水溶性物質に対しては、当該研究にて開発した手法は適したシステムであることから、多様な地質空間や揚水井配置に応じたリスク状態、あるいは、浄化可能状況の空間可視化としての発展的貢献を期待したい。

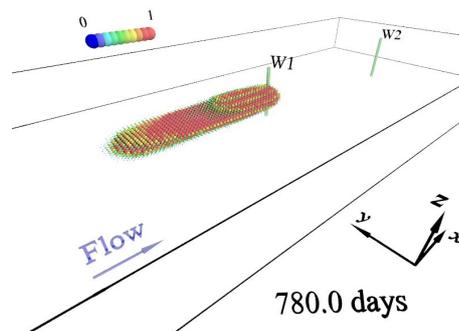


図-5 リスクマップの進展の例（井戸1）

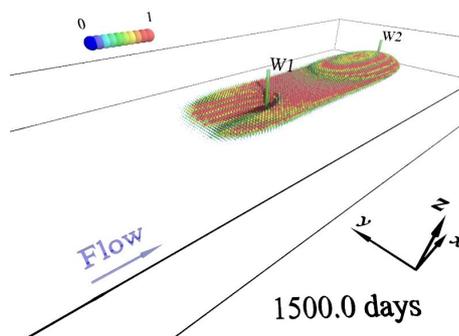


図-6 リスクマップの進展の例（井戸2）

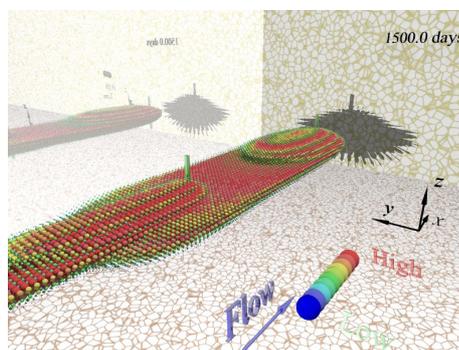


図-8 リスクマップの進展の全体像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

井上一哉・高田大輝・濱田莉菜子・鈴木麻里子・小林晃：地下ダム止水壁の透水性能に応じた溶質輸送現象に関する実験的検討 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.1_343-1_348, 2018.

井上一哉・濱田莉菜子・小林晃：地下ダム貯水湖内の溶質輸送挙動に関する実験的検討, 土

木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.1_25-1_30, 2018.

井上一哉・小尾泰輝・濱田莉菜子・教野真帆・田中勉: 中規模溶質輸送実験を用いた溶質マクロ分散性に及ぼす相関長と不均質度の影響評価, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.73, No.2, pp.1_85-1_96, 2017.

Yasuteru Kobi, Kazuya Inoue and Tsutomu Tanaka: Assessing Temporal Moment Characteristics of Solute Transport Phenomena in Heterogeneous Aquifers Using Random Walk Particle Tracking, International Journal of GEOMATE, Vol.12, pp.114-121, 2017.

井上一哉・藤白沙都・田中勉: ランダムウォーク粒子追跡法による地下水揚水処理範囲の三次元確率空間分布推定, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.72, No.4, pp.1_55-1_60, 2017.

井上一哉・上田祥央・田中勉: 水溶性汚染物質の地下水揚水可能範囲に対する確率空間分布の時系列推定方法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.72, No.2, pp.1_121-1_132, 2016.

Kazuya Inoue, Tomoki Kurasawa and Tsutomu Tanaka: Spatial and Temporal Moment Approaches to Quantify Laboratory-Scale Macrodispersion in Stratified Porous Formations, Journal of Rainwater Catchment Systems, Vol.22, No.1, pp.15-22, 2016.

Kazuya Inoue, Tomoki Kurasawa and Tsutomu Tanaka: Quantification of Macrodispersion in Laboratory-Scale Heterogeneous Porous Formations, International Journal of GEOMATE, Vol.10, Issue 21, pp.1854-1961, 2016.

Tatsuya Kitajima, Kazuya Inoue, Mariko Suzuki and Tsutomu Tanaka: Evaluation of non-Darcy flow and solute transport in porous media through column experiments hydraulic barrier performance of cut-off wall Proceeding of PAWEES and INWEPF 2018, 2018.

Hiroki Takada, Kazuya Inoue, Rinako Hamada, Mariko Suzuki and Tsutomu Tanaka: Experimental investigations on solute transport behavior in subsurface dam corresponding to hydraulic barrier performance of cut-off wall Proc. PAWEES and INWEPF 2018, 2018.

Rinako Hamada, Kazuya Inoue, Hiroki Takada and Tsutomu Tanaka: Experimental investigations on solute transport behavior in underground dam, Proceedings of the 28th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.769-774, 2018.

[学会発表](計 13 件)

1. 北嶋竜也・井上一哉・鈴木麻里子・田中勉: 多孔質体内における浸透流と溶質輸送の非線形性に関する実験的検討, 平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.228-229, 2018.
2. 濱田莉菜子・井上一哉・高田大輝・鈴木麻里子・田中勉: 地下ダム湖内の溶質輸送現象の実験的・数値解析的検討, 平成 30 年度雨水資源化システム学会大会講演会講演要旨集, pp.24-29, 2018.
3. 高田大輝・井上一哉・濱田莉菜子・鈴木麻里子・田中勉: 地下ダム止水壁の遮水性能に応じた移流分散挙動の定量化, 平成 30 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.230-231, 2018.
4. 濱田莉菜子・井上一哉・田中勉・高田大輝・小林晃: 貯留型地下ダム湖内の溶質輸送に及ぼす水溶液比重の影響, 平成 29 年度雨水資源化システム学会大会講演会講演要旨集, pp.22-27, 2017.
5. 濱田莉菜子・井上一哉・田中勉: 地下ダム場における溶質輸送現象の定量化, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演要旨集, pp.797-798, 2017.
6. 藤白沙都・井上一哉・田中勉: 揚水井の捕獲領域の推定, 平成 29 年度農業農村工学会京都支部講演会講演要旨集, pp.82-83, 2017.
7. 藤白沙都・井上一哉・田中勉: 地下水揚水法による溶質流入空間の確率的推定手法, 平成 29 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.640-641, 2017.
8. 井上一哉・藤白沙都・田中勉: ランダムウォーク粒子追跡法を用いた汚染地下水の揚水可能領域に対する三次元時系列推定, 計算工学講演会論文集, Vol.20, 6pages, 2017.
9. 小尾泰輝・井上一哉・田中勉: 溶質輸送経路に関する実験的評価, 平成 29 年度農業農村工学会京都支部講演会講演要旨集, pp.78-79, 2017.
10. 小尾泰輝・井上一哉・北嶋竜也・田中勉: 画像解析による不均質帯水層を移行する溶質輸送経路の追跡, Kansai Geo-Symposium 2017 -地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム-論文集, pp.14-19, 2017.
11. 小尾泰輝・井上一哉・田中勉: 中規模溶質輸送実験によるマクロ分散現象の評価, 平成 29 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, pp.634-635, 2017.
12. 上田祥央・井上一哉・田中勉: 砂質系サイトの溶質マクロ分散評価, 平成 29 年度農業農村工学会京都支部講演会講演要旨集, pp.84-85, 2017.
13. 上田祥央・井上一哉・田中勉: 地下水汚染物質の不確実性を考慮した溶質捕獲領域の確率的推定, 平成 28 年度農業農村工学会京都支部講演会講演要旨集, pp.78-79, 2016.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。