



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

井上, 一哉

高田, 大輝

濱田, 莉菜子

鈴木, 麻里子

小林, 晃

(Citation)

土木学会論文集B1（水工学）, 74(5):l_343-l_348

(Issue Date)

2018

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2018 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90006757>



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

井上 一哉¹・高田 大輝²・濱田 莉菜子³・鈴木 麻里子⁴・小林 晃⁵

¹正会員 博士（農） 神戸大学准教授 農学研究科食料共生システム学専攻（〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: mornel@kobe-u.ac.jp

²学生会員 学士（農） 神戸大学大学院生 農学研究科食料共生システム学専攻（〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: 185a008a@stu.kobe-u.ac.jp

³学生会員 学士（農） 神戸大学大学院生 農学研究科食料共生システム学専攻（〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: 175a014a@stu.kobe-u.ac.jp

⁴正会員 博士（農） 神戸大学助教 農学研究科食料共生システム学専攻（〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1）
E-mail: msuzuki@peridot.kobe-u.ac.jp

⁵正会員 工博 関西大学教授 環境都市工学部都市システム工学科（〒 564-8680 吹田市山手町 3-3-35）
E-mail: koba5963@kansai-u.ac.jp

本研究では、地下ダム止水壁の透水性能と地下ダム貯水湖内の溶質輸送特性について実験的に検討することを目的として、高さ 100 cm、幅 100 cm、奥行き 3 cm の溶質輸送実験を実施した。帯水層と地下ダム止水壁、帯水層基盤を透水係数の異なる土質試料にて形成し、色素水溶液にて現象を可視化した。画像解析にて輸送現象を定量化した結果、止水壁の下部領域に他よりも透水性の高い弱部が存在すると、貯水位によっては深度中腹にある溶質の通過経路になる結果が得られた。また、エントロピーを導入した結果、弱部があるとエントロピーは減少せずに徐々に増加すること、止水壁が健全である場合には、溶質の大部分が止水壁内に侵入している時点でエントロピー最小となることを実験的に示した。

Key Words: underground dam, solute transport phenomena, laboratory scale experiment, image analysis, entropy

1. 緒論

沖縄本島や奄美群島の島しょ群の中には、豊富な降水量があるにも関わらず、地表ダム建設に向かない平坦な地形であることから、恒常的な水不足の中で小規模ため池やわずかな地下水を利用して農業活動を営む地域が存在する。不安定な水利用や水不足の解消、農業用水や生活用水の水源確保のため、帯水層に止水壁を築造して地下浸透した降水の流出を抑制しつつ、安定貯水を図る地下ダム事業が展開されている^{1),2)}。わが国では、宮古島や伊是名島、喜界島などの地域に十数基の農業用地下ダムが稼働しており、保良地下ダムや喜界第二地下ダムは新規建設に向けた調査過程にある。

地表ダムでは滞留時間や日射量、水温等の条件によっては富栄養化の発生が懸念されるのに対して、地下ダムの貯留水は富栄養化の発生条件に遭遇せず、水質の安定性に利点がある。一方、自然流下状態の地下水脈を堰き止めるため、地下水流动速度は低く、農業活動の活性化に伴う施肥量の増加を想定すると、地中浸透する窒素成分の増加、ダム湖での滞留・濃縮の懸念がある。地下水揚水地点の選定や水質悪化対策などを事前に検討することは健全な水利用を継続する重要な事項であるものの、地下ダム湖内の溶質輸送挙動に関する

知見は乏しい³⁾。井上ら⁴⁾は地下ダム湖を模擬した室内実験により、溶質挙動を可視化して溶質の空間分布を定量評価した。しかしながら、止水壁の施工過程で生じやすい帯水層基盤付近の透水係数の高まりや止水壁を再構築した際の溶質輸送へ及ぼす影響など、実施工の面と照らし合わせると多くの課題を残している。

可視化実験による溶質輸送現象の観察や挙動の定量化は、止水壁の性能劣化を診断する情報の取得方法や貯水湖の管理における計測方法の策定など、実サイト運営に有益な知見につながると期待される。そこで本研究では、止水壁の透水特性と溶質挙動に関する知見を獲得すべく、移流分散実験を実施し、止水壁の部分的な遮水性の差異に応じた移流分散特性の変化について定量的に検討した。本論文では、地下ダム堤体を地下ダム止水壁、あるいは、止水壁と称する。

2. 溶質輸送可視化実験

(1) 実験土槽

溶質輸送実験では、実験土槽本体の前面と背面を厚さ 3 cm のアクリル板、底部をステンレス板で構成して、高さ 100 cm、幅 100 cm、奥行き 3 cm の空間を作製した。図-1 に実験装置の概要を示す。上下流方向（水平方

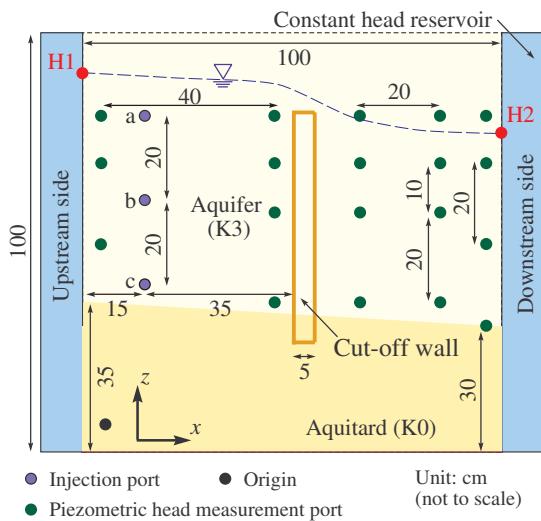


図-1 溶質輸送実験装置の概略

向)に x 軸、深度方向(鉛直方向)に z 軸を定め、土槽の上流端最下部から下流方向に5 cm、鉛直上方に6 cmの点に原点を設けた。土槽の上下流端に定水頭タンクを据え付け、土槽とタンクの連結部分に空隙率の高いステンレス板とメッシュを貼付した。また、図-1に示すように、背面の3箇所a～cに半径6 mmの孔を穿孔し、シリコン栓で閉じて水溶液の注入孔とした。さらに、背面の19箇所に半径1.5 mmの孔を穿孔し、ビニルチューブと連結してピエゾ水頭の計測に用いた。

(2) 土質試料と実験ケース

図-1に示すように、帯水層部と帯水層基盤部に加えて、止水壁部の3区画で実験領域を構成した。地下ダム湖を形成するため、透水係数の異なる4種類の土質試料を準備して、各試料を所定の箇所に充填した。表-1に用いた試料の物理特性を示す。すべての実験ケースに共通して、試料K0にて帯水層基盤部、試料K3にて帯水層部を形成した。間隙率は充填試料の質量と充填領域の体積、透水係数は土槽内に試料を充填し、所定の動水勾配にて排水流量と断面積から算出した。

図-2に示すように、止水壁の無い状態をBase Case、止水壁を造成したケースをCase α として、止水壁の有無に応じた溶質輸送挙動を比較できるようにした。Case α では、高さ55 cm、幅5 cm、奥行き3 cmの止水壁を試料K1にて形成した。本実験では、止水壁周辺の溶質輸送挙動の可視化に主眼を置いていることから、可視化に適した珪砂を用いた。透水性の高い試料である点を踏まえて、帯水層と止水壁の透水係数の比が約100倍異なるように試料を選定することで実サイトの状態を透水係数比で合わせた。また、止水壁の下端部、特に帯水層基盤部への挿入部では止水壁の施工上、低い透水性の確保が難しい場合もある⁵⁾ことから、

表-1 土質試料の物理特性一覧

試料番号(充填部)	平均粒径(cm)	透水係数(cm/s)
K0(帯水層基盤部)	0.010	3.2×10^{-3}
K1(止水壁)	0.011	4.8×10^{-3}
K2(止水壁)	0.015	3.2×10^{-2}
K3(帯水層)	0.12	4.0×10^{-1}

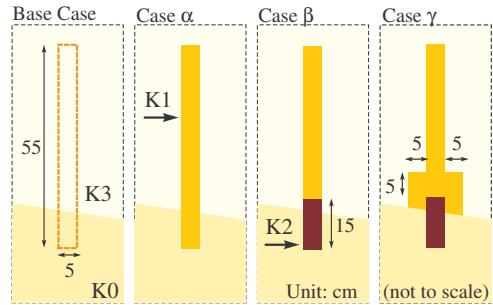


図-2 実験ケース一覧

Case β では止水壁の1/4程度となる下端15 cmを試料K1より約10倍の透水性を有する試料K2を充填して、Case α より遮水性能が劣る状態を対象とした。

実サイトの止水壁施工過程では、Case β のような弱部の発見は難しい一方で、弱部の存在は貯水性能の低下を招くため、弱部探査は重要度の高い項目である²⁾。調査などにより、弱部を探査できた場合には、既設の止水壁の上流側と下流側で透水性を確保する工事がなされることを踏まえて、Case γ として、試料K1を用いてCase β の上下流側に幅5 cmの拡幅を与えた。

(3) 実験手順

まず、飽和した試料K0を土槽の底から止水壁の下端まで6層に分けて積み上げて帯水層基盤部を形成した。各層の水中充填過程では突き固めと密度管理にて0.437の間隙率に調整した。次に、単層あたり3 cmの高さで、複数の仕切り板により止水壁部と帯水層部を区分けしつつ、地下谷を締め切る伊江島や宮古島の地下水盆を参考にして帯水層基盤部の勾配が5/100²⁾となるように試料を充填した。止水壁部は試料K1または試料K2を、帯水層部は試料K3を該当箇所に充填し、3 cm高さごとに突き固めて間隙率を統一した。同一層内に複数の試料を充填するため、単層の試料充填を終えた後、隣接試料間の境界が乱れないように仕切り板を徐々に引き抜いた。充填作業を高さ100 cmまで繰り返し、帯水層内に高さ55 cm、幅5 cm、奥行き3 cmの止水壁を構築した。Case γ は止水壁と帯水層基盤の結合部付近に拡幅区間があり、Case α からCase γ に共通して、止水壁下部の約7 cmが帯水層基盤に貫入している。

試料の充填後に排水しつつ、最上流端と最下流端の水位をそれぞれ図-1に示すH1とH2の位置に調整した。止水壁天端から5cm高い位置、ならびに、止水壁天端から7cm低い位置にH1を設定したパターンにて、越流状態と非越流状態を模擬した。本実験では、上下流端の動水勾配は帶水層基盤の傾斜と同じ1/20に保つて、土槽内に浸透流を生じさせ、排水流量が一定になるまで通水を放置して定常流状態を形成した。

本研究では、硝酸性窒素のような水溶性物質の輸送現象に焦点を当てているものの、輸送挙動の可視化と安全性を踏まえて、青系水溶性色素のBrilliant Blue FCFを採用した。色素水溶液の初期濃度を0.2mg/cm³に調整し、ダム湖内の深度位置に応じた溶質輸送現象の差異を検討するため、図-1に示す孔a, b, cのいずれかに25cm³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。実験中は光量を一定に保ち、土槽から約100cmの位置に設置したカメラにて水溶液の移行過程を一定間隔で撮影し、画像を取得した。画像の一例として、Base CaseとCase α の時系列画像を図-3に示す。図-3(a)と(b)に示すように、溶質分布の時間変化は均質地盤内の輸送状態⁶⁾になっており、帶水層部分は均質に充填できていると考えられる。

3. 色素水溶液の空間分布の変動評価

(1) 画像解析と流速ベクトル

可視化した溶質輸送現象を定量化すべく、色素水溶液の注入濃度を0.2mg/cm³から8段階に薄くすることで、該当する色素濃度とピクセル明度の関係を求めた。また、すべてのピクセルに対してピクセルに存在する土質試料を判別した上で、変換関数を使い分けた。

色素水溶液の空間分布を収めた画像データのすべてのピクセルを抽出することにより、空間モーメントを

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

にて求めた。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 は空間次数、 c は色素濃度である。色素濃度をピクセル明度に関連付けていることから、

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U \cdot P(x, z, t) x^i z^j dx dz \quad (2)$$

と表記できる⁶⁾。ここに、 U は1ピクセルの面積、 P はピクセル明度であり、実際の積分区間は対象とする画像の両軸方向の規模に限定される。 x 成分と z 成分に対する色素分布の重心位置 x_G と z_G は、

$$x_G(t) = \frac{M_{10}}{M_{00}}, \quad z_G(t) = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (3)$$

にて算出し、溶質移動の速度ベクトル v_x 、 v_z を

$$v_x = \frac{x_G(t + \Delta t) - x_G(t)}{\Delta t}, \quad v_z = \frac{z_G(t + \Delta t) - z_G(t)}{\Delta t} \quad (4)$$

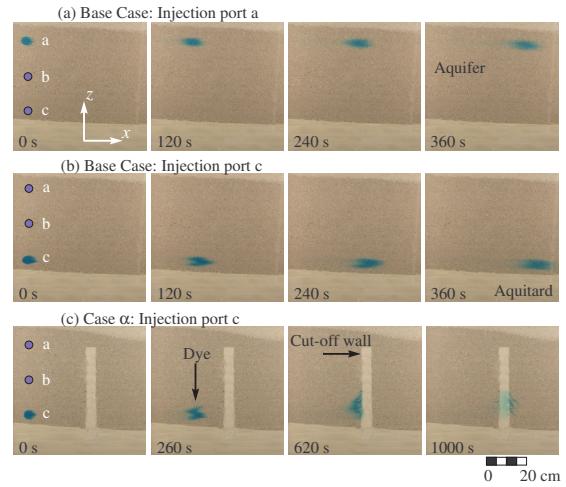


図-3 溶質輸送実験の画像の一例

にて求めた。ここに、 Δt は時間間隔である。また、重心位置から軸方向への分布のばらつきを示す空間2次モーメント M_{20} (x 方向)と M_{02} (z 方向)を求めた。

(2) エントロピーの導入

溶質空間分布の動向をマクロ的に捉える指標として、系の乱雑さを表すエントロピー⁷⁾を導入した。時刻 t の濃度分布のエントロピー $H(t)$ は、

$$H(t) = - \sum_{i=1}^n P_i(x, z, t) \log P_i(x, z, t) \quad (5)$$

にて表される。ここに、 i はピクセルの位置指標、 n は総ピクセル数である。エントロピーを濃度分布のばらつきの尺度と考える⁸⁾と、エントロピーの状態を追跡することにより溶質の伸展や収縮を評価でき、空間2次モーメントによる各軸方向への溶質伸展の評価も含めて、既往の研究には無い指標の導入を試みた。

4. 結果と考察

(1) 止水壁の有無に応じた溶質輸送挙動の差異

前章にて提示した図-3に示すように、地下ダム止水壁の存在によって、溶質の空間分布は大きく異なる。止水壁の有無とダム湖内の溶質輸送挙動の関係について検討するため、Base CaseとCase α の越流状態に対して、式(3)と式(4)に基づいて導出した溶質空間分布の流速ベクトル結果を図-4に示す。図中、Case α に対応した止水壁位置と帶水層基盤に加えて、計測した地下水水面の位置を併記しており、各孔からリリースした水溶液の重心移動にて流速ベクトルを描いている。

止水壁の無い状態での溶質輸送は均質地盤内の移流分散状態であり、帶水層基盤に並行した輸送である。他方、止水壁造成の効果は流速成分の変化に顕著に現れており、越流状態であるため、孔aを起点とする溶質は

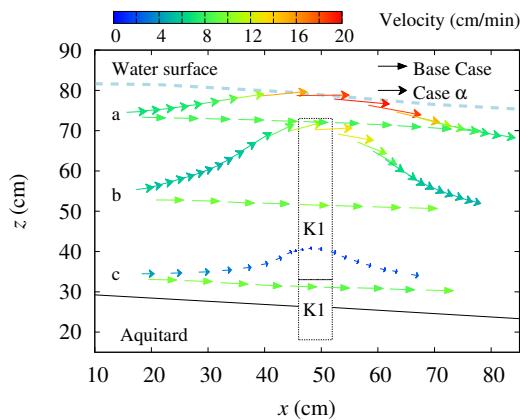


図-4 重心移動と流速分布 (Base Case と Case α)

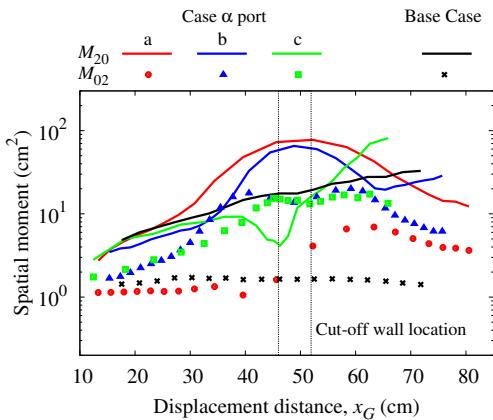


図-5 空間 2 次モーメントの変化 (Base Case と Case α)

天端付近で最大ノルムを示しながら越流し、孔 b を起点とする溶質は鉛直方向への移動量が他点と比べて最も大きい結果である。図-3 や図-4 に示すように、孔 c からリリースした溶質は止水壁に接する前に鉛直輸送が発達しつつ、止水壁に接する前後にて流速ノルムを低下させたまま止水壁を通過する様子がわかる。水深の深い部分を移動する溶質であってもダム湖に残存することはないものの、止水壁に近づくほど流速が大きく低下する点は地下ダム湖としての特徴である。

溶質分布の軸方向の変化を観察するため、図-5 に重心位置と空間 2 次モーメントの関係を記す。 M_{20} は x 軸方向、 M_{02} は z 軸方向の空間 2 次モーメントをそれぞれ表している。2 次モーメントの上昇と下降は、空間分布の拡大と縮小に対応しており、止水壁へ接近するにつれて、孔 b の溶質の両軸方向への拡大、孔 c の溶質の z 軸方向への縮小が顕著である。これは止水壁の近傍で z 方向流速が卓越することに起因しており、井上ら⁴⁾ が指摘するように、溶質の空間分布を定量的に評価する上で空間モーメントは有益な情報と考えられる。

(2) 止水壁の透水性に応じた溶質輸送挙動

地下ダムでは遮水性を確保するために、帶水層基盤へ根入れして止水壁全体を構成している⁵⁾。しかしながら

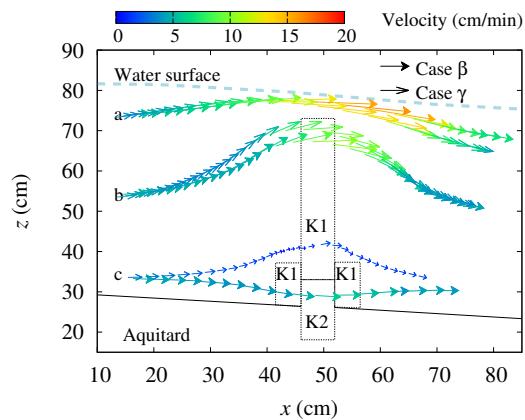


図-6 越流状態の流速ベクトルの比較 (Case β と Case γ)

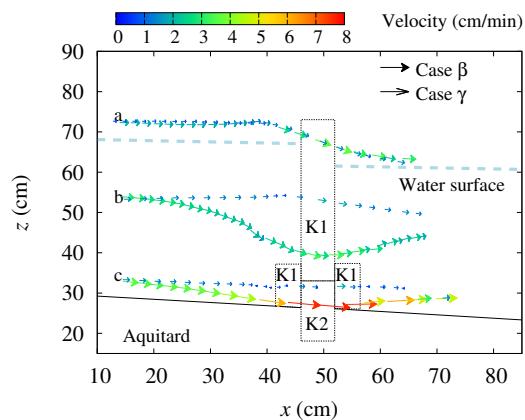


図-7 非越流状態の流速ベクトルの比較 (Case β と Case γ)

ら、サイトによっては止水壁の堤高は数十メートルあり、築造過程を鑑みると、深度が深い部分ほど低い透水性を維持することは難しい。自然地盤は高い不確実性を有しており、止水壁と帶水層基盤の接着部付近の遮水性が他の部分よりも劣る状況があり得る。

このような状況を反映して、止水壁の透水性に差異を与えた Case β に対する溶質分布の重心移動と流速ベクトルの実験結果を図-6 に示す。また、透水性の弱部を補った Case γ に対する実験結果についても比較している。孔 a の溶質輸送は両ケースの差異は小さいものの、溶質の初期深度が深くなるほど移動経路、ならびに、流速ノルムには相違が生じている。特に、孔 c からの輸送は極端に異なった挙動を示しており、Case β では試料 K2 の部分が輸送経路となり、地下水の流れで考えると水みちになっていることがわかる。Case γ のように、止水壁下端での透水係数を低く保つことで流速は低く、かつ、鉛直上向きに流れが生じている。図-4 と図-6 に見られるように、Case α と Case γ の流速ベクトルは類似していることがわかる。

Case β のような弱部はダム湖の貯留効果を下げるため、止水壁を建造している過程において発見すべき部位である。止水壁の造成中は、堰上げ効果はあまり大き

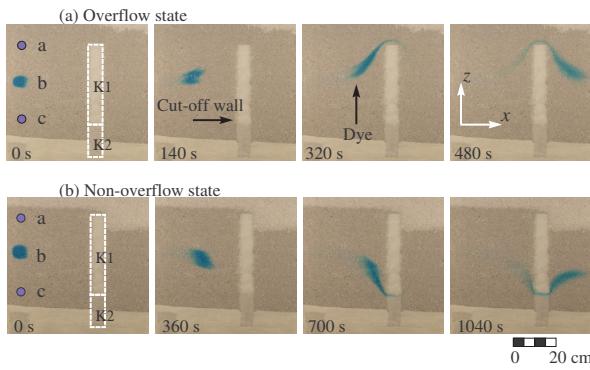


図-8 上下流の水位に応じた溶質輸送挙動 (Case β , 孔 c)

くないことから、ダム湖内の貯水位が満水になることはない。そこで、1/20の動水勾配を維持しつつ、境界条件となる上流端の水位を止水壁天端から7 cm低い位置に設定した非越流状態を対象としたCase β とCase γ に対する実験結果を図-7に示す。孔aの溶質は毛管帯を通過しているため、地下水面より上方を移動している。図-6に比べて変化が顕著に現れているのは孔bを起点とする輸送であり、透水性の高い部位に向かって大きく下降する経路をとっている。飽和状態にある流路断面の減少によって、水位が低くなるほど水や溶質を引き込む弱部の影響は表れやすいと推察される。孔cを起点とする輸送は、Case β とCase γ 間で輸送経路の差異は生じているものの、拡幅部の効果により、Case γ では沈み込むことなく傾斜基盤に平行な輸送になっている。図-8には、孔bからリリースした溶質挙動について、実験にて得られた時系列画像を比較している。地下ダム造成の現状として、弱部探査にトレーサを利用することを踏まえると、トレーサ試験にて溶質の鉛直動の挙動を追跡することで、止水壁造成時に透水性の劣る弱部を探査できる可能性がある。

軸方向の溶質の進展について検討するため、Case β とCase γ に対する空間2次モーメントの変化を越流状態と非越流状態に対して、それぞれ図-9と図-10に示す。孔aからリリースした溶質は非越流状態のときには、両ケースともに止水壁内を通過するため、赤丸で示す z 方向の溶質の進展が大きく発現する点、緑で示す孔cからの輸送ではCase β の方がCase γ よりも x 方向が大きく、 z 方向が小さい点が特徴的である。特に、後者は、透水性能の差異を表しており、止水性の高い場ほど流れに沿って鉛直方向への拡大が促進されると言える。孔bからの輸送のように貯留水位によっては、水平方向の移動を保ち、 z 方向への溶質拡大が生じにくい領域もあることから、実サイトへの展開を考えると、貯水位についても重要な情報と考えられる。一般的に地下ダム湖においては、流速の低い領域での過度な滞

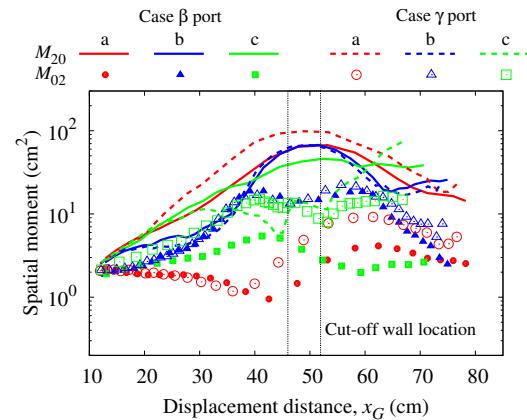


図-9 空間2次モーメントの変化 (越流状態)

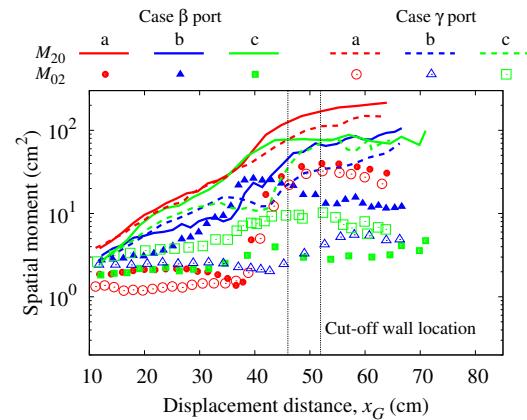


図-10 空間2次モーメントの変化 (非越流状態)

留や水質悪化に関する懸念が生じることから、揚水地点の選定を検討する上で、空間的な流速や溶質輸送特性の変動は有益な情報に成り得ると期待される。

(3) エントロピー評価

本実験のBase Caseのように、均質地盤内の移流分散現象では溶質分布は一定の変化率で拡大していく。統計力学的視点から見ると、エントロピー増大則に従った現象と考えることができる⁹⁾。地下ダム湖内の溶質輸送は溶質分布の拡大・縮小を複雑に繰り返す現象であることから、エントロピーの観点で評価することによって、従来とは異なった視点にて移流分散現象を検討した。本研究で着目している止水壁の弱部または弱部に近い領域を溶質が通過する孔cからの輸送に焦点を当てて、エントロピーの時系列変動を越流状態と非越流状態に対して、注入時のエントロピーで正規化した結果をそれぞれ図-11と図-12に示す。図中、丸印は溶質のフロントが止水壁に触れた時刻を意味する。

Base Case や弱部を有するCase β はエントロピーが上昇傾向にあるのに対して、遮水性の高いCase α やCase γ では、エントロピー増大の状態から急激にエントロピーが減少し、再度、増大する挙動を示す。特に、Case α とCase β の差異は顕著であり、弱部の有無が明

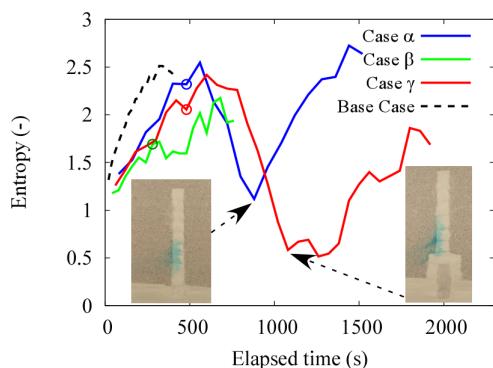


図-11 エントロピーの時系列変動（越流状態）

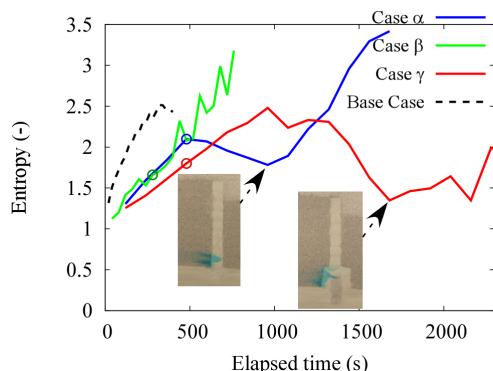


図-12 エントロピーの時系列変動（非越流状態）

確に発現している。図中に併記したエントロピー最小時点の溶質分布画像を観察すると、エントロピー最小時刻は、溶質の大部分が止水壁内に侵入し、止水壁内で滞留している時点であることがわかる。言い換えると、Case β のように、透水性としての弱部があるとエントロピーの大幅な低下は生じないと見える。したがって、止水壁周辺にて濃度の多点計測をできるならば、エントロピーのマクロ評価を活かして透水性に関わる止水壁の健全度を調査できる可能性を有している。効率的なモニタリング計画を含めて、この点は今後の課題とする。

5. 結論

本研究では、地下ダム止水壁の透水性に着目することにより、貯水湖内の溶質輸送現象について実験的に定量評価した。その結果、1/4程度の止水壁の下部領域に、他よりも透水性の高い弱部が存在すると、溶質の輸送経路に影響を及ぼし、深度中腹からの溶質輸送であっても抜け口となる実験結果が得られた。また、エントロピーを導入した結果、弱部があるとエントロピーは減少せずに徐々に増加することが明らかとなった。さらに、止水壁が健全である場合には、エントロピー最小小時刻は、溶質の大部分が止水壁内に侵入している時点であることを実験的に示した。

参考文献

- 1) 長谷川高士:地下ダム, 土と基礎, 42(3), pp.67–68, 1994.
- 2) 古川博恭, 黒田登美雄 : The underground dam, 海鳥社, 810p., 2011.
- 3) 中川啓, 粉井和朗, 内田一平 : 塩水侵入阻止型地下ダム貯留域内の残留塩分の挙動, 水工学論文集, 48, pp.367–371, 2004.
- 4) 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), 74(4), pp.I_25–I_30, 2018.
- 5) 緑資源公団:地下ダム工事誌, 緑資源公団, 609p., 2001.
- 6) 井上一哉, 小林晃, 鈴木克季, 竹之内亮, 田中勉 : 色素トレーサと空間モーメント解析を用いたマクロ分散長推定法, 水工学論文集, 55, pp.613–618, 2011.
- 7) 岡部豊 : 熱・統計力学, 朝倉書店, 139p., 2008.
- 8) Chiogna, G., Hochstetler, D.L., Bellin, A. and Kitanidis, P.K.: Mixing, entropy and reactive solute transports, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20405, 2012.
- 9) Berkowitz, B., Cortis, A., Dror, I. and Scher, H.: Laboratory experiments on dispersive transport across interfaces: The role of flow direction, *Water Resour. Res.*, 45, W02201, 2009.

(2018. 5. 31 受付)

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON SOLUTE TRANSPORT BEHAVIOR ASSOCIATED WITH HYDRAULIC PROPERTY OF UNDERGROUND DAM

Kazuya INOUE, Hiroki TAKADA, Rinako HAMADA,
Mariko SUZUKI and Akira KOBAYASHI

Dye tracer experiments in a tank with the dimensions of 100 cm height, 100 cm length and 3 cm thickness were conducted to clarify the relation between solute transport phenomena and the hydraulic property of underground dam. Dye was allowed to visualize solute transport and to identify time-series variations of spatial moments, the velocity vector and the entropy. Experimental results showed that a lower part in the cut-off wall with a relatively higher hydraulic conductivity provided solute pathways released from not only a deeper spot but a shallower spot according to the water level condition. Entropy transition around the cut-off wall with or without a vulnerable part was significantly quantified.