Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

地下ダム貯水湖内の溶質輸送挙動に関する実験的検討

井上，一哉
濱田，莉菜子
小林，晃

(Citation)
土木学会論文集B1（水工学）,74(4):I_25--I_30

(Issue Date)
2018

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005954

土木学会論文集B1(水工学) Vol.74, No.4, I_25-I_30, 2018.

地下ダム貯水湖内の溶質輸送挙動に関する実験的検討

井上　一哉[1]・濱田　莉菜子[2]・小林　晃[3]

[1]正会員 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 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
[3]正会員 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，地下ダム貯水湖内の溶質輸送特性を検討するため，高さ 80 cm，幅 200 cm，奥行き 3 cm のラボレベル溶質輸送実験を実施した．透水係数の異なる土質試料により帯水層と地下ダム止水壁，難透水性基盤を模擬し，色素水溶液と NaCl を添加した色素水溶液を用いて溶質輸送現象に及ぼす比重の影響を定量化した．画像解析と空間モーメント法を応用し，溶質輸送現象を定量化した結果，地下ダム湖内の溶質は止水壁を越流，あるいは通過して流下することが確認された．また移流分散過程において，止水壁の上流側では溶質の鉛直方向の伸びが促進される点と比重の大きい溶質は鉛直方向の分布拡大を示す点を定量化することができた．

Key Words: *solute transport, underground dam, cut-off wall, laboratory scale experiment, spatial moment approach*

1. 緒論

地下ダムは，地上部での水源に乏しく，農業用水や生活用水などの水資源の安定的な確保を望む地域における地下水の利活用を果たす水利施設である[1),2)]．地上ダムと異なり，地層中に地下水脈を堰き止める地下ダム堤体を建造するため，水没地域や生態系への影響が無く，蒸発散による貯水量の減少が生じない特徴を有している．また，地下ダム堤体は地上ダム堤体に比べて力学的に安定した状態にあり，維持管理に費やす労力や亀裂などの損傷に伴う堤体や下流域への被害に対する懸念がほとんど生じない点も利点と言える[2)]．わが国では，沖縄本島や宮古島などの島嶼圏を中心に十数基の地下ダムが稼働しており，宮古島の仲原地下ダムや沖永良部島の沖永良部地下ダムは現在築造過程にある．

地下ダムでは地層中の空隙部に貯水するため，水質の良好さについても地上ダムに対する優位性として挙げられる一方で，地下ダム堤体の建造により地下水の移動速度は低下することから，汚染物質が地下ダム貯水湖に流入した場合，水質の回復に時間を要することとなる．また，地下ダム建設が水質悪化の直接的要因とはならないものの，豊富な水供給に伴う農業活動の活性化と連動して，農地での施肥使用量や窒素成分の地中溶脱量の上昇は十分に予想される[3)]．堤体による締め切り効果と相まって，窒素成分の滞留や濃縮は水質管理における懸案事項の筆頭でありながら，ダム湖内を移動する溶質挙動に関する知見のほとんどは塩水浸入に関する事例[4)]である．したがって，塩水阻止型のみならず貯留型地下ダムに共通する溶質輸送現象に関する学術的知見を得ることは大変有意義な課題である．

そこで本研究では，地下ダム湖内，特に地下ダム堤体周辺部における溶質輸送現象に関する基礎的知見を得ることを主目的として，均質地盤の移流分散実験を実施した．比重の異なる 2 種類の水溶液を用いて，また，越流水深を変えることで，溶質挙動への影響について定量的に検討した．なお本論文では，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. 地下ダム湖内溶質輸送実験

(1) 土質試料と色素水溶液

帯水層，ならびに，地下ダム止水壁を巨視的視点で模擬するため，地盤構成材料として透水係数の異なる 3 種類のケイ砂を準備した．透水係数の大きい順に試料 S1，S2，S3 と称し，表-1 に各試料の物理特性を示す．実サイトの透水係数[2)]より約 2 オーダー大きい試料である点と溶質輸送挙動の定量化に重きを置く点を踏まえて，各試料の透水係数の比により実サイトを模擬しており，試料 S1，S2，S3 をそれぞれ帯水層，地下ダム止水壁，難透水性基盤の形成材料に割り当てた．透水係数の比を考慮することで，難透水性基盤の透水性は止水壁の透水性よりも少し小さい状態を巨視的に模擬

表-1 土質試料の物理特性一覧

試料番号（充填部）	土粒子密度 (g/cm^3)	平均粒径 (cm)	均等係数 (−)	間隙率 (−)	透水係数 (cm/s)
S1（帯水層）	2.68	1.20	1.61	0.437	3.96×10^{-1}
S2（止水壁）	2.68	0.110	1.71	0.437	5.87×10^{-3}
S3（難透水性基盤）	2.68	0.106	1.69	0.437	4.81×10^{-3}

している．土粒子密度は密度試験，平均粒径と均等係数は粒度試験，間隙率は充填試料の質量と土層の体積から間接的に求めた．また，土層内に土質試料を充填し，所定の動水勾配に伴う排水流量と断面積を基に透水係数を求め，15 °C 水温で補正した．

地下ダム湖の水質管理では主に硝酸性窒素による地下水汚染が懸念されることから，本研究では水溶性物質の溶質輸送に焦点を当てた．溶質輸送挙動を可視化すべく，青系水溶性色素の Brilliant Blue FCF（Blue 1, Color index: 42090）[5),6)] を採用した．後述する画像解析の処理過程を考慮して色素水溶液の初期濃度を 0.2 mg/cm^3 に調整した．また，比重の差異が溶質輸送に及ぼす影響を把握するため，色素水溶液に NaCl を混合した水溶液を比較材料として用いた．海水中の塩分濃度を目安として，色素 NaCl 水溶液の NaCl 初期濃度を 30.0 mg/cm^3 に調整した．実験に供した色素水溶液と色素 NaCl 水溶液の比重はそれぞれ 1.0004 と 1.0202 である．本研究では，塩水阻止型の地下ダム建設に伴う塩水くさびではなく，貯留型地下ダム湖内の溶質輸送現象に関わる 1 つの影響因子として水溶液比重に焦点を当てている．

(2) 実験土槽と透水場の形成

溶質輸送実験を実施するにあたり，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 80 cm，幅 200 cm，奥行き 3 cm の空間を作製した．上下流方向を x 軸，鉛直方向を z 軸として，図-1(a) に平面図，(b) に断面図を示す．土槽の両側面には定水頭タンクを設置し，土槽とタンクの連結部分は試料流出を防ぐメッシュフィルタを貼付した．また，背面の 10 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．さらに，背面の 4 箇所 a ～ c, h には半径 6 mm の孔を穿孔して溶質の注入孔とし，シリコン栓で閉じた．

地下ダム止水壁を構築した帯水層の状態を形成するにあたり，十分に土質試料を飽和させて水中落下法により試料を充填した．まず，試料 S1 を土層の底から高さ 30 cm まで 6 層に分けて突き固め，次に，試料 S3 を 4 層に分けて充填することで，難透水性基盤を形成した．このとき，仕切り板により止水壁の貫入空間を確保し

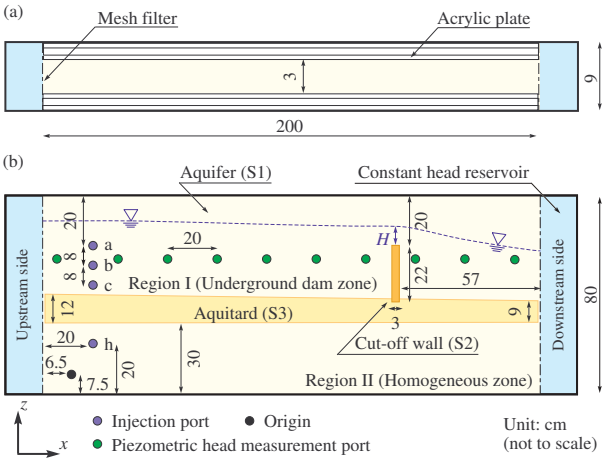

図-1 溶質輸送実験装置の概略：(a) 平面図，(b) 断面図

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 3/200 の勾配[2)] となるように試料を充填した．続いて，試料 S1 を 5 層に分けて充填するとともに，止水壁の領域に試料 S2 を充填した．同一層内に試料 S1 と S2 を充填する際には，隣接する試料同士の混合を防ぐため，所定の試料を配置する空間の両側に仕切り板を挿入し，試料の充填完了後，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．土層の底から 60 cm 高さまで試料を充填することで，帯水層内に高さ 22 cm，幅 3 cm，奥行き 3 cm の止水壁が構築され，止水壁下部の約 1.5 cm が難透水性基盤に貫入した状態にある．最後に，試料 S1 を一層あたり 5 cm の高さで残りの空間全体に充填した．全体を通して，試料間に間隙率の差が生じないように，各層の充填過程では 0.437 の間隙率を密度管理して積み上げた．

本研究では，地下ダム止水壁の有無が溶質輸送挙動に及ぼす影響を比較できるように，実験土槽の下部 30 cm の空間に試料 S1 のみの透水場を形成する工夫を施した．そのため，上部 50 cm の空間にて実際の地下ダムサイトを模擬していることになり，図-1 に示すように，便宜上，実験土槽を領域 I と II に区分している．

(3) 実験ケースと実験方法

上下流に設置した定水頭タンクの圧力を調整して上下流端に水位差を与えて場の流れを生成した．図-1 に

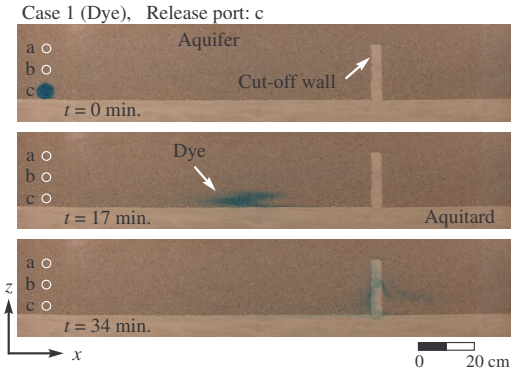

図-2 溶質輸送実験の画像の一例（Case 1，溶質注入孔 c）

示す止水壁上流側天端から地下水面までの距離を越流水深 H として，止水壁の直上流と直下流にあるマノメータの数値を内挿した値から水深 H を求めた．越流，非越流状態にあるダム湖における溶質輸送挙動を定量化するため，+3 cm（Case 1），±0 cm（Case 2），−3 cm（Case 3）の越流水深 H となるように，上下流のタンク圧力を調整した．プラスは越流，マイナスは非越流状態を示しており，各ケースの動水勾配は，10/200，15/200，10/200 であり，上下流端の水位差をそれぞれ 10 cm，15 cm，10 cm で維持した．

いずれのケースにおいても，流出流量と水温を計測し，15 °C 水温で補正した流量とピエゾ水頭値の読み取りにて定常流状態を確認した．図-1 に示す孔 a，b，c，h のいずれかに 20 cm^3 の色素水溶液，または，色素 NaCl 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．このとき，奥行き方向に均一の分布になるように，前面から背面にかけて徐々に針の先端位置を変えながら，20 秒かけて一定流量で注入した．溶質の初期位置による溶質輸送現象の差異を検討するため，孔 a，b，c は地下ダム湖内に，孔 h は均質場にそれぞれ設けている．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，土層から約 100 cm の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．本実験は 20 °C の恒温室にて実施しており，水温変化に伴う粘性や密度の変化は極めて小さいと考えられる．

3. 画像解析による溶質空間分布の評価

(1) 画像解析

本実験の主目的の 1 つは，地下ダム湖内の溶質輸送挙動を捉えた時系列画像に基づいて，水平・鉛直方向の溶質空間分布の変形を定量評価することにある．一例として，色素分布画像を図-2 に示す．止水壁と難透水性基盤を模擬した土質試料は帯水層を模擬した土質試料に比べて色彩としての白みが強く，同一の色素濃度であっても溶質の存在する試料に応じて青系と白系の彩度バランスに変化が生じる．そこで，溶質分布の変形を定量化する最初のステップとして，井上ら[5] の手法により，土質試料ごとに色素濃度と対応するピクセル明度の変換関数を求めた．室内照明や間接照明，カメラの位置を溶質輸送実験と同じ状態にして，注入する色素水溶液の濃度を 0.2 mg/cm^3 から 7 段階に薄くすることで，色素濃度をピクセル明度の多項式関数にて表現した[5]．止水壁と難透水性基盤に関する変換関数は酷似した結果が得られたことから，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，帯水層とそれ以外の変換関数を使い分けた．

(2) 空間モーメント法

空間モーメント法は溶質の濃度や質量の空間分布状況を解釈する 1 つの手段であり，フィールドレベル[7] やラボレベル[8] の溶質輸送実験にて採用されている．2 次元場における濃度分布の空間モーメントは

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

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．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．

本実験では，色素濃度をピクセル明度に関連付けていることから，溶質空間分布の変形を定量化する 2 つ目のステップとして，

$$M_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} U \cdot I(x,z,t)x^i z^j dxdz \qquad (2)$$

にて空間モーメント量を算出した[5]．ここに，U は 1 ピクセルの面積，$I(x,z,t)$ はピクセル明度である．また，

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

により色素分布の重心位置を求めた．ここに，x_G と z_G は分布の重心位置の x 成分と z 成分である．さらに，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．

4. 結果と考察

(1) 溶質分布の重心位置変動

溶質分布の経時変化を観察するため，Case 1 にて孔 a からリリースした色素水溶液，ならびに，色素 NaCl 水溶液の移流分散の様子をそれぞれ図-3 と図-4 に示す．Case 1 の越流水深 H は +3 cm であり，両水溶液ともに止水壁を越流するものの，溶質の空間分布形状は大きく異なることが観察される．比重の大きい色素 NaCl 水溶液は色素水溶液に比べて鉛直下方に落ち込んでいることがわかる．

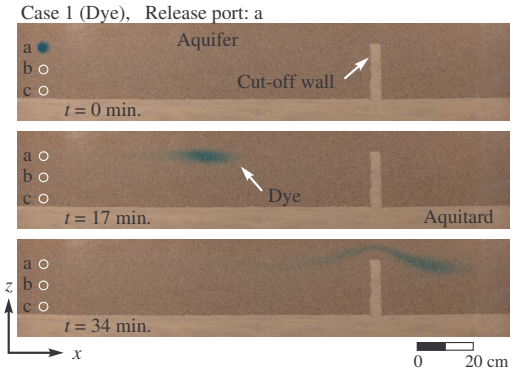

図-3 色素水溶液の溶質輸送挙動（Case 1，注入孔 a）

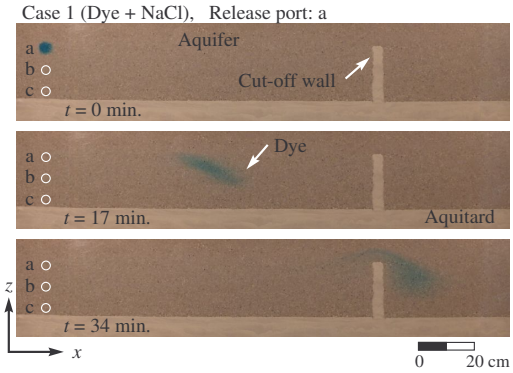

図-4 色素 NaCl 水溶液の溶質輸送挙動（Case 1，注入孔 a）

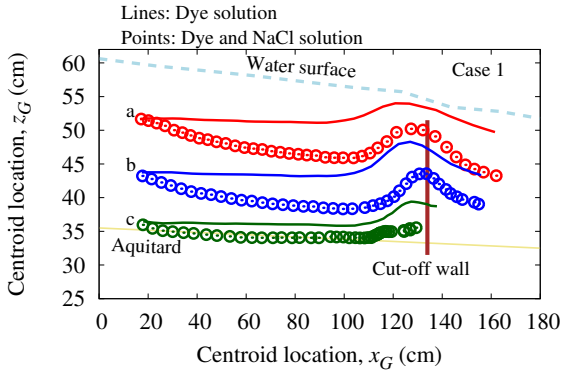

図-5 色素分布の重心移動の変化（Case 1）

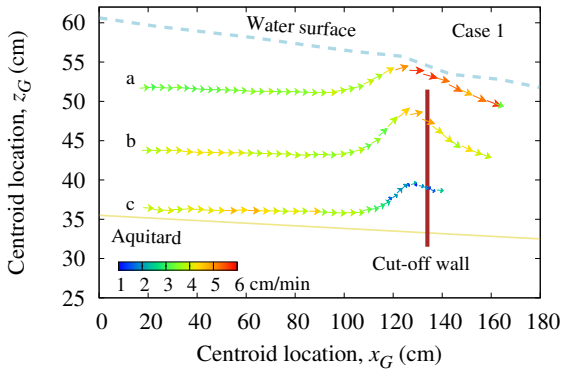

図-6 地下ダム場の流速分布（Case 1）

比重の差異が溶質輸送挙動に及ぼす影響を検討するため，式 (3) にて導出した各水溶液の空間分布の重心位置を追跡した結果を図-5 に示す．図中，止水壁と難透水性基盤，計測地下水面の位置に加えて，孔 a，b，c からリリースした両水溶液の重心移動についてもプロットしている．止水壁による貯留効果により止水壁の上流側 20 cm 付近から鉛直上方へ溶質は移動し，止水壁を越流，あるいは，止水壁内部を通過して下流側へ流下していることが 1 つを除いて確認できる．実線で示す色素分布の重心移動に比べて，丸印で示す色素 NaCl 水溶液の重心位置は鉛直下方に沈んでおり，比重の影響が明確に見られるとともに，地下水面から深い部分にてリリースするほど両水溶液の移動の差異は小さくなっている．難透水性基盤は帯水層に比べて約 2 オーダー小さい透水係数であるため，色素水溶液は高透水性部から低透水性部への溶質移動が発生しにくいこと[9),10)]が要因として挙げられる．また，水深が深いほど水平方向の流速成分は鉛直成分よりも卓越するため，色素 NaCl 水溶液は難透水性基盤に浸入するものの，比重による鉛直移動より水平方向への移動が支配的になる点も両水溶液の移動の差異が小さい要因に挙げられる．

地下ダム湖内の流速分布について定量化するため，各軸方向の重心の移動距離を経過時間にて除すことで算出した溶質の流速ベクトルの結果を図-6 に示す．色素 NaCl 水溶液は間隙水との比重の差異に伴う密度流の効果を含んでいるため，場の地下水流れを簡易的に表現することを目的として，色素水溶液の溶質輸送に基づいたベクトル図を描いている．ダム湖内は全体的に，地下水面から難透水性基盤に向けて流速は大きくなり，水深の深い部分の地下水流速は相対的に速いことがわかる．一方，止水壁を越流する流速は場全体の中で最も速く，止水壁の上流側 20 cm 付近の水深の深い部分ほど流速は最も低下している．図-2 に見られるように，水深の深い部分を移動する溶質であってもダム湖内に留ま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特徴的な現象である．貯水域よりも透水係数の小さい止水壁による遮水と難透水性基盤の傾斜は流速変動に大きく影響を及ぼすと言える．

越流水深の差異に応じた溶質輸送挙動を検討するため，Case 2 と Case 3 に対して溶質分布の重心位置を追跡した結果をそれぞれ図-7 と図-8 に示す．図-5 と同様に，溶質輸送経路は水溶液の比重に依存する様子を見て取れる．色素 NaCl 水溶液の輸送経路は色素水溶液の輸送経路より下方になるものの，Case 2 は Case 3 よりも両水溶液の輸送経路の乖離が小さい結果が得られている．これは流速のノルムに起因しており，動水勾配に呼応して Case 3 よりも Case 2 の流速は全体的に速くなるため，地下水流の駆動力は比重による沈下より卓越していると推測される．図-9 と図-10 にそれぞれ

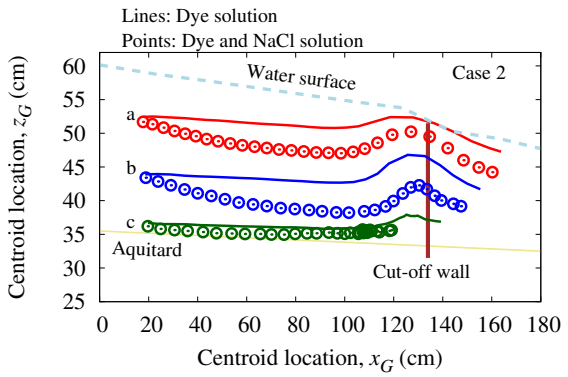

図-7 色素分布の重心移動の変化（Case 2）

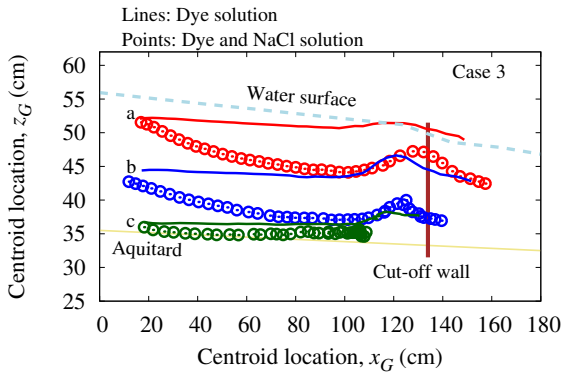

図-8 色素分布の重心移動の変化（Case 3）

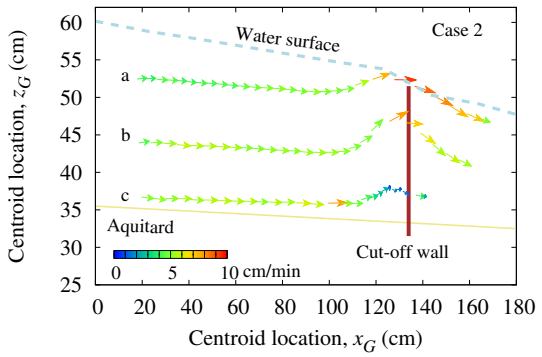

図-9 地下ダム場の流速分布（Case 2）

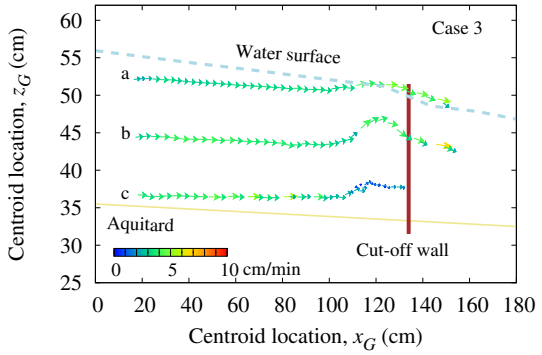

図-10 地下ダム場の流速分布（Case 3）

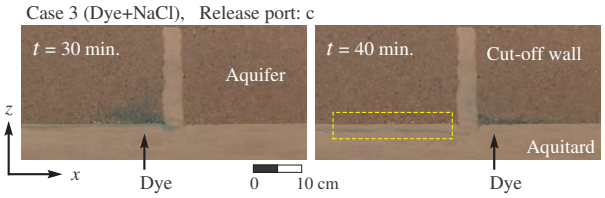

図-11 色素 NaCl 水溶液の輸送状態（Case 3）

Case 2 と Case 3 の流速ベクトルの結果を示す．流速ノルムの顕著な差異と，孔 c を起点とする溶質の止水壁の直上流における輸送速度の低下を観察できる．Case 2 の越流状態から Case 3 の非越流状態になると，水頭の変化が小さくなり，流動性が大きく低下するため，全体的に流速ノルムは小さくなると推測される．

(2) 溶質分布の空間 2 次モーメント変動

図-5 や図-7，図-8 では，孔 c を起点とする色素 NaCl 水溶液の重心位置は止水壁を通過せずに，ダム湖内に留まった状態にある．実際には，図-11 に示すように，止水壁，または，難透水性基盤を経由して，溶質の一部は下流側へ移動している．しかしながら，図-11 の黄色枠内に見られるように，溶質の一部は難透水性基盤内に沈み込んで移動性が低下するため，溶質空間分布の重心位置を求めると止水壁よりも上流側に位置する結果になる．高比重の色素 NaCl 水溶液は色素水溶液よりも鉛直輸送が大きくて難透水性基盤に流入しやすいため，透水性の小さい難透水性基盤を移動する溶質が増える分，溶質全体としての重心位置の移動距離は短くなると推測される．

重心移動のみでは溶質全体の輸送状況の把握は難しいことから，分布の全体像を捉えるため，式 (2) より導出した色素水溶液の空間 2 次モーメントの時間変動を図-12 に示す．図は Case 1 の結果を代表的に示しており，孔 h を起点とする溶質輸送の結果を併記することで，地下ダム堤体の無い状態における溶質輸送と比較している．また，止水壁の有無や動水勾配に応じて溶質移動速度は空間的に異なるため，時間の関数として空間 2 次モーメントを記す．さらに，溶質分布のフロントが止水壁の上流面に最接近した時刻の空間 2 次モーメントを丸印でプロットしている．実線で示す x 方向への分布のばらつき M_{20} は点線で示す z 方向への分布のばらつき M_{02} よりも高い値で推移しており，一般的な移流分散現象と同様に z 方向よりも x 方向へ溶質は拡大することを示している．また，孔 a から c の M_{02} は 20 分付近から孔 h とは異なる上昇を示している．これは止水壁付近では鉛直方向に伸展することを表しており，地下ダム湖内の溶質輸送で特徴的な点と言える．

比重の効果を検討するため，色素 NaCl 水溶液の空間 2 次モーメントの変化を図-13 に示す．比重により溶質分布は鉛直方向へ拡がる傾向にあることから，孔 a と b の M_{02} は図-12 に比して大きい値になっている．孔 c の M_{02} は止水壁の上流面に最接近した直後から 1 オー

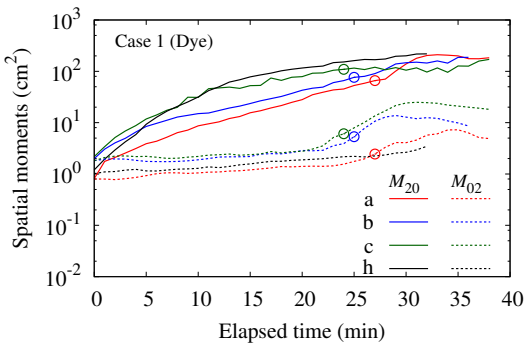

図-12 色素水溶液の空間 2 次モーメントの変化

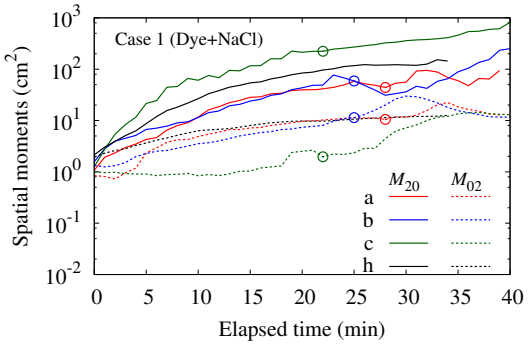

図-13 色素 NaCl 水溶液の空間 2 次モーメントの変化

ダーほど上昇しており，止水効果は水深方向の分布拡大を伴うことを示唆している．

前述のように，止水壁の深部付近は流速が小さく，止水壁周辺の流向・流速変化は相対的に大きい．止水壁周辺では鉛直方向への溶質分布の拡大が誘発されるため，実地盤の透水係数は約 2 オーダー小さい点，ならびに，地下ダムサイトにて農地からの継続的な溶質流入を踏まえると，溶質の停滞は無いにしても，止水壁周辺では水深方向に拡がるプロファイルとなる可能性がある．また，実サイトへの展開を考えると，流速の小さい領域では水質悪化に関する懸念が生じることから，取水井戸の深さや位置の選定に向けて，水頭値の計測範囲を広げた場全体の水頭分布の検討が望まれる．この点は実験設備の拡充を含めた今後の課題とする．

5. 結論

本研究では，地下ダム貯水湖内にある水溶性の比重に応じた輸送特性の傾向を実験的に視覚化した．ダム湖内の溶質挙動は滞在時間が異なるものの，止水壁を越流あるいは通過して下流へ流出することが確認された．また，比重の大きい溶質が鉛直方向へ沈みつつ移流分散する過程を捉え，難透水性基盤への浸入を観察できた．止水壁周辺にて鉛直方向の溶質伸展が促進される点は地下ダムに特徴的な現象であり，空間モーメントの観点から各軸方向の分布変動を定量化できた．

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) 中西康博：南西諸島の石灰岩島嶼における耕種農業と家畜飼育起源の硝酸態窒素による地下水汚染，日本草地学会誌，54，pp.280–285，2008.
4) 中川啓，籾井和朗，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.
5) 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.
6) Forrer, I., Papritz, A, Kasteel, R., Flühler, H. and Luca, D.: Quantifying dye tracers in soil profiles by image processing, *Euro. J. Soil Sci.*, 51, pp.313–322, 2000.
7) Singha, K. and Gorelick, S.M.: Saline tracer visualized with three-dimensional electrical resistivity tomography: Field-scale spatial moment analysis, *Water Resour. Res.*, 41, W05023, 2005.
8) 井上一哉，藤原隆之，倉澤智樹，田中勉：中規模溶質輸送実験による不均質多孔質体内の溶質マクロ分散現象と局所的不均質性の定量化，土木学会論文集 A2(応用力学)，71(2)，pp.I_691–I_702，2015.
9) Salamon, P., Fernàndez-Garcia, D. and Gòmez-Hernández, J.J.: Modeling mass transfer processes using random walk particle tracking, *Water Resour. Res.*, 42, W11417, 2006.
10) 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.

(2017. 9. 29 受付)

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON SOLUTE TRANSPORT BEHAVIOR IN SUBSURFACE RESERVOIR WITH UNDERGROUND DAM

Kazuya INOUE, Rinako HAMADA and Akira KOBAYASHI

Dye experiments in a tank having 80 cm height, 200 cm length and 3 cm thickness were conducted to quantify solute transport phenomena in subsurface reservoir with underground dam. Dye solution mixed with NaCl was also employed to elucidate the effect of the specific gravity on the solute spreading. Spatial moment analysis linked with image processing was applied to identify time-series variation of dye distribution. The results revealed that solutes in reservoir flowed over or across the cut-off wall and solutes with larger specific gravity showed a significant spread in the vertical direction. Moreover, solutes approaching the cut-off wall exhibited an increase tendency of transverse spatial moments despite of the release ports.