J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 132, p.3 ～ 12 (2016)

多孔質媒体中での塩水侵入・排除に関する室内実験と数値解析

籾井和朗 [1]・高橋昌弘 [2]・Roger A. Luyun, Jr.[3]

Experimental and numerical analyses on saltwater intrusion and removal in porous media

Kazuro MOMII[1], Masahiro TAKAHASHI[2] and Roger A. Luyun, Jr.[3]

1. はじめに

地下水は，多くの国々において，農業，工業，生活用水のための重要な水資源であり，湧水などを通じて人々の生活に豊かさを与えている．このような地下水の有用性にもかかわらず，表流水や大気現象と異なり，その動きや質的変化が目に見えないため，現状の把握や定量的評価が難しいものとなっている．また沿岸域には人口が集中しており，古くから地下水に関する研究が行われている．海岸帯水層における地下水に関する研究は，海水侵入現象に関する Ghyben-Herzberg 近似など，1900 年頃から検討されている（Bear, 1972）．1980 年以降は，コンピュータによる分散を考慮した数値解析（籾井ら, 1986）が行われ，2000 年以降は，パソコンで汎用プログラムを利用して数値解析（Guo and Langevin, 2002; Langevin and Guo, 2006）が可能となり，結果の可視化とともに現象の理解が深まっている．近年では，津波により地表面に湛水した海水の侵入と地下淡水域に侵入した海水の動態や島嶼域における淡水レンズの挙動などが検討されている（Illangasekare et al., 2006; Werner et al., 2013）．

地下水中における海水と淡水の輸送では，両者の混合に伴う溶質濃度の変化により流体密度が変化する点が，均一密度の溶質輸送とは異なっている．すなわち地下水の流速は流体の密度に依存することから，海水と淡水の輸送では密度を含む項がダルシーの法則の式中に現れる．一方，均一密度の溶質輸送では溶質濃度変化による流速変化が生じない．海水と淡水の輸送において流速分布を求めるには密度分布を必要とし，この密度分布を求めるには溶質濃度分布が必要となる．溶質の空間的な拡がりは流速に依存することから，解析的には，地下水の流れと溶質輸送の支配方程式を満足する流速（圧力）と溶質濃度を求めることになる．この典型的な例が海岸地下水における海水侵入である．一方，多孔質媒体中における溶質輸送解析では，流れ方向に沿う溶質の拡がりを表す縦分散と，流れに直交する方向への溶質の拡がりを表す横分散が，溶質の希釈に関わる重要な分散パラメータとなる．例えば，一様な流れの中を移動するひと塊の溶質は，一般には流れ方向に比べて横方向の分散が小さい（Todd and Mays, 2005）ため，2 次元平面では，流れ方向に長く拡がった楕円形状を呈しながら輸送される．また，海岸域で地下淡水を井戸から揚水すると，井戸周辺の海水も井戸に向かって移動し，井戸に向かう流れに直交する横分散により，地下淡水域に塩分が希釈混合される．このように，塩分濃度の空間分布を把握するためには，地下水中における分散の評価が重要となる．

本稿では，海岸帯水層における海水と淡水地下水の相互作用に関し，塩水侵入と地下止水壁設置に伴う塩水動態を取り上げ，主に，Luyun et al.（2009），および高橋・籾井（2016）の最近の論文での室内実験と数値解析の結果に基づいて解説を加え，課題や今後の展開について考察する．

2. 塩水の侵入と排除：Luyun et al.（2009）に基づく考察

2.1 実験

Fig. 1 にアクリル製実験装置の概要を示す．平均粒径 1.2 mm のガラス球を浸透水槽（幅 90 cm，高さ 60 cm，奥行き 8 cm）に高さ約 50 cm まで充填した．多孔質媒体浸透層の両側には，水位制御可能な淡水水槽（右側）と塩水水槽（左側）を設定している．塩水は赤色食用色素で着色し，密度が 1.025 g cm^{-3} になるように調整した．

実験では，まず，水槽全体を淡水（イオン交換水）で満たし，右側水槽の水位 h_1 と左側水槽の水位 h_2 との水位差を 0.5 cm に固定し，淡水の流れが十分安定した後，左側水槽排水パイプにおいて，単位奥行あたりの流量 q を測定し，浸透層の飽和透水係数 k を次式：

$$k = \frac{2l}{(h_1^2 - h_2^2)} q \qquad (1)$$

[1]Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 1-21-24 Korimoto, Kagoshima, Japan. Corresponding author: 籾井和朗，鹿児島大学農学部.
[2]Research and Development Center, Nippon Koei Co., ltd. 2304, Inarihara, Tsukuba, Japan.
[3]Land and Water Resources Division, University of the Philippines Los Baños, Laguna 4031, Philippines.
2015 年 8 月 20 日受稿　2016 年 2 月 12 日受理

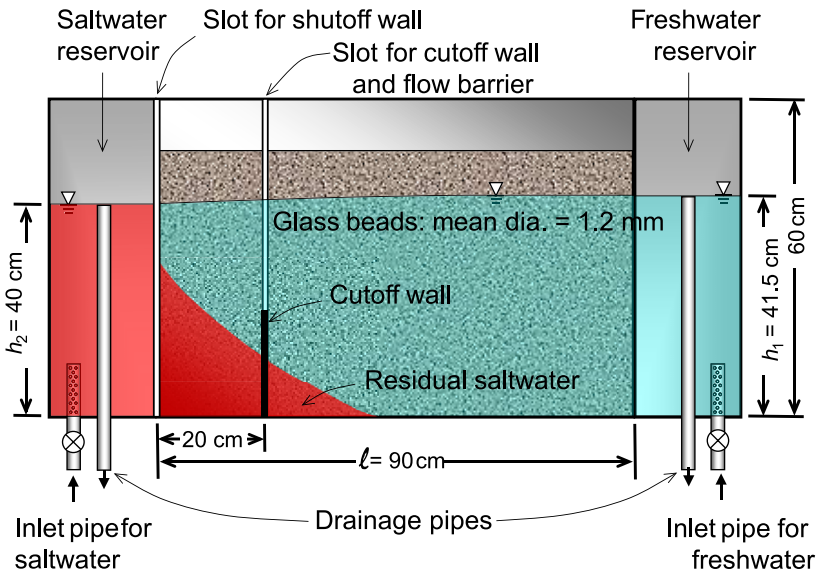


Fig. 1 塩水侵入・排除に関する実験装置.
Experimental setup for saltwater intrusion and removal.

に基づいて求めた（例えば，Citarella et al., 2015）．ここに，l は浸透層の幅（90 cm）である．次に，遮水壁を塩水水槽と浸透層の間に挿入し，左側水槽の淡水を塩水と置き換え，塩水水槽水位を $h_2 = 40.0$ cm（左側）および淡水水槽水位を $h_1 = 41.5$ cm（右側）に固定した．遮水壁を取り除くと，塩水が浸透層内左下端から侵入し始め，十分時間が経過すると塩水の侵入が止まり，塩水楔が形成される（塩水侵入過程）．この後，塩水水槽から浸透層内に水平距離 20 cm の位置に予め設置した止水壁挿入スロットに，高さ 20 cm の止水壁（厚さ 0.4 cm）を挿入し，その後の塩水の挙動（塩水排除過程）をデジタルカメラで撮影した．

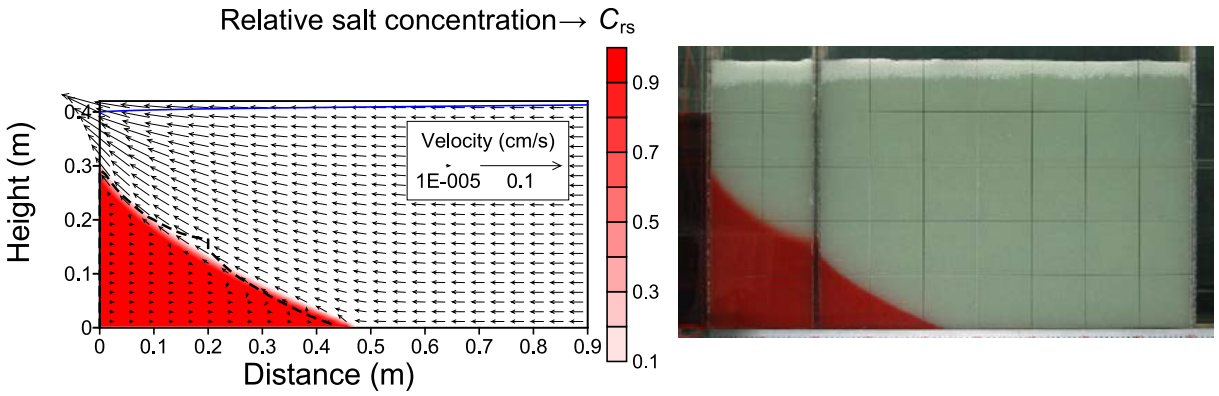
2.2 実験結果と数値解析の比較

Fig. 2 に室内実験（右図）と数値解析（左図）の結果を示す．数値解析には，密度依存型移流分散解析コード SEAWAT（Guo and Langevin, 2002）を適用した．数値解析に必要な微視的分散スケールの分散長（詳細は，次節の式（2）参照）に関し，Luyun et al.（2009）は，縦分散長には平均粒径 0.12 cm の値，および横分散長には縦分散長の 1/10 の値 0.012 cm を与えている．図中の数値解析の赤色は相対濃度（$0 \leq C_{rs} \leq 1$）表示であり，淡水（密度 1 g cm^{-3}）を 0，塩水（密度 1.025 g cm^{-3}）を 1 とし，点線は，実験の淡塩水境界面を目視により観測したものである．実験では多孔質媒体中に止水壁挿入用スロットがあり，数値解析ではこのスロットを無視しているため，数値解析と実験の定常塩水楔形状はスロット付近で若干異なるが，両者は全体的には概ね一致している．この定常塩水楔は，遮水壁を取り除いて約 1 時間で形成された（Fig. 2（a））．次に，浸透層内に高さ 20 cm の止水壁を設置すると，止水壁より右側に残留している塩水楔の先端位置は初めの約 20 分は若干前進する（Fig. 2（b））が，その後徐々に後退（Fig. 2（c））し，最終的には全ての残留塩水が排除される（Fig. 2（d））．初期の楔先端の前進は，止水壁設置により，止水壁直上部から右側の地下水面が若干上昇し，塩水楔先端部が右側へ移動し，塩水楔の形状が変形したと考える．塩水楔の排除には止水壁挿入後約 1 日を要し，塩水侵入に要した時間の約 25 倍であった．

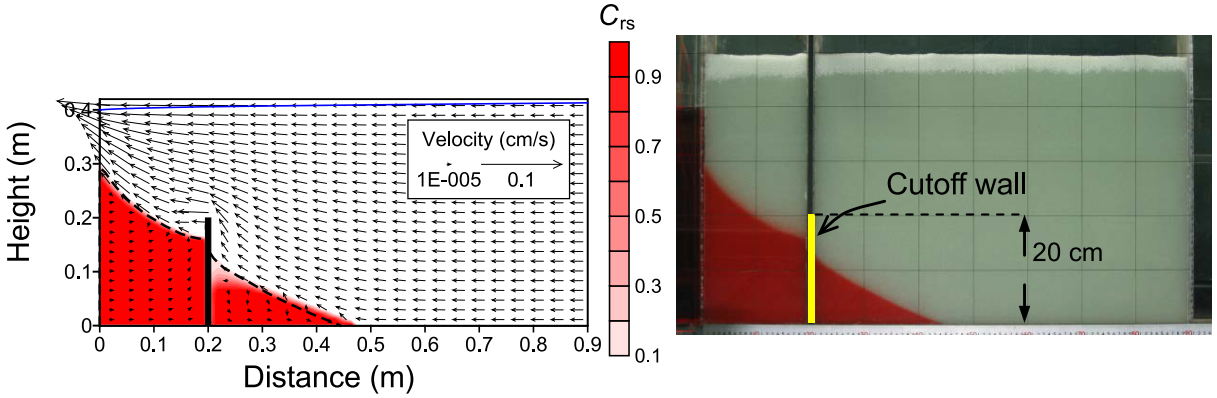
数値解析より次のことが考察できる．淡水域では，淡水水槽（右）側から淡塩水混合域に沿って塩水水槽（左）側に向かう淡水の流れが発生し，一方，塩水域では，淡水より遅い流速で塩水水槽から塩水域に塩水が供給される．淡塩水混合域の混合幅は小さいが，塩水水槽から供給された塩水は，淡塩水混合域で右側からの淡水の水平流れと合流し，流れの方向を左上向きに変え，淡塩水混合域に沿って希釈されながら塩水水槽へ流出する．定常状態では，このようにして，塩分の補給と流出に平衡（動的平衡状態）が保たれている．実際の海岸帯水層では，塩水水槽を海，淡水水槽側を内陸部地下水と想定することで，類似の現象（海岸帯水層における海水侵入現象）が生じている．

一方，止水壁設置後（Fig. 2（b）以降）の塩水排除過程では，止水壁より右側の残留塩水域への塩水の補給が絶たれ，右側からの淡水の流れによって，淡塩水混合域において，流体力学的分散（機械的分散と分子拡散）により希釈された塩分は，止水壁頂部を超えて塩水水槽側に輸送される．その結果，止水壁より右側の残留塩水塊は徐々に小さくなり，最終的には消滅する．

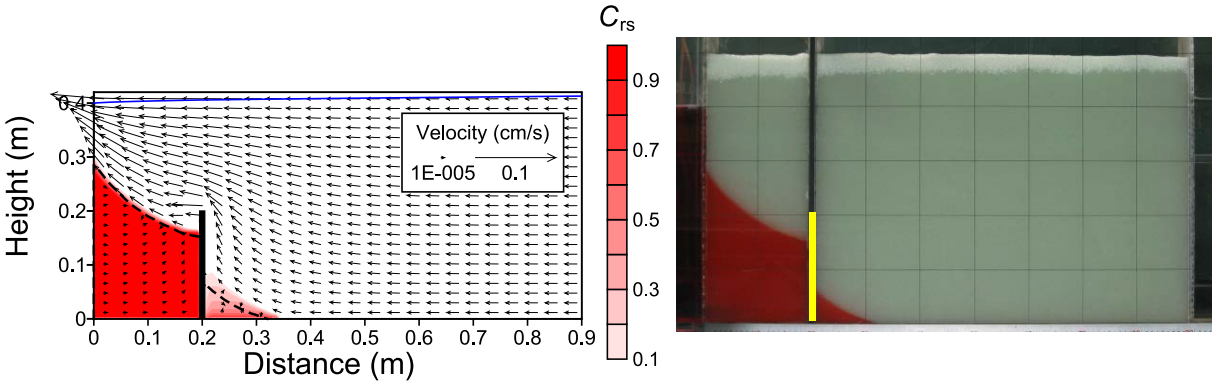
海岸帯水層における代表的な海水侵入制御法として，Oude Essink（2001）によれば，井戸からの注水（Luyun et al., 2011），涵養池からの地下水涵養，埋め立て，止水壁などが提案されている．止水壁の場合には，内陸部に残留した塩分の対処が問題となり，その動態については未解決であった．Luyun et al.（2009）では，内陸部からの地下淡水の流れがある場合には，淡水流れにより残留塩水が排除されることを，室内実験と数値解析により明らかにした．



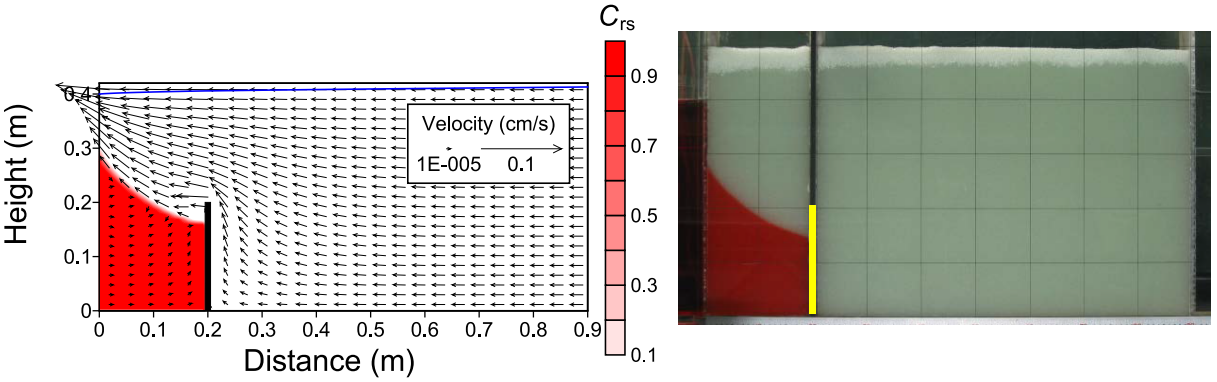
(a) Steady state condition.



(b) Peak of advance of the residual saltwater (20 min after wall installation).



(c) Attenuation of residual saltwater (12 h after wall installation).



(d) Complete removal of residual saltwater (1 day after cutoff wall installation).

Fig. 2 実験と数値解析の結果の比較.
Comparison of experimental and numerical results.

3. 塩水の侵入・排除に及ぼす分散効果：高橋・籾井（2016）に基づく考察

多孔質媒体中での止水壁設置後の塩水の排除過程には，前述のように，淡塩水混合域における分散による塩分輸送が影響している．Luyun et al.（2009）では，実験に使用したガラス球の平均粒径とその 1/10 の値を縦と横の分散長に仮定して数値計算を行い，塩水塊の挙動について検討した．高橋・籾井（2016）では，対象とする浸透層の分散長の値を予め推定し，次いで塩水侵入・排除に及ぼす分散の効果について，実験と数値解析により検討している．

3.1 分散係数と分散長

まず，地下水中における分散係数について概説する．本研究では，鉛直断面 2 次元（x, y）を対象にしており，水平方向を x 軸および鉛直方向を y 軸（上向きを正）とし，x, y 方向の間隙平均流速 u', v' と微視的分散スケールである縦分散長 α_L，横分散長 α_T を用いると，多孔質媒体中の流体力学的分散係数 $D_{xx}, D_{yy}, D_{xy}, D_{yx}$ は，次式で表される：

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \alpha_L \frac{u'^2}{V} + \alpha_T \frac{v'^2}{V} + D^* \\ D_{yy} &= \alpha_L \frac{v'^2}{V} + \alpha_T \frac{u'^2}{V} + D^* \\ D_{xy} &= D_{yx} = (\alpha_L - \alpha_T)\frac{u'v'}{V} \end{aligned} \tag{2}$$

ここに，$V = \sqrt{u'^2 + v'^2}$ および D^* は浸透層内の分子拡散係数である．塩水侵入・排除の数値解析では分散係数を式 (2) に基づいて計算している．式中の流速の計算には，流体の密度 ρ の変化を考慮した一般化したダルシーの法則（Guo and Langevin, 2002; Zheng and Bennett, 2002）を適用する：

$$\begin{aligned} u &= -\frac{K}{\mu}\frac{\partial P}{\partial x} \\ v &= -\frac{K}{\mu}\left(\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g\right) \end{aligned} \tag{3}$$

ここに，K は固有透過係数，μ は粘性係数，u, v は水平，鉛直方向の断面平均流速，P は水圧，および g は重力加速度であり，x, y 方向の断面平均流速 u, v と間隙平均流速 u', v' は，有効間隙率 n_e を用いて，$u = n_e u', v = n_e v'$ の関係にある．固有透過係数 K と透水係数 k は，$k = K\rho g/\mu$ の関係にある（嘉門ら, 2007）．式（3）の密度項 ρg は，重力に起因し，重力は鉛直方向に作用するので，水平方向の速度成分 u には含まれない．密度 $\rho = 1.025$ g cm^{-3} の海水の場合，密度 $\rho = 1.0$ g cm^{-3} の淡水に比べて，密度項 ρg が大きくなる．一方，淡水の場合は均一淡水密度の従来のダルシーの法則と一致する．

密度変化が無視できる従来の溶質輸送解析とは異なり，塩分濃度が変化すると，流体密度が変化し，この密度変化により，一般化したダルシーの法則（式（3））によれば，流速が変化する．流速変化は，式（2）に示すように，流速依存型の分散係数の大きさを変え，塩分濃度の希釈に影響する．濃度分布が変化すると，流体密度が変化することになる．本研究で用いた数値解析コード SEAWAT では，海水侵入などの密度変化の大きい場合の流れと溶質輸送を結合して解く手法を採用している（Guo and Langevin, 2002）．

一様流中において，流れ方向を x 軸にとり $D_L = D_{xx}$, $D_T = D_{yy}$ と略記すると，式（2）は簡略化され次式を得る：

$$\begin{aligned} D_L &= \alpha_L |u'| + D^* \\ D_T &= \alpha_T |u'| + D^* \end{aligned} \tag{4}$$

すなわち，流体力学的分散係数は，分散長と間隙平均流速の積，および分子拡散係数の和として表される．この式は，室内実験などでの一様流中における分散長 α_L, α_T の推定に適用される．分散長は，一般には，縦分散長が横分散長に比べて大きく，概ね，$\alpha_L/\alpha_T = 10 \sim 100$ の範囲にある（Todd and Mays, 2005）．

3.2 一様流中のパルス・連続注入実験

本研究で用いる浸透層の分散長の推定とその妥当性は，以下のパルス・連続注入実験に基づいて行う．実験

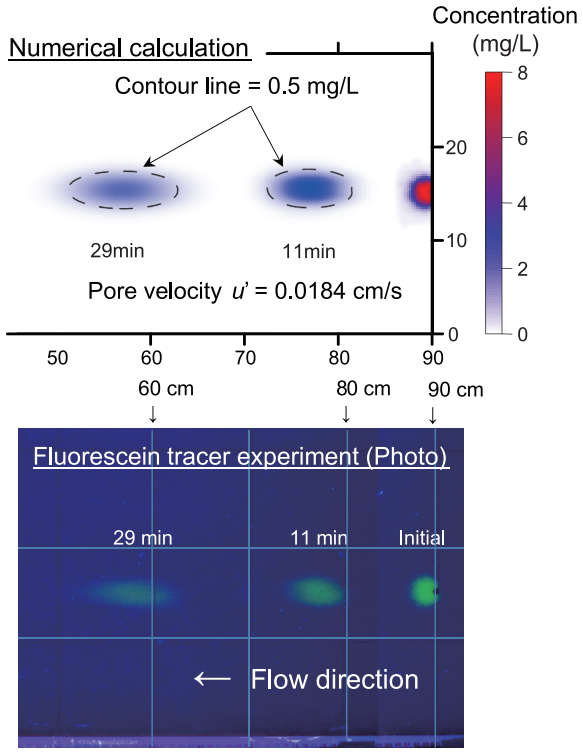


Fig. 3　フルオレセイントレーサーによるパルス注入実験と数値計算の比較.
Comparison of numerical calculation and experiments under pulse injection of fluorescein tracer.

装置の概略は，Fig. 1 と同様であるが，大きさが異なり，浸透層幅 100 cm，高さ 40 cm，奥行き 1.5 cm の浸透水槽である．断面 2 次元の取り扱いを確実にするために奥行きを薄くし，またトレーサーの輸送過程をより詳細に検討するために長い流路長を確保した．多孔質媒体として平均粒径 1.3 mm のガラス球を高さ 35 cm まで充填した．充填に際しては，浸透層全体の一様性を保つために，低周波振動モータ（振動数約 60 Hz）で水槽全体を振動させながら，水中に，空気が混入しないように水とともにガラス球を注入・充填した．この装置では，トレーサー注入口を，装置左端から水平距離 90 cm，装置底面から 15 cm の高さに設置した．一定量のトレーサー注入にはシリンジポンプを用いた．

Fig. 3 下図にパルス注入実験（写真）を示す．実験では，左側水槽水位 30 cm，および右側水槽水位 30.5 cm に固定し，浸透層横幅 100 cm に対し，水位差 0.5 cm（動水勾配 0.005）で右側から左側へ向かう流れを発生させた．この流れは，自由水面を有する地下水の流れのため，完全な一様流ではないが，数値解析（後述）の流速分布からは概略一様流と判断できる．トレーサーを 1 分間パルス注入後，11 分，29 分と時間とともにトレーサー塊は，間隙平均流速 u' で流下しながら，希釈輸送されている．トレーサーには蛍光色素（フルオレセイン）を用い，実験は，暗室内で紫外線ランプ（40 W × 2 本）を照射して実施した．蛍光色素の輸送過程をデジタルカメラ（Nikon 製 D5100，ピクセル 3269 × 2448）で撮影した．デジタルカメラからのカラー画像情報をトレーサー濃度に変換する方法は，画像出力値を，赤（R），緑（G），青（B）の 3 要素 R, G, B（それぞれ 0 ～ 255 の 256 段階）に分離し，フルオレセイン濃度 C と R, G, B 値との関係により検討した．Fig. 4 の検定結果に示すように，R 値は不規則な変化，G 値は濃度 C の増加とともに増加，および B 値は濃度 C の増加とともに減少した．B 値の変化幅（70 ～ 150）に比べて，G 値の変化幅（25 ～ 200）が大きく，さらに G 値に対する濃度 C の変化を指数関数で良く近似できることから，フルオレセイン濃度 C を G 値の関数として表した．なお，本実験装置での有効間隙率 n_e は，浸透層左右の水位差 0.5 cm に対して観測流量より求めた断面平均流速（0.0081 cm s^{-1}）と，トレーサー塊の中心位置の移動により求めた間隙平均流速 u'（0.0184 cm s^{-1}）との比より，0.44 である．

以上のように，高橋・籾井（2016）では，Luyun et al.（2009）に比べて，①実験装置の奥行きを薄くし，断面 2 次元性を高めたこと，②実験装置の幅を長くすることでトレーサーの流下距離を長くし，溶質の輸送過程を明確にしたこと，③塩水侵入・排除実験装置にトレーサー注入口を付加し，同一実験装置で分散係数の推定を行えるようにしたこと，および④振動状態でガラス球を水中充填し，浸透層の一様性を高めたことにより，改良を加えた．

3.3 分散係数の推定

パルス注入実験における分散係数の推定は，Elfeki et al.（1997）の方法を参考にしている．ここでの推定方法と Elfeki et al.（1997）の方法の両者ともに，一様流中で輸送されるトレーサー塊の拡がりの濃度分布を正規分布と仮定して推定している．Elfeki et al.（1997）では，写真撮影したトレーサー濃度の値は確定せず，トレーサー塊形状を楕円（例えば，Fig. 3 上図の数値解の点線）とみなし，その形状を肉眼で識別し，トレーサー塊端の濃度の値をトレーサー塊中心濃度の 1% と仮定し解析している．一方，高橋・籾井（2016）では，画像解析によりトレーサー塊の濃度の値を既知にしている点が異なり，より客観的な推定が可能となる．トレーサー塊の拡がりの x，y 方向の平均二乗変位 σ_x^2, σ_y^2 は時間とともに増大し，分散係数 D_L（D_T の式は同様のため省略）は，次式で表される（例えば，椿, 1974）：

$$D_L = \frac{1}{2}\frac{d\sigma_x^2}{dt} \tag{5}$$

流れ方向と流れに直角な方向のトレーサー塊の拡がり幅に基づいて平均二乗変位 σ_x^2，σ_y^2 を求め，その時間変化を Fig. 5 に示す．トレーサー注入開始約 10 分以降は，σ_x^2，σ_y^2 はほぼ直線的に増加（米沢, 1986）している．式（5）に基づいて推定した縦と横の分散係数は，Fig. 5 に示すように，それぞれ $D_L = 3.5 \times 10^{-3}$ cm^2 s^{-1} および $D_T = 1.4 \times 10^{-4}$ cm^2 s^{-1} である．本実験での浸透層中の分子拡散係数 D^* は機械的分散係数 D_L，D_T に比べて小さいと仮定し無視し，間隙平均流速 $u' = 0.0184$ cm s^{-1} を式（4）に代入すると，本実験でのガラス球（平均粒径 1.3 mm）では，$\alpha_L = 0.19$ cm，$\alpha_T = 0.0074$ cm となり，その比 $\alpha_L/\alpha_T = 27$ である．なお，浸透層中の分子拡散係数 D^* の値は，浸透層の屈曲度や水温ならびに溶質の種類に依存するが，概ね 10^{-5} cm^2 s^{-1} のオーダーにある

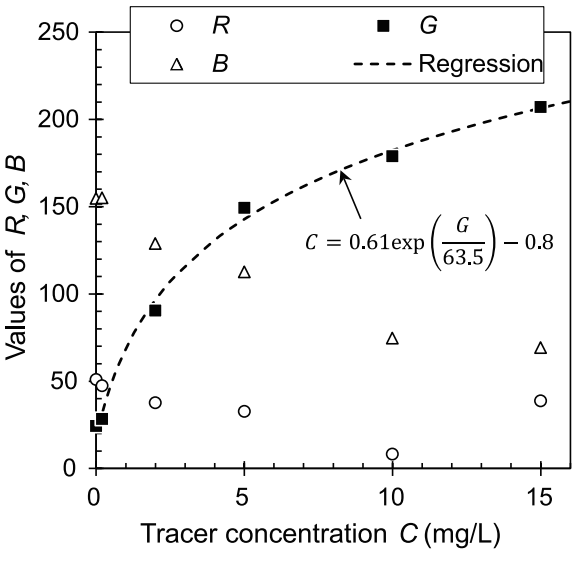


Fig. 4　デジタルカラー画像から分離した R, G, B 値とフルオレセイントレーサー濃度 C の関係．
Relationship between the fluorescein tracer concentration, C, and the red, green, and blue luminosity values (R, G, B) separated from the digital color images.

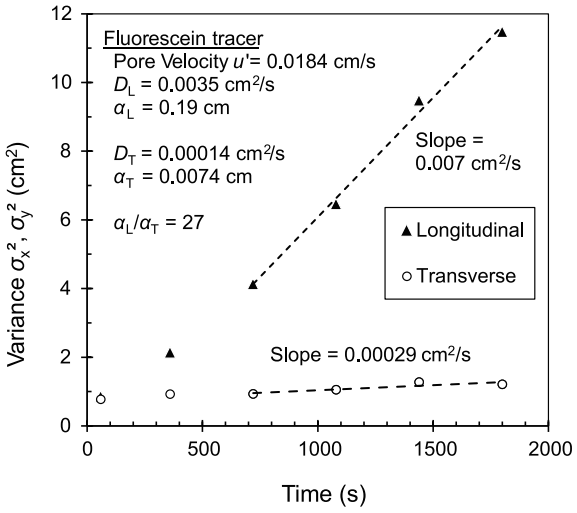


Fig. 5 パルス注入実験における縦方向と横方向の平均二乗変位の時間変化.
Relationship between the longitudinal and transverse variances and the travel time in the pulse injection experiments.

(Fetter, 2008) といわれており，一方，本実験での縦分散係数 D_L は 10^{-3} cm^2 s^{-1}，横分散係数 D_T は 10^{-4} cm^2 s^{-1} のオーダーにある．

Fig. 3 上図には，初期濃度分布についてはパルス注入開始後 1 分 (Fig. 3 下図の Initial) における画像解析に基づくフルオレセイン濃度の値（領域 10 ピクセル × 10 ピクセルの平均値，実際には領域 0.24 cm × 0.24 cm に相当）を数値解析の格子点（格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 0.5$ cm）に割り当て，数値解析の初期濃度分布とし，その後の濃度分布を，移流分散解析コード MT3DMS（A Modular 3-D Multi-Species Transport Model）(Zheng and Wang, 1999; Langevin and Guo, 2006) の数値解析により求めた．初期水位はパルス注入実験の境界条件の水位差に設定した．縦と横の分散長は，Fig. 5 の推定値（$\alpha_L = 0.19$ cm, $\alpha_T = 0.0074$ cm）を与えた．Fig. 3 上図に示すように，パルス注入後の蛍光色素の輸送過程を概ね再現している．

Fig. 5 に示したように横方向の平均二乗変位 σ_y^2 の時間変化が小さいため，横分散長の妥当性をさらに検討するために，同一の実験装置で連続注入実験を行い，その再現性を検討した．トレーサーの注入幅 Y の場合に対する一様流中での定常状態での溶質濃度 C (x, y) の解析解 (Huang et al., 2002) は，次式で与えられる：

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2}\left\{ \mathrm{erf}\left[\frac{\left(y+\frac{Y}{2}\right)}{2\sqrt{\frac{xD_T}{u'}}}\right] - \mathrm{erf}\left[\frac{\left(y-\frac{Y}{2}\right)}{2\sqrt{\frac{xD_T}{u'}}}\right]\right\} \quad (6)$$

ここに，C_0 は注入濃度である．パルス注入実験と同じ横分散長 α_T を式 (4) に代入し横分散係数 D_T を求め，式 (6) より濃度分布を求めた．式中の間隙平均流速 u' は，連続注入実験時の観測流量と有効間隙率 n_e (= 0.44) より求めた．なお，トレーサー注入幅は，注入口から $x = 35$ cm において鉛直濃度分布を最も良く再現する値 $Y = 0.3$ cm を採用した．

Fig. 6 に，フルオレセインを連続注入した場合の解析解，実験写真，および注入口から $x = 35$, 65 cm におけ

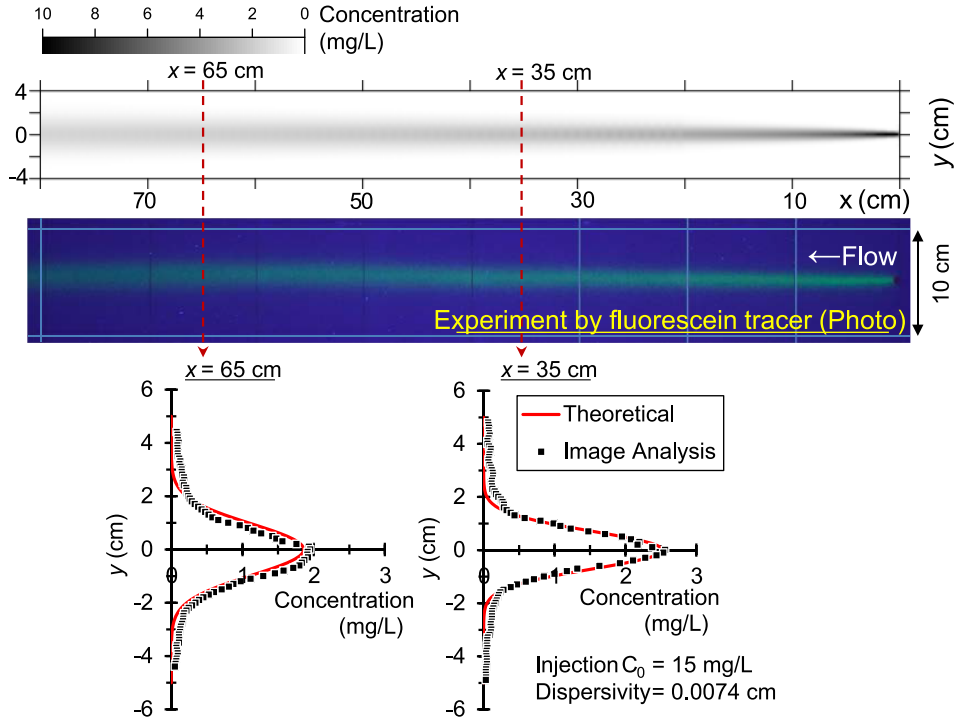


Fig. 6 フルオレセイントレーサーを用いた連続注入実験結果と解析解の比較.
Comparison of analytical solutions and experimental results of the continuous injection by fluorescein tracer.

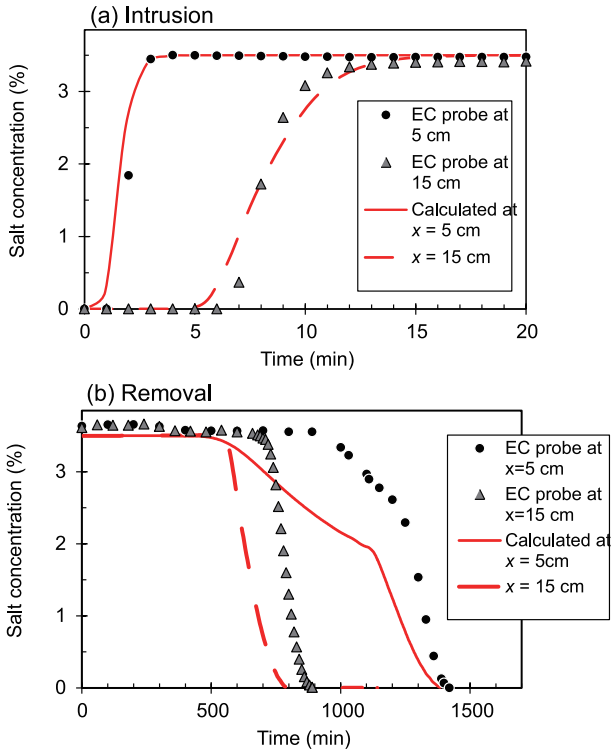


Fig. 7　塩水侵入・排除過程における塩分濃度の時間変化の実測値と数値解.
Measured and numerical results of salt concentration changes in (a) saltwater intrusion and (b) removal processes at two EC probe locations.

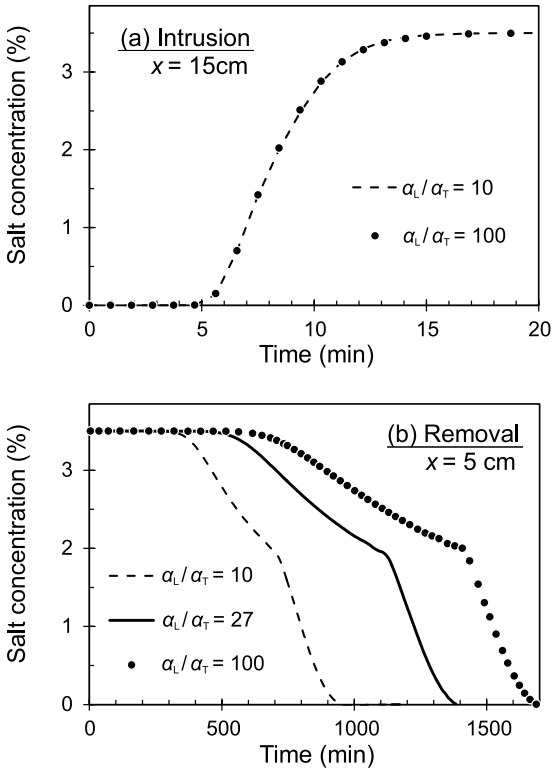


Fig. 8　数値解析に基づく塩水侵入・排除に及ぼす分散長の影響.
Influence of dispersivity on (a) saltwater intrusion and (b) removal based on the numerical analysis.

る鉛直濃度分布の画像解析結果と解析解の比較を示す．ここでは，トレーサー注入口中心を座標原点としている．連続注入実験においても，$x = 65$ cm の実験結果と解析解は良く一致しており，ここで与えた横分散長は概ね妥当である．

3.4 塩水の侵入・排除に及ぼす分散の影響

3.4.1 実験

塩水侵入・排除実験の方法は，前述の Luyun et al. (2009) と概略同じであるが，この装置での特徴が 2 つある．まず，止水壁（高さ 28 cm）は，塩水水槽と浸透層左端の境界に設置した．これにより浸透層内に止水壁挿入スロットが不要であり，定常塩水侵入における塩水楔形状が，従来の理論解や数値解と一致する．淡水と塩水の水槽水位は 31.0 cm および 30.0 cm である．また，浸透層底から高さ $y = 5$ cm で，浸透層左端隅をここでは座標原点として，$x = 5$ cm と 15 cm の 2 ヶ所に直径 2 mm，センサー部の長さ 15 mm（浸透層の奥行きと同一長さ）の電気伝導度計を設置し，塩分濃度の時間変化を求めた．なお，塩水は赤色食用色素で着色し，前述のパルス・連続注入実験の直後に塩水侵入・排除実験を行っており，浸透層の水理定数（分散長，透水係数，間隙率）は同一と考える．

3.4.2 結果と考察

Fig. 7 に塩水侵入と排除における電気伝導度計による塩分濃度の時間変化の実測値と SEAWAT による数値解の比較を示す．塩水侵入過程では，数値解に比べると電気伝導度による実測塩分濃度の立ち上がりが若干急ではあるが，実測値と数値解は概ね良く一致している．塩水排除過程では，実験に比べて，数値解の方が先に濃度低下が生じているが，$x = 5$ cm において残留塩水が排除され淡水濃度になる時間（約 1400 分）は概ね一致している．Fig. 2 に示した実験と数値解析の結果にも見られるように，止水壁近くの塩水塊左上部分は実験に比べて早く希釈される傾向にある．この不一致については，今後の検討を要するが，以下のようなことが考えられる．まず，実験装置の構造上，実験装置塩水側の止水壁とガラス球浸透層の間に金網を張った穴あきアクリル板（厚さ 3 mm）を設置し浸透層を支えているが，この穴あきアクリル板が排除過程の流れに影響を与えたのではと考えられる．さらに，数値計算においては，間隙平均流速 u' に基づく格子ペクレ数 $P_e < 2$ が，概算ではあるが，$P_e = u'\Delta x/D_L \approx \Delta x/\alpha_L = 2.6$ とやや大きく，数値分散などの計算誤差を考慮すると，現在採用している計算格子間隔 5 mm をさらに小さくする必要がある（Zheng and Benftt, 2002）．今後，数値計算で用いる境界条件と出来る限り一致するように実験装置を工夫するとともに，粒径スケールでの数値計算による検討などにより，詳細は明らかになると考える．

Fig. 8 には，数値解析において，縦分散長を固定して，縦横分散長比 $\alpha_L/\alpha_T = 10, 27, 100$ の相違が塩水侵入・排除過程における塩分濃度の時間変化に及ぼす影響を示

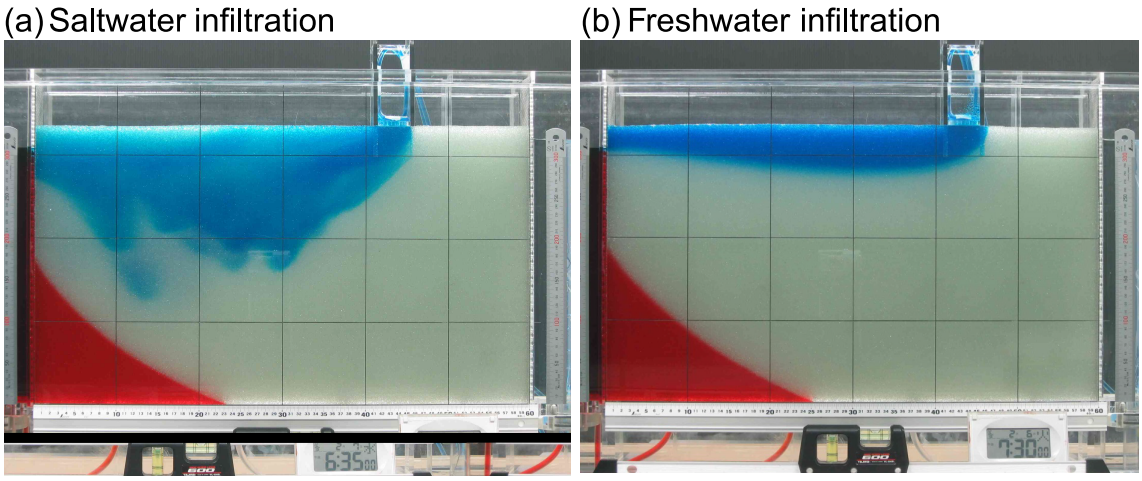


Fig. 9 下部に塩水侵入楔（赤色）のある帯水層への地表面からの（a）着色塩水（青色，密度 1.025 g cm^{-3}）と（b）着色淡水（青色，密度 1 g cm^{-3}）の輸送に関する室内実験.
Experiments on transport of (a) blue-colored saltwater ($\rho = 1.025$ g cm^{-3}) and (b) blue-colored freshwater ($\rho = 1$ g cm^{-3}) from the top of the aquifer with the red-colored saltwater intrusion wedge below.

す．塩水侵入過程 Fig. 8（a）では，縦横分散長比が大きくなると，淡塩水混合域は拡がらずに，定常状態での塩水楔先端位置は若干ではあるが先に伸びる傾向にある（Abarca and Clement, 2009）が，この観測位置（$x = 15$ cm，$y = 5$ cm）での塩分濃度の時間変化に及ぼす影響は少ない.

Fig. 8（b）には，横分散の相違が塩水排除過程に及ぼす影響を示す．縦横分散長比を大きく設定すると，排除時間が長くなる．これは，本研究で対象とする流れでは，Fig. 2 の流速分布で解説したように，淡塩水混合域に沿う淡水側の流れが卓越していることから，流れ方向を淡塩水混合域に沿い塩水水槽に向かう方向と想定する（籾井ら, 1989）と，淡水流速は同じでも，横分散長 α_T が小さくなると式（4）により横分散係数 D_T が小さくなり，淡塩水混合域に対して直角方向の機械的分散に基づく塩分の輸送が低下するためである．図に示すように，塩水排除により，観測位置（$x = 5$ cm，$y = 5$ cm）の塩分濃度が 0 になるのは，$\alpha_L/\alpha_T = 10$ のとき約 950 分後，$\alpha_L/\alpha_T = 27$ では約 1400 分後となり，塩水排除時間に大きな相違が生じる．微視的分散係数であり，室内実験でも横方向の分散スケールを精度良く求めることの困難さはあるが，横分散が支配的な輸送現象においては，対象とする多孔質媒体（実験装置）に対して精度良い分散長の推定が現象の理解においては重要となる.

4. おわりに

海岸帯水層における海水と淡水地下水の相互作用に関し，本稿では，塩水侵入後の塩水楔内に止水壁を設置した場合の塩水塊の動態について，Luyun et al.（2009），および高橋・籾井（2016）の研究成果に基づいて解説を加えた．Luyun et al.（2009）では，多孔質媒体の縦分散長をガラス球の平均粒径で与え，横分散長をその 1/10 と仮定した．残留塩水塊の全体的な減衰傾向に関する数値解と実験結果は概ね一致する．すなわち，Luyun et al.（2009）では，止水壁設置後に内陸側に残留した塩分は，内陸部からの地下淡水流れがある場合には，淡水流れにより排除されることを明らかにした．しかし，塩水排除過程での実験と数値解の相違，すなわち実験に比べて数値解の方がより希釈される傾向にあること（例えば，Fig. 2（c））, および最終的な排除時間の不一致については，特に言及していない．高橋・籾井（2016）での横分散長は縦分散長の 1/27 であることから，Luyun et al.（2009）の 1/10 の場合には横分散が大きく評価され，塩水楔内の塩分濃度は数値解の方が希釈された結果になる．これに対し，高橋・籾井（2016）では，対象とする浸透層に適切な分散長を，画像解析に基づいて予め推定した．この推定分散長を用いて数値計算した結果，塩水侵入時は，電気伝導度に基づく塩分濃度の観測値と数値解は良く一致した．一方，塩水排除時には，塩水塊の排除に要した時間は概ね一致したが，塩分の希釈過程に，実験との相違がみられた．この相違については，今後，数値モデルや物理モデルに基づいてさらに検討を加える必要がある.

以上のように，多孔質媒体中での密度効果を考慮した塩水の動態解析には，今後も物理モデルや数値モデルに基づいた検討の蓄積が現象の理解に有用となる．特に，密度効果を無視した溶質輸送解析では対応できない現象，例えば，津波により地表面に湛水した海水の表層不飽和帯から飽和地下水帯への輸送現象では，塩分の下方への輸送に不安定性が現れることが予想される．参考のため，Fig. 9 には，予備実験の段階ではあるが，淡水に食用色素で青色に着色した溶質の地表面からの輸送状況と，青色に着色した密度 1.025 g cm^{-3} の塩水の下層への浸透・輸送状況を示す．十分に時間が経過した場合には，通常の溶質輸送では Fig. 9（b）に示すように定常状態が存在するが，Fig. 9（a）の塩水の場合には，土壌物理学

でのフィンガリング現象と類似の不安定な輸送過程が現れる．また，予め帯水層内に侵入していた塩水楔（左隅の赤色部分）内に湛水塩水が侵入し，両者が混合することはない．数値モデルに基づく定量的評価により，この興味深い現象の把握が可能となる．また，土壌物理学で対象とする根群域での塩類集積問題も，塩濃度が高くなると，密度効果を考慮した移流分散解析の検討が必要になると考える．今後，地下水学と土壌物理学に共通する「移流分散溶質輸送現象」に関し，研究者間で連携し，さらに科学的知見が蓄積されることを期待する．

引用文献

Abarca, E. and Clement, T.P. (2009): A novel approach for characterizing the mixing zone of a saltwater wedge. Geophysical Research Letters. 36(6): L06402, doi:10.1029/2008GL036995.

Bear, J. (1972): Dynamics of Fluids in Porous Media, pp. 557–575. Elsevier, New York.

Citarella, D., Cupola, F., Tanda, M.G. and Zanini, A. (2015): Evaluation of dispersivity coefficients by means of a laboratory image analysis. Journal of Contaminant Hydrology, 172: 10–23.

Elfeki, M., Uffink, G.J.M. and Barends, F.B.J. (1997): Groundwater Contaminant Transport — Impact of Heterogeneous Characterization —, pp. 247–287. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Fetter, C.W. (2008): Contaminant Hydrogeology, pp. 45–47. Waveland Press, Inc., Long Grove, Illinois.

Guo, W. and Langevin, C.D. (2002): User's guide to SEAWAT: a computer program for simulation of three-dimensional variable-density groundwater flow. US Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations 6–A7. Tallahassee, Florida.

Huang, W., Smith, C., Lerner, D., Thornton, S. and Oram, A. (2002): Physical modeling of solute transport in porous media: evaluation of an imaging technique using UV excited fluorescent dye. Water Research, 36: 1843–1853.

Illangasekare, T., Tyler, S.W., Clement, T.P., Villholth, K.G., Perera, A.P.G.R.L., Obeysekera, J., Gunatilaka, A., Panabokke, C.R., Hyndman, D.W., Cunningham, K.J., Kaluarachchi, J.J., Yeh, W.W.-G., van Genuchten, M.T. and Jensen, K. (2006): Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka. Water Resources Research, 42: W05201, doi:10.1029/2006WR004876.

嘉門雅史, 日下部治, 西垣誠 (2007): 地盤環境工学ハンドブック, p. 76. 朝倉書店, 東京.

Langevin, C.D. and Guo, W. (2006): MODFLOW/MT3DMS-based simulation of variable-density ground water flow and transport. Ground Water, 44(3): 339–351.

Luyun Jr., R., Momii, K. and Nakagawa, K. (2009): Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. Journal of Hydrology, 377: 227–236, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.019.

Luyun Jr., R., Momii, K. and Nakagawa, K. (2011): Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion. Ground Water, 49(2): 239–249, doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00719.x.

籾井和朗, 神野健二, 上田年比古, 伊藤敏朗, 細川土佐男, 平野文昭 (1986): 不飽和領域を考慮した海岸自由地下水の塩水の侵入・分散の数値解析. 日本地下水学会誌, 28 (3): 103–112.

籾井和朗, 細川土佐男, 神野健二, 伊藤敏朗（1989): 海岸帯水層における鉛直塩分濃度分布に基づく横方向分散定数の推定方法. 土木学会論文集, 411 (II-12): 45–53.

Oude Essink, G.H.P. (2001): Improving fresh groundwater supply — problems and solutions. Ocean and Coastal Management, 44: 429–449.

高橋昌弘, 籾井和朗 (2016): 塩水の侵入・排除過程に及ぼす分散長の影響. 日本地下水学会誌, 58 (1): 9–30.

Todd, D.K. and Mays, L.W. (2005): Groundwater Hydrology, p. 382. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

椿東一郎 (1974): 水理学 II, pp. 173–17. 森北出版, 東京.

Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T. and Barry, D.A. (2013): Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. Advances in Water Resources, 51: 3–26.

米沢富美子 (1986): ブラウン運動, pp. 14–16. 共立出版, 東京.

Zheng, C. and Bennett, G.D. (2002): Applied Contaminant Transport Modeling, pp. 184–189, pp. 529–540. Wiley Interscience, New York.

Zheng, C. and Wang, P.P. (1999): MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems. Documentation and User's Guide. U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.

要　　旨

本稿では，海岸帯水層における海水と淡水地下水の相互作用に関し，塩水侵入と地下止水壁設置に伴う塩水動態を取り上げ，最近の論文における室内実験と数値解析の結果に基づいて解説を加えた．特に，多孔質媒体中の微視的分散スケールである横分散長が塩水の希釈，排除に影響を及ぼし，横分散長を過小評価すると塩水塊の排除時間が過大評価されることを示した．また，ここでの解析の特徴は，塩水の密度変化を想定しており，従来の密度効果を無視した多孔質媒体中での溶質輸送解析では対応できない密度依存型移流分散現象である．土壌物理学分野では，例えば，根群域での高濃度の塩類集積問題への適用が考えられる．今後，地下水学と土壌物理学に共通する移流分散溶質輸送現象として，物理モデルと数値モデルの両面から，さらなる科学的知見の蓄積を期待する．

キーワード：海岸帯水層，海水侵入，止水壁，密度依存型移流分散解析，分散長