

石灰岩帯水層の溶質輸送パラメータ群の同定 Estimation of solute transport parameters of limestone aquifer

○ 竹内 佑衣* · 稲口 知花** · 岡部 北斗* · 鈴木 麻里子* · 井上 一哉*
Yui Takeuchi, Tomoka Inaguchi, Hokuto Okabe, Mariko Suzuki and Kazuya Inoue

1. 緒論

帯水層内の物質輸送現象を支配する因子は分散長と透水係数の空間分布である。分散長の空間分布を密に測定する手段は無く、地下水管理では経験的に数値を設定している。また、自然地盤の透水係数分布は対数正規性を有する¹⁾²⁾と捉えられているものの、強度の低い石灰岩に対して密な間隔でのルジオン試験の実施は難しい。そこで、軽量の単孔式希釈試験による石灰岩帯水層の分散長と透水係数の空間分布の同定方法について研究した。

2. 単孔式希釈試験

対象サイトは国営かんがい事業が実施されている鹿児島県喜界島の南西部である。図1に示す21か所の観測孔にて単孔式希釈試験を実施した。初期濃度 0.744 mg/cm³ のNaClを孔内へ均一に投入し、6時間～12時間の電気伝導度(EC)の変化を計測して濃度に換算した。観測孔の地質構成とEC計の設置例を図2に示す。単孔式希釈試験を繰り返すことにより、平面座標や深度の異なる94か所で濃度変動を計測した。

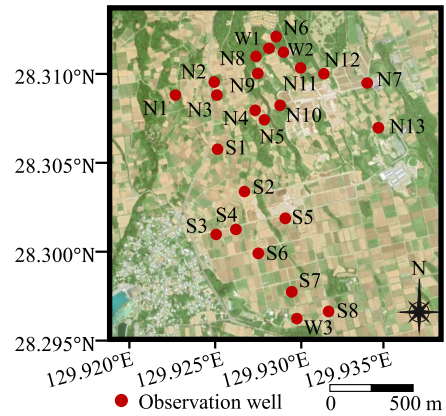


図1：観測孔の位置と補間領域

Fig.1 : Observation well and target field

3. 溶質輸送パラメータ群の同定

単孔式希釈試験における移流分散モデルは、トレーサ濃度 C (g/cm³), トレーサの初期濃度 C_0 (g/cm³), 実流速 u (cm/s), 経過時間 t (s), 縦分散長 A_L (cm), 横分散長 A_T (cm), 観測孔の半径 R (cm), 定数 $a = \sqrt{\pi}R/2$ を用いて,

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left(\operatorname{erf} \left(\frac{a-ut}{2\sqrt{A_L ut}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{a+ut}{2\sqrt{A_L ut}} \right) \right) \operatorname{erf} \left(\frac{a}{2\sqrt{A_T ut}} \right) \quad (1)$$

と表される³⁾。本研究では、群知能であるカッコウ探索アルゴリズム(CKA)によって実流速, 縦分散長, 横分散長を同定した。また, 見かけのダルシー流速 v_a (cm/s), 動水勾配 I を用いて透水係数 K を

$$\ln \left(\frac{C}{C_0} \right) = -\frac{2|v_a|t}{\pi R}, \quad K = \frac{|v_a|}{2|I|} \quad (2)$$

により求めた⁴⁾。本研究では, 3つの観測孔の地下水位から動水勾配を算出し, 透水係数の同定に用いた。

4. パラメータ群の同定結果と空間分布

4.1 縦分散長と横分散長

観測孔 S3 を例として, 観測濃度の変化と CKA で同定したパラメータによる再現結果を図3に示す。標高によらず再現結果は良好であり, 的確にパラメータ同定でき

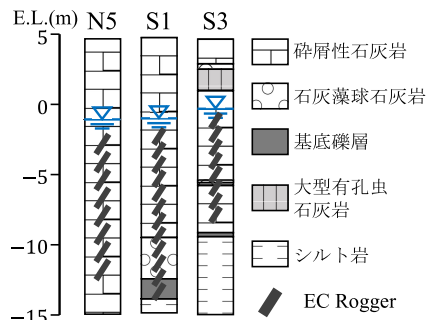


図2：地質構成とECロガーの設置の例

Fig.2 : An example of geology composition and EC Rogger installation

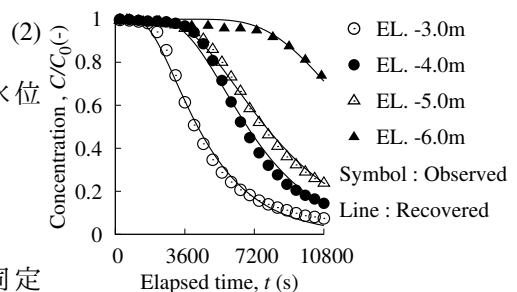


図3：観測濃度の変化とその再現 (S3)

Fig.3 : Observed and recovered concentration (S3)

* 神戸大学大学院農学研究科 : Graduate School of Agricultural Science, Kobe University.

** 三井化学株式会社 : Mitsui Chemicals, Inc.

単孔式希釈試験, 透水係数, 分散長, 群知能

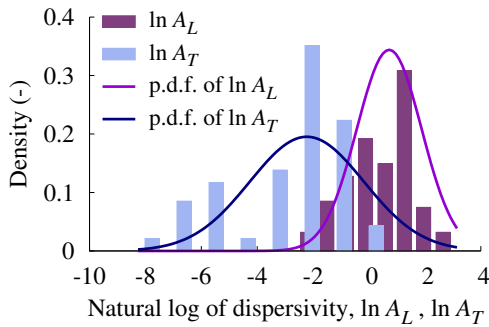


図4：縦分散長，横分散長のヒストグラム
Fig.4：Histogram of A_L, A_T

ている．94か所すべての観測点にて得られた縦分散長と横分散長のヒストグラムを図4に示す．対象サイトの縦分散長と横分散長は常用対数に換算して2オーダー以上の幅を有する点，縦分散長の尖度2.40，横分散長の歪度-0.79であり，対数正規分布には従わない点が多くなった．

両パラメータの空間分布を可視化するため，図1に示す黒枠内を50 m×50 m×1 mの要素で標高0.5 m～-49.5 mまで区分し，8万個の要素重心位置に対して逆距離加重法により縦分散長と横分散長の3次元分布を求めた．難透水性を示す地下水盆の形状に沿ってトリミングした後の標高-2 mに対する縦分散長の空間分布を図5に示す．南から北に向かって縦分散長は上昇傾向にあり，北緯28.305°以北では変動幅の大きい帯水層と判断される．

4.2 透水係数

透水係数の鉛直分布の例として，8つの観測孔に対する結果を図6に示す．孔ごとに変動幅は異なり，深度方向に対するトレンドは無いことがわかる．これは石灰岩の深度に応じて固結度や溶食の度合いは異なり，石灰岩の間隙構造は多様化する⁵⁾ことに起因する．94か所すべての観測点にて得られた透水係数のヒストグラムを図7に示す．透水係数分布の歪度は0.0361，尖度は2.69であり，対象サイトの透水係数は対数正規性を有する．逆距離加重法により透水係数の3次元分布を描くと図8のようになり，透水性は相対的に南部で低く，北部で高い帯水層であることを視覚的に捉えることができる．

5. 結論

本研究では，単孔式希釈試験により石灰岩帯水層の分散長と透水係数の空間分布を同定した．対象サイトの分散長は2オーダー以上の幅を有する点，透水係数は孔ごとに変動幅は異なり，帯水層全体として対数正規性を示す点を明らかにした．単孔式希釈試験を繰り返して分散長と透水係数の空間分布を同定しつつ，可視化できる点が本手法の利点である．

参考文献：1) Robin, M. J. L. et al., *Water Resour. Res.*, 1991. 2) Hess, K. M. et al., *Water Resour. Res.*, 1992. 3) 中川ら，土木学会論文集 B1 (水工学)，2018. 4) Piccinini, L. et al, *Hydrol. Sci. J.*, 2016. 5) Mosthaf, K. et al, *J. Hydrol.*, 2018.

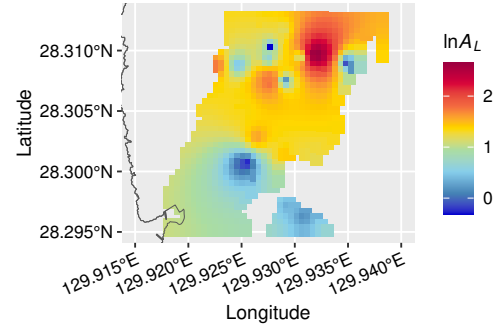


図5：縦分散長の補間結果 (E.L.-2.0 m)
Fig.5：Image of interpolated A_L (E.L.-2.0 m)

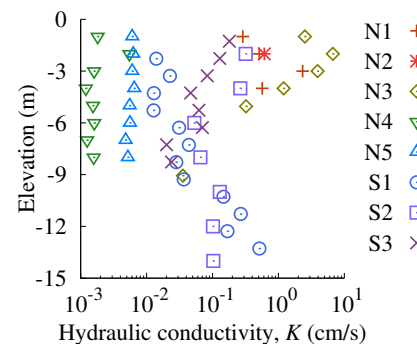


図6：透水係数の鉛直分布
Fig.6：Vertical distribution of K

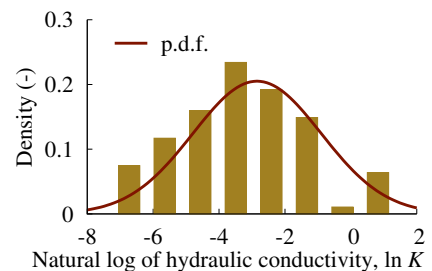


図7：透水係数のヒストグラム
Fig.7：Histogram of K

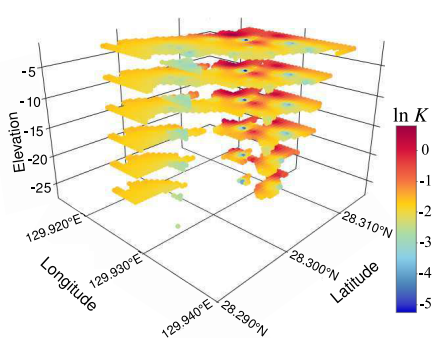


図8：透水係数の3次元モデル
Fig.8：3D model of K