

塩水浸入試験におけるトレーサー濃度分布の光学的な定量計測手法の開発

日本原子力研究開発機構 正会員 〇佐藤 久
日本原子力研究開発機構 正会員 澤田 淳
検査開発株式会社 非会員 高須 民男

1. はじめに

沿岸地域を対象とした地下水の流動に影響を与える要因のひとつとして、淡水と海水の密度差に起因した密度流により海水が陸側へ浸入する塩水楔現象が知られている。高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発において、この塩水楔現象は処分場周辺の地下水流動に影響を与えるだけではなく、海水などの地下水組成の変化が人工バリア性能などに影響を及ぼす可能性があることから、このような密度流による塩水楔の分布とその経時変化をいかに把握するかが課題の一つとなっている。実際の地質環境調査に際しては、地層が本来的に持つ不均質性に起因して、このような沿岸地域における地下水組成分布や流動状況の把握には多大な調査が必要となる¹⁾。そのため、限られた種類と数の測定データの補完などといった推定が行われるとともに、数値解析による予測評価が検討されている。一方で、対象とする現象はダルシー則に基づく浸透流に加えて移流分散と密度流を考慮した複雑な連成問題であり、原位置のデータを用いた解析コードの検証が十分なされているとはいえないのが現状である。

そのような観点から、既知の粒径のガラスビーズなどを活用した室内試験による解析コードの検証²⁾³⁾も行われているが、それらは塩水を着色して観測した画像を用いた塩淡水境界部の位置の比較であり、塩水濃度分布の定量的な測定に基づく検討には至っていない。このため、密度流を対象とした数値解析モデルの検証に必要なデータを室内実験により取得することを目的として、光学的手法を活用した塩水濃度分布の定量的な測定手法を開発した。

2. 光学的測定手法による濃度測定方法の概要

光学的手法によるトレーサーの濃度測定は、染料で着色したトレーサー溶液と無着色溶液における光の反射率の違いを利用している。この手法を用いて、一定濃度の染料で着色した塩水の染料濃度を測定することにより、間接的に塩水濃度を測定する。

染料濃度と光の反射率の関係には、Kubelka-Munk 理論に基づいた式を用いることができる。すなわち、染料に対する光の吸収係数 K と媒体の散乱係数 S を用いて光の反射率 R との関係を表すことができる。

$$(1 - R)^2 / 2R = K / S$$

(1)

ここで、染料の吸収係数 K は染料の濃度に比例することから、染料濃度と染料の吸収係数の比例係数 k と染料濃度 C 、散乱係数 S を用いて式(2)で表すことができる。

$$(1 - R)^2 / 2R = k \cdot C / S$$

(2)

式(2)より、 $(1 - R)^2 / 2R$ と染料濃度 C の関係から比例係数 k を求めることにより、反射率 R から染料濃度（トレーサー濃度）を求めることができる。

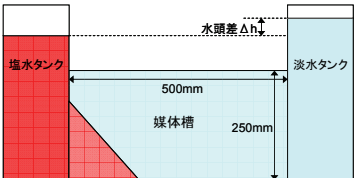


図1 塩水浸入試験装置概念図

3. 試験装置の概要

日本原子力研究開発機構では、横幅 50cm、高さ 25cm、奥行き 10cm の水槽（媒体槽と呼ぶ）の中に既知の粒径のガラスビーズを充填することにより地質媒体を模擬した塩水浸入試験を実施している⁴⁾。図 1 に試験装置の概念図を示す。媒体槽の片側には淡水を一定水頭で注水する淡水タンク、もう一方には塩水を一定水頭で制御する塩水タンクを設けており、一定の動水勾配条件下での塩水浸入試験を実施することができる。塩水は赤色の染料(食用赤色 102 号)により一定の濃度で着色しているため塩水の浸入状況を目視確認でき、かつその染料の濃度を光学的手法により測定することで、塩水の濃度を間接的に算出することができる。本報告では、表 1 の条件で実施した塩水浸入試験において、塩水の浸入が定常状態に達した状況で測定した塩水の濃度分布について報告する。なお、反射光の測定には CCD カメラ（DVC 社製 DVC1412、撮影解像度 1392×1040 ピクセル、4096 階調）を用いた。

表 1 塩水浸入試験条件

水頭差(cm)	1
塩水濃度(%)	4
塩水比重	1.027
ビーズ粒径(mm)	1
透水係数(cm/sec)	1.14

キーワード 光学的手法, 塩水浸入, 密度流, 定量測定, Kubelka-Munk

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33 日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門 TEL 029-282-1111

4. Kubelka-Munk の関係式の成立性の確認

媒体槽に淡水を満たした場合の反射率を基準とした、既知の濃度 C の染料で着色した塩水を満たした場合における媒体槽全体での反射率の平均を測定した。 $(1-R)^2/2R$ と染料濃度 C の関係を図 2 に示す。図 2 に示されるように、 $(1-R)^2/2R$ と染料濃度 C は原点を通る直線で近似できることから、Kubelka-Munk の関係式が成立しており、反射率 R から染料濃度 C を算出可能であることを確認できた。ただし、低濃度領域においては、近似直線と若干の乖離があり、トレーサー濃度が過小評価される傾向にあることに留意する必要がある。

ピクセル単位で塩水濃度を評価する場合においては、媒体槽は直径 1mm のガラスビーズを充填していることから、ピクセル単位で見ると反射光のばらつきが生じている。このことから、局所的には散乱係数が異なっており、散乱係数を一定と仮定して塩水濃度を算出すると、反射率のばらつきに起因する誤差が生じる。そこで、ピクセル単位の領域においても Kubelka-Munk の関係式が成立していることを仮定した上で、局所的な散乱係数のばらつきに起因する反射率のばらつきを考慮して塩水濃度分布を算出した。

5. 測定結果

塩水浸入が定常状態に達した際の赤色で着色された塩水の浸入状況を図 3 に示す。図 3 は一般的な写真撮影画像で、これからも塩水と淡水のおおよその境界を判別することは可能であるが、塩水の濃度分布を定量的に評価することはできない。CCD カメラを用いて、光学的手法により測定した光の反射率から算出した塩水濃度分布を図 4 に示す。ここで濃度 C は、塩水の初期濃度 C_0 (4%) で正規化している。塩淡境界における塩水濃度分布を定量的に表現することができ、境界部付近では塩水が淡水と混ざり合う遷移帯を定量的に評価することが可能であることがわかった。この様な、遷移帯での濃度分布を詳細に検討した結果を図 6 に示す。図 6 は、図 5 のライン 1 ～ライン 8 の遷移帯にほぼ直行する方向での塩分濃度分布を示している。各ライン間の比較のために、 $C/C_0=0.5$ で各ラインの濃度分布が重なるように横軸を調整している。遷移帯の塩水濃度分布は場所によらず、同じ傾向を示していることがわかる。なお、データには幾つかのノイズが散見される。これらのノイズは、ガラスビーズの不均質な反射に起因するものや、塩水と淡水での光の屈折率の違いに起因するものなど、幾つかの原因が考えられ、今後の測定精度向上に向けた検討課題の一つである。

6. まとめ

染料で着色した塩水の反射率に Kubelka-Munk の関係式を適用することにより、塩水浸入試験における塩水濃度分布を定量的に測定することが可能となった。低濃度領域で過小評価される事や、塩水濃度の変化に起因する屈折率の変化によるノイズの影響があるものの、塩水が淡水と混ざり合う遷移帯の広がりやそこでの濃度分布を把握することができる有効なデータを取得できる。また、数値解析モデルの検証データとしても有効なデータであると考えられる。今後は様々な試験ケースへの適用を図り、データを拡充するとともに数値解析モデルとの比較検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 丸井敦尚, 林武司, 塩淡境界面の三次元的形状把握に関する研究, 資源と素材, Vol. 117, pp. 816-821 (2001)
- 2) 藤縄克之, 増岡健太郎, 長野宇規, 渡辺紹裕, 海面上昇がゼロメートル地帯に及ぼす影響を予測するための塩水浸入数値解析モデル, 土木学会論文集, Vol. VII-35, No. 790, pp. 35-48, (2005)
- 3) Goswami, R. R., and T. P. Clement, Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics, Water Resour. res., Vol. 43, W04418, doi:10.1029/2006WR005151, (2007)
- 4) 高須民男, 前川恵輔, 多孔質媒体水理・物質移行現象可視化装置(小型 MACRO)の開発及び予察試験結果, JAEA-Technology, 2006-061, (2006)

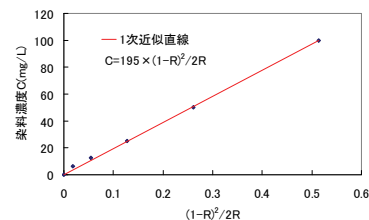


図 2 $(1-R)^2/2R$ と染料濃度の関係

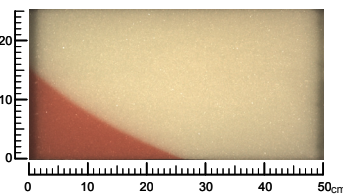


図 3 定常状態に達した塩水楔の様子 (写真撮影画像)

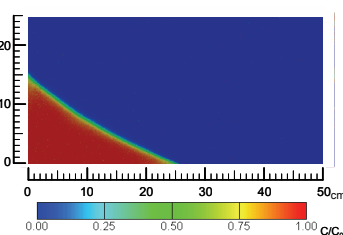


図 4 定常状態に達した塩水楔の濃度分布

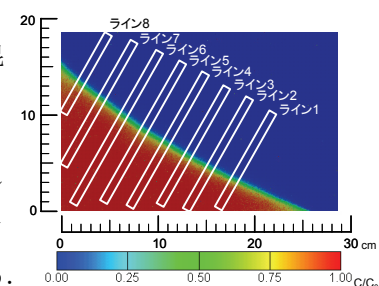


図 5 塩水楔に垂直な領域の濃度分布の評価領域

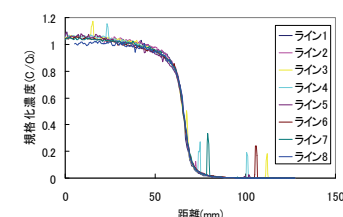


図 6 塩水楔に垂直な領域の濃度分布