

# 塩水侵入を抑制するための対策手法の基礎的研究

高橋 昌弘<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>日本工営株式会社基盤技術事業部（〒102-8539東京都千代田区九段北1-14-6）

\* E-mail: a3653@n-koei.co.jp

地球温暖化等により潮位が上昇し塩水侵入が現状からさらに進行すると、アップコーニング等が生じることにより、淡水の地下水資源をこれまでと同様な方法では取水できないことが懸念されている。本稿では、①井戸による塩水の揚水および処理水の注水、②井戸による塩水の揚水、③基盤まで達しない止水壁を構築（フローティング式の地下ダム）等、塩水侵入抑制のための対策手法を用いた時の効果について、数値モデル解析により検討した。その結果、3ケースともに塩水侵入先端位置を抑制する効果が認められた。ただし、水処理コスト、地下水流入量の確保、止水壁構築コスト、対策井の配置といった課題も残った。今後これらを精査・勘案して、地下水塩水化が顕在化する前に、最適な対策方法を確立する必要がある。

**Key Words** :seawater intrusion, SEAWAT, counter measure, groundawater dam, numerical simulation

## 1. はじめに

地球温暖化等により潮位が上昇し塩水侵入がさらに進むとアップコーニング等が生じ易くなり、淡水の地下水資源をこれまでと同様な方法で取水できないことが懸念されている。筆者らはその対策の一つである塩水侵入域に塩水侵入高よりも高く止水壁を構築したときの挙動を検討し、止水壁構築により残留する塩水が排除されること、およびその挙動には分散係数の把握が重要であることを室内実験と数値実験によって考察してきた<sup>1)</sup>。今回、室内実験結果を再現できたモデルを用いて、塩水侵入を防止するいくつかの対策をモデルに導入し、その効果について予測解析を実施した。本稿では、これらの解析結果について報告する。

## 2. はじめに

室内実験用いた装置を図-1に示す。既往の実験装置<sup>2)</sup>からの主な変更点は、鉛直2次元性を保つため実験装置の厚さを1cmと薄くした、実験時間の短縮も含め操作性

が上がるように長さが高さを短くしたことである。なお、充填したガラスビーズの平均粒径は0.088cmである。

実験ではまず蛍光トレーサーを装置の注入口に瞬間的に注入し、そのトレーサーの拡がりデジタルカメラで撮影するパルス実験を実施した。この実験結果を用いて、塩水侵入および排除過程を支配する縦横分散長を算定した。次に、淡水で満たした装置に塩水を侵入させ、定常状態に達した後、止水壁を想定したアクリル板（高さ20cm）を左端に挿入して塩水を排除させる塩水侵入・排除実験を実施した。

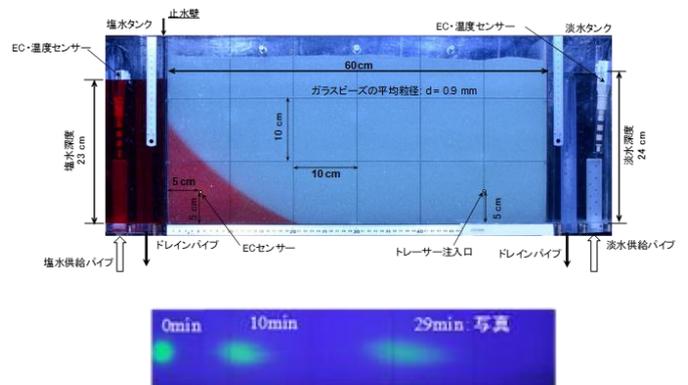


図-1 実験装置（上）とパルス実験結果（下）

### 3. 実験および解析方法

#### (1) パルス実験

既往研究では正規化した濃度分布式と画像判読できる最低濃度から推定したが、ここでは画像解析から得られた濃度分布を再現する数値モデルを構築し、分散長を算定した。数値モデルはMODFLOWおよびMT3DMS (Zheng and Wang, 1999) を用いた。

#### (2) 塩水侵入実験

既往研究ではモデルの格子間隔を0.5cmとしていたが、格子ベクレ数がやや大きく数値分散等の計算誤差が発生している可能性があった。これを踏まえ、本研究では格子間隔を0.2cmとして、塩水侵入・排除実験の再現を行った。なお再現モデルの縦・横分散長はパルス実験で算定された値を採用した。数値モデルはSEAWAT Ver4 (Langevin and Guo, 2006) <sup>2)</sup> を用いた。

#### (3) 予測解析

塩水侵入および排除実験結果を再現できたモデルを用いて、いくつかの塩水侵入対策を想定し、予測解析を行った。想定した対策ケースは、①基盤まで止水壁を構築、②井戸による塩水の揚水および処理水の注水、③井戸による塩水の揚水、及び④基盤まで達しない止水壁を構築 (フローティング式の地下ダム) である。

### 4. 結果および考察

#### (1) パルス実験と再現結果

パルス実験結果から作成した合成写真を図-1に示す。数値解析では、パルス実験 (10分と29分) における濃度分布の再現を目標とし、縦・横分散長を変化させた15ケースで検討を行った。ここで、再現性の良否判定には、実測値と計算値の差の2乗和を用いた。この誤差二乗和の分布を図-2に、最終的な値 (最適値) を用いた時のパルス試験の再現状況を図-3に示した。両者はよく整合している。最適値の縦分散長は0.07cm、横分散長0.0025cmであり、推定した縦分散長はほぼ粒径スケールとなった。

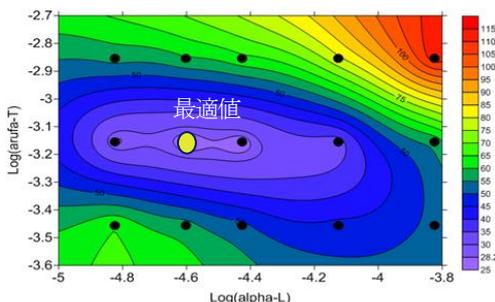


図-2 残差の二乗和の分布 (縦:横分散長、横:縦分散長)

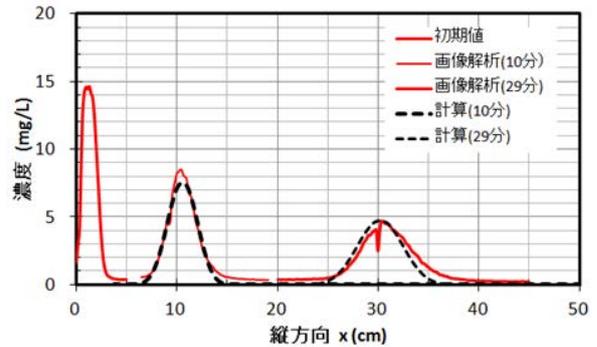


図-3 パルス実験の再現状況 (縦方向)

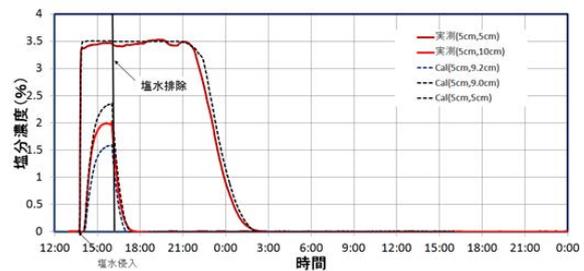


図-4 塩水侵入・排除試験の再現

#### (2) 塩水侵入・排除実験と再現結果

パルス実験で得られた縦・横分散長を用いて、塩水侵入・排除実験の再現を行った。再現対象は実験装置に設置したセンサーの塩分濃度とした。その結果、センサーで得られた塩水侵入および排除実験結果をほぼ再現できた (図-4)。このようにパルス試験の再現解析から縦・横分散長を求め、これを塩水侵入・排除実験の再現解析に用いる手法は、有効であることが明らかとなった。

#### (3) 予測ケースにおける対策の効果

ここでは上記で再現されたモデルに塩水侵入対策として、①井戸による塩水の揚水および処理水の注水<sup>4)</sup>、②井戸による塩水の揚水、および③基盤まで達しない止水壁の構築 (フローティング式の地下ダム) を想定した。これらについて応答解析を実施し、それぞれの効果を検討した。なお、解析期間は3時間としている。

##### a) 井戸による塩水の揚水および処理水の注水 (ケース1)

塩水侵入部の直上から高濃度の塩水を揚水し、それを低濃度まで処理したのち、再び同量を上流側で注入する手法である。塩水侵入先端位置は初期値に比べ後退しており、対策効果が認められる (図-5)。また本法では、揚水した水量と同量を処理して注水しているため、境界からの流入量と流出量は対策なしのケースと大きく変化しない。なお、この方法は高濃度の塩水の侵入を低濃度の処理水により抑制する、すなわち処理水による人工的な地下ダムを構築していることと等価になっている。

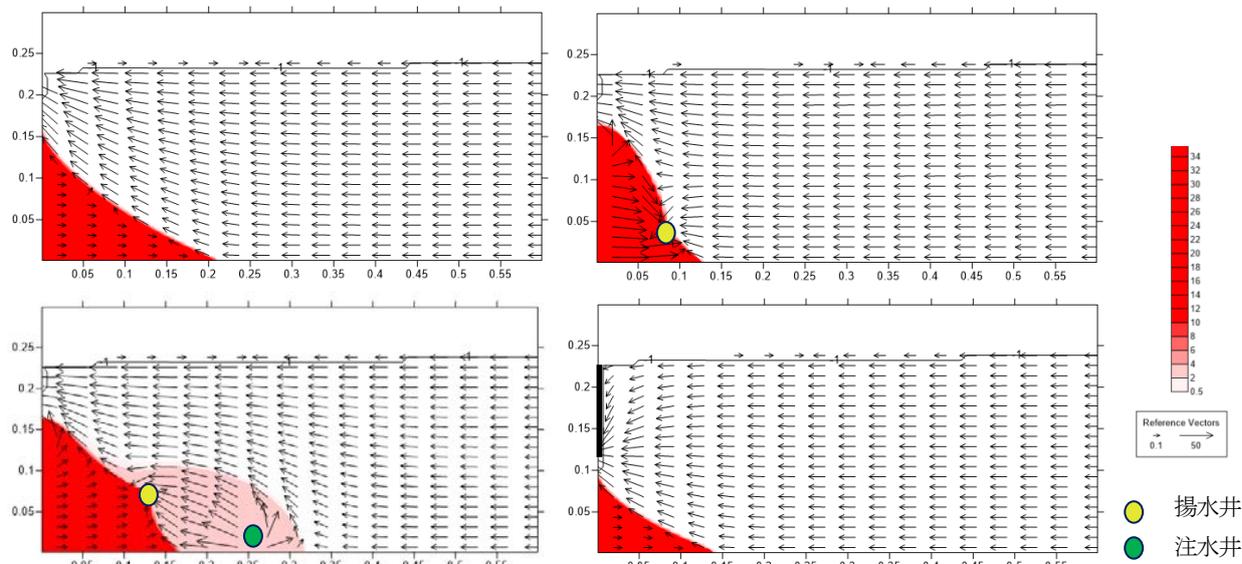


図5 解析結果 (左上：対策なし、左下：ケース1、右上：ケース2、右下：ケース3)

#### b) 井戸による塩水の揚水(ケース2)

塩水侵入部の直上から塩水を直接揚水する方法である。塩水侵入先端位置はケース1と同様に初期値に比べ後退しており、対策として有効であることがわかる。ただし、揚水している水量が塩水および淡水の左右の境界からの流入量の増加で賄われており、初期条件よりも流入量が多くなっていることに留意する必要がある。すなわち、本ケースのように塩水からの揚水を行うのであれば、この系に流入する地下水が増加しても水収支的に問題ないのかどうかを予め検討しておくべきである。

#### c) 基盤まで達しない止水壁を構築(フローティング式の地下ダム ケース3)

既往実験結果および解析で明らかになっているように、基盤から塩水侵入高よりも高く止水壁を構築すると、侵入していた塩水が最終的にすべて排除される結果となり、有効な対策手法であることが判明している。ただし、基盤までの深度が深い場合、建設コストが嵩むことが予想される。そこで、本手法では、止水壁の根入れ深度を基盤岩まで到達させない、フローティング式の地下ダムを想定している。モデル上では、モデルの右端の地下水位(23cm)の約50%の高さまで止水壁を挿入している。塩水侵入先端位置は初期値に比べ後退しており、対策は有効である。また、水収支的にも、流入量、流出量が初期値に比べ80%程度の減少にとどまっており、大きな変化は認められない。

## 4. まとめ

- ・今回想定した3つの対策ケースともに、塩水侵入先端位置を無対策よりも後退させることができ、塩水侵入を抑制する手法として有効である。

- ・ただし、それぞれの方法には水処理コスト、上流からの地下水流入量の確保、止水壁建設コストといった課題があり、対策井の配置や揚水量の最適化等も含め、今後これらを精査し総合的な評価を行い対策方法を決定する必要がある。

- ・我が国は四方を海で囲まれており、温暖化等による潮位上昇等により塩水侵入が助長されるリスクに備えて、予め塩水化対策手法を確立しておくことが肝要と考える。

### 参考文献

- 1) 高橋昌弘, 榎井和朗: 塩水侵入域止水壁設置後の残留塩水の挙動, 日本地下水学会 2016 秋季講演会予稿集, 2016,
- 2) 高橋昌弘, 榎井和朗: 塩水侵入域止水壁設置後の循環流と横分散に起因する希釈過程, 日本地下水学会 2014 春季講演会予稿集, 2014,
- 3) Langevin, C.D. and Guo, W.: MODFLOW/MT3DMS-based simulation of variable-density ground water flow and transport, *Ground Water*, 44(3), 339-351, 2006
- 4) Hany F. Abd-Elhamid and Akbar A. Javadi.: A Cost-Effective Method to Control Seawater Intrusion in Coastal Aquifers, *Water Resources Management*, Vol 25, September 2011, pp.2755-2780, 2011