

室内実験によるバリア井戸設置位置と水位差変動が 地下水塩水侵入挙動に及ぼす影響評価

九州大学大学院工学研究院 環境社会部門 准教授 広城 吉成

要旨

近年の地球温暖化による海面上昇や地下水揚水量の増加に伴う地下水面の低下により、沿岸部帯水層では地下水への塩水侵入が懸念されている。その対策の 1 つとして、沿岸部井戸での塩水揚水による塩水侵入のバリアが提案されている。しかしながら、バリア井戸の最適配置の検討に関する研究は十分行われていない状況にある。本報では、今後さらなる地下水の塩水化が見込まれる中でより塩水侵入防止効率の良いバリア井戸の配置条件を検討することを目的とした。その結果、沿岸部帯水層の海側にバリア井戸を設置することは効果的であり、沿岸部での塩水揚水によって内陸部の淡水取水井戸を保全する最適なバリア井戸の配置を提案することができた。

1. はじめに

近年の地球温暖化による海面上昇や地下水揚水量の増加に伴う地下水面の低下により、沿岸部帯水層では地下水への塩水侵入が懸念されている。なかでも海面上昇は地下の塩水楔上に形成される貴重な淡水レンズを縮小させ、ツバル諸島などの島しょ部では淡水資源は危機的な状況となっている。次に、温暖化に伴う水需要の増加、降水の減少や不安定化による河川流量の減少、積雪地域での積雪の減少と融雪流出の早期化による夏季河川流量の減少は、必然的に地下資源への依存性を高め、増田¹⁾は「地球温暖化に伴う水循環・水資源の変化を心配する」の中で、米作地帯は海に面した三角州が多いから、海面上昇に伴う地表水塩水化や高潮災害増加の心配もある、と述べている。また、世界の多くの地域では、すでに自然涵養される地下水を上回る地下水が揚水されており、過剰取水が加速するとさらなる地下水面の低下を招くことが懸念されている²⁾。このような淡水地下水面の低下及び海面上昇によって、淡塩境界が上昇する。これに対して、沿岸部の地下水を対象として様々な塩水化対策が提案され研究³⁾⁴⁾⁵⁾されているが、いまだに研究途中であるものも多い。例えば、Sherif³⁾らによれば、エジプトのナイルデルタ帯水層では海岸から 100km 以上離れているにもかかわらず塩水侵入が報告され、地下水が塩水に一旦汚染

されると、その地域では元の状態に戻すために長期的な管理を余儀なくされているとしている。一方、数値解析に関する研究では、水質の悪化や揚水可能量の減少に対して、応用的な研究が進められており、例えば Pool⁶⁾らは、3 次元可変密度流モデルを使用して、海に近いゾーンで塩水を高い割合で揚水する場合にも塩水侵入抑制効率が上がることを数値解析によって示している。また Park⁷⁾らは、位置、揚水速度、バリア井戸の数など、さまざまなパラメータが別の生産井から揚水された水質への影響を数値的に解析し、デュアルポンプシステムの良好な性能を示しているが、生産井からの可能な揚水量の限界は明らかにしていない。

以上、塩水侵入を防ぐ最適な配置のバリア井戸の効果や生産井からの可能な揚水量の限界を示した報告は見られない。そこで本研究では、室内実験によってバリア井戸の効果を明らかにするために、バリア井戸の設置位置による塩水侵入阻止効果の違いを検討した。次に、Ozaki⁸⁾らが実施した実験装置等を改良し、より効率の良いバリア井戸の設置位置について実験を行った。

2. 内容

2.1 実験装置

沿岸部不圧帯水層を模した室内実験装置の写真を図 1、その概要を図 2 に示す。実験装置は長さ 122.3cm、

高さ 40.0cm, 幅 10.0cm の透明アクリル製水槽である。水槽内部は塩水槽, 浸透槽, 淡水槽から構成されており, それぞれの長さは 11.1cm, 100.0cm, 11.2cm である。なお, 浸透槽には直径 0.71~1.00mm のガラスビーズを充填し, 層厚は約 32cm である。本実験は, 水中でのガラスビーズは飽和状態となっており, 浸透槽の間隙の体積は間隙水の体積に等しい。ガラスビーズの体積は, その質量を測定し既知の密度(比重 2.5)で除することによって算出した。また, 間隙水の体積は直接的に測定することができないため, ガラスビーズ層を作る際に同時に注入した淡水の体積を使用した。その結果, 浸透槽の間隙率は 38.5%であった。参考として, 表 1 に堆積物の間隙率に関する指標を示す⁹⁾。この表から, 本実験における浸透槽の間隙率は砂や礫の堆積物による間隙率の範囲内であり, 砂層を模した浸透槽となっていることが確認できた。

この装置の両側には塩水および淡水の貯留タンクをそれぞれ設置しており, これらのタンク内に供給された塩水および淡水は, 一定の高さの排水口からオーバーフローさせることによって任意の水頭を設定できるようになっている。また, 2 次元断面の実験における奥行き方向の流れについては, 浸透槽両側の塩水, 淡水槽ともに面的に開孔しているため無視できる。次に, 本実験では, これらの貯留タンクにポンプなどで淡水および塩水をそれぞれ供給し, 設定した

水位が実験装置内の淡水槽および塩水槽に導入できるようにした。座標については, 浸透槽左下端を始点とし, 淡水槽側方向に x-y 座標を採っている。なお, 座標(90, 15), (90, 25), (15, 15)に位置している取水井は実験に使用していないため名称を付けていない。

実験 1 において取水井 P を内陸部の淡水地下水利用を想定した生産井, 取水井 A~D を塩水侵入阻止型のバリア井戸と想定した。実験 2 において取水井 A を内陸部の淡水地下水利用を想定した生産井, 取水井 B を塩水侵入阻止型のバリア井戸と想定した。

取水方法としては静水圧を利用した。取水井にバルブを取り付けることによって, 選択的に取水や流量調整できるようにしている。また, 淡塩境界の変化を見やすくするために塩水は食紅を用いて赤に着色した。

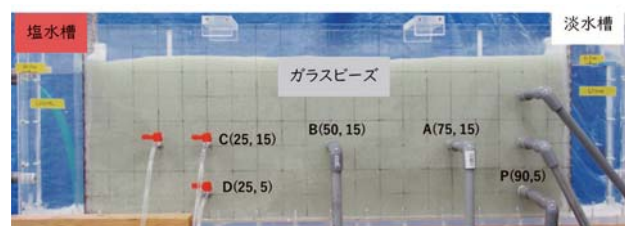


図 1 実験装置

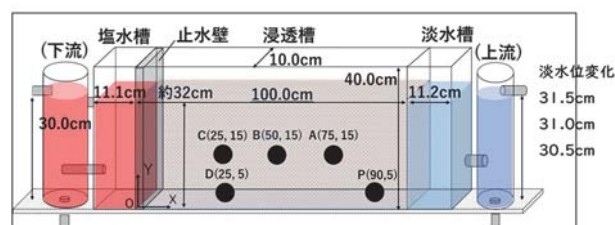


図 2 実験装置概要

表 1 堆積物の間隙率⁹⁾

堆積物	間隙率
礫	0.25~0.4
砂	0.25~0.5
シルト	0.35~0.6
粘土	0.35~0.6
砂岩	0.05~0.3
石灰岩	0.0~0.4

2.2 バリア井戸設置位置による塩水侵入抑制効果の比較

実験 1 は 2 ステップで構成されている。ステップ 1 で生産井を想定した井戸 P へ塩水侵入させた後, ステップ 2 でバリア井戸を想定した井戸 A, B, C 及び D で取水を行う。この 2 ステップの操作を取水条件と取水するバリア井戸を変更し, 複数回行うことで各バリア井戸の生産井に対する塩水侵入抑制効果を比較した。なお, 塩水槽の水位は 30.0cm, 淡水槽の水位は 31.5cm とした。塩水侵入抑制効果の指標として, 生産井への塩水侵入が確認できなくなる時点での生産井取水量に対するバリア井戸取水量を限界取水率として定義した。すなわち限界取水率の値が小さいほど, 効率よく塩水侵入を防ぐことができ, 生産井での安定的な淡水取水ができることを示している。なお, 井戸 A での取水をケース 1,

井戸 B での取水をケース 2, 井戸 C で取水をケース 3, 井戸 D での取水をケース 4 とする。

$$\text{限界取水率(\%)} = \frac{\text{バリア井戸取水量}}{\text{生産井取水量}} \times 100$$

表 2 はステップ 2 におけるケース 1~4 の限界取水率を示す。ケース 1 においては限界取水率を確認することができなかつたため、取水率 64%($Q_A=6.0\text{ml/s}$, $Q_P=9.4\text{ml/s}$)以上であるとした。ケース 2 においては、2 つの条件で限界取水率を確認できたが、ケース 1 との比較のため、生産井 P 取水量 Q_P の条件を考え、限界取水率を 38%($Q_B=3.4\text{ml/s}$, $Q_P=9.0\text{ml/s}$)とした。ケース 3 において、取水率 29%の時点においては井戸 P への塩水侵入が確認できたが、取水率 30%の時点において井戸 P への塩水侵入が確認できなかった。したがって、限界取水率は 30%であるとした。また、ケース 4 において、限界取水率を確認できなかったが、限界取水率はケース 1 と同様の推定から、31%以下であるとした。

井戸 A, B 及び C の臨界取水率を比較すると、井戸 A の限界取水率が最も大きく、井戸 C の限界取水率が最も小さい。このことから、海側に近い塩水槽側にバリア井戸を設置する方が塩水侵入抑制効果が高いことが分かる。

ケース 1 とケース 2 の等しい取水条件の比較写真を図 3 に示す。ケース 1 が定常状態であり、ケース 2 は井戸 B に塩水侵入が確認できた時点の写真である。井戸 A では塩水侵入が確認されず、井戸 B では塩水侵入が確認できた。したがって、限界取水率の観点から、バリア井戸 B の塩水侵入抑制効果が大きいことから、海側に近い位置にバリア井戸を配置することが塩水侵入を阻止するうえで有効であると考えられる。

図 4 に、ケース 1~4 における定常状態の写真を示す。ケース 3 とケース 4 を比較する。ケース 3 の写真では、井戸 C より内陸を想定した淡水槽側の塩水侵入域が確認できる。一方、ケース 4 の写真では、井戸 D より淡水槽側の塩水侵入域が消滅している。塩水侵入長で比較すると、井戸 C より下部に設置している井戸 D のバリア井戸としての効果が高いことが分かる。今回の実験

では、井戸 A や井戸 B を生産井と想定しなかつたが、そのような位置に生産井があつた場合、帯水層下部に設置したバリア井戸 D によって塩水侵入を防ぐことができると考えられる。帯水層下部に設置したバリア井戸は塩水侵入域を小さくする効果が高いことから、内陸部の地下水利用において有利と考えられる。以上、バリア井戸を海側、深部に設置することで塩水侵入抑制効果を高めることが分かつた。

表 2 バリア井戸における限界取水率

バリア井戸	井戸 A	井戸 B	井戸 C	井戸 D
バリア井戸取水量(ml/s)	6.0	3.4	2.4	2.8
生産井 P 取水量(ml/s)	9.4	9.0	8.0	8.9
限界取水率	64%以上	38%	30%	31%以下

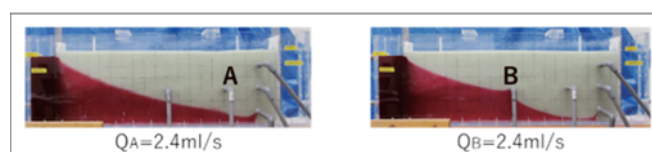


図 3 ケース 1 とケース 2 比較($Q_P=9.0\text{ml/s}$)

2.3 水位差変動による塩水侵入挙動変化の観察

水位差変動を再現するために、塩水水位は 30.0cm で一定にし、淡水水位を 31.5cm, 31.0cm, 30.5cm に調整し、実験を行った。なお、井戸 A 及び B の取水条件は淡水水位によって変化させない。実験 2 は次に示す 3 ステップで構成し、各ステップにおいて定常状態に到達したら、連続して次のステップに移行し、ステップ 3 が終了した時点で実験終了とした。なお、実験を通して、井戸 A 取水量 Q_A は 4.8ml/s~5.1ml/s の範囲で固定し、井戸 B 取水量 Q_B は 3.1ml/s に固定した。

まず、ステップ 1 では、塩水槽側の止水壁を引き抜き、淡水と塩水の密度差による塩水楔形成過程を観察する。次に、ステップ 2 ではバリア井戸を想定した井戸 B での取水を開始し、井戸 B への塩水侵入過程を観察する。最後に、ステップ 3 では生産井を想定した井戸 A での取水を開始し、井戸 A への塩水侵入の有無を確認する。図 5 にステップ 2 及びステップ 3 定常状態における写真を示す。ステップ 2 において、淡水水位が低下すると、

バリア井戸より塩水槽側の塩水侵入域が大幅に拡大していることが分かる. このことから, 水位差変動によって塩水化が進行していく中であっても, バリア井戸をより塩水槽側に設置することで, 塩水が上昇するアップコーニング(upconing)を塩水槽側に抑えることができると推察された.

ステップ 3 において, 淡水水位が 30.5cm の条件では, 生産井を模した井戸 A に塩水侵入が確認できた. 一方, 淡水水位 31.5cm 及び 31.0cm の条件においては塩水侵入が確認できなかった. このことから, バリア井戸が塩水侵入を防いだことが分かった.

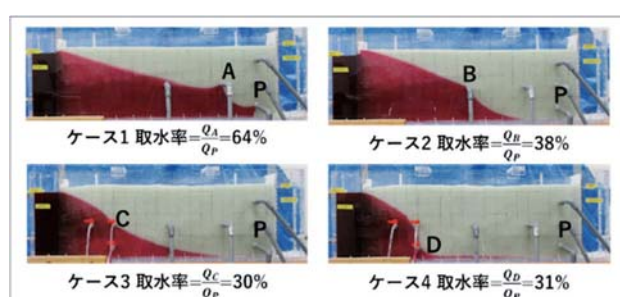


図 4 全ケース比較

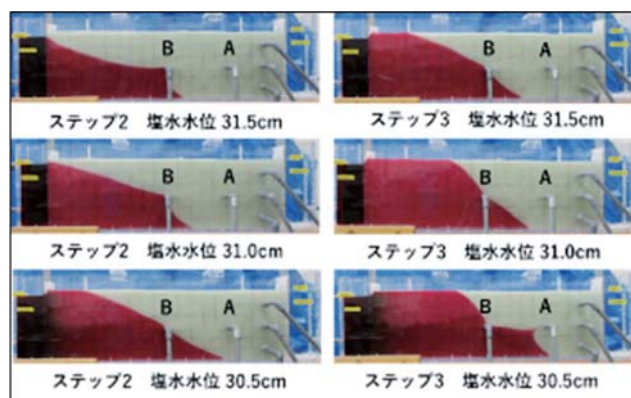


図 5 実験 2 定常状態 ステップ 2(左), ステップ 3(右)

3. おわりに

本研究では, 地下水塩水化対策として塩水の揚水に着目し, 塩水揚水バリア井戸の効果的な設置位置を検討し, 沿岸部を想定した室内試験で塩水の揚水を再現した基礎研究を行った. 実験 1『バリア井戸設置位置による塩水侵入抑制効果の比較』及び, 実験 2『水位差変動による塩水侵入抑制効果の観察』を通して, 本研究

で得られた知見を以下に示す.

1. 限界取水率の観点から考えると, 生産井を模した井戸 P への塩水侵入を防ぐバリア井戸としての効果は井戸 B 及び C の方が井戸 A よりも大きい. したがって, 沿岸部帯水層において, バリア井戸の設置位置が海側に近いほど, 塩水を阻止する効果が大きい.
2. 沿岸部帯水層において, 井戸 C より下部に位置している井戸 D の方が塩水侵入域を抑える効果が大きい. したがって, 沿岸部帯水層において, バリア井戸設置位置が深い(下側)ほど, 塩水侵入域を抑える効果が大きい.
3. 淡水水位を低下させた塩水侵入の挙動から, バリア井戸をより海側に近い位置に設置することで, 塩水侵入を抑制できる可能性が高い.

今後の課題として, 本実験結果を再現する数値モデルを構築し, 本モデルでバリア井戸と生産井戸の最適な配置の組み合わせを検討したい.

参考文献

- 1) 増田耕一: 巻頭言「地球温暖化に伴う水循環・水資源の変化を心配する」, 水文・水資源学会, 35 巻, 3 号, 173-174 (2022).
- 2) 藤縄克之: 環境地下水学, 共立出版, 2.2.3, 20-21 (2010).
- 3) Sherif. M., Hamza. K.: Mitigation of seawater intrusion by pumping brackish water, *Transport in Porous Media*, 43, 29-44 (2001).
- 4) Mohammed. S., Hussain. Hany. f. Abd-Elhamid, Akbar. A.Javadi, Mohsen, M. Sherif: Management of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers, A review, *MDPI Water*, 11, 2467 (2019).
- 5) 靱井和朗・高橋昌弘・Roger A. Luyun, Jr.: 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, 土壌の物理性, 土壌物理学会, No. 132, 3-5 (2016).
- 6) Pool. M, Carrera. J.: Dynamics of negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion, *Hydrogeology Journal*, 18, 95-105 (2010).

- 7) Park. S, Kim. J, Yum. B, Yeh. G: Three-Dimensional Numerical Simulation of Saltwater Extraction Schemes to Mitigate Seawater Intrusion due to Groundwater Pumping in a Coastal Aquifer System, *Journal of Hydrologic engineering*, 17, 10-22 (2012).
- 8) Ozaki. S., C. Abi. Akl., T. Nagino, Y. Hiroshiro: Investigating Effect of Pumping Ratio on Effectiveness Barrier Wells for Saltwater Intrusion: Lab-scale Experiments and Numerical Modeling, *Water*, Vol.13(Issue15), 2100; DOI:10.3390/w13152100, 31st July, (2021).
- 9) 藤縄克之:環境地下水学, 共立出版, 3.2.2, 41-43 (2010).