

学位論文要旨	
氏名	ロジャー アプンター ルユン ジュニア
題目	海岸帯水層における海水侵入に及ぼす地下止水壁と人工涵養の効果 (Effects of Subsurface Physical Barrier and Artificial Recharge on Seawater Intrusion in Coastal Aquifers)
<p>海岸帯水層において淡水地下水を適切に利用するためには、海水侵入が問題となる。海岸域の人口増加に見合うだけの過剰な地下水揚水や地球温暖化による平均海水位の上昇は、海水をさらに内陸部へと侵入させることになり、淡水地下水の供給を脅かすことになる。地下止水壁と人工的な注水は、海岸帯水層における海水侵入制御手法の一つと考えられる。この手法の海水侵入制御効果について、室内実験と数値計算により検討を加えた。</p> <p>地下止水壁に関しては、止水壁の貯留域に残留した海水が、内陸側からの淡水流れにより、完全に洗い出されることを実験と数値計算により明らかにした。この現象は、地下ダムが海水侵入を防ぐだけでなく、初期に塩類化している海岸帯水層における淡水の貯留と供給を改善することにも有効である。本研究により、止水壁設置位置での塩水くさびの厚さを止水壁の高さが越えていれば、残留した海水は洗い出されることが分かった。ここでの結果は、低い地下ダムを設置することにより、建設コストが節約できる可能性があることを示唆している。</p> <p>また、地下止水壁を海側に近い場所で深く挿入することにより、有効に海水を海側へ押し戻すことができることを明らかにした。一方、止水壁を初期塩水くさび先端部より上流側に設置すると、止水壁の挿入に伴い、さらに海水侵入を引き起こしてしまうことを示した。止水壁の設置に伴う海水の海側への押し戻し効果は、止水壁を設置する海側からの水平距離の1次関数、及び止水壁の挿入深さの3次関数になっていることを明らかにした。本研究で検討した実験条件下での海水の押し戻し効果と止水壁設置位置との関係式を提案した。これにより、止水壁の任意の設置位置と挿入深さに対し、塩水くさび先端部の後退について定量的な検討を加えることができる。</p> <p>淡水を人工的に注入する人工涵養と海水侵入制御に関する研究では、塩水くさび先端部の近傍において注水することにより、海水を海側へより有効に押し戻すことが可能であることを明らかにした。一方、注水位置が塩水くさび先端部から遠くなると効果は小さくなることから、同じ注水量であれば、海水侵入を制御するためには、地表からの涵養よりも注入井戸による涵養の方が効果的である。地表からの涵養については、最も効果的な位置は、塩水くさび先端部の直上であることを明らかにした。また、注入井戸の場合は、同一注入量の条件では、点源としての注水は、線源としての注水と同じ効果が得られることが分かった。</p>	

学 位 論 文 要 旨

氏 名	Roger Apuntar Luyun Jr.
題 目	Effects of Subsurface Physical Barrier and Artificial Recharge on Seawater Intrusion in Coastal Aquifers (海岸帯水層における海水侵入に及ぼす地下止水壁と人工涵養の効果)

Seawater intrusion is often a major constraint to optimal utilization of fresh groundwater from coastal aquifers. Excessive groundwater abstraction to meet growing demands from increasing coastal population and the expected rise in mean sea level due to global warming will cause seawater to encroach farther inland and threaten the available fresh groundwater supply. Subsurface physical barriers and artificial recharge are among several countermeasures proposed to control seawater intrusion into coastal unconfined aquifers. Laboratory-scale experiments and numerical simulations were thus performed to determine the effectiveness of these control methods. In this research, the physical barriers examined were subsurface dams and partially penetrating flow barriers while the artificial recharge methods included recharge ponds and recharge wells.

In the study of subsurface dams, the dynamics of residual saltwater after cutoff wall installation was investigated. Experimental and numerical results show that the residual saltwater trapped in the storage area of cutoff walls will be completely flushed out by the freshwater flow from inland. This phenomenon proves that subsurface dams are very effective not only in preventing saltwater intrusion, but also in reclaiming previously saline-intruded coastal aquifers for freshwater storage. This study also shows that residual saltwater will be flushed if the wall crest exceeds the thickness of the saltwater wedge at that location. These results imply that there is a potential for construction cost savings by installing shorter subsurface dams.

In the study of subsurface flow barriers, the behavior of the saltwater wedge resulting from different barrier penetration depths and locations were analyzed. Results show that more effective saltwater repulsion can be achieved with deeper barrier penetration and at locations closer to the coast. When the barrier is installed upstream of the original toe position however, saltwater intrusion increases with deeper barrier penetration. Saltwater repulsion due to flow barrier installation was found to be linearly related to horizontal barrier location and a third-order polynomial function of barrier penetration depth. For the given boundary condition, a generalized equation relating these design parameters was developed. This can be used to determine the theoretical saltwater repulsion achieved by subsurface flow barriers of specific depth and location relative to the saltwater wedge toe.

In the artificial recharge studies, the effects of location and mode of application of recharge on saltwater behavior were analyzed. Results show that more effective saltwater repulsion can be achieved if recharge is applied near the saltwater wedge toe. Recharge becomes less effective if applied farther and higher from the toe. These imply that for the same recharge rate, recharge wells are more effective than recharge ponds in repulsing saltwater intrusion. For recharge ponds, the most effective location would be above the toe because of the increased pressure head created by the recharge water. Results from recharge wells also show that for the same recharge rate, point injection achieved about the same saltwater repulsion as line application.

学位論文審査結果の要旨

学位申請者 氏名	Roger Apuntar Luyun Jr.
審査委員	主査 鹿児島大学 教授 梶井 和朗
	副査 鹿児島大学 准教授 中川 啓
	副査 佐賀大学 教授 瀬口 昌洋
	副査 佐賀大学 教授 田中 明
	副査 琉球大学 教授 吉永 安俊
審査協力者	
題目	Effects of Subsurface Physical Barrier and Artificial Recharge on Seawater Intrusion in Coastal Aquifers (海岸帯水層における海水侵入に及ぼす地下止水壁と人工涵養の効果)
<p>現代社会における安全できれいな水の確保は、あらゆる人間活動の根幹をなすものである。特に、農業においては、水は食料を生産するための不可欠な資源である。近年、地下に止水壁を設置し、海へ流出する清澄な地下水を堰き止め、淡水を地盤間隙中に貯留、利用する方法が、新たな農業用水資源開発として注目されている。この方法は、有効な地下水貯留技術と考えられるが、地下止水壁設置後の地下水流れの変化や淡水貯留域内に残留する海水の挙動については、地下で生じている現象であり現地モニタリングによる把握が難しく、未だ科学的な知見が得られていない。さらに海水は淡水に比べて密度が大きく、従来の密度効果を考慮しない溶質輸送解析では地下水における海水の挙動解明は行えない。一方、国外においては、止水壁による地下水貯留技術が普及していないため、全く検討されていないのが現状である。本研究では地下止水壁設置に伴い帯水層内に残留している海水の挙動を、室内可視化実験と密度効果を考慮した数値計算により解明することを試みている。また、海岸帯水層における地下淡水域への海水侵入制御に関して、地表からの淡水注入や井戸からの注水の効果についても検討を加えている。</p>	

まず、地下止水壁下端が基盤に達している場合、止水壁設置後に貯留域に残留した海水は完全に消失することを可視化実験により明らかにした。密度効果を考慮した数値計算では、陸側から海側へ向かう淡水の流れがある条件下では、止水壁設置後に海側からの海水の流れが止水壁により遮断され、残留海水が分散により希釈、輸送され、陸側からの淡水流れにより徐々に洗い出される流動状況を再現した。また、止水壁高さが高くなると、低い場合に比べて残留海水排除のための時間が長くかかること、及び残留海水が消失する条件は止水壁上端が淡塩水境界面より高い位置にあることを数値計算により明らかにした。一方、止水壁下端が基盤に達していない不完全な止水条件下では、止水壁を海水侵入先端部より内陸側に設置すると、海水侵入がさらに助長されること、及び不完全止水壁による海水の押し戻し割合は、止水壁を設置する海側からの水平距離の1次関数、止水壁挿入深さの3次関数になることを明らかにした。この結果に基づいて、止水壁設置位置と海水の押し戻し割合の関係式を新たに提案し、海岸帯水層に設置した止水壁が海水侵入に及ぼす効果の定量的評価を可能とした。

次に、淡水を井戸から人工的に注入し海水侵入を制御する場合には、海水侵入のくさび先端部近傍で注水することにより、海水を海側に最も後退させることを示した。また、注入井戸の場合には、同一注入量の条件では、点源からの注水は、線源からの注水と同じ海水侵入抑制効果が得られることを示した。一方、地表面から淡水を涵養する場合には、井戸からの注水に比べて、同一の注入量条件下では、海水侵入抑制効果が小さいことを明らかにした。

以上のように、海岸帯水層において、これまで不明であった地下止水壁設置に伴う地下水における海水の挙動を、室内実験と数値計算により明らかにした点は独創的であり、学術的に高く評価できる。本研究で得られた知見は、海岸帯水層における海水侵入阻止型地下ダムによる水資源管理に役立てることができるとともに、人口の集中する沿岸域における水資源の開発と保全の観点からも高く評価できる。したがって審査委員一同は、本論文が博士（学術）の学位論文として十分に価値があるものと判定した。

最終試験結果の要旨	
学位申請者 氏名	Roger Apuntar Luyun Jr.
審査委員	主査 鹿児島大学 教授 糸井 和朗
	副査 鹿児島大学 准教授 中川 啓
	副査 佐賀大学 教授 瀬口 昌洋
	副査 佐賀大学 教授 田中 明
	副査 琉球大学 教授 吉永 安俊
審査協力者	
実施年月日	平成22年 1月 8日
試験方法 (該当のものを○で囲むこと。) <input checked="" type="radio"/> 口答 <input type="radio"/> 筆答	
<p>主査及び副査は、平成22年1月8日の公開審査会において学位申請者に対して、学位申請論文の内容について説明を求め、関連事項について試問を行った。具体的には別紙のような質疑応答がなされ、いずれも満足できる回答を得ることができた。</p> <p>以上の結果から、審査委員会は申請者が博士（学術）の学位を受けるに必要な十分の学力ならびに識見を有すると認めた。なお、本研究は農学と工学にまたがる内容であるので、博士（学術）の学位の授与が適当と判断した。</p>	

学位申請者
氏 名

Roger Apuntar Luyun Jr.

【質問 1】 止水壁付近に残留した海水が洗い出されると結論されているが、密度差があるので、流速が遅い場合は洗いだされずにとどまる場合もあると思うが、どのように考えれば良いのか。

【回答 1】 現実には海水が洗い出されてしまうまでにはかなりの時間がかかると考えられ、ご指摘のように見かけ上、ほとんどとどまっているように見える場合もあると考えられる。ここでは、時間がかかっても最終的には海水が除去されるということを示した。また実際には、地下ダムを建設している時にすでに洗い出しが進む場合もある。

【質問 2】 数値シミュレーション結果が現象と良く一致したということだが、モデル実験を行う必要があったのか。またモデル実験を行わなければ分からなかったことがあるか。モデルは実際のどのような場合を想定しているのか。

【回答 2】 ここでの実験は、主要な現象を把握することと、後で行った数値シミュレーションの検証のために行ったものである。逆に実験では確認できない流況などの詳細なメカニズムを知るために数値シミュレーションを行った。実験では行うことのできない、止水壁や人工涵養などの条件を変えた様々なケースを数値シミュレーションで検討したものである。

【質問 3】 初期の塩水くさびが定常状態かどうかについて、またその形状を予測することは可能か。

【回答 3】 解析解もあり、可能である。

【質問 4】 地球温暖化によって海水面が 50 cm 上昇すると、実際にはどの程度塩水くさびは陸域に後退すると予測できるか。

【回答 4】 解析解もあり、可能である。イタリアで 50~80 cm 上昇した場合に、内陸部へ 2 km 侵入が進むとの報告もある。

【質問 5】 淡水域で揚水が行われ、水位変動が生じた場合の塩水くさびの形状を予測できるか。

【回答 5】 そのようなケースをアップ・コーニングというが、解析解もあり、予測可能である。揚水量が陸域からの淡水流量に比べて小さい場合は、アップ・コーニングは生じない。

【質問 6】 物質輸送方程式の移流項の解法として、MOC と TVD を示されたが、それらの主要な違いを説明せよ。

[回答 6] MOC は濃度情報を持った粒子を追跡していく，いわゆる粒子追跡法のような解法であるが，TVD は濃度プロファイルを多項式により補間しながら解いていく方法である。TVDの方が計算時間が速く，後半の数値シミュレーションはTVDで行ったものである。

[質問 7] すべての実験および数値シミュレーションは，淡水側と塩水側の水位差が，ほぼ同じ状況で行われたものである。もし異なった水位差で行われた場合でも，ここで得られたのと同じ結果が得られるかどうかについて述べよ。

[回答 7] 塩水侵入過程は，淡水側と塩水側の水位差が大きい場合は，塩水侵入長が短くなり，水位差が小さい場合は，塩水侵入長が長くなる。また塩水の排除過程については，水位差が大きい場合は，押し戻し率が大きくなり，逆は小さくなると考えられる。しかし現象としては同じ結果が得られると考えている。

[質問 8] 止水壁による海水の押し戻し割合は，水平距離の1次関数，止水壁挿入深さの3次関数になると結論づけているが，この関係は普遍化・一般化できるか。

[回答 8] 水位差を大きくすると押し戻し率は大きくなる。逆の場合は小さくなると考えられるが，この水位差の効果を，提案した関係式に導入することで一般化が図れると考えている。

[質問 9] 現在，沖縄県内で設置されている地下ダムと本研究の地下止水壁は，本質的には同じ構造物とみなしても良いか。

[回答 9] 内陸部に設置する地下水を貯留するタイプの地下ダムと，海岸近くに設置する塩水侵入阻止型の地下ダムがあるが，その塩水侵入阻止型の地下ダムと同様のものと考えている。

[質問 10] 近い将来，日本で地下止水壁の建設計画はあるか。海外での地下止水壁の建設状況について知るところを述べよ。

[回答 10] 現在，日本には15例あるが，計画についてはわからない。海外では，メキシコ，インド，韓国，アフリカ，ブラジルなどにあるが，日本のものほど大きなものではない。フィリピンにも2例ある。

[質問 11] フィリピンでの地下水の水資源としての利用状況について説明し，ここでの地下ダムや人工涵養に関する検討結果は，フィリピンでは有益と考えるか。

[回答 11] 通常のダムが少ないので，多くの住民は地下水を農業用水や生活用水などの水資源として利用している。フィリピンも島嶼部であるから，日本と同じように塩水侵入の問題が起こっていて，本研究で検討したことは，将来非常に有益なものと考えている。