

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19580283

研究課題名（和文）：

**海岸地下淡水資源保全のための海水侵入制御メカニズムとモデリング**

研究課題名（英文）：

Control and Modeling of Seawater Intrusion for Conservation of Fresh Groundwater in Coastal Aquifers

研究代表者

梶井 和朗 (MOMII KAZURO)

鹿児島大学・農学部・教授

研究者番号：40136536

**研究成果の概要（和文）：**

海岸帯水層において淡水地下水を適切に利用するには、海水侵入の問題を予め把握することが必要となる。海岸域での過剰な地下水の揚水や地球温暖化による海面上昇は、海水をさらに内陸部へと侵入させることになり、淡水地下水の塩水化が懸念される。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、室内実験と数理モデルにより明らかにし、さらに、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、止水壁ならびに地表からの淡水注入や井戸からの注水の効果について検討を加えた。

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解析では、陸側から海側へ向かう淡水流れが存在する条件下では、止水壁設置後では海側からの海水の侵入が止水壁により遮断され、淡水地下水と海水の境界付近において、分散により希釈された残留海水が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正確に再現した。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、止水壁による海水の押し戻し割合は、海から止水壁までの水平距離の 1 次関数、及び止水壁挿入深さの 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、地表面から淡水を涵養する場合は、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。

**研究成果の概要（英文）：**

Seawater intrusion is often a major constraint to optimal use of fresh groundwater from coastal aquifers. Excessive groundwater extraction to meet growing demands from an increasing coastal population and the expected rise in mean sea level from global warming will cause seawater to encroach farther inland and threaten the available groundwater supply. In this study, laboratory experiments and numerical analysis were performed to determine the effectiveness of physical barriers and artificial

recharge methods to control the seawater intrusion in coastal aquifers. 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, experimental and numerical results show that the residual saltwater trapped in storage areas by cutoff walls is completely flushed out by the freshwater flow from inland.

In the study of subsurface flow barriers, we found that saltwater repulsion was linearly related to horizontal barrier location and a third-order polynomial function of penetration depth. For a particular freshwater discharge, this relationship can be used to determine the theoretical saltwater repulsion achieved by subsurface flow barriers of specific depth and location relative to the toe of the intruding saltwater wedge.

In the artificial recharge studies, results show that more effective saltwater repulsion can be achieved when recharge is applied near the saltwater toe. Recharge becomes less effective when applied farther and higher from the toe. These findings imply that, for the same recharge rate, recharge wells are more effective than recharge ponds in repulsing saltwater intrusion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度			
2006年度			
2007年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学 ・ 農業土木学・農村計画学

キーワード：海水侵入，地下水，地下ダム，人工涵養，室内実験，数値計算，水資源

### 1. 研究開始当初の背景

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。新たな水資源開発は、環境への負荷の点から予め十分な検討が必要である。農業用水資源として、幅 1m 程度、基盤から数 10m の高さの止水壁を地下に数 km 設置し、海へ流出する清澄な地下水あるいは降水による自然な涵養地下水により地下水を堰き上げ、新たな淡水地下水を地盤中に貯留する工法が日本において実用化されている。この工法は、農業用水のみならず生活用水としての利

用にも期待され、国内では離島、国外では乾燥地における新たな水資源開発法として注目されている。この地下水貯留施設（地下ダム）は、循環型で持続的な資源である水の性格を有効に利用した水資源確保技術であり、かつ地表環境に及ぼす影響は少ない。また、今後想定される地球規模での温暖化に伴う海面上昇問題では、海岸帯水層への海水の侵入による淡水地下水の塩水化が懸念されるが、地下ダムは、海水侵入阻止のための対策としても有効な方法となりうる。

このように地下ダムは、有効な地下水貯留

技術であるが、地下ダム設置後、貯留域内の地盤中に残留した海水が地下水の取水とともにどのように振る舞うのか、及び通常の運営管理時に残留塩分がどのように挙動するのかに関しては、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極めて難しく、未だ科学的な見解が得られていない。この残留海水の挙動解明は、良質な淡水地下水を、必要な時に必要な量だけ利用していくために解決すべき重要な課題である。しかし、海水は淡水に比べて密度が大きく、密度効果を考慮した流動解析が必要となり、密度効果を考慮しない通常の溶質輸送解析では、海水と淡水地下水との相互作用や海水の挙動解明は行えない。また、地下水貯留域内には、地表からの生活及び農業由来の環境負荷物質が蓄積することが考えられ、貴重な淡水資源保全の観点から、地下水の流動特性と質的变化の検討が必要であるが、十分には検討されていない。一方、国外においては、このような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。

## 2. 研究の目的

本研究では、室内実験及び数理モデル解析に基づいて、工学的対策による海水侵入制御のメカニズム解明とその効果の定量化、及び工学的対策が地下水流動に及ぼす影響の評価について検討を加える。実験で対象とする工学的対策は、地下ダム方式、矢板方式、浸透池方式、注水井方式の4ケースである。これらのケースにおいて、侵入海水が地下水中でどのように振る舞うかについて、写真撮影により追跡する。現象の可視化後に、数理モデルにより各ケースに対する理論的考察を加え、海水の流動特性を明らかにする。また、各工学的対策による海水侵入抑制効果を明らかにする。

以上のことから、本研究では、

- ・工学的対策による海水侵入抑制メカニズムを解明し、
  - ・海水侵入制御工法の効果を定量的に評価すること
- を主な目的とし、室内実験、モデリング、数値シミュレーション及び理論解析に基づいて検討し、地球水資源として良質な地下水の保全とその有効利用に貢献することを狙いとする。

## 3. 研究の方法

海水侵入抑制の工学的対策として、地下ダム方式、矢板方式、浸透池方式、注水井戸方式に対する室内実験を行う。実験では、海水に相当する塩水（密度  $1.025\text{g/cm}^3$ ）は食用色素により赤色に着色する。また、鉛直2次元断面内における水の流れを可視化するために、陸側の淡水（無着色）と浸透池あるいは

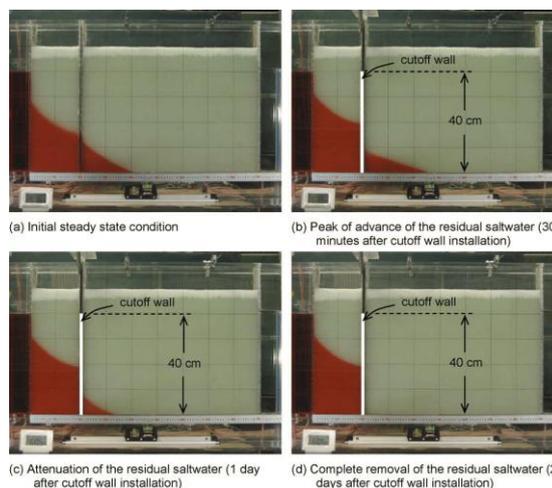
注水井戸からの淡水（青色）を区別するために両者の色を変え、その変化をカメラにより追跡する。また、色の濃淡と塩分濃度が必ずしも対応しないことが考えられるため、電気伝導度計による実測塩分濃度と色の濃淡との対応を解析し、実験の妥当性を予め検討する。

また、数理モデルを利用して、現象の解明を検討する。数理モデルとしては、アメリカ地質調査所 (USGS) が開発したプログラムコード SEAWAT 2000 による検討を加える。

## 4. 研究成果

### (1) 地下ダム方式

地下止水壁下端が基盤に達している場合、**図 1** に示すように、止水壁設置後に、塩水侵入先端部が僅かに前進し (**図 1(b)**)、その後徐々に後退し (**図 1(c)**)、最終的には、貯留域に残留した海水が完全に消失する (**図 1(d)**) 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、残留海水が流体力学的分散により希釈、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 (**図 2**)。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なること、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。



**図 1** 地下ダム方式での海水の挙動 (止水壁高さ 40cm の実験結果)

- (a) 左上：初期定常状態
- (b) 右上：止水壁挿入後 30 分
- (c) 左下：止水壁挿入後 1 日
- (d) 右下：止水壁挿入後 2 日

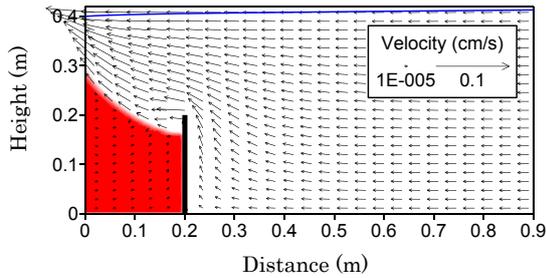
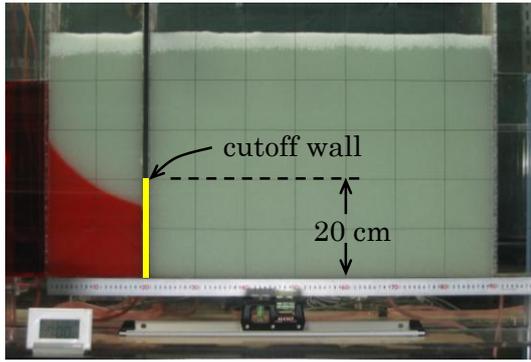
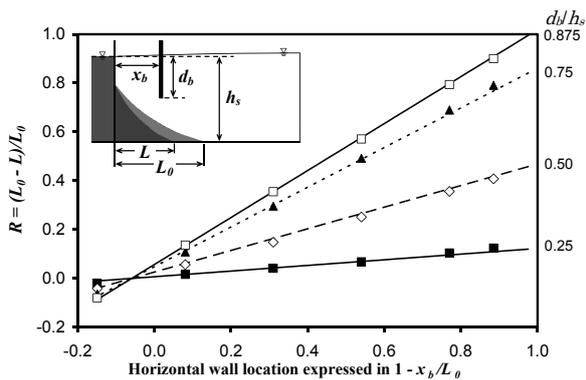
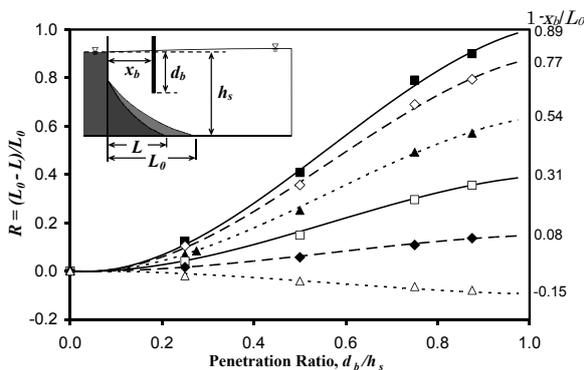


図2 地下ダム方式での地下水流動 (止水壁高さ 20cm の実験結果及び 数値計算結果)



(a) 止水壁水平距離  $x_b$  の 1 次関数



(b) 止水壁挿入深さ  $d_b$  の 3 次関数

図3 矢板挿入水平位置  $x_b$  と挿入深さ  $d_b$  に対する塩水楔先端位置の後退割合  $R$  の関係 ( $h_s$ : 塩水深,  $L_0$ : 初期塩水楔先端位置,  $L$ : 矢板挿入後の塩水楔後退位置)

## (2) 矢板方式

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( $x_b$ )の 1 次関数(図 3(a))、止水壁挿入深さ( $d_b$ )の 3 次関数(図 3(b))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を定量的に評価することを可能とした。

## (3) 淡水注入方式

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(図 4)。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。

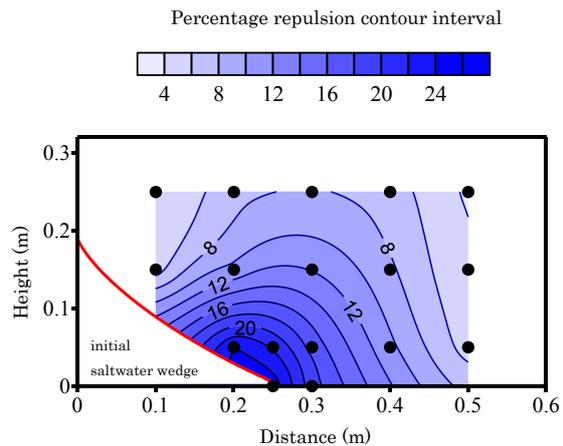


Figure Percentage repulsion of seawater intrusion based on location of recharge well injection points (●).

図4 井戸からの注水による塩水楔の制御 (図中の数字は、初期侵入先端位置の後退割合%, 図中の●は注水点)

## (4) まとめ

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や淡水注入(人工涵養)に伴う地下水における海水の挙動を、室内実験と数値解析により明らかにした。本研究で得られた成果は、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淡水資源の開発と保全の観点からも有益である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- 1) Nakagawa, K., Hosokawa, T., Wada, S.-I., Momii, K., Jinno, K., and Berndtsson, R.: Modelling reactive solute transport from groundwater to soil surface under evaporation. *Hydrological Processes*, **24**, 608-617 (2010) (査読有)
- 2) Luyun Jr., R., Momii, K., and Nakagawa, K.: Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. *Journal of Hydrology*, **377**, 227-236 (2009) (査読有)
- 3) Luyun Jr., R., Momii, K., Nakagawa, K., and Takahashi, M.: Effects of artificial recharge and physical barrier on seawater intrusion. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, **53**, 85-90 (2009) (査読有)
- 4) Luyun Jr., R., Momii, K., Nakagawa, K., and Fujiyama, S.: Saltwater dynamics due to cutoff wall installation in coastal unconfined aquifers: experimental and numerical studies. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, **320**, 214-219 (2008) (査読有)

[学会発表] (計7件)

- 1) Kei Nakagawa, Kazuro Momii, and Roger Luyun Jr.: Effective location of injection wells and cutoff walls for controlling seawater intrusion. *7th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association of Hydraulic Engineering and Research*, 21-24 Feb. 2010, Auckland, New Zealand (2010)
- 2) Roger Luyun Jr., 梶井和朗, 中川啓: Laboratory-scale effects of flow barriers on seawater intrusion. 日本地下水学会 2009年秋季講演会(札幌大会), 2009年10月16日北海道立道民センターかで2・7(札幌市)(2009)

- 3) Luyun Jr., R., Momii, K., Nakagawa, K., and Imahase, F.: Effects of physical barrier and artificial recharge on seawater intrusion. *XXXVI International Association of Hydrogeologists Congress, Integrating Groundwater Science and Human Well-being*, 26 October-1 November, Toyama International Center, Toyama (2008)
- 4) 高橋昌弘, 梶井和朗, 中川啓: 淡水注入による塩水侵入抑制効果に関する検討. 日本地下水学会 2008年秋季講演会, 2008年11月21日, 九州大学(福岡)(2008)
- 5) Luyun Jr., R., Momii, K., Nakagawa, K.: Saltwater dynamics due to cutoff wall installation- The effect of grid spacing on numerical simulations. 日本地下水学会 2008年秋季講演会, 2008年11月21日, 九州大学(福岡)(2008)
- 6) Nakagawa, K., Momii, K., and Berndtsson, R.: Nitrate transport process through volcanic ash soil. *6th International Groundwater Quality Conference*, Fremantle, Western Australia, 2-7 December (2007)
- 7) Luyun Jr., R., Momii, K., Nakagawa, K., and Fujiyama, S.: Saltwater dynamics due to cutoff wall installation in coastal unconfined aquifers: Experimental and numerical studies. *Pre-published Proceedings of Sixth International Conference on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, Credibility in Modelling*, 9-13 September, Copenhagen, Denmark, 390-395 (2007)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

梶井 和朗 (MOMII KAZURO)

鹿児島大学・農学部・教授

研究者番号: 40136536

### (2)研究分担者

中川 啓 (NAKAGAWA KEI)

鹿児島大学・農学部・准教授

研究者番号: 90315135