

環境トレーサーを用いた湿潤島嶼流域における
地表水—地下水相互作用にともなう地下水の非定常現象の解明

Groundwater Dynamics Associated with Surface Water-Groundwater Interaction in
Watersheds of Humid Islands Using Environmental Tracers

博士論文

(要約)

令和6年2月

広島大学大学院先進理工系科学研究科

友澤 裕介

目 次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 要 旨 | 1 |
| Abstract..... | 3 |
| 目 次 | 5 |
| 図リスト | 7 |
| 表リスト | 9 |
| I 序論..... | 10 |
| 1 研究背景 | 10 |
| 2 地下水涵養・流動に関する従来の研究..... | 14 |
| 2.1 涵養域から流出域を含む地下水流動特性..... | 14 |
| 2.2 沖積平野および沿岸部を対象とした地下水流動特性 | 14 |
| 2.3 環境トレーサー | 15 |
| 3 研究目的 | 15 |
| II 過剰揚水にともなう難透水層を通過する鉛直下方への流動 | 16 |
| 1 背景・目的 | 16 |
| 2 地域概要および方法..... | 16 |
| 3 結果と考察 | 20 |
| 3.1 地下水の塩水化の状況..... | 20 |
| 3.2 下層断面分布から推定する分布特性..... | 23 |
| 4 まとめ..... | 27 |
| III 洪水時における河川から被圧地下水への非定常な涵養機構 | 28 |
| 1 背景・目的 | 28 |
| 2 調査地域と方法 | 28 |
| 2.1 調査地域概要 | 28 |
| 2.2 観測井戸および観測方法..... | 32 |
| 3 結果 | 33 |
| 3.1 地下水の化学組成および水理水頭分布 | 33 |
| 3.2 酸素・水素安定同位体比の分布 | 35 |
| 3.3 地下水の水理水頭、EC および安定同位体比の長期変化 | 37 |
| 4 考察 | 39 |
| 4.1 定常時における沖積平野の地下水涵養－流動状況..... | 39 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2 | 深部地下水における EC および $\delta^{18}\text{O}$ の長期的な変動特性 | 42 |
| 4.3 | 平野中央都心部における深部地下水への非定常な涵養機構 | 47 |
| 5 | まとめ | 50 |
| IV | 揚水にともなう塩淡水境界付近の非定常な混合過程 | 51 |
| 1 | 降水および湧水の安定同位体比 | 51 |
| 1.1 | 背景および目的 | 51 |
| 1.2 | 調査地域と方法 | 52 |
| 1.2.1 | 地域概要 | 52 |
| 1.2.2 | 調査方法 | 52 |
| 1.3 | 結果と考察 | 54 |
| 1.3.1 | $\delta^{18}\text{O}$ および d-excess 値の時系列変動 | 54 |
| 1.3.2 | 降水のローカルな天水線 | 57 |
| 1.3.3 | 降水の高度効果と地下水涵養線の推定 | 57 |
| 1.4 | まとめ | 60 |
| 2 | 地下水の流動の推定 | 61 |
| 2.1 | 背景および目的 | 61 |
| 2.2 | 調査地域と方法 | 62 |
| 2.2.1 | 地域概要 | 62 |
| 2.2.1 | 調査方法 | 64 |
| 2.3 | 結果と考察 | 65 |
| 2.3.1 | 水理水頭および $\delta^{18}\text{O}$ から推定される地下水流動系 | 65 |
| 2.3.2 | Cl ⁻ 濃度と $\delta^{18}\text{O}$ に基づく沿岸岩盤地下水の特徴 | 67 |
| 2.3.3 | 地下水年代トレーサーに基づく $\delta^{18}\text{O}$ が低い淡水性地下水の起源推定 | 70 |
| 2.3.4 | 塩淡水境界近傍の地下水動態 | 75 |
| 2.1 | まとめ | 75 |
| V | 総合討論—揚水によって生じた非定常な流れの解明— | 76 |
| 1 | 塩水化と地形等の比較 | 76 |
| 2 | 研究手法に関する今後の課題 | 76 |
| 3 | 現象に関する今後の課題 | 76 |
| 4 | 本研究成果の応用—地下水の持続可能な利水について— | 77 |
| VI | 結論 | 80 |
| | 謝辞 | 82 |
| | 引用文献 | 83 |

学位論文の要約

本研究では、湿潤島嶼流域において人為的揚水の影響を受けた地下水の非定常現象に焦点を絞り、その要因を解明することを目的とした。その結果、環境トレーサーによる観測によって①過去の揚水の影響による難透水層を通過する鉛直下方の流れ、②大出水時の河川の影響が地下水に現れる現象、③沿岸部地下水の塩淡水境界付近において古い停滞性の淡水が混合した井戸水の存在、を明らかにし、その要因について考察を行った。

I章では、人為的揚水の影響により地下水に非定常な流れが生じた研究事例を示した。また、沿岸部においては、揚水にともなう難透水層を通過するような鉛直下方向への流動や大出水時の河川から地下水への涵養、塩淡水境界付近の複雑な水の混合などがあるが、それらの要因や地下水流動に及ぼす影響は十分明らかにされていないことから、環境トレーサーを用いた研究・解明をおこなう必要性を述べた。

II章では、過去に地下水の過剰揚水により非定常な地下水の流れが生じ、沿岸地下水の塩水化が報告されていた大阪平野において、2015年におこなった観測結果を示し、海水の混合率が最大28.9%を示す地下水が海岸線から3.8 kmの深度約40 mのところに残存していた。環境トレーサー（水の安定同位体比）により地下水の淡水成分の涵養域を推定したところ、標高100 m以上の高地由来の水が海岸線から3.8~5.5 km内陸側の深度約40 m付近に分布していた。一方で2.8~3.8 kmの深度60 m付近において、浅い帯水層由来と思われる水があり、難透水層を通過する鉛直下方向への流動が推定された。

III章では、中規模都市があり、常に低い地下水位であることが知られている岡山平野において、8年間に及ぶ水位、一般水質、酸素・水素安定同位体比の観測の結果を示し、沿岸地下水における塩水化と、平野中央部地下水における大出水における河川水の影響が確認できた。沿岸の深部地下水における海水の混合率は25%と推定され、陸域の揚水による地下水位低下に伴い塩水が侵入したものと考えられた。平野中央部の深部地下水（深度10~20 m）においては、観測期間中最大の出水後に酸素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ）が約2年間にわたり顕著に低い値を示した。大出水時の河川水が地下水に到達したと仮定し、動水勾配を用いて到達時間を推定したところ、169~405日と見積もられ、洪水時から深部地下水における $\delta^{18}\text{O}$ の最低値が出現するまでの時間（約300日）の範囲内にあり、洪水時の河川水による非定常な地下水涵養が示唆された。

IV章では、農業用水などの揚水が行われている島嶼である瀬戸内海の生口島において、2年間の降水と6年間の地下水の観測を行った結果を示し、深度40 m以深の岩盤地下水で $\delta^{18}\text{O}$ と塩化物イオン（Cl⁻）濃度の変動がみられ、Cl⁻濃度の上昇とともに $\delta^{18}\text{O}$ の低下傾向がみられた。これはマルチトレーサーによる考察の結果より $\delta^{18}\text{O}$ の低い地下水が出現していることを意味したが、この値は現在島内にもたらされる降水では説明ができない低い値であり、すなわち塩淡水境界の上昇にともない、より低い $\delta^{18}\text{O}$ をもつ古い時代（最終氷期）の淡水成分が深部から上部へ流入している可能性が示唆された。これは、SF₆および

^{14}C を使用した地下水の年代測定結果による解析からも裏付けられた。

V章では、総合討論として各章の結果を地形等に注視して比較を行った。沿岸低地の地形勾配、すなわち動水勾配の差異が地下水の動態に影響を与えていると推察された。具体的には、大阪平野はその勾配が緩やかであるため、塩水化が長期間残存している可能性が考えられる。これに対して、岡山平野は大阪平野よりも勾配があるため、被圧地下水においても河川の影響がみられたと推測された。また、生口島は他の地域と比較して勾配が急であるため、高い塩水化が見受けられないと示唆された。これらの結果を利水に応用する場合、動水勾配が小さい地域においては過去の影響が長く残る恐れがあり、早く回復する浅層地下水（不圧地下水）に限定して使用するとともにモニタリング調査で確認することで持続可能性が担保できると思われた。また、トレーサー法による地下水涵養域の推定することが地下水を管理・維持するにあたり、有効であると考えられる。さらに、既存の概念にない非定常な流れが生じることを前提に管理していく必要があると考えられる。

本研究による環境トレーサーを用いた地下水の長期的観測から新たに解明された、人為的揚水による10m以上深部の地下水（被圧地下水を含む）における非定常な流動現象は、水資源を持続的に使用し管理していくにあたりきわめて有益な成果となるであろう。

引用文献

- 青木一男・鶴巻道二・西田幹嗣（2003）泉南南部地域における塩水化現象と最適用水量に関する研究. 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2003 発表論文集, 91-98.
- 浅井和由・辻村真貴・佐竹洋（2001）乗鞍岳東斜面における地下水流動系と降雨流出過程. 日本水文科学会誌, **31**(4), 135-149.
- 浅井和由・本島勲（2005）酸素・水素安定同位体比を用いた火山地下水調査－御嶽山における事例研究－. 地下水技術, **47**(10), 23-28.
- 浅井和由・辻村真貴・FANTONG Wilson Yetoh（2014）中部山岳地域における降水の安定同位体比の時間変動特性：御嶽山における研究事例. 日本水文科学会誌, **44**(2), 67-77.
- 浅井和由・辻村真貴・浅井和見（2021）溶存窒素・アルゴン濃度からみた中部地方の地下水の Excess air -SF₆年代に与える Excess air の影響-. 地下水学会誌, **63**(4), 267-277.
- 石飛智穂・谷口真人・嶋田純（2007）沿岸海底湧出量測定による塩淡水境界変動と地下水流出の評価. 地下水学会誌, **49**(3), 191-204.
- 市原実・藤野良幸・森浩一・中世古幸次郎・日下雅義・室田明（1975）大阪層群と大阪平野. アーバンクボタ, **16**, 2-11.
- 一柳錦平・田上雅治（2016）日本全域における降水の安定同位体比—2013 年集中観測の結果より—. 日本水文科学会誌, **46**(2), 123-138.
- 一柳錦平・松永緑・田上雅治・嶋田純（2020）都城市における降水の安定同位体比の季節変動. 日本水文科学会誌, **50**(2), 85-94.
- 伊藤浩子・小野寺真一・齋藤光代・丸山豊・金広哲・勝見武（2015）大阪平野とその周辺地域における地下水中の重金属等の含有状況について. Kansai Geo-Symposium 2015 論文集, 91-96.
- 内田洋平（2015）筑後・佐賀平野の地盤沈下と地下水管理の現状. 地下水学会誌, **57**, 19-27.
- 岡山県（2016）おokayama 全県統合型 GIS（地盤情報）. <http://www.gis.pref.okayama.jp/pref-okayama/Portal>（2019.10.15 閲覧）
- 大阪府（2023）地盤沈下・地下水対策:大阪府域における地下水利用及び地盤沈下等の状況について（令和 3 年）. <https://www.pref.osaka.lg.jp/kankyohozen/jiban/chikasui.html>（2023.12.15 閲覧）
- 小野寺真一・近藤昭彦・佐藤芳徳・林正貴・新藤静夫・松本栄次・池田宏（1996）東アフリカ, タンザニアの半乾燥地域における地中水循環. ハイドロロジー（日本水文科学会誌）, **26**, 75-86.
- 小野寺真一（2009）II 備讃地域陸海域の水・栄養塩動態解明 2 備讃地域陸域からの負荷量推定技術 4) 地下水流出負荷・干潟浄化用推定技術. 備讃地域陸海域の水・栄養塩動態解明と農業への再利用技術の開発, 先端技術を活用した農林水産技術高度化事業平成 19

- ～21年度 研究成果報告書 課題番号 1947 (研究総括者：吉川省子), 38-47.
- 小野寺真一 (2010) 巨大都市の物質負荷. 谷口真人編, アジアの地下環境—残された地球環境問題—. 学報社, 243p.
- 小野寺真一・宮越昭暢 (2010) 特集号「地下水流動系と熱/物質輸送」刊行にあたって. 地下水学会誌, **52**, 333-334.
- 小野寺真一・清水裕太・伊藤浩子・塚本千鶴・沖 泰三・青木一男 (2013) 大阪平野における窒素負荷の変動とその地下水水質に及ぼす影響. Kansai Geo-Symposium 2013 論文集, 27-30.
- 小野寺真一・齋藤光代・清水裕太 (2016) 沿岸巨大都市における地下水水質汚染の傾向について. Kansai Geo-Symposium 2016 論文集, 3-4.
- 小野寺真一・齋藤光代・北岡豪一 (2018) 瀬戸内海流域の水環境—里水—. 吉備人出版, 266p.
- 香川県 (2011) 香川の水資源. 香川県政策部水資源対策課, 138p.
- KG-NET・関西圏地盤研究会 (2007) 新関西地盤 大阪平野から大阪湾 2007. 新関西地盤 / 関西地盤情報活用協議会地盤研究委員会編, 354p.
- 風早康平・安原正也 (1994) 湧水の水素安定同位体比からみた八ヶ岳の地下水の涵養・流動過程. ハイドロロジー, **24**, 107-119.
- 風早康平 (1997) 地下水の涵養源と流動：同位体水文学的手法. 地質ニュース, **513**, 20-25.
- 樫根勇 (1989) 河川と地下水. 地学雑誌, **98**, 42-52.
- 環境省 (2022) 自然環境調査 Web-GIS. <http://gis.biodic.go.jp/webgis/> (2022.11.20 閲覧)
- 気象庁 (2016) 過去の気象データ・ダウンロード. <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/ob-sdl/> (2016.7.1 閲覧)
- 気象庁 (2022a) 過去の気象データ検索. <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2022.11.20 閲覧)
- 気象庁 (2022b) 日本の気候. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kisetsu_riyou/tenkou/Average_Climate_Japan.html (2022.11.20 閲覧)
- 国土開発技術研究センター (1993) 地下水調査および観測業務規定(案). 山海堂, 330.
- 国土交通省 (2007) 旭川河川概要. http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/87076/87076-1.html (2016.7.1 閲覧)
- 国土交通省 (2008) 国土地盤情報検索サイト. <http://www.kunijiban.pwri.go.jp> (2019.10.15 閲覧)
- 国土交通省 (2016) 国土交通省川の防災情報. <https://www.river.go.jp> (2016. 7.1 閲覧)
- 国土交通省岡山河川事務所 (2011) 【旭川】平成 23 年 9 月 3 日～5 日『台風 12 号による出水』. <http://www.cgr.mlit.go.jp/okakawa/> (2016. 7.1 閲覧)
- 齋藤光代・小野寺真一・竹井務 (2005) 沿岸農業小流域における硝酸性窒素流出過程. 陸水学雑誌, **66**, 1-10.
- 齋藤光代・小野寺真一 (2009) 沿岸農業流域における地下水による硝酸性窒素流出の季節変

- 動特性. 陸水学雑誌, **70**(2), 137-147.
- 齋藤光代・小野寺真一・伊藤浩子・丸山 豊・谷口正伸・金广哲・勝見武 (2015) 大阪湾沿岸地下水と下水道の相互作用について—栄養塩類からみて—. Kansai Geo-Symposium 2015 論文集, 87-90.
- 齋藤庸・三宅紀治 (2003) 関東平野南西域の地下水収支に関する検討. 日本水文科学会誌, **33**, 197-214.
- 佐藤努・中村太郎 (2005) 淡路島北部における降水の高度効果. 日本水文科学会誌, **35** (1), 15-22.
- 嶋田純 (1998) 扇状地における地下水涵養と流出. 日本水文科学会誌, **28**, 63-70.
- 田上雅浩・一柳錦平・嶋田純 (2013) 日本における降水の安定同位体比の季節変動と空間分布. 日本水文科学会誌, **43**(3), 73-91.
- 嶋田純 (2001) 山体を構成する基盤岩中の地下水流動. 日本水文科学会誌, **31**(2), 37-47.
- 嶋田純 (2005) 瀬戸内海海底の水. 瀬戸内海, **43**, 22-27.
- 嶋田純 (2012) モンスーンアジア地域における可能地下水涵養量を考慮した地下水資源管理. 日本水文科学会誌, **42**(2), 33-42.
- 高橋正明 (2018) 「水同位体比アナライザー」による水試料の水素・酸素同位体比測定. 日本水文科学会誌, **48**(1), 17-21.
- 竹内徹・北岡豪一・山口一裕・小野寺真一 (2014) 閉鎖性海域沿岸沖積平野における完新世粘性土層の形成過程について—岡山平野の例—. 日本水文科学会誌, **44**(3), 161-177.
- 谷口真人 (2011) 地下水流動—モンスーンアジアの資源と循環—. 共立出版, 294p.
- 谷口真人 (2013) 安全保障としての地下水の重要性. 地下水学会誌, **55**, 5-11.
- 陀安一郎・申基澈・鷹野真也編 (2023) 同位体環境学がえがく世界: 2023 年版. 総合地球環境学研究所, 290p.
- 土原健雄・吉本周平・皆川裕樹・白旗克志・石田聡 (2018) 環境トレーサーを用いた地表水と地下水の交流研究の現状. 地下水学会誌, **60**(2), 169-192.
- 鶴巻道二 (1992) 大阪平野における被圧地下水の塩水化について. 地下水技術, **34**, 37-50.
- 鶴巻道二 (2003) 地下水水質研究委員会の活動の総括. 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2003 発表論文集, 81-90.
- 塚本千鶴・鶴巻道二 (2003) 「地下水水質年表」に見られる異常水質について. 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2003 発表論文集, 99-106.
- 塚本千鶴 (2010) 大阪地域の地下水観測井の水質の特徴. 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2010 発表論文集, 87-94.
- 登坂博行 (2006) 地圏の水環境科学. 東京大学出版会, 363p.
- 友澤裕介・小野寺真一・齋藤光代 (2023) 瀬戸内海島嶼部における降水および地下水の安定

- 同位体比. 日本水文科学会誌,(印刷中).
- 永田俊・宮島利宏 編 (2008) 流域環境評価と安定同位体. 京都大学学術出版会, 476p.
- 中屋眞司・三田村宗樹・益田晴恵・上杉健司・本館佑介・日下部実・飯田智之・村岡浩爾(2009) 環境同位体と水質より推定される大阪盆地の地下水の涵養源と流動特性. 地下水学会誌, **51**(1), 15-41.
- 林武司・内田洋平・安原正也・丸井敦尚・佐倉保夫・宮越昭暢 (2003) 水質・同位体組成からみた関東平野の地下水流動. 日本水文科学会誌, **33**, 125-136.
- 林武司 (2005) 酸素・水素安定同位体比を用いた地下水調査. 地下水技術, **47**(8), 27-38.
- 林武司・宮越昭暢・安原正也 (2007) 大都市圏の発達に伴う地下水環境の変化と課題. 日本水文科学会誌, **37**, 271-285.
- 藤縄克之 (2010) 環境地下水学. 共立出版, 354p.
- 町田功 (2000) 東京都三宅島における降水の酸素安定同位体比時空間変化. 水文・水資源学会誌, **13**(2), 103-113.
- 町田功 (2005) 小規模な海洋島における降水の酸素・水素安定同位体的特性. 水文・水資源学会誌, **18**(4), 349-361.
- 益田晴恵 (2011) 都市の水資源と地下水の未来. 京都大学学術出版会, 75-136.
- 丸山豊・小野寺真一・北岡豪一 (2015) 河川近傍の“みずみち”状湧水における水温変動を利用した地下水フラックスの推定. 地下水学会誌, **57**, 207-219.
- 松見悠世・山口一裕・北岡豪一 (2010) 岡山平野地下水における水質の特徴と流動系. 陸水物理学会, 第 32 回陸水物理研究会広島大会講演予稿集, 16.
- 三宅紀治・齋藤庸 (2003) 東京, 埼玉の沖積低地を主とした被圧地下水流動について. 日本水文科学会誌, **33**, 185-196.
- 村岡浩爾 (2005) 沿岸都市域における地下水総合管理のための地下水涵養モデルの構築. 平成 14 年度～平成 16 年度科学研究費補助金(基盤研究(B)(1))研究成果報告書, 126p.
- 安原正也・風早康平・丸井敦尚 (2007) 富士山の地下水とその涵養プロセスについて. 荒牧重雄・藤井敏嗣・中田節也・宮地直道 編, 富士火山. 山梨県環境科学研究所, 389-405.
- 藪崎志穂・田瀬則雄 (2004) 台風到来時の降水の酸素・水素安定同位体比の変動特性. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **5**, 29-39.
- 藪崎志穂・田瀬則雄・嶋田純 (2011) 火山灰土層中における土壌水の同位体比プロファイルと地下水涵養量の推定. 地球環境研究, **13**, 43-57.
- 山田誠・平川丈志・松田亮・山口一裕・北岡豪一・日下部実 (2006) 温泉水の水素と酸素の安同位体比から推定される深部花崗岩の水の由来. 日本水文科学会誌, **36**(4), 205-218.
- 山中勤・恩田裕一 (2011) 波長スキャンキャビティリングダウン分光法を用いた水同位体分析計の測定精度について. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **12**, 31-40.
- 山中勤 (2020) 環境同位体による水循環トレーシング. 共立出版, 258p.
- 山中勝・奥村維男・中野孝教 (2007) 屋久島河川水にあらわれる同位体高度効果と流出特性.

- 日本水文科学会誌, **37**(2), 41-54.
- 山本莊毅 (1983) 新版 地下水調査法. 古今書院, 490p.
- 山本雅弘・北村俊博・赤木誠司・古川孝文・日下部実 (1993) 岡山県下の天水の水素及び酸素同位体比. 地下水学会誌, **35**(2), 107-112.
- 梁熙俊・嶋田純・松田博貴・利部慎・董林垚 (2015) 島嶼地域における地下水位の時系列解析及び電気伝導度を用いた淡水レンズ形状の評価－沖縄県南大東島の例－. 地下水学会誌, **57**(2), 187-205.
- 涌井久司・山中勤 (2006) 安定同位体組成からみた那須扇状地扇央部における地下水渦養源とその地域性. 地下水学会誌, **48**(4), 263-277.
- 早稲田周・中井信之 (1983) 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成. 地球化学, **17** (2), 83-91.
- Asai, K., Satake, H. and Tsujimura, M. (2009) Isotopic approach to understanding the groundwater flow system within an andesitic stratovolcano in a temperate humid region: case study of Ontake volcano, central Japan. *Hydrological Processes*, **23**, 559-571.
- Badon-Ghyben, W. (1888-1889) Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam. Tijdschr. K. Inst. Ing., The Hague, 27p.
- Mizota, C. and Kusakabe, M. (1994) Spatial distribution of δD - $\delta^{18}O$ values of surface and shallow groundwaters from Japan, south Korea and east China, *GEOCHEMICAL JOURNAL*, **28**(5), 387-410.
- Clark I. and Fritz P. (1997) Environmental Isotopes in Hydrogeology. CRC Press: New York; 328. Chapman TG. Estimating the frequency.
- Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702-1703.
- Drever, J.I. (1988) The Geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall, New Jersey, 437p.
- Eissa, M. A. (2018) Application of multi-Isotopes and geochemical modeling for delineating recharge and salinization sources in Dahab Basin Aquifers (South Sinai, Egypt). *Hydrology*, 5, 41.
- Ferguson, G. and Gleeson, T. (2012) Vulnerability of coastal aquifers to groundwater use and climate change. *Nature Climate Change*, **2**, 342-345.
- Freeze, R.A. and Cherry, J. A. (1978) Groundwater. Prentice Hall, New Jersey, 604p.
- Gupta, P., Noone, D., Galewsky, J., Sweeney, C. and Vaughn, B. H. (2009) Demonstration of high-precision continuous measurements of water vapor isotopologues in laboratory and remote field deployments using wavelength-scanned cavity ring-down spectroscopy (WS-CRDS) technology. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, **23**, 2534-2542.
- Hayashi, T., Tokunaga, T., Aichi, M., Shimada, J. and Taniguchi, M. (2009) Effects of human activities and urbanization on groundwater environments: An example from the aquifer system of Tokyo and

- the surrounding area. *Science of the Total Environment*, **407**, 3165-3172.
- Herzberg, A. (1901) Die Wasserversorgung einiger Nordseebader, J. Gasbeleucht. *Wasserversorg.* **44**, 815-819, 842-844.
- Holding, S.; Allen, D. M.; Foster, S.; Hsieh, A.; Larocque, I.; Klassen, J.; Van Pelt, S. C. (2016) Groundwater vulnerability on small islands. *Nature Climate Change*, **6**, 1100-1103.
- IAEA (2006) Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology: A Guidebook, STI/PUB/:1238p.
- IAEA/WMO (2023) Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database, Accessible, <https://nucleus.iaea.org/wiser> (Accessed on 25th July 2023)
- Jasechko, S. (2019) Global isotope hydrogeology – Review. *Review of Geophysics*, **57**, 835-965.
- Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R.G., Fallatah, O. and Kirchner, J.W. (2024) Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. *Nature*, **625**, 715–721.
- Ju, Y., Massoudieh, A., Green, C. T., Lee, K. K. and Kaown, D. (2021) Complexity of groundwater age mixing near a seawater intrusion zone based on multiple tracers and Bayesian inference. *Science of the Total Environment*, **753**, 141994.
- Kagabu, M., Shimada, J., Nakamura, T., Delinom, R. and Taniguchi, M. (2013) Groundwater age rejuvenation caused by excessive urban pumping in Jakarta area, Indonesia. *Hydrological Processes*, **27**, 2591-2604.
- Kerstel, E. R. Th; van Trigt, R.; Dam, N.; Reuss, J.; Meijer, H. A. J. (1999) Simultaneous determination of the $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$, and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope abundance ratios in water by means of laser spectrometry. *Analytical Chemistry*, **71**, 5297-5303.
- Kusano, Y., Tokunaga, T. Asai, K., Asai, K., Takahashi, H. A., Morikawa, N. and Yasuhara, M. (2014) Occurrence of old groundwater in a volcanic island on a continental shelf; an example from Nakano-shima Island, Oki-Dozen, Japan. *Journal of Hydrology*, **511**, 295-309.
- Matsubaya, O., Sakai, H., Kusachi, I. and Satake, H. (1973) Hydrogen and oxygen isotopic ratios and major element chemistry of Japanese thermal water system. *Geochemical Journal*, **7**, 123-151.
- Onodera, S.; Saito, M.; Hayashi, M.; Sawano, M. (2007) Nutrient dynamics with groundwater-seawater interactions in a beach slope of a steep island, western Japan. *IAHS Publication*, **312**, 150-158.
- Onodera, S., Saito, M., Sawano, M., Hosono, T., Taniguchi, M., Shimada, J., Umezawa, Y., Lubis, R. F., Buapeng, S. and Delinom, R. (2009) Effects of intensive urbanization on the intrusion of shallow groundwater into deep groundwater: Examples from Bangkok and Jakarta. *Science of the*

- Total Environment*, **407**, 3209–3217.
- Onodera, S. (2011) Subsurface pollution in Asian megacities. In, M. Taniguchi (Ed.), *Groundwater and Subsurface Environment*, Springer, 159-184.
- Orlanski, I. (1975) A regional subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of American Met. Soc.*, **56**, 527-530.
- Picarro, Inc. (2023) L2130-I ANALYZER DATASHEET. https://www.picarro.com/support/library/documents/l2130i_analyzer_datasheet# (Accessed on 26th January 2023).
- Robinson, C., Li, L. and Barry, D. A. (2007) Effect of tidal forcing on a subterranean estuary. *Advances in Water Resources*, **30**(4), 851–865.
- Saito, M., Onodera, S., Okada, K., Sawano, M., Miyaoka, K., Chen, J., Taniguchi, M., Liu, G. and Fukushima, Y. (2009) Evaluation of denitrification potential in coastal groundwater using simple in situ injection experiment. *HYDROLOGICAL CHANGES AND WATERSHEDMANAGEMENT*, 653-658.
- Shimada, J., Inoue, D., Satoh, S., Takamoto, N., Sueda, T., Hase, Y., Iwagami, S., Tsujimura, M., Ishitobi, T. and Taniguchi, M. (2007) Basin-wide groundwater flow study in a volcanic low permeability bedrock aquifer with coastal submarine groundwater discharge. *IAHS Publication*, **312**, 75-85.
- Shimada, J. (2011) Chemical and physical evidences in the groundwater aquifer caused by over-pumping of groundwater and their countermeasures in the major Asian coastal cities. In, M. Taniguchi (Ed.), *Groundwater and Subsurface Environment*, Springer, 289-309.
- Shintani, T., Masuda, H., Nemoto, T., Ikawa, R., Marui, A., Tanimizu, M. and Ishikawa, T. (2022) Three-dimensional structure and sources of groundwater masses beneath the Osaka Plain, Southwest Japan. *Journal of Hydrology Regional Studies*, **43**, 101193.
- Simmers, I. (Ed.) (1988) Estimation of Natural Groundwater Recharge (Nato Science Series C). Springer, 528p.
- Taniguchi, M. (Ed.) (2011) *Groundwater and Subsurface Environment*. Springer, 310p.
- Tokunaga, T., Shimada, J., Kimura, Y., Inoue, D., Mogi, K. and Asai, K. (2011) A multiple-isotope ($\delta^{37}\text{Cl}$, ^{14}C , ^3H) approach to reveal the coastal hydrogeological system and its temporal changes in western Kyushu, Japan. *Hydrogeology Journal*, **19**(1), 249-258.
- Tosaki, Y., Morikawa, N., Kazahaya, K., Tsukamoto, H., Togo, Y.S., Sato, T., Takahashi, A., Takahashi, M. and Inamura, A. (2017) Deep incursion of seawater into the Hiroshima Granites during the Holocene transgression: Evidence from ^{36}Cl age of saline groundwater in the Hiroshima area, Japan, *GEOCHEMICAL JOURNAL*, **51**(3), 263-275.
- Toth, J. (1963) A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Jour Geophys. Res.*, **68**, 4795-4812.
- Toth, J. (1995) Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeol. Jour.*, **3**(4), 4-

16.

- Tsujimura, M. and Tanaka, T. (1998) Evaluation of evaporation rate from forested soil surface using stable isotopic composition of soil water in a headwater basin. *Hydrological Processes*, **12**, 2093-2103.
- UNESCO-IHP and UNEP (2016) Transboundary aquifers and groundwater systems of small island developing states: Status and trends. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya, 172p.
- United Nations (2021) Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Available online: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld> (Accessed on 1st December 2021)
- Yamanaka, T., Mikita, M., Lorphensri, O., Shimada, J., Kagabu, M., Ikawa, R., Nakamura, T. and Tsujimura, M. (2011) Anthropogenic changes in a confined groundwater flow system in the Bangkok Basin, Thailand, part II: how much water has been renewed? *Hydrological Process*, **25**, 2734-2741.
- Xin, P., Robinson, C., Li, L., Barry, D. A. and Bakhtyar, R. (2010) Effects of wave forcing on a subterranean estuary. *Water Resources Research*, **46**, W12505.

学位論文関係論文

- 友澤裕介・小野寺真一・齋藤光代・竹内徹・北岡豪一（2021）都市化の影響を受けた沿岸沖積平野の地下水環境に及ぼす非定常な涵養機構の影響. 日本水文科学会誌, **51**(2), 1–17.
- Tomozawa, Y., Onodera, S. and Saito, M. (2019) Estimation of groundwater recharge and salinization in a coastal alluvial plain and Osaka megacity, Japan using $\delta^{18}\text{O}$, δD , and Cl^- . *International Journal of GEOMATE*, **16**, 153–158. (Nature 論文 (Jasechko et al., 2024) にて被引用)
- Tomozawa, Y., Onodera, S. and Saito, M. and Asai, K. (2023) Groundwater Dynamics near the Saltwater–Freshwater Interface in an Island of Seto Inland Sea. *Water* **2023**, **15**(7), 1416.

参考論文

- 友澤裕介・小野寺真一・齋藤光代・伊藤浩子（2017）大阪沿岸地下水における水素・酸素安定同位体比と塩化物イオン濃度の分布特性. Kansai Geo-Symposium 2017 論文集.
- 小野寺真一・清水裕太・齋藤光代・友澤裕介・王崑陽・伊藤浩子（2019）都市化にともなう地下水涵養量の変化と下水道老衰の地下水水質に及ぼす影響. Kansai Geo-Symposium 2019 論文集.
- 山本民次・中西夏希・竹田一彦・友澤裕介（2017）大黒神島および周防大島沿岸における海底湧水による物質負荷. 日本水産学会誌, **83**(3), 385-391.
- Kimbi, SB., Onodera, S., Nozaki, S., Tomozawa, Y., Wang, K., Rusydi, A. and Saito, M. (2021) Impact of citrus agriculture on the quality of water resource in a small steep island, Seto Inland Sea, Japan, *International Journal of GEOMATE*, **20**, 109-114.
- Kimbi, SB., Onodera, S., Ishida, T., Saito, M., Tamura, M., Tomozawa, Y. and Nagasaka, I. (2022) Nitrate Contamination in Groundwater: Evaluating the Effects of Demographic Aging and Depopulation in an Island with Intensive Citrus Cultivation. *Water* **2022**, **14**(14), 2277.
- Nozaki, S., Onodera, S., Tomozawa, Y. and Saito, M. (2021) Spatial distributions in groundwater discharge on various tidal flats in a small and steep island, Western Japan, *International Journal of GEOMATE*, **20**, 66-71.