

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：82111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24780238

研究課題名(和文) 淡水レンズが存在する石灰岩帯水層の不均一性評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of evaluation techniques for heterogeneity of carbonate aquifers where freshwater lenses occur

研究代表者

吉本 周平 (Yoshimoto, Shuhei)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究所資源循環工学研究領域・主任研究員

研究者番号：10435935

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：不均質な炭酸塩岩帯水層に淡水レンズが存在する南西諸島の多良間島とマーシャル諸島共和国のマジュロ環礁を対象として、地下水中の主要イオン濃度、六フッ化硫黄、フロン類、硝酸イオンの窒素酸素安定同位体比、ラドン濃度を指標として、淡水レンズ内の地下水流動と物質輸送の状況を検討した。多良間島の淡水レンズの地下水は、島の周縁部の浅層で相対的に最近の年代に涵養されたといえるものの、複数の(あるいは連続する)年代に涵養された地下水の混合であることが推察された。一方、マジュロ環礁ローラ島では、地下水面に到達した浸透水は淡水レンズ全体には混合せずに、比較的表層を流動していることが推察された。

研究成果の概要(英文)：Geochemical indicators such as major ions, sulfur hexafluoride, chlorofluorocarbons, nitrogen/oxygen isotopes in nitrate, and radon were applied to understand situation of groundwater flow and solute movement in heterogeneous carbonate aquifers which have freshwater lenses. In the Ryukyu Limestone aquifer of Tarama Island, Okinawa, the groundwater was thought to be composed of mixed water which had been recharged in multiple (or continuous) ages, although the shallow groundwater in the coastal areas would have been recharged in relatively recent time. On the other hand, in Laura Island of Majuro Atoll, the recharged water was estimated to flow in the surface of the freshwater lens, without mixing with the deeper groundwater.

研究分野：地下水学

キーワード：地下水 小島嶼 気候変動 環境同位体 硝酸性窒素 炭酸塩岩帯水層 六フッ化硫黄 涵養年代推定

### 1. 研究開始当初の背景

淡水レンズは、島や半島の帯水層中で海水の上にレンズ状に浮いている淡水の地下水資源である。日本では、南西諸島の多良間島や南北大東島などでみられる。これらの島々では、特に雨が少ない時期において、生活用水や農業用水を淡水レンズ資源に依存している。

淡水レンズは低平な島々に分布しているが、これらは気候変動などの自然影響や過剰揚水、地表面での人間活動による水質汚染などの人為的影響を受けやすく、水資源として脆弱である (White and Falkland, 2010)。このため、淡水レンズ資源を持続的に利用するためには、量・質両方の観点から将来の変動を予測した上で保全対策を構築することが重要である。

淡水レンズの水資源量および水質の将来変動を適切に予測するためには、地下水流動や物質輸送のメカニズムを理解した上で予測モデルを構築する必要がある。しかし、南西諸島において淡水レンズの帯水層となる琉球石灰岩は、洞窟やドリネが多く不均一であるため、従来の均一帯水層を仮定したモデルでは、将来の水資源・水質変動を適切に評価できない可能性がある。

淡水レンズの形状や賦存量に関する研究は数多く実施されている。例えば、塩分濃度分布の現地調査 (Plummer et al., 1976, など) や、電磁探査 (Anthony, 1992, など)、模型実験 (井内ら, 2000, など) などがある。また、分布型モデルでのシミュレーションによる塩淡境界変動の再現についても、広く検討されている。しかし、これらは均一な帯水層を仮定しており、洞窟やドリネなどを有する不均一な帯水層をモデル化した事例は見られない。

また、地球化学的な手法による淡水レンズの研究には、水素酸素安定同位体による検討事例 (Jones et al., 1997, など) や硝酸性窒素に関する報告 (Detay et al., 1989; Chen and Krol, 1997, など) があるが、これらは端緒的で、地下水流動や物質輸送の解明には至っておらず、石灰岩帯水層の不均一性を踏まえた検討はなされていない。

### 2. 研究の目的

空洞のない均一な帯水層では、淡水レンズは Ghyben-Herzberg の法則に従い、塩淡境界はくさび状を呈すると考えられる (図 1 (a))。しかし、実際には、南西諸島の琉球石灰岩には洞窟などの空洞が存在している。これらの空洞内における地下水の流動は、石灰岩の岩体 (マトリックス) 部分に比べて速い。このため、淡水レンズ内に空洞が存在すると、これらの空洞を海水が侵入して、均一な帯水層で推定される淡水資源量よりも実際には少なくなる可能性がある (図 1 (b))。また、このような淡水レンズ内では、溶質は空洞内の速い流動に伴って移動すると考えられる。

しかし、これまでの淡水レンズ変動の予測モデルは均一帯水層を仮定したものではなく、淡水レンズ帯水層の不均一性については実態も明らかになっていない。さらに、水質保全の観点からは淡水レンズ内における硝酸性窒素などの溶質の挙動を把握することが求められるが、これらに関する研究もまだ殆どみられない。このため、本研究では、溶存イオンや環境同位体などの測定による地球化学的手法によって、洞窟やドリネなどの空洞を有する不均一な石灰岩帯水層に存在する淡水レンズ内の地下水流動および物質輸送のメカニズムを解明することを目的とする。

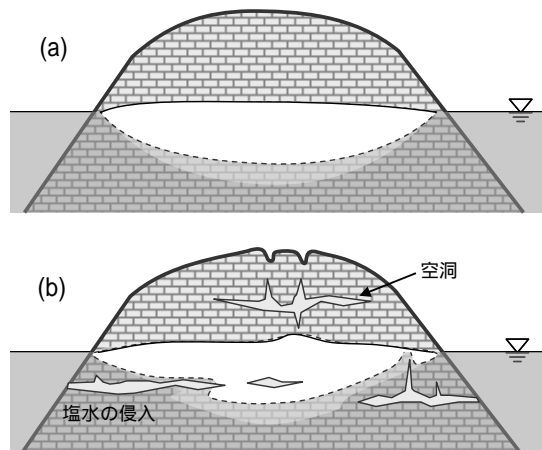


図 1 空洞のない帯水層(a)と空洞を有する帯水層(b)における淡水レンズ分布状況の模式図

### 3. 研究の方法

研究対象として、炭酸塩岩帯水層に淡水レンズが存在する地区である、南西諸島の多良間島と、マーシャル諸島共和国のマジュロ環礁を選定した。

多良間島は、宮古島と石垣島のほぼ中間に位置している。最高点は島の北部にある八重山遠見台 (標高 34.2 m) であるが、全体的には標高 10 m 前後ではほぼ平坦である。多良間島の表層は、島のほぼ全域が更新世の琉球石灰岩 (琉球層群) で覆われ、ドリネや洞窟などがみられる。琉球石灰岩は石灰藻球、サンゴ、有孔虫などを起源とし、層厚は 50-60 m である。琉球石灰岩の下位には砂岩・泥岩からなる多良間砂層が存在し、難透水性基盤を形成しているが、露頭は地表面にはみられない。淡水レンズは琉球石灰岩の帯水層中に形成されている。かんがい用水として利用可能な  $200 \text{ mS m}^{-1}$  以下の淡水の分布域の面積は約  $10 \text{ km}^2$  で、最も厚い部分は島の中心よりやや北西側に偏り、その厚さは約 7 m である。島の大部分は農地として利用されており、集落は北部に塊状に存在する。

マジュロ環礁は、マーシャル諸島共和国の首都であり、北緯  $7^\circ$  東経  $171^\circ$  の太平洋上

に位置する。淡水レンズは環礁の西端のローラ島にのみ存在している。ローラ島は海拔2m程度の低平な島で、地質は上位から表土層、完新世に形成された礁湖堆積物、更新世にカルサイト化を受けた石灰岩が分布する。礁湖堆積物層は、さらに上位と下位に区分することができ、下位のほうが上位よりも透水性が高い(Anthony et al., 1989)。ローラ島の淡水レンズについては、1998年の干ばつによって、取水施設の周辺で塩水遡上がもたらされた(Presley, 2005)。島内の農業形態は、ココヤシやパンダナスなどの実の採取、および豚や鶏の飼育が一般的であるが、島の一部で集約的な作物栽培と畜産が実施されている。

本研究では、これらの調査地区において地下水を採取し、淡水レンズ中の地下水流動状況を示す指標として有効であると思われる主要イオン濃度、六フッ化硫黄( $SF_6$ )、フロン類(CFCs)、硝酸イオンの窒素酸素安定同位体比、ラドン濃度を測定した。重炭酸( $HCO_3^-$ )は滴定法(pH4.8 酸消費量)で測定し、それ以外の主要イオン( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ )濃度はイオンクロマトグラフ装置によって測定した。六フッ化硫黄とフロン類の測定の具体的な手順は浅井・辻村(2010)に従った。硝酸イオンの窒素酸素安定同位体比は、脱窒菌法(Sigman et al., 2001; Casciotti et al., 2002)で前処理して $N_2O$ ガスに変換した後に濃縮して質量分析計で測定した。ラドン濃度の測定はトルエン抽出法(濱田ら, 1997)に従った。なお、採水時に現地で、電気伝導度、pH、水温、溶存酸素濃度、酸化還元電位を測定した。

#### 4. 研究成果

(1) 多良間島では、採水した試料の $SF_6$ の濃度は、中心部で低く、周縁部で高い傾向にある。また、同一の観測孔では、水面直下の $SF_6$ 濃度が相対的に高い(図2)。採水時の電気伝導度の変動から推定される孔内水の混合を考慮する必要があるが、これらの結果から周縁部の浅層の地下水は相対的に最近の年代に涵養されたものであるといえる。島の南北でこの傾向に顕著な差は見られない。

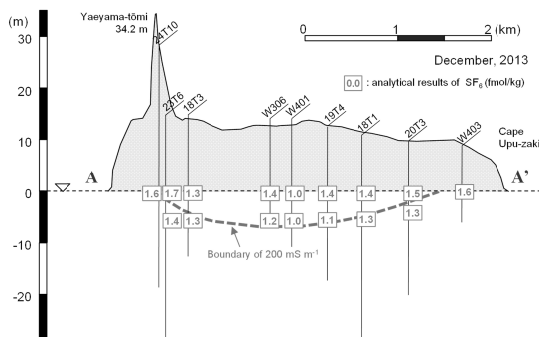


図2 多良間島の南北断面における地下水中の $SF_6$ 濃度の分布

北半球大気中の $SF_6$ 濃度と試料の大気換算濃度の比較(図3)から、浸透流をピストン流と仮定した場合のみかけの地下水涵養年代はおおよそ2000-2010年頃と算定される。試料中のCFC-12およびCFC-113の大気平衡濃度は、1990年頃からの北半球大気中のピーク濃度と同等もしくは小さく、微生物による分解の影響などを考慮すれば、 $SF_6$ 濃度から算定される涵養年代と矛盾しない。なお、CFC-11の濃度は北半球大気中のピーク濃度より大きく、何らかの人為的な汚染による影響を受けていると思われる。

硝酸イオンの窒素酸素安定同位体比は、透水性が比較的低いとされる島の北側で相対的に大きい(図4)。硝酸イオンの安定同位体比から推定される脱窒現象は、 $SF_6$ やCFCsの測定とともに、時空間的な地下水流動の状況の検討に用いられる事例もある(例えば、Böhlke and Denver, 1995)。一方で、帯水層中で脱窒が発生しているかについては、同位体組成の測定だけでなく、地上における施肥などの窒素負荷の発生量の整理や他の水質項目の測定結果を参照なども必要である。例えば、琉球石灰岩を帯水層とする沖縄県糸満市の米須地下ダムの貯留域では、地下水中の溶存酸素濃度は不均一な分布を示す。溶存酸素や溶存有機炭素の有無は脱窒場の形成に影響を与えることから、多良間島においてもこれらの水質項目について把握し、脱窒の有無や地下水流動に伴う挙動について、多角的に検証することが必要である。

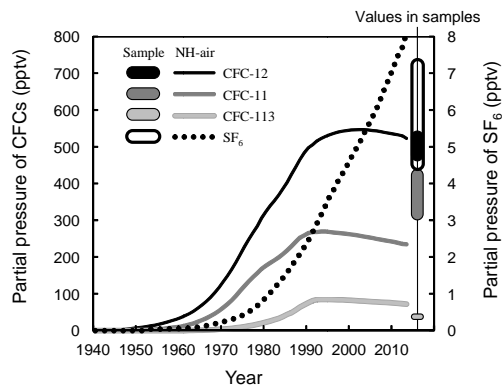


図3 北半球大気中の $SF_6$ およびCFCs濃度と、多良間島の試料の大気換算濃度

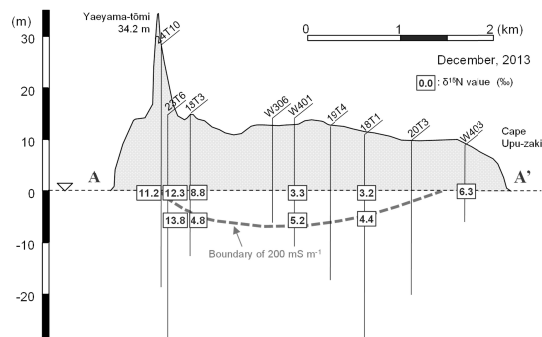


図4 多良間島の南北断面における地下水中の硝酸イオンの $^{15}N$ 値の分布

淡水レンズとして存在している地下水は、単一の年代に涵養されピストン流によって浸透した地下水ではなく、複数の（あるいは連続する）年代に涵養された降水と海水の混合によるものと思われる。海水の寄与については、トリリニアダイアグラム（図5）やNa<sup>+</sup>濃度と電気伝導度の関係などから確認できる。年代の異なる涵養水の混合については、SF<sub>6</sub>濃度とCFCs濃度の混合モデルによって検討できる場合がある（例えば、浅井・辻村，2010）。そのためには、任意の深度で採水するための遮水パッカーの適用などによる涵養年代推定の精度向上が有効であると思われる。

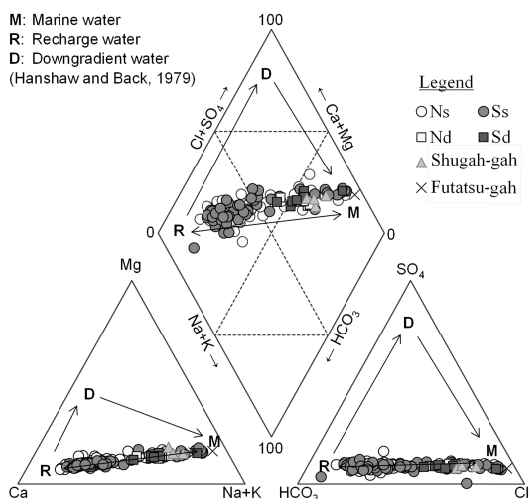


図5 多良間島の地下水試料のトリリニアダイアグラム。Nsは島の北側の試料のうち、井戸と観測孔の水面下1mで採取されたもの、Ndは観測孔の塩淡水境界付近で採取されたものを表す。同様に、SsとSdは、島の南側の試料のうち、それぞれ、水面下1mのものと塩淡水境界付近のものである

また、多良間島の表層地下水中のラドン濃度は、島の中心部および周縁部の一部で比較的高く不均一である。洞窟中でラドン濃度が低下するなど地下水と岩石との接触面積の違いや、琉球石灰岩の成因となる生物によってウランの蓄積量が異なることが、この要因として考えられる。帯水層を構成する琉球石灰岩の岩相や化石相、ならびに洞窟分布などの水理地質性状も考慮しつつ、他の水質項目の結果と併せて検討することで、地下水流動状況の解明につながるものと考えられる。

(2) マジュロ環礁ローラ島の淡水レンズについて、表層の地下水における硝酸性窒素濃度は、集約的な作物栽培や畜産が行われている区画の周辺で比較的高濃度であり、それ以外でもスポット的な分布が見られる（図6）。また、比較的浅層の地下水で硝酸性窒素が検出されることから、地表の窒素負荷が溶解した浸透水は、地下水面に到達すると淡水レンズ全体には混合せずに、比較的表層を流動していることが推察される。

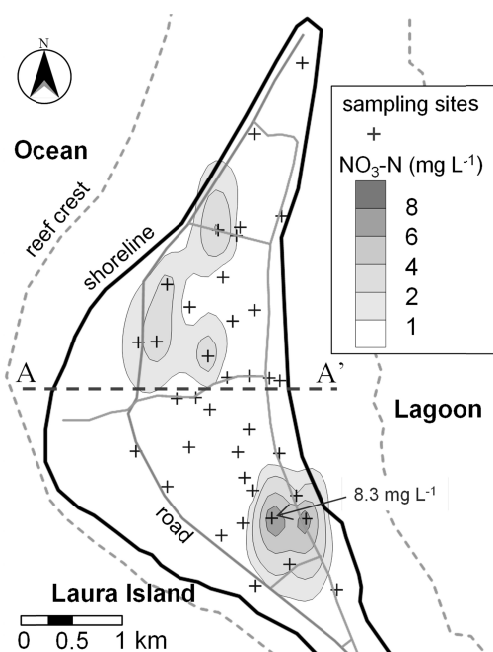


図6 マジュロ環礁ローラ島の表層地下水の硝酸性窒素濃度の分布

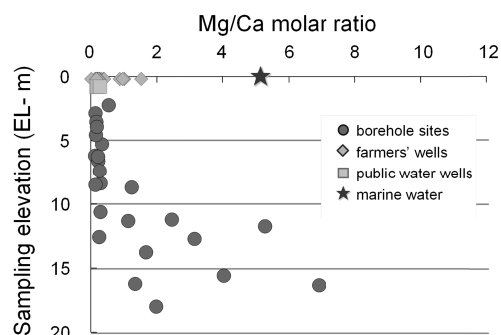


図7 マジュロ環礁ローラ島の地下水のMg/Ca比と採水深度の関係。観測孔は単一深度を対象とした打ち込み井戸、農家井戸は水深1m未満の浅井戸、水道水源井は地下水水面下0.6-1.0mにある横孔によって集水する構造のものである

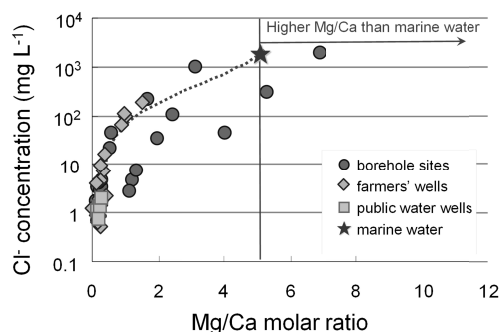


図8 マジュロ環礁ローラ島の地下水のMg/Ca比とCl<sup>-</sup>濃度の関係。点線は淡水と海水の混合線

地下水中のMg/Ca比は、炭酸塩岩帯水層における地下水の滞留時間の指標として言及されることがある（例えば、Edmunds et al., 1987）。ローラ島の地下水については、比較的深層においてMg/Caが高く（図7）、淡水と海水の混合だけでは説明できないMg/Ca比

の増加がみられる(図8)。よって、淡水レンズの深層の地下水は流動性が低く、長期間に亘って滞留している可能性がある。

(3) 多良間島の淡水レンズの地下水は、島の周縁部の浅層で相対的に最近の年代に涵養されたといえるものの、複数の(あるいは連続する)年代に涵養された地下水の混合であることが推察された。一方、マジロ環礁ローラ島では、地下水面に到達した浸透水は淡水レンズ全体には混合せずに、比較的表層を流動していることが推察された。

このように、炭酸塩岩帯水層の淡水レンズにおける地下水の挙動は、帯水層の水理地質性状によって異なるものと考えられる。本研究では、地下水中の主要イオン濃度、六フッ化硫黄、フロン類、硝酸イオンの窒素酸素安定同位体比、ラドン濃度を測定して、地下水流動状況を検討した。これらを地下水流動状況の指標として利用することで、不均質な炭酸塩岩帯水層における淡水レンズ内の地下水流動および物質輸送のメカニズムを明らかにすることができるものと考えられる。

#### <引用文献>

- Anthony SS, Peterson FL, Mackenzie FT, Hamlin SN, Geohydrology of the Laura fresh-water lens, Majuro atoll: A hydrogeochemical approach, Geol Soc Am Bull 101, 1066-1075, 1989
- Anthony SS, Electromagnetic methods for mapping freshwater lenses on Micronesian atoll islands, J Hydrol 137, 99-111, 1992
- 浅井 和由, 辻村 真貴, トレーサーを用いた若い地下水の年代推定法 火山地域の湧水へのCFCs年代推定法の適用, 日本水文科学会誌 39(3), 67-78, 2010
- Böhlke JK, Denver JM, Combined use of groundwater dating, chemical, and isotopic analyses to resolve the history and fate of nitrate contamination in two agricultural watersheds, Atlantic coastal Plain, Maryland, Water Resour Res 31(9), 2319-2339, 1995
- Casciotti KL, Sigman DM, Hastings MG, Böhlke JK, Hilker A, Measurement of the oxygen isotopic composition of nitrate in seawater and freshwater using the denitrifier method, Anal Chem 74, 4905-4912, 2002
- Chen D, Krol A, Hydrogeology of Heron Island, Great Barrier Reef, Australia, In: Vacher HL, Quinn T (eds) Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, 299-326, 1997
- Detay M, Alessandrello E, Come P, Groom I, Groundwater contamination and pollution in micronesia. J Hydrol 112, 149-170, 1989

- Edmunds WM, Cook JM, Darling WG, Kinniburgh DG, Miles DL, Bath AH, Morgan-Jones M, Andrews JN, Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, U.K.: a basis for groundwater quality management, Appl Geochem 2(3), 251-274, 1987
- 濱田 浩正, 今泉 眞之, 小前 隆美, ラドン濃度を指標とした地下水調査・解析法, 農業工学研究所報告 36, 1997, 17-50
- Hanshaw BB, Back W, Major geochemical processes in the evolution of carbonate-aquifer systems, J Hydrol 43, 287-312, 1979
- 井内 国光, 坂本 光, 柿沼 忠男, 砂モデル実験による海岸及び島しょ地下水の定常挙動, 陸水学雑誌 61, 1-10, 2000
- Jones B, Ng KC, Hunter IG, Geology and hydrogeology of the Cayman Islands, In: Vacher HL, Quinn T (eds) Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, 299-326, 1997
- Presley, T.K., Effects of the 1998 drought on the freshwater lens in the Laura area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands. U.S. Geol Surv Sci Inv Rep 2005-5098, 40 p., 2005
- Sigman D.M., K.L. Casciotti, M. Andreani, C. Barford, M. Galanter, J.K. Böhlke, A bacterial method for the nitrogen isotopic analysis of nitrate in seawater and freshwater, Anal Chem, 73, 4145-4153, 2011
- White, I., T. Falkland, Management of freshwater lenses on small Pacific islands, Hydrogeol J 18, 227-246, 2010

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表](計5件)

- 吉本 周平, 土原 健雄, 白旗 克志, 石田 聡, 塩水侵入阻止型地下ダム貯留域における残留塩水塊と溶存酸素濃度の分布の状況, 平成 27 年度農業農村工学会大会講演会, 2015 年 9 月 1-3 日, 岡山大学津島キャンパス(岡山市)
- 吉本 周平, 土原 健雄, 白旗 克志, 石田 聡, 多良間島の琉球石灰岩帯水層における淡水レンズ地下水中のラドン濃度の分布, 第 52 回アイソトープ・放射線研究発表会, 2015 年 7 月 8-10 日, 東京大学本郷キャンパス(東京都)
- 吉本 周平, 浅井 和由, 土原 健雄, 白旗 克志, 石田 聡, 沖縄県多良間島の淡水レンズにおける地下水中の六フッ化硫黄および溶存イオンの分布状況, 日本地下水学会 2014 年秋季講演会, 2014 年 11 月 7 日, くまもと県民交流館パレア(熊本市)
- Yoshimoto S, Ishida S, Koda K, Kobayashi T, Chemical composition of groundwater in the Laura freshwater lens, Majuro

Atoll, Republic of the Marshall Islands,  
40 Congress of International Association  
of Hydrogeologists, 2013年9月17  
日, Perth (Australia)

吉本 周平,石田 聡,幸田 和久,小林 勤,  
環礁島淡水レンズにおける水質分布と地  
下水流動機構の関係性の検討 マーシャル  
諸島共和国マジュロ環礁ローラ島を対  
象として,日本地下水学会 2013 年春季  
講演会,2013年5月18日,千葉大学松戸  
キャンパス(松戸市)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

吉本 周平 (YOSHIMOTO, Shuhei)

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究  
機構・農村工学研究所資源循環工学研究領  
域・主任研究員

研究者番号：10435935