

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：82111

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26660194

研究課題名(和文) 淡水レンズ地下水の流動マントル構造の高密度水温観測による解明

研究課題名(英文) Elucidation of mantle structure of groundwater flow in freshwater lens by dense water-temperature observations

研究代表者

白旗 克志 (Shirahata, Katsushi)

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門地域資源工学研究領域・主任研究員

研究者番号：10648281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：淡水レンズ地下水が、流動が遅く長く滞留している中心部分とそれを取り囲む流動が速い若い地下水部分からなる内部構造をもつことを、実測によって明らかにした。典型的淡水レンズがある島嶼において、地下水面付近の高密度温度観測、淡水レンズ下部の多深度電気伝導度観測、淡水レンズ側方外縁部の洞窟内での流向流速観測を行い、(1)大きな降雨時の散発的な地下浸透・淡水レンズへの付加により地下水面下に温度が異なる若い地下水からなる層を生じさせること、(2)降雨の付加のほか潮汐等の影響によって淡水レンズ下面位置が上下動すること、(3)側方外縁部においても潮汐の影響により水平方向に往復する流動が生じることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study clarified by field observations that a freshwater lens is composed of two part, a core where the groundwater is stable and old, and a mantle where the flow is fast and the groundwater is young. On an island where a typical freshwater lens exists, three observations were made: dense temperature observations near the groundwater surface, multi-depth EC observations near the lower surface adjacent to blackish water, and observations using current meter in groundwater cropping out in a cave at the horizontal margin of the freshwater lens. They revealed that (1) large rainfall events occasionally produce a layer of groundwater just added to the freshwater lens with lower or higher temperature than the original groundwater part, (2) the lower surface of the freshwater lens fluctuates not only affected by the addition of rainwater, but also significantly by tides and others, and (3) at the horizontal margin the water flows periodically seaward and landward affected by tide.

研究分野：地下水資源学

キーワード：地下水 淡水レンズ 温度観測 降雨応答 潮汐応答

### 1. 研究開始当初の背景

空隙が多い地層からなる島では、海岸線を越えて地層中まで連続する海水面上に、地表から浸透した雨水が、内陸部で厚く海岸部では薄いレンズ形状となって浮き、淡水レンズと呼ばれる地下水塊を形成する(図1)。

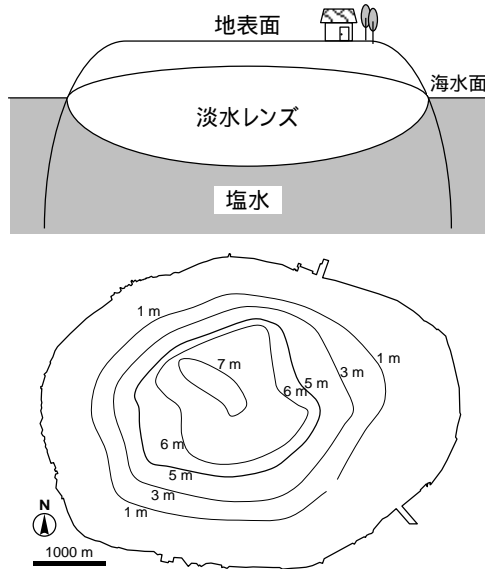


図1 淡水レンズ模式断面図および実測による淡水レンズ厚さ平面分布図の例(白旗・長田, 2009)

淡水レンズ地下水に関する調査・研究は、国内の南西諸島、海外では太平洋諸島等においてその利用可能な水資源量に関するものが多くある。近年は気候変動に関連し、太平洋諸島などの淡水レンズに水源を依存している島々で、海面上昇によって陸地面積が減少することでかん養量が減って淡水レンズが縮小し、水資源が減少すると予想されており、淡水レンズ地下水への関心は高まっている。

白旗(2010)は、沖縄県多良間島の淡水レンズに関する調査の中で、多数回の現地測定による淡水レンズ規模の推移から、淡水レンズの水量が直前1年の年降水量と相関をもつことを示した。一方石田ら(2013)は、淡水レンズの厚さを経時連続的に観測する手法を開発する中で、豪雨の直後に淡水レンズが厚くなり、その後2ヶ月程度で厚さが次第に減少していく観測例を示した。これらの結果から、淡水レンズの水量は、長期的には年降水量に相関している一方で、短期間の降水に対しても短期間で増減する応答を示していることが明らかになった。このことは、淡水レンズの中に長期間留まる水と、淡水レンズに付加してから短期間で淡水レンズを通過し流出する水の両方があることを想起させる。

### 2. 研究の目的

本研究は、淡水レンズが、流動が遅く淡水レンズ内に長く留まっている中心部分と、その外縁部を取り囲むような流動が速いあるいは地下水に付加してからの時間が短い周

辺部分からなる(流動のマントル構造をもつ)ことを、現場での高密度水温観測等の実測によって明らかにすることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、淡水レンズ内の外縁に近い部分に流動が速いマントル部があると想定し、現地においてこれを感知できる観測手法を用いた。具体的には、典型的な淡水レンズが存在する沖縄県多良間島を対象とし、行政機関により設置されている地下水観測孔および島の海岸近くに位置する洞窟において、以下の観測・測定を行った。

#### (1) 淡水レンズ上部における温度観測

淡水レンズの分布範囲内(対象地域内で淡水厚さが5m前後の位置、なお淡水は測定された電気伝導度が200mS/m以下の水として定義)に設置された観測孔において、地下水面の直上から水中の淡水レンズ上半部の範囲の深度に10cmから20cm間隔で小型の自記水温計を設置し(図2)、10分間隔で温度を自動記録した。なお水位についても自記水位計を設置して同様に観測した。

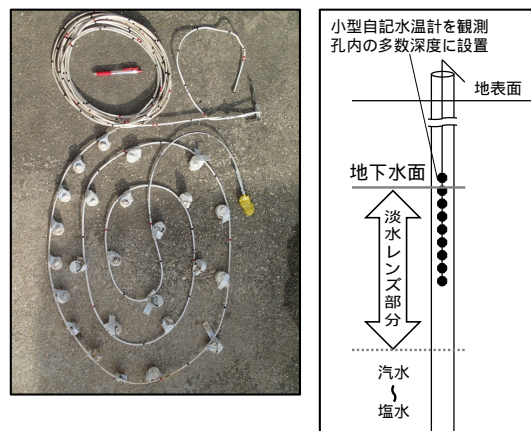


図2 用いた小型自記温度計と高密度水温観測のイメージ

一般に地下水は降雨や河川等の地表水に比べて温度変化が少ないことが知られている。逆にいえば地下水に比べ降雨・地表水は温度が幅広く変化するため、降雨と地下水が同じ温度であることはほとんどない。このため、地表から降雨が浸透し地下水に付加されれば、温度変化によって新たに付加した部分の深度範囲を捉えられると見込んだ。

年に2・3回現地において観測データを回収し、同島内のアメダス降水量データとともに整理した。

#### (2) 淡水レンズ下部における電気伝導度観測

淡水レンズの下側外縁部、すなわち汽水域との境界付近の多数深度に自記電気伝導度計を設置し、淡水レンズの下面境界(電気伝導度200mS/mの面)の上下移動を観測した。淡水レンズの下部では、深い位置ほど塩水に近くなるため電気伝導度が大きい。し

たがって淡水レンズ下面境界が下方に移動すれば、一定深度で観測している電気伝導度は小さくなり、下面境界が上昇すれば、一定深度の電気伝導度は大きくなる。淡水レンズの厚さは地下水面から200mS/m面までの距離であるから、多深度電気伝導度観測の結果を地下水位の観測結果とともに分析することで、降水時の淡水レンズ厚さの変化を捉えることができる。降雨が地表から浸透し地下水に付加すれば、淡水レンズの厚さが大きくなることが期待される。

### (3) 淡水レンズ側方外縁部における流向等測定

対象地域の淡水レンズ分布範囲の西側、海岸との間にある、洞窟内に水面が露出している地下水(図3)について、数日間自記流向流速計を設置し、地下水の水平方向の流れを観測した。

海岸に近い淡水レンズ側方外縁部では、潮汐による海水位の周期変動が内陸に向かって減衰しながら伝播するため(図4)、満潮時には海水位が地下水位より高く、干潮時には逆になる。このため、海岸に近い外縁部の地下水は水平方向に繰返し往復して流動すると想定され、このことによって淡水レンズの側方外縁部に水平方向の速い流れが生じると考えられる。この流向流速観測はその状況を捉えることを目的とした。



図3 流向流速観測を行った洞窟内の状況

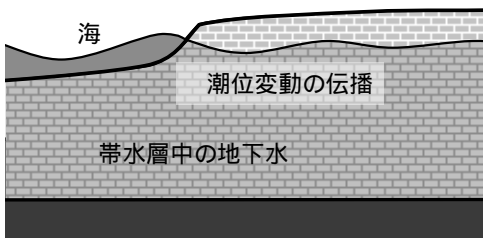


図4 潮位変動の地下水位への伝播(模式断面図)

## 4. 研究成果

### (1) 淡水レンズ水面付近の温度変化

本研究課題期間中の観測(～2016年11月)で、降水に伴う地下水面直下の温度変化は10回認められた。このうち降水に伴い温度が低下した例が7、上昇した例が3であった：

- ・2014/5/7：低下
- ・2014/5/10：低下

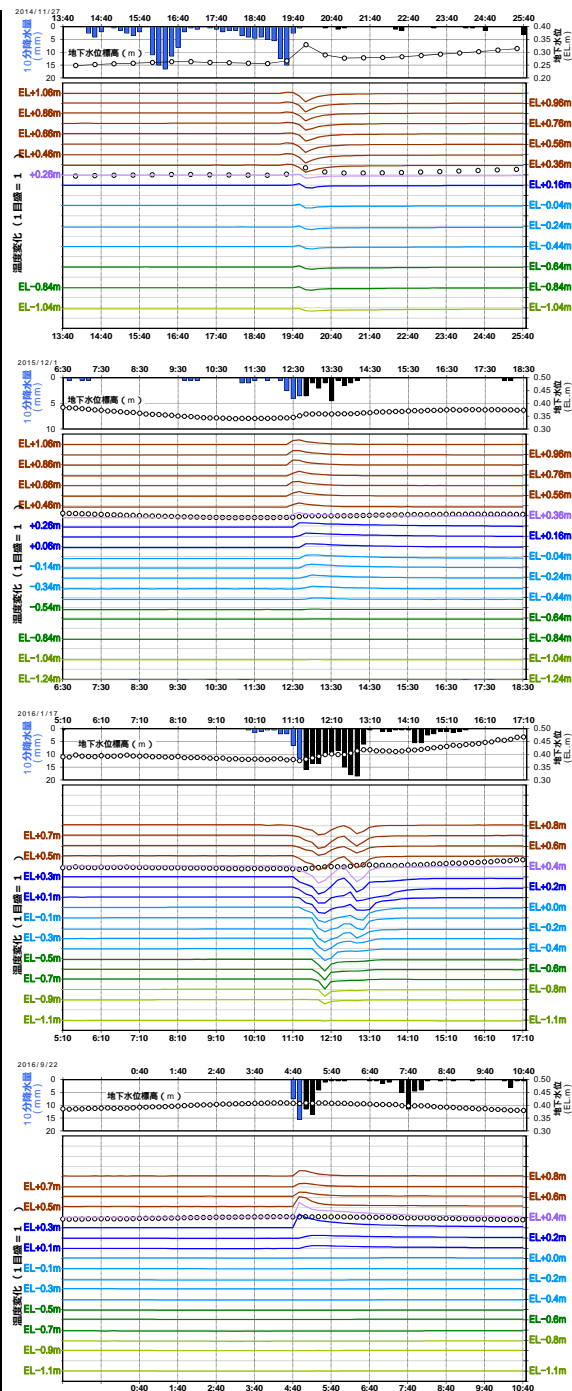


図5 降水に伴う温度変化の事例(上から順に2014/11/27の温度低下、2015/12/1の温度上昇、2016/1/17の温度低下、2016/9/22の温度上昇)

- ・2014/5/23：低下
- ・2014/11/27：低下
- ・2015/5/22：低下
- ・2015/12/1：上昇
- ・2015/12/6：上昇
- ・2016/1/17：低下
- ・2016/4/11：低下
- ・2016/9/22：上昇

なお当然ながらこの観測期間中に上記以外にも大小の降水が多数回あったが、その多くでは淡水レンズへの浸透・付加が認められなかったことになる。

図5に、温度が低下した2事例と上昇した2事例の、水面付近の深度別の温度の時間変化を示す。あわせて対象地域内のアメダスによる10分間降水量の推移(棒グラフ)また地下水位の変化(白丸)も示している。

このような観測の結果、以下のことが確認され、また明らかとなった。

地下水面付近の温度観測によって、降雨が浸透し淡水レンズに付加したタイミングを把握することは可能である。

必ずしも全ての降水時に降雨が地下浸透し地下水に付加するわけではなく、一部の程度降水量が多い時のみに地下水に付加する。

浸透・付加した降雨と地下水の温度の上下関係は、季節等の時期によらず、同じような時期であっても温度上昇・低下のいずれも見られる（例えばほぼ同じ季節であっても2014/11/27は低下・2015/12/1は上昇）。

1回の降水イベントの中でみると、降水が始まってすぐに地下水への付加が起こるとは限らず、遅れて付加することが多い。例えば図5最上段の例では、水位上昇と温度変化が認められた図の中央付近の降水の3時間前にも比較的大きな降水があったが、その際には水位上昇も温度変化も認められず、地下水に到達していないと考えられる。このことは地面から地中に浸透した降雨が地下水面より上の不飽和帯中に、ある程度の時間留まることを示している。

降水量の大きさと、温度変化の大きさ・温度変化が認められる深度区間の長さとの相関関係は不明確であった。特に、1回の降水イベントの累積降水量と、その際に温度変化が認められた深度区間の長さを比較した結果、多くの場合に降水量から見込まれる最大の温度変化深度を超えて深部まで温度変化が認められた。これは、特に地下水より温度が低い降雨が浸透した場合には、降雨の比重が地下水より大きく、空洞である観測孔内に入るとその冷水塊が最深部まで沈降する現象を捉えていた可能性があり、自然の帯水層中の状況とは異なると考えられる。

まとめると、水面付近の多深度温度観測によって、付加したばかりの若い地下水が淡水レンズの水面付近に生じることは確認できた。しかしその厚さ・大きさを定量的に把握し降水量との相関関係を明らかにすることは、空洞である地下水観測孔内での観測では難しいことが分かった。

## (2) 淡水レンズ下部境界の上下移動と淡水厚さの変動

図6に、淡水レンズ下部における多深度の電気伝導度観測結果の例を、同地点で観測した地下水位等とともに示す。そのほか対象とする島嶼の周囲の潮位とほぼ等しいと考えられる潮位、観測した気圧、また別途入手した降水量データもあわせて示している。

観測により、以下のことが確認され、また明らかになった。

淡水レンズ下部の一定深度の電気伝導度連続観測データには、潮汐の影響による約一日に2回の上下変動、気圧変化に伴う変動が明瞭である。前項に記したような一部の降水

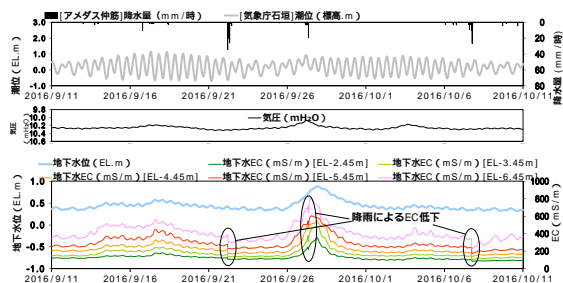


図6 降水量・潮位・気圧・地下水位・多深度電気伝導度観測結果の例（2016/9/11～10/11）

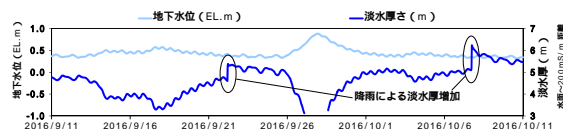


図7 多深度電気伝導度観測データと地下水位観測データから推定した淡水レンズ厚変化の例（2016/9/11～10/11）

時にはその降雨の浸透・付加による電気伝導度の低下が確かに認められる。一方で潮汐および気圧の影響による変動のほうが普遍的であり、このことは降雨の浸透の影響を分りにくくしている。

多深度電気伝導度観測結果と地下水位観測結果から推定された淡水レンズ厚さの時間変化（図7）についても、潮汐と気圧の影響が明瞭に認められる。このため降雨の浸透・付加の影響を定量的に分析する場合には、何らかの方法で異なる要因による影響を分離する必要があると考えられる。

淡水レンズ下部の多数深度の電気伝導度観測結果を地下水位観測結果と組み合わせることにより、淡水レンズ厚さの時間変化を連続的に把握することは可能であり、淡水レンズ下面境界が降水時に下方に移動する範囲も把握できる。一方で、淡水レンズ下面の移動には降雨浸透以外の要因による影響が大きくまた普遍的で、降水量との淡水レンズ厚さの関係の定量的な分析しようとする場合、複合的な要因の影響を分離する手法が必要である。

## (3) 淡水レンズ側方外縁部の流動

図8に、淡水レンズの西側の海岸との間にある洞窟内の地下水について、流向および流速を約2日半の間連続的に測定した結果を示す。その西側の海岸（図9）で観測した潮位のデータとともに示す。

海岸の潮位の約1日に2回の上下動に伴い、洞窟内の地下水は満潮時には内陸に向か

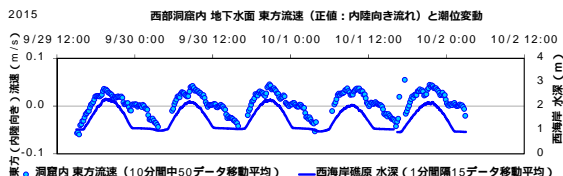


図8 淡水レンズ西側外縁部洞窟内での流向流速観測結果および西側海岸潮位観測結果（2015/9/29～2015/10/1）



図9 満潮時(上)と干潮時(下)の洞窟西側の海岸の状況(2016/7/5~7/6)

い、干潮時には海岸に向かうように交互に往復するように流れていることが捉えられた。

この観測により、淡水レンズの側方においても、海岸線から200m~300m程度内陸に入った位置までは、潮位変動の影響によって地下水が水平方向に往復するように比較的速く流動する外縁部があることが明らかとなった。

#### <引用文献>

白旗 克志・長田 実也(2009): 淡水レンズからの水源開発を目指して 多良間島における調査、地盤工学会誌、57(9)、42。

白旗 克志(2010): 地下水電気伝導度測定による淡水レンズの水収支分析、水土の知、78(6)、514-515。

石田 聡・吉本 周平・白旗 克志・土原 健雄・今泉眞之(2013): 深度別電気伝導度連続測定による淡水レンズ動態把握手法、農村工学研究所技報、214、163-173。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

SHIRAHATA, K., YOSHIMOTO, S., TSUCHIHARA, T., ISHIDA, S. (2017): Improvements in a simple harmonic analysis of groundwater time series based on error analysis on simulated data of specified lengths, Paddy and Water Environment, 15(1), 19-36、査読有

SHIRAHATA, K., YOSHIMOTO, S., TSUCHIHARA, T., ISHIDA, S. (2016): Digital filters to eliminate or separate tidal components in groundwater observation time-series data、Japan Agricultural

Research Quarterly: JARQ, 50(3)、241-252、査読有

〔学会発表〕(計4件)

SHIRAHATA, K., YOSHIMOTO, S., TSUCHIHARA, T., ISHIDA, S.: Digital filters for application to tidal groundwater time series, 43rd IAH Congress, 2016.9.28、モンペリエ(フランス)

白旗 克志・吉本 周平・土原 健雄・石田 聡: 多深度自記温度観測による淡水レンズ地下水への降雨浸入深度把握の試み、平成28年度農業農村工学会大会講演会、2016.8.31、ハーンル仙台(宮城県・仙台市)

SHIRAHATA, K., YOSHIMOTO, S., TSUCHIHARA, T., ISHIDA, S.: Simple harmonic-analysis technique for separating out major tidal components in groundwater time-series data, 42nd IAH Congress, 2015.9.17、ローマ(イタリア)

白旗 克志・吉本 周平・土原 健雄・石田 聡: 地下水位観測データから主要潮汐成分を分離する簡易調和解析法の適用性向上、平成27年度農業農村工学会大会講演会、2015.9.2、岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

白旗 克志 (SHIRAHATA, Katsushi)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門 地域資源工学研究領域・主任研究員  
研究者番号: 10648281

##### (2) 連携研究者

石田 聡 (ISHIDA, Satoshi)  
国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門 地域資源工学研究領域・ユニット長  
研究者番号: 30414444