

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：82111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K08011

研究課題名(和文) 潮汐に最適化した周波数解析手法の利用による淡水レンズ水資源量時間変化の要因分析

研究課題名(英文) Analysis of factors of fluctuations of water resource in a freshwater lens by frequency analysis techniques optimized for tides

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・上級研究員

研究者番号：10648281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：島嶼の貴重な地下水資源である淡水レンズの地下水観測孔において、自記計により多深度の電気伝導率(EC)と地下水位を約2年間連続観測し、地下水位、EC、淡水厚の時間変化の変動成分を降水量等データとも対比しながら分析した。淡水厚の時系列データに含まれる変動成分と要因として、その周期あるいは期間が短いものから、(1)強い降雨時に数時間以内に起きる増加、(2)約25時間に2回上下動する潮位振動の影響による同周期の恒常的振動、(3)台風接近等による数日間の潮位上昇による同程度の期間の一時的減少が認められた。また淡水厚の長周期変動成分には、1年累積降水量との正の相関が認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で明らかに示したように、淡水レンズ地下水資源に潮位変動が大きく影響することには、淡水レンズ地下水を井戸等で取水して利用する場合に特に留意する必要がある。具体的には例えば、台風接近時等の潮位が高いときの淡水レンズからの取水では、井戸内に下層の塩水を引き込んで貴重な淡水資源を汚染する可能性が高くなる。また淡水レンズの厚さが長期間の累積降水量と正の相関をもつことは、市町村規模の地域全体の淡水レンズ地下水開発構想の検討のために必要となる、降水の淡水レンズ涵養率の推定に活用できると見込まれる。

研究成果の概要(英文)：Two-year-long continuous observations of multi-depth groundwater ECs and groundwater level (GWL) were made at an observation hole in a freshwater lens with auto-logging devices. The fluctuations of GWL, ECs, and freshwater thickness derived therefrom were analyzed with comparison to precipitation data and others. The fluctuations of the freshwater thickness contained (1) increase shortly after a heavy rain event, (2) constant oscillations with two peaks and two troughs per about 25 hours affected by tidal oscillations, and (3) a few day-long temporary decrease accompanied with a temporary rise in sea level typically due to approach of a typhoon. Long-period fluctuation component extracted from the freshwater-thickness time series data showed positive relationship with one-year cumulative precipitation.

研究分野：地下水資源学

キーワード：淡水レンズ 時系列データ 周波数分離 潮汐 降水

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

透水性の地層からなる島嶼では、海洋から地層中に海水が浸入し、地下水の多くの部分を塩水が占める。降水は多くが地下浸透するため河川が発達せず、浸透した淡水は地下の塩水の上に比重差により浮かんで海岸近くで薄く内陸ほど厚い凸レンズ形状の淡水層を形成する(図1)。その淡水層は淡水レンズと呼ばれ、上記のような地質条件の島嶼の貴重な水資源となる。

淡水レンズの水資源量・取水利用可能量の推定に必要な淡水レンズの分布と規模の把握では、従来は携帯型測定機器を用いて多数箇所の地下水観測孔で深度毎の電気伝導率(塩分濃度の指標)と地下水位を測定する方法がとられていた。近年では現地設置型の自動記録式観測機器(自記計)を用いて水位と複数深度電気伝導率を1時間等の等時間間隔で観測することによる淡水厚の連続把握手法も用いられている。石田ら(2013)は、この方法による観測により、淡水レンズの電気伝導率の連続観測データに、潮位変動に対応した周期(概ね半日周期または日周期)の潮汐振動成分が含まれることを示している。また、淡水レンズの地下水位の連続観測データの同様の潮汐振動成分が、海岸の潮位変動が内陸に向かって伝播することによるものであることを利用して帯水層の水理定数を推定した事例もある(白旗ら 2014)。

太平洋諸島などで報告されている淡水レンズの過剰揚水・塩水化は、潮汐振動の地下水への影響が認識されず取水施設において塩水を井戸内に引き込みやすいタイミングで取水していることも一因と考えられる。また従来の携帯型機器による測定に基づく淡水レンズ水資源量の評価は、潮汐振動による周期変動の中の一時点の測定結果に基づくため、長期的な取水利用可能量に関係する水資源量が過大あるいは過小に捉えられている可能性がある。

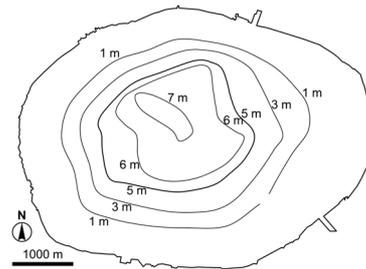
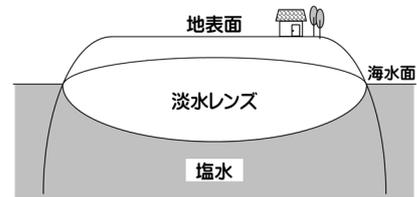


図1 淡水レンズ模式断面図および実測による淡水レンズ厚さ平面分布図の例(白旗・長田 2009)

2. 研究の目的

本研究では、淡水レンズにおける電気伝導率等の時系列観測データに潮汐周期を考慮した周波数解析手法を適用し、主要な潮汐振動成分を除去あるいは逆に抽出した上で降水、潮汐その他の影響要因を分析する。潮汐等の複合的要因により変動する淡水レンズ水資源量の正確な評価方法を提示し、島嶼の貴重な水資源である淡水レンズの適切な利用と管理に資する。

3. 研究の方法

(1) 淡水レンズ現地観測

典型的な淡水レンズが分布する沖縄県多良間島を対象とし、地下水観測孔において、電気伝導率(EC)と地下水位の自記連続観測を行った。

淡水レンズ分布範囲内の地下水観測孔の多数深度に自記EC計を設置して各一定深度のECの時間変化を観測するとともに、自記水位計および自記気圧計を設置してそれぞれの時間変化を観測した。EC計設置深度の間隔は原則として0.5mとした。一定深度で観測したECが上昇/低下することは、EC 200 m S / mの面で定義される淡水レンズ下面の位置が高くなる/低くなることを表す。測定・記録の時間間隔の設定は30分とした。年当たり3回、概ね4ヶ月に1回の頻度で現地において自記計からのデータ回収等保守管理作業を行った。本報告では2017年12月~2020年1月の約2年間のデータを用いる。別途多良間島の潮位データと、島内のアメダスの時間降水量データを利用した。

(2) 時系列観測データの整理と分析

淡水厚時系列データの作成

30分間隔の約2年間の多数深度のEC観測データから、各時刻において深度方向に内挿して、淡水レンズの下面(EC 200 m S / mの面)の深度(地上の基準位置からの深さ)を算出した。その淡水下面深度と、自記水位観測データから得られる地下水面の深度を、それぞれ淡水下面標高と地下水位標高に換算し、その差を計算して淡水レンズ厚の時系列データを作成した。

時系列グラフによる淡水レンズの挙動の要因の推定

地下水位・EC・淡水下面位置・気圧・潮位・降水量の時系列データをグラフ化して対比し、淡水レンズの挙動(地下水位・EC等の時間変化)の要因を推定した。

フーリエ解析による周波数成分分析

地下水位と淡水厚の時系列データについて、フーリエ級数展開の式を利用して周波数成分を分離して振幅スペクトルを作り、その成分構成を分析した。観測データに含まれることが見込まれる周期11.9~26.9時間の既知の主要な潮汐振動成分(例えば主要4分潮と呼ばれるM2、K1、

S2、01 などの記号で表される成分)の振幅を正確にスペクトルに表すため、フーリエ解析の対象とする時系列データの長さは主要潮汐振動成分の周期を考慮した特定の長さとした。

デジタルフィルタによる周波数成分選別と降水の影響の分析

淡水厚の時系列データに、主要潮汐成分の周期を考慮して作成したデジタルフィルタを適用して、主要潮汐より高周波数(短周期)の変動成分のみあるいは低周波数(長周期)の変動成分のみのデータを作り、降水量データを用いて、淡水レンズ厚に降水が与える影響を分析した。

4. 研究成果

(1) 淡水レンズの挙動とその要因

図2に、自記観測により得られた淡水レンズの地下水位、EC、淡水下面位置の変動を、気圧、時間降水量、潮位とともに示す。

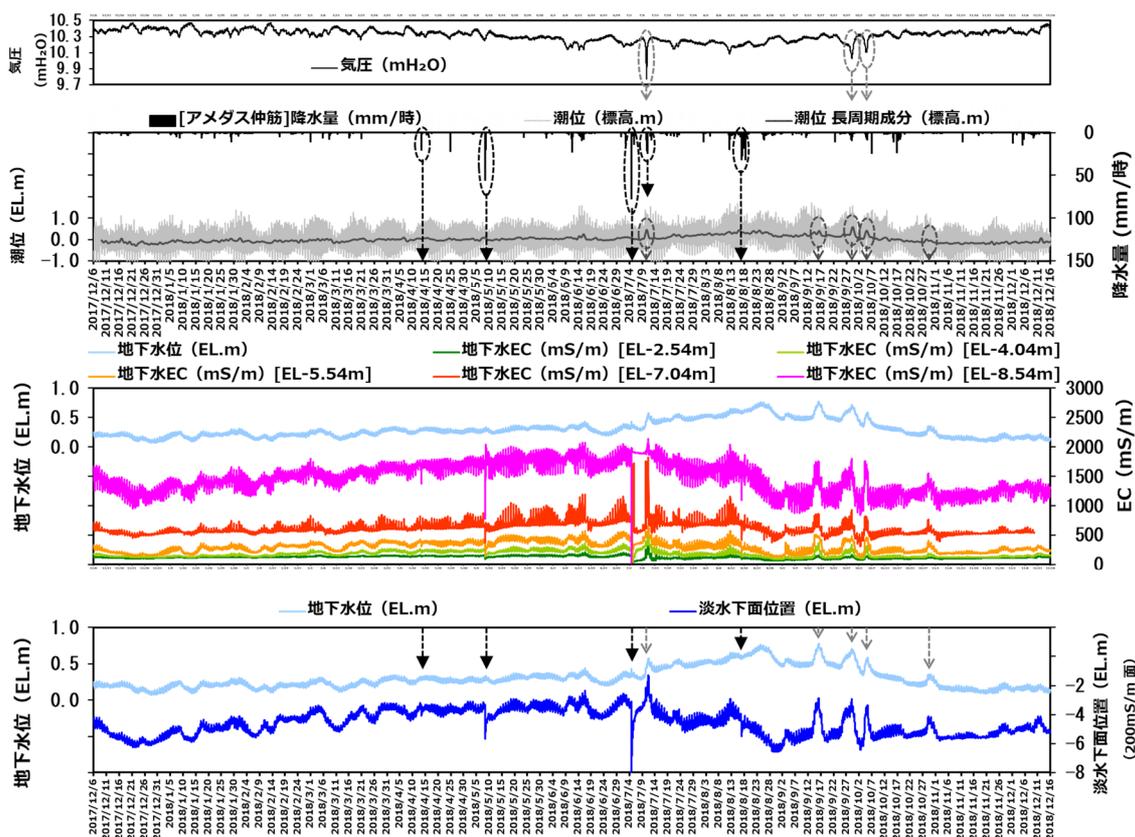


図2 淡水レンズが分布する島嶼における気圧、時間降水量、潮位、地下水位、複数深度EC、淡水下面位置の時間変化(2017年12月6日~2018年12月15日)

地下水位とECの時系列データには、概ね25時間に2回上下動する周期的な変動が恒常的に認められた。その変動は潮位変動と同じ周期であり、潮位よりも振幅は小さく変動の山と谷のタイミングは数時間遅い。潮位変動が海岸から伝播することにより生じたものと考えられる。2018年7月11日頃、9月16日頃、9月29日頃、10月5日頃、10月29日頃には、それぞれ3日間前後、一時的に地下水位と淡水下面が上昇した。潮位の約25時間周期の変動を除去し平滑化して長周期成分を抽出した変動にも同じ期間に一時的に高い状況が認められたことから、観測された地下水位と淡水下面の上昇は潮位の一時的上昇の影響と考えられる。5回の潮位の一時的上昇のうち7月11日頃、9月29日頃、10月5日頃の3回については、それぞれ2018年の台風8号、24号、25号の接近に伴う気圧の一時的低下に起因すると考えられる。2018年4月13日、5月8日、7月4日、7月10日、8月17日頃には、それぞれ1時間程度の短い時間でECが低下(淡水下面が下降)した後、やや緩やかに元に戻る現象が認められた。これらは強い降雨による地下水涵養の結果と考えられる。このような降雨に伴うEC変動(淡水下面位置の上下動)は、本研究で得られたデータの中では概ね時間雨量20mm以上の場合に限られ、10mm以下の時間雨量では認められなかった。またこのような一部の強い降雨時の地下水涵養の影響は、地下水位データでは、概ね25時間周期の潮位変動の影響による周期的な変動に紛れることもあって、ほとんど認められなかった。例外的に2018年7月4日には、時間雨量77.5mmという極端な強雨に伴い、淡水下面の下降とともに地下水位の上昇が認められた。

まとめると、時系列グラフの対比によって明らかになった淡水レンズ観測データの変動成分

とその要因は、変動の周期あるいは期間が短いものから、1)一部の強い降雨によって1時間程度で起きる淡水下面位置の下降、2)概ね25時間に2回上下動する潮位振動の伝播の影響による地下水位と淡水下面位置の同じ周期の恒常的な振動、3)台風接近等に伴う数日間の一時的潮位上昇による地下水位と淡水下面位置の同程度の期間の一時的上昇、である。

上記のうち後の2つに関係する、潮位の影響による淡水下面位置の変動については、淡水レンズの地下水を井戸等により取水して利用することを考える際に、特に留意が必要である。一般に淡水レンズ地下水からの井戸取水では、揚水に伴い井戸周辺で局部的に淡水下面が円錐形状となって上昇し、その下位の塩水が上昇して井戸に近づく。揚水強度が過大であれば塩水が井戸に到達して貴重な淡水資源を汚染する(石田ら 2017)。そのような揚水に伴う淡水レンズ水資源の汚染の危険性は、揚水前の自然状態で淡水下面が高い位置にあれば当然大きくなる。したがって例えば、通常時には塩水を引き込まずに取水できていた井戸でも、台風接近時等の潮位上昇時に取水すれば塩水を引き込んでしまうことがあり得る。淡水レンズを水源として利用する際には、その挙動に潮位変動が大きく関わることを認識しておくことは重要と考えられる。

(2)淡水レンズの地下水位と淡水厚データの周波数成分

図3に、地下水位と淡水厚の時系列データのフーリエ解析により得られた振幅スペクトルを示す。対象データは2017年12月1日-0:00から始まる30分間隔17712時間のものである。

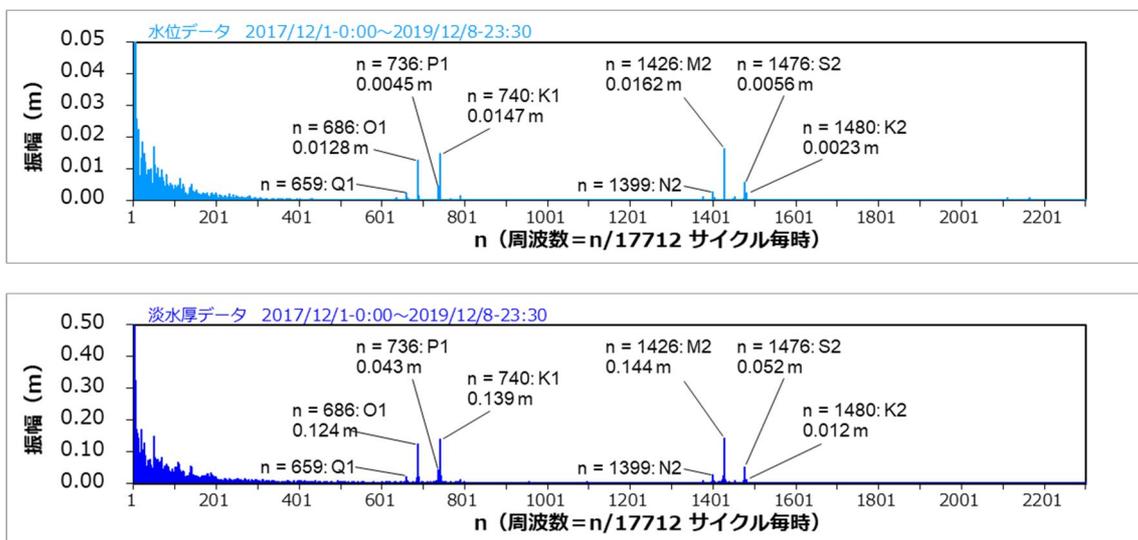


図3 淡水レンズ地下水の水位観測データから得られた周波数スペクトル(上段)と淡水厚時系列データから得られた周波数スペクトル(下段)

いずれのスペクトルでも、図の左端から裾を引くように表れる低周波数(長周期)成分以外に、図中に記した8つの主要な潮汐成分(分潮)が明瞭に認められる。これら8つ(長周期のものから順にQ1、O1、P1、K1、N2、M2、S2、K2)は主要8分潮と呼ばれるもので、その周期は海洋物理学や測地学の分野で正確に知られている。上図に示した17712時間データのスペクトルでは、そのうちQ1とN2以外の振幅が概ね正確に表される。Q1とN2については、それに対応するスペクトルの高まりが表れるが、その正確な振幅を得ることはできない。別途、M2とN2の概ね正確な振幅が得られる18532時間データのフーリエ解析と、Q1の概ね正確な振幅が得られる18433時間データのフーリエ解析を行った結果を含め、表1に主要8分潮の振幅をまとめて示す。

表1 地下水位と淡水厚時系列データのフーリエ解析で得られた主要潮汐成分の振幅

潮汐成分:	Q1	O1	P1	K1	N2	M2	S2	K2
周期:	26.87 h	25.82 h	24.07 h	23.93 h	12.66 h	12.42 h	12.00 h	11.97 h
地下水位								
17712h データ		12.8 mm	4.5 mm	14.7 mm		16.2 mm	5.6 mm	2.3 mm
18532h データ					2.9 mm	16.2 mm		
18433h データ	2.5 mm							
淡水厚								
17712h データ		124 mm	43 mm	139 mm		144 mm	52 mm	12 mm
18532h データ					29 mm	143 mm		
18433h データ	24 mm							

(3) 淡水厚の周波数選別データと降水量の関係

図4に、淡水厚の時系列データから高域通過デジタルフィルタを用いて主要潮汐成分よりも短周期の成分を取り出した時系列データを、時間降水量データとともに示す。元の淡水厚時系列データでは潮汐の影響による周期12時間~27時間の大きな振動成分によって不明瞭であった、強い降雨時の淡水厚の短時間の変動がより明瞭に認められ、その変動が概ね時間雨量20mm以上の場合に限られることもより容易に確認することができる。

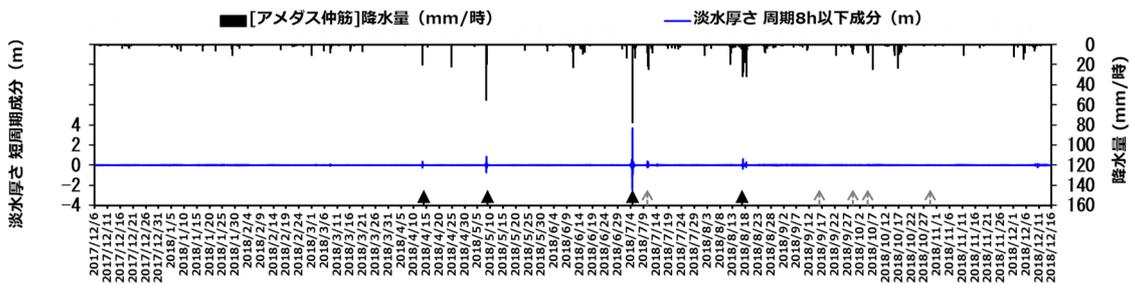


図4 淡水レンズの淡水厚変動データの短周期成分と時間降水量（2017年12月6日~2018年12月15日）

図5に、淡水厚の時系列データから低域通過デジタルフィルタを用いて主要潮汐成分よりも長周期の成分を取り出した時系列データを、色々な長さの累積降水量データとともに示す。淡水厚長周期成分の時系列データが元の観測データの始点である2017年12月から約3ヶ月間欠けているのは、ここで用いたデジタルフィルタリングの原理上、出力時系列データでは、入力時系列データの端部に当たる部分がフィルタの長さに応じて失われるためである。累積降水量との対比から、淡水厚の長周期変動成分は、1年程度の長期間の累積降水量と正の相関関係があることが推測された。

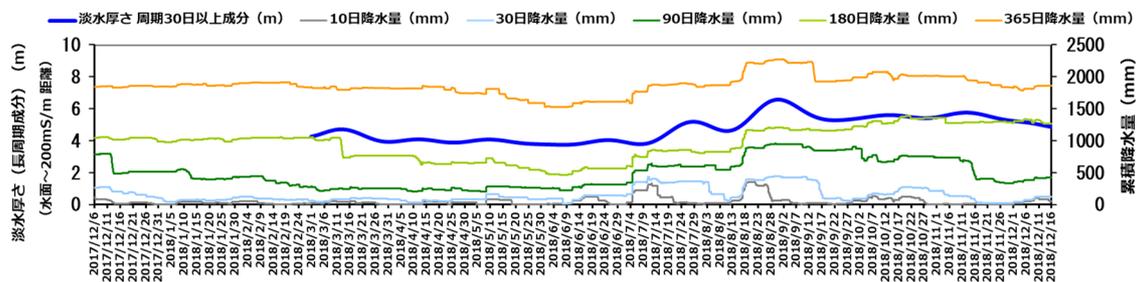


図5 淡水レンズの淡水厚変動データの長周期成分と累積降水量（2017年12月6日~2018年12月15日）

この淡水厚と累積降水量の正の相関関係は、降水量のどれくらいの割合が長期的な淡水レンズ厚の増加に寄与するのかを分析するために用いることができる。本研究の対象とした多良間島では、農業用水源として地表水とともに淡水レンズの地下水も開発し利用する構想があり、その将来的な地下水利用計画の検討のためには降水の淡水レンズ涵養率を設定する必要がある。地域内の多数地点の観測孔において長期間の観測を行い、ここで示したような検討を行うことで、淡水レンズ全体としての平均的な涵養率の推定に用いられる可能性があり、その結果は将来の淡水レンズの適切な取水利用に資すると考える。

< 引用文献 >

石田 聡・白旗 克志・土原 健雄・吉本 周平（2017）：帯水層内の水質混合を抑制する単孔式二重揚水装置の作製と取水試験、農研機構研究報告 農村工学研究部門、1、11-17。

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。

白旗 克志・石田 聡・吉本 周平・土原 健雄（2014）：地下水位の潮汐応答の分析による淡水レンズ帯水層の水理定数推定手法、農村工学研究所技報、215、141-154。

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。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 白旗 克志、吉本 周平、土原 健雄、石田 聡	4. 巻 87
2. 論文標題 卓越潮汐に合わせ最適化した周波数分離法を組み合わせた潮汐応答法による沿岸域帯水層の水理定数推定 多良間島の147日地下水位データへの適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_51 ~ I_60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.87.I_51	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsushi Shirahata, Shuhei Yoshimoto, Takeo Tsuchihara, Satoshi Ishida	4. 巻 17
2. 論文標題 Study on aquifer hydraulic properties using tidal response method for future groundwater development	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Paddy and Water Environment	6. 最初と最後の頁 531 ~ 537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10333-019-00749-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsushi Shirahata, Shuhei Yoshimoto, Takeo Tsuchihara, Satoshi Ishida	4. 巻 71
2. 論文標題 Heterogeneous hydraulic properties of an insular aquifer clarified by a tidal response method with simple decomposition techniques	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geologia Croatica	6. 最初と最後の頁 83-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4154/gc.2018.06	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 白旗克志、吉本周平、土原健雄、石田聡	4. 巻 59
2. 論文標題 潮汐成分を含む時系列地下水観測データ（30分間隔および10分間隔）の処理のための非再帰型デジタル フィルタ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 応用地質	6. 最初と最後の頁 201-212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5110/jjseg.59.201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Katsushi Shirahata, Shuhei Yoshimoto, Takeo Tsuchihara, Satoshi Ishida
2. 発表標題 Tidal response method with simple decomposition techniques to determine hydraulic parameters of freshwater-lens aquifer
3. 学会等名 25th Salt Water Intrusion Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 白旗克志, 吉本周平, 土原健雄, 石田聡
2. 発表標題 周波数成分分離を組み合わせた潮汐応答法による沿岸域帯水層の水理定数の推定
3. 学会等名 平成30年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Katsushi Shirahata, Shuhei Yoshimoto, Takeo Tsuchihara, Satoshi Ishida
2. 発表標題 Heterogeneous hydraulic properties of an insular aquifer clarified by a tidal response method with simple decomposition techniques
3. 学会等名 44th IAH Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	石田 聡 (Ishida Satoshi) (30414444)	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・ユニット長 (82111)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	土原 健雄 (Tsuchihara Takeo) (30399365)	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・上級研究員 (82111)	