

令和 2 年 9 月 3 日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13893

研究課題名(和文) 四国非火山性温泉組成による地殻変動予測への挑戦

研究課題名(英文) Challenge to Prediction of Crustal Deformation by geochemical compositions of Non-volcanic Hot spring water, Shikoku, Japan

研究代表者

堀 利栄 (Hori, Rie)

愛媛大学・理工学研究科(理学系)・教授

研究者番号：30263924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：四国西部非火山性温泉である道後温泉および東道後温泉において、温泉水のpH値および泉温等の時系列変化を調査し、温泉水の組成変動が地殻変動予測(地震予測)に有効かどうか検討を行った結果、以下のような成果を得る事が出来た。(1) 四国西部地区の非火山性温泉のpH値は、1日程度の短期的な変動を示しながら数か月単位の長期的な値の低下、上昇を繰り返している。(2) FFT法等の解析により、温泉水のpH値変動には日周帯以下の潮汐応答(高調波)も存在することがわかった。以上の結果から、温泉水のpH値は、地殻変動に対応して変化しているセンサーとして使える事が判明した。今後はそのメカニズムの詳細な解明が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果によって、西南日本の非火山性温泉水の化学組成地殻にかかる応力によって変化している事実を初めて証明した学術的意義は大きい。温泉水のpH値は、おおまかに温泉水の組成変化を代表していると判断され、且つ簡便に測定出来る事から、簡便な地殻変動検出法として、非火山性の温泉水におけるpH値のモニタリングが使える可能性を示唆した社会的意義は大きい。このようなモニタリング井を地域別に設置し、ネットワーク化すれば、安価で感度の良い地殻変動予測が可能となる事を本研究は示した。

研究成果の概要(英文)：We have conducted to study secular changes of pH value and spring temperature of hot spring water from Dogo and Higashi Dogo Hot springs, which are famous and old non-volcanic hot springs in western Shikoku, Japan, to clarify whether the geochemical composition of hot spring water is changed due to crustal deformation and/or earthquake activity. Through this research, the following results were obtained. (1) The pH value of these hot springs shows a short-term fluctuation of approximate one day, while the long-term value decreases and rises every few months. (2) The analyses such as FFT and other methods revealed that there is a strong tidal response to the change of pH value of Dogo and Higashi Dogo hot spring water examined. We conclude that the pH value of hot spring water can be used as a sensor that is changing in response to crustal movements, however it is necessary to search the critical mechanism in the future.

研究分野：地質学、地球環境学

キーワード：道後温泉 東道後温泉 pH 潮汐振動 地殻変動

様式 C-19、F-19-1、Z-19(共通)

1. 研究開始当初の背景 万葉集にも詠われた道後温泉は四国西部の非火山性温泉のひとつで日本最古の温泉とされている。道後温泉には、1000 年にもわたる記録が残っており、四国沖および紀伊半島沖を震源とする地震の度に温泉の湧出停止や濁り等が起こったことが記されており、非火山性温泉が地震活動に呼応していることが知られていた。研究代表は、指導学生らと共に「東道後温泉」の源泉の1つを2年以上に渡り、所有者の許可を得て温泉水の組成変動を日単位で継続調査してきた。「東道後温泉」は、道後温泉と同じく西日本内帯の火山フロントより南に位置する非火山性温泉の一つであり、1854 年の安政南海大地震によって湧出したとされている(例えば高橋, 2012)。もともと、西南日本の非火山性温泉は、貴ガスの同位体比分析によって沈み込むプレート起源物質(流体やガス)の関与が議論されており、同温泉も何らかの地殻変動のシグナルを感知している可能性が考えられた。2012 年秋から2014 年にかけての我々の予察研究の結果、温泉水の pH が、地球表層環境(降雨や季節)に関係なく有意に変動する事が判明した(日野・堀ほか 2015)。我々の予備調査において日々の pH 変動は、四国西部に発生する微小地震(特に深部低周波微動)群の発生時期とよく対応している事が分かった。しかしながら、温泉水の pH 変動が地殻変動に呼応しているかどうかは推測の域をでなかった。そこで、2014 年の夏から秒単位での計測が可能な pH データ記録計を設置し日変化を含む連続記録を採取した。その結果、温泉水の pH 変動は、潮汐変動周期と一致する 12 時間強の変動を示しながら、長期にわたる上昇や下降を示している事が判明した。つまり「東道後温泉」の pH 変動は、敏感な地殻応力場の変動指標として使える可能性が示唆された。道後温泉についても、南海地震等の地震動に敏感に反応し、湧出が止まったり濁りが生じたりすることが古くから報告・研究されており(例えば、力武, 1947; 豊田・野間, 1952; 宇佐美ほか, 2013 など)、地殻応力場の変化に敏感に反応する温泉であることがよく知られてきた。近年では、産業技術総合研究所活断層・火山研究部門地震地下水研究グループによって道後温泉の水位変動に着目した長期変動観測や解析(例えば, Itaba and Koizumi, 2007; 小泉・木下, 2017)が実施されているが、松山平野周辺に湧出する温泉水の組成や含有ガスに着目した研究は、川辺(1991)以降ほとんどなされていない。そこで我々は、道後及び東道後温泉水の化学組成変動に着目し、pH 値がおおまかにその組成変動を代表すると仮定し、pH 値変動データを連続的に観測・解析する事で、周辺地域での地殻変動の予測が可能かどうかを探る研究の着想を得た。



Fig. 1. Localities of Dogo-Onsen and East Dogo-Onsen Hot Spring, Southwest Japan. Modified after (Hino et al. 2015).

2. 研究の目的 本研究は、西南日本に分布する非火山

温泉着目し、温泉水の化学組成変化による地殻変動予測の可能性を探るものである。先行研究を踏まえ、本研究では、以下の3点<(1)東道後温泉と同地域にある道後温泉水についても同様な現象(潮汐周期変動と長期減少・上昇傾向)が検出されるかどうか、連続 pH 記録計を設置し検討する。(2)四国東部非火山性温泉(香川県)における検討。(3)四国全計測温泉の pH の変動解析と GPS などを使った既存の地表変動解析または応力場解析との比較検討を行い、pH 変動が地殻変動指標として使えるかどうか明らかにする。>を具体的目標としたが、研究の進展や、源泉に計測値を設置する技術的・実的な問題から結果的に(1)の目的に特化した形となった。研究検討地域は、当初の予定より範囲を狭め四国西部松山平野東部に位置する「道後温泉」、および同温泉と同じ泉質(アルカリ単純泉)の「東道後温泉」の2カ所となった(Fig.1)。

3 研究の方法 本研究課題を実施するにあたり、予察研究を実施してきた東道後温泉においては 2017 年 6 月よりセンサーヘッドを交換し pH 値の連続測定を再開した。また、道後温泉においては、所有・管理者の松山市の許可を得、測定装置を設置可能な源泉 1カ所を選定し、2016 年 11 月より松山市の協力のもと、pH 値測定装置を設置し5分毎の連続した pH 値の観測・記録を開始した。2019 年には、東道後温泉における pH 値測定装置をこれまでの計測装置の耐久年度が過ぎた事もあり、道後温泉と同様式の測定装置を設置した。その結果、pH 値、泉温、気温変化のデータが同時に得られるようになった。採取した温泉水については、愛媛大学総合科学研究支援センターの ICP-MS を用いて、Li, Al, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Cd, Cs, Ba, P, Ag, U 及び Na, Ca, Mg の 21 元素の含有量を測定するとともに、各含有量と様々なファクターとの相関を検討した。また温泉水 pH 値の長期間の変化を検討するとともに、周波数解析を山本明彦(愛媛大学分担者)が実施した。同時に pH 値変動と四国西部に発生する深部低周波微動との対応関係も検討した。周波数解析においては、pH 値や関連する解析を長期変動と短期変動にわけることとし、短期変動について、pH 値や気象・地殻変動データの日周帯以下の潮汐応答を調べた(山本ほか, 2017 で一部報告)。特に日周帯以下の応答を詳しく調べるために、複数の手法でスペクトル解析を行い、詳細な周波数分布を求めた。使用した方法は主に、FFT 法、Marple 法、存否法の3種類である。Marple 法・存否法は原理的に AR(自己回帰)モデリングに基づく手法であり、本研究では AR 次数としてデータ長の 10-20%程度を使用した。

4. 研究成果 東道後温泉水の pH 値と泉温、気温、湿度、気圧、松山市域雨量合計との相関係数を検討した結果、泉温、湿度、松山地域における降水量との相関は見られなかったが、気温と気圧(気象台記録値)については、相関係数がそれぞれ 0.24, -0.12 となっており、気温や気圧との弱い相関が示唆された。また、東道後温泉水の 21 元素における化学組成分析では、pH 値は、Li, Ba, Sr 濃度と負の相関が見られた。As については、pH 値と弱い正の相関が示唆される。Ba, Sr および Li の起源や増減のメカニズムを検討するために、源泉における Ba と Ca, Sr と Ca, Li と Na の含有濃度をプロットした。Sr や Ba に関しては、Ca と正の相関が、Li に関しては Na との正の相関が見られた。Fig. 2 には、2016 年 5 月 16 日から 2017 年 4 月 6 日までの東道後温泉源泉 pH 変動と、同時期に四国西部地域に発生した深部低周波微動を、Fig. 3 には

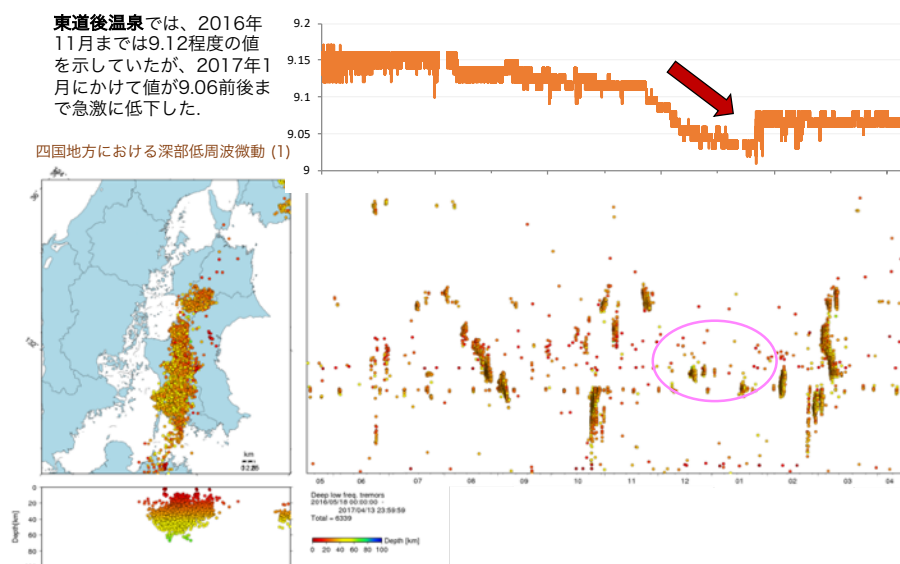


Fig. 2. 東道後温泉pH変動と深部低周波微動。Data period from 16th May, 2016 to 6th April 2017. Secular correlation of Non-volcanic deep low-frequency tremors and pH values of Hot Spring water, East Dogo-Onsen, Matsuyama City, Ehime Prefecture, Japan. Data of deep low-frequency tremors after Hi-net (<https://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>).

は 2017 年 2 月 15 日から 5 月 17 日までの道後温泉源泉 pH 値変動と、同時期に四国西部地域に発生した深部低周波微動を比較のためにプロットしてある。深部低周波微動と地殻内流体の挙動とは密接に関連している事が示唆されている。地殻熱流体が微動発生と関連するならば、非火山性温泉で地殻流体が関与している両温泉も何らかの関連がある可能性がある。

深部低周波微動のデータは、Hi-net

(<https://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>)より引用した。東道後温泉では、2016 年 11 月まで源泉の pH は 9.12 程度の値を示していたが、2017 年 1 月にかけて値が 9.06 前後まで急激に低下したのが観察された(Fig. 2)。

道後温泉では、1日程度の短期的な変動を示しながら、数か月にわたるpH値の低下と上昇を繰り返している。

四国地方における深部低周波微動 (2)

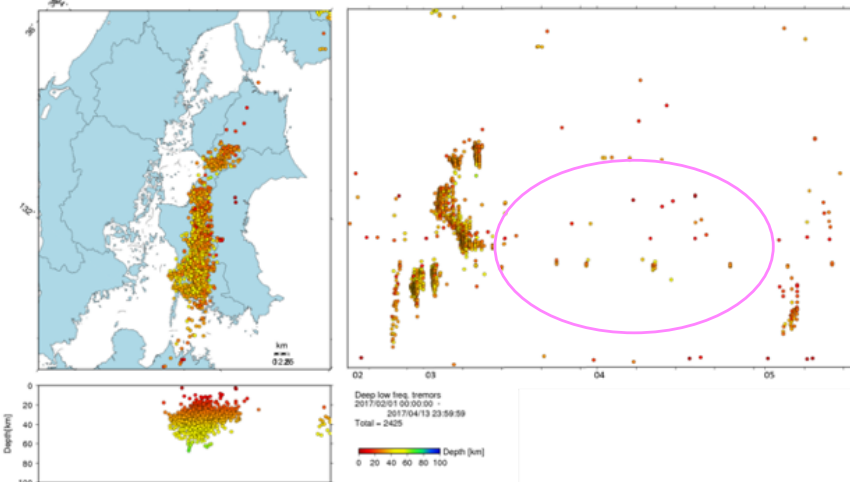


Fig. 3. 道後温泉pH変動と深部低周波微動。Data period from 15th February, to 17th May, 2017. Secular correlation of Non-volcanic deep low-frequency tremors and pH values of Hot Spring water, Dogo-Onsen, Matsuyama City, Ehime Prefecture, Japan. Data of deep low-frequency tremors after Hi-net (<https://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>).

一方、道後温泉では、2017年3月から4月にかけて、源泉のpH値が8.5から8.45まで、0.05程低下するのが見られた (Fig. 3)。特に東道後温泉および道後温泉のpH値の長期低下時には、四国西部域における深部低周波微動の発生が少なく、同様な値を長期間にわたって示す時や上昇時への転換時に深部低周波微動の発生が多く見られる傾向があった。これらの現象は、道後および東道後温泉水のpH値が地殻変動と関連して変化している可能性を示唆する。

本研究では、東道後温泉および

道後温泉水の組成(pH値が大まかに代表していると仮定)が、地殻変動を敏感に反映している可能性を検討する為、さらにpH値変動の周波数解析を行った。サンプリングデータは、道後温泉および東道後温泉とも5分サンプリングデータに揃えて解析を実施した。特に道後温泉の計測データに関しては、2017年1月から2019年11月までの約2.79年分のデータを得る事ができ、山本が最終的な周波数解析を実施した。解析した道後温泉のデータは、データ長が293,542点、FFTの場合は先頭から262,144点(2¹⁸)、約1019日分のデータとなった。

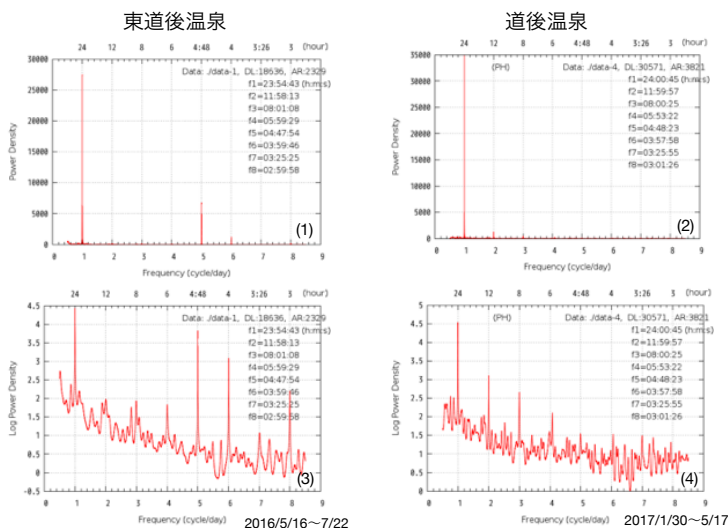


Fig. 4. 東道後温泉・道後温泉pH変動における周波数解析結果。The results of frequency analysis on secular change of pH values (every 5 mins) from East Dogo-Onsen, Dogo-Onsen, Matsuyama City, Ehime Prefecture, Japan. Power densities in normal scale (1) East Dogo-Onsen and (2) Dogo-Onsen. Power densities in log scale (3) East Dogo-Onsen and (4) Dogo-Onsen.

Fig. 4に、2016年5月16日～7月22日の東道後温泉pH値データを解析したものと、2017年1月30日～5月17日の道後温泉pH値データを解析したものを示す。両観測値に於いては、pH値計測に関して、データ計測装置機器が異なるにも関わらず、温泉水のpH値変動において、1日周期(M1)をはじめ、1/2日周期(M2)、1/3日周期(M3)、1/4日周期(M4)などの潮汐周期と一致する明瞭なスペクトルピークが検出された。この結果は道後温泉および東道後温泉水のpH値変動が潮汐周期を持つ事を示していると判断可能である。つまり、非火山性温泉のpH値が、地殻

変動に敏感に呼応して変動している事を示唆するものである。

Fig. 5に、約2.7年におよぶ道後温泉における温泉水とその観測機器に関連したデータPH(pH値)、SB(system battery)、ST(system temperature)、TS(temperature sensor)の解析の一部を示す。FFT解析ではPH、STに、1日周期(M1)、1/2日周期(M2)、1/3日周期(M3)、1/4日周期(M4)の潮汐が明瞭なスペクトルピークとして検出され、Marple法、存否法による解析では、さらに1/5日周期(M5)～1/8日周期(M8)も検出された。結果としては、2017年末に実施した数ヶ月分のデータ解析(Fig. 4)とほぼ同じ結果であったが、短波長解析で、より短周期側の倍潮がより強調されてあらわれた。

また、Fig. 4 の結果と比べると、短周期の倍潮がより明確に、かつ強度も大きく示され、power の振幅は以前の2-3ヶ月分のデータ解析では2桁程度であったが、約3年分の解析結果では、6、7桁にもなる強い成分である事が示された。

道後温泉

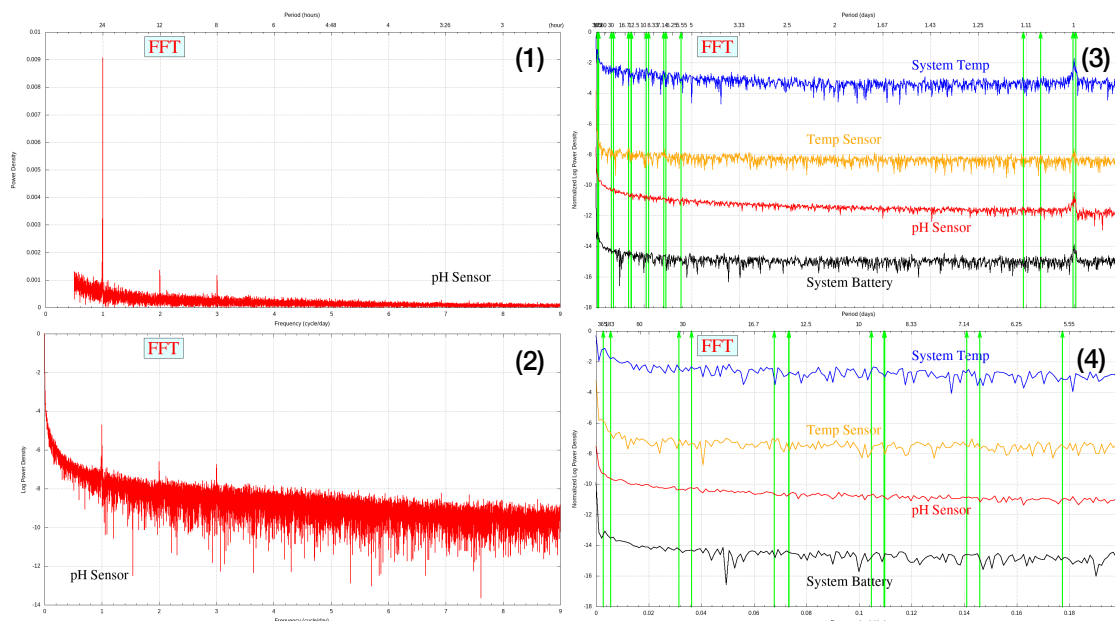


Fig. 5. 道後温泉pH値変動におけるFFT法による周波数解析結果。2017年1月から2019年11月までの測定データを解析。緑の線は理論潮汐値
The results of frequency analysis on secular change of pH values (every 5 mins) from Dogo-Onsen, Matsuyama City, Ehime Prefecture, Japan.
Power densities in normal scale (1) and densities in log scale (2) for short-period.
Short: 周波数(0.0-9.0)の解析結果 (1) & (2), Medium:周波数(0.0-1.1)の解析結果 (3), Long:周波数(0.0-0.2)の解析結果 (4)

これらのことから、PH(pH 値), ST(計測地点気温)には明らかな日周帯以下の潮汐応答(高調波)が存在することがわかった。日周帯以下の潮汐応答は大気潮汐、気圧潮汐として知られており、気圧が断熱的な変化(断熱圧縮・断熱膨張)を示すと仮定すれば、気圧潮汐が気温変化に現れても不思議ではなく、ST(計測地点気温)が高調波の潮汐応答を示すことは説明できると考えられる。これを確かめるため、松山市内の野外の気象データ(気温、気圧)、地殻変動データ(歪、傾斜)をそれぞれ気象庁、産総研から入手し、同様の解析を行ったところ、いずれにも M1~M7 の高調波が検出された。歪・傾斜データでは4大(8大)分潮が検出された(山本他 2017 で一部報告)。以上の成果から、本研究によって、非火山性温泉水の pH 値は、地殻変動に呼応して変動している事が明らかとなった。特に日周帯以下の潮汐応答(高調波)が明瞭である事が判明した。しかしながら、温泉水の化学組成変動のメカニズムについては仮説の域を出ず、まだ未解決のままである。また、本研究によって非火山性温泉水の pH 値が簡便な地殻変動センサーとして使える可能性が示されたが、pH 値がどのように周辺地域における地震発生と関わり変動するか、その対応関係も未だ精査できていない。今後の検討課題としたい。

【引用文献】

- 豊田 英義・野間 泰二 (1952) 愛媛県道後温泉地域の地下状況に関する研究。愛媛大学紀要, 1 巻(3), 139-146.
日野 愛奈・佐野 栄・堀 利栄(2015) 東道後温泉組成の時系列変化-地殻変動との対応関係の検討-. 愛媛大学理学部紀要, 20 巻, i-xiii.
Itaba S. and Koizumi N. (2007) Earthquake-related Changes in Groundwater Levels at the Dogo Hot Spring, Japan. Pure and Applied Geophysics, 164, 2397-2410.
川辺岩夫(1991)地震に伴う地下水・地球化学現象, 地震, 44 巻, 341-364.
小泉尚嗣・木下千裕 (2017) 道後温泉における地震後の水位上昇について, 地震, 第 70 巻(2), p.125-134.
力武常次(1947) 南海地震に伴う道後温泉の変化, 東大地震研究所速報, 5, 189-194.
宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子(2013) 日本地震被害総覧 599-2012, 東京大学出版会 694 pp.
山本明彦・堀利栄・日野愛奈(2017) 道後・東道後温泉における pH 値と地殻変動の潮汐応答.日本地質学会四国支部総会・学術大会, 松山 12 月

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 與那覇 可南子	4. 巻 平成28年度号
2. 論文標題 東道後温泉水のpH 値変動と地殻変動との対応	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 愛媛大学 卒業論文	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 0件）

1. 発表者名 堀 利栄・日野愛菜・山本明彦
2. 発表標題 東道後・道後温泉水におけるpH値の長期変動と周期解
3. 学会等名 日本地質学会第124回大会・松山。（ただし台風のため中止）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本明彦・堀利栄・日野愛奈
2. 発表標題 道後・東道後温泉におけるpH値と地殻変動の潮汐応答
3. 学会等名 第17回日本地質学会四国支部総会・講演会，松山
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堀 利栄・日野 愛奈・山本明彦
2. 発表標題 道後平野温泉水におけるpH値長期変動とその周期解析
3. 学会等名 第17回日本地質学会四国支部総会・講演会，松山
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

堀 研究室 https://sites.google.com/site/rieshorilabweb/home
--

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
研究分担者	山本 明彦 (Yamamoto Akihiko) (80191386)	愛媛大学・理工学研究科(理学系)・教授 (16301)	2018年度未退職