
原 著

2014年に間欠泉に変化した立山カルデラの 火口湖新湯の水位変化の特徴

福井幸太郎¹⁾, 飯田 肇¹⁾, 菊川 茂¹⁾

(令和2年3月4日受付, 令和2年4月22日受理)

Characteristics of Water Level Change of the Shinyu Hot Spring Pond Converted to Geyser in 2014

Kotaro FUKUI¹⁾, Hajime IIDA¹⁾ and Shigeru KIKUKAWA¹⁾

Abstract

Field observations of water level and water temperature were carried out in the Shinyu hot spring pond which changed to geyser in 2014. An one cycle of the water level change of the Shinyu hot spring pond is as follows : (1) the hot spring water flows back into the spouts and discharges water (0.5~1 days), (2) the drying state continues (2~5 days), (3) predictive spouting of hot spring water is repeated (0~2 days), (4) water level rise due to continuous spouting of hot spring water from the spouts (3~5 days), and (5) the state of full water (0~14 days). The spouting of hot spring water was not like the eruption of usual geyser that the hot spring water was instantaneously blown high, but the hot spring water with bubbles was gushed out for a long time. The cycle of water level change from 2014 to 2018 was 10~18 days except for 2015, which was irregular. When the cycle of the water level change was divided into spouting time and pause time, the spouting time was very long with 10 days on average, and the pause time was short with about 4 days on average. There is no example of geysers with such a long spouting time, and the Shinyu hot spring pond can be said to be a geyser with a unique spouting and pause pattern in the world. The temperature of spouting hot spring water reached the boiling point. Thus, the Shinyu hot spring pond was proven to be a geyser induced by boiling.

Key words : Geyser, Crater pond, Tateyama Volcano, Tateyama Caldera, Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

要 旨

2014年に間欠泉に変化した立山カルデラの火口湖新湯でタイムラプスカメラと無人航空機(UAV), 温度データロガーを用いた水位・水温の現地観測を2014~2018年に実施した。新湯

¹⁾富山県立山カルデラ砂防博物館 〒930-1405 富山県中新川郡立山町芦峯寺字ブナ坂68. ¹⁾Tateyama Caldera Sabo Museum. 68 Ashikuraji-bunazaka, Tateyama-machi, Toyama 930-1405, Japan.

の水位変化の 1 周期は以下であった。①噴出した温泉水が噴出口に逆流して排水 (0.5~1 日間程度), ②干上がった状態が継続 (2~5 日間程度), ③前兆的な温泉水の噴出と排水が繰り返される (0~2 日間程度), ④噴出口から温泉水が継続的に噴出し水位上昇 (3~5 日間程度), ⑤満水状態 (0~14 日間程度)。温泉水の噴出は, 一般的な間欠泉のように細い噴出管から温泉水を短時間に高く吹き上げる様式ではなく, 気泡を伴う温泉水が時間毎, 噴出口毎に強弱を繰り返しながら湧き出て湖底にたまり, 水位が徐々に上昇していくという様式であった。2014~2018 年の水位変化の周期は, 不規則だった 2015 年を除くと 10~18 日間であった。水位変化を温泉水噴出期間と休止期間で区分すると, 噴出期間は平均 10 日間程度と極めて長く, 休止期間は平均 4 日間程度と相対的に短かった。噴出期間がこれほどの長期間にわたる間欠泉は例がなく, 新湯は世界的にみても特異な噴出・休止パターンをもつ間欠泉であるといえる。また, 噴出される温泉水は沸点に達していた。このことから, 新湯は間欠沸騰泉と判明した。

キーワード: 間欠泉, 火口湖, 立山火山, 立山カルデラ, 無人航空機 (UAV)

1. はじめに

活火山, 立山火山 (気象庁名: 弥陀ヶ原) の一角をなす東西約 6.5 km, 南北約 4.5 km の巨大な楕円形の凹地である立山カルデラの中央部には, 新湯とよばれる熱湯をたたえる火口湖がある (Fig. 1)。直径は約 40 m, 水深は約 5.6 m, 湖面標高は約 1,620 m, 表層の水温は 65~70℃, 温泉水の pH は 3~4 である。

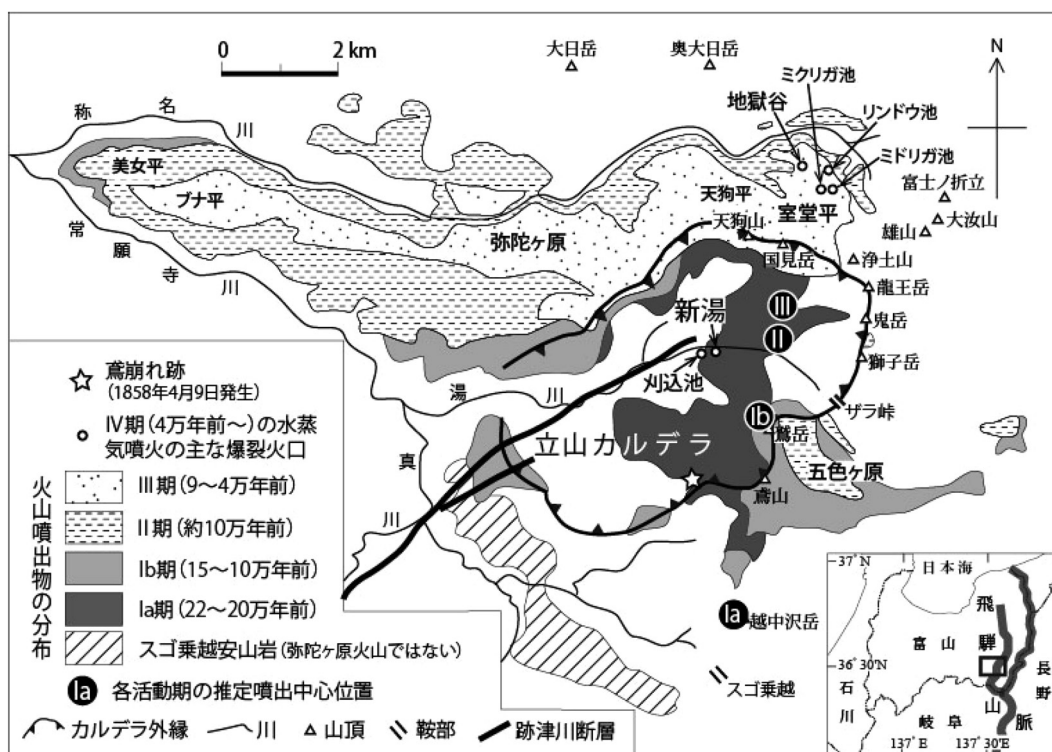


Fig. 1 Distribution of volcanic products from Tateyama Volcano and location of the Shinyu hot spring pond.

This map is based on Harayama *et al.*, (2000).

図 1 立山火山の火山噴出物の分布図と新湯の位置。原山ら (2000) により作成。

新湯は、明治～昭和初期まで間欠泉であった(吉澤, 1904; 1925)。その後、湖底で噴出した温泉水が火口壁の切れ口からオーバーフローして水位が維持される満水状態が続いた(Fig. 2b)(藤井ら, 1960)。

ところが、2014年春、突如、温泉水が消失して干上がり、再び干満を繰り返す間欠泉に戻った(福井ら, 2018)。間欠泉の状態は現在(2019年末)まで継続している。

立山火山の現在の活動中心である室堂平の地獄谷周辺では、近年、噴気や熱活動が活発化している(野上, 2016)。2016年12月、気象庁は立山火山を常時観測火山に追加し、24時間体制で地獄谷周辺の火山活動の監視を行っている。しかし、新湯では、周辺への立ち入りが規制されていることもあり、火山活動の観測がほとんど行われていなかった。

草津白根火山2018年噴火で認識されたように、水蒸気噴火は火山活動が不活発な火口周辺でもおこりうる(大場ら, 2018)。したがって、新湯の水位変化を引き起こしているメカニズムを明らかにすることは、立山火山の活動を監視する上でも重要である。

また、間欠泉は火山噴火と酷似した噴出現象と考えられており(Nishimura *et al.*, 2006)、火山噴火の理解のための間欠泉の数値モデル実験も行われている(Toramaru and Maeda, 2013)。新湯の水位変化のメカニズムに関する研究成果は、火山の噴火メカニズムの解明に応用できる可能性がある。

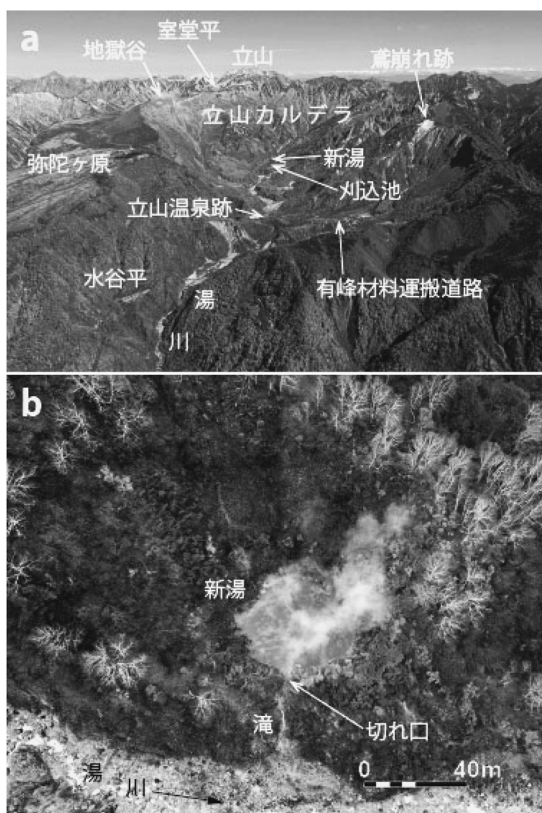


Fig. 2 Tateyama Caldera and the Shinyu hot spring pond seen from the sky.

a : Tateyama Caldera, b : The Shinyu hot spring pond.

図 2 上空からみた立山カルデラと新湯

a : 立山カルデラ, b : 新湯.

著者らは、間欠泉化した新湯の水位変化メカニズムを明らかにするために 2014 年からタイムラプスカメラと無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle : UAV), 温度データロガーを用いた水位・水温の現地観測を行ってきた。本論文では、2014~2018 年の新湯の水位・水温変化の特徴について報告する。

2. 調査地域

立山火山は、活動期毎に噴出中心を南から北へ移動させてきた複合火山である (Fig. 1) (原山ら, 2000)。活動期は古い方から I a 期 (22~20 万年前), I b 期 (15~10 万年前), II 期 (約 10 万年前), III 期 (9~4 万年前), IV 期 (4 万年前~現在) の 5 期に分けられる (Fig. 1) (Yamasaki *et al.*, 1966 ; 原山ら, 2000 ; 中野ら, 2010)。

IV 期になるとマグマ噴火は発生せず、室堂平周辺で水蒸気噴火を繰り返すようになった (小林, 1990 ; 奥野, 2008)。最新の噴火は 1836 年の地獄谷での水蒸気噴火と考えられている (中野・伊藤, 1998 ; 福澤, 2006 ; 奥野, 2008)。

この IV 期には、立山カルデラ内でも水蒸気噴火が発生し、火口湖 (新湯と刈込池) が形成された (Fig. 1)。新湯は、もともと冷水の池で、江戸時代には孫池もしくは孫刈込池と呼ばれていたが、1858 年に発生したマグニチュード 7.3~7.6 の安政飛越地震 (中央防災会議, 2008) の激しい揺れによって温泉水の池に変化し、以降、新湯と呼ばれるようになったとの伝承がある (大塚, 1891 ; 吉澤, 1904)。その後、明治~昭和初期は間欠泉 (吉澤, 1904 ; 1925), 昭和初期~2014 年は満水状態が続いた (藤井ら, 1960 ; 福井ら, 2018)。

新湯の温泉水は、シリカに過飽和 (300 mg/L) で、温泉水中にはシリカの球状体が析出している (赤羽, 1993 ; 赤羽ら, 1999)。池を漂う岩片を核にシリカの球状体が付着・集積し、世界的にも希少な玉滴石 (魚卵状蛋白石) が産み出されている (赤羽ら, 1989 ; 赤羽, 1993 ; 高橋ら, 2007)。

玉滴石は、1801 年に木内石亭が著した『雲根志』という書物に「山姥の握り飯」という名で記載されており (横江, 2010)、江戸時代にはすでに産出されていた可能性がある。このことは、安政飛越地震以前にも新湯で温泉水が湧出していた時期があったことを示唆する。

明治時代、この玉滴石を産出することで新湯は地質学者に注目され (神保, 1898 ; 1904 ; 吉澤, 1904 ; 大塚, 1891 ; 篠本, 1895 ; 1904)、全国的に有名になった。新湯は、立山一帯が活火山であることを示す証である点と、今なお玉滴石という希少で美しい鉱物を産み出している点が評価され、2013 年 10 月 17 日に国の天然記念物に指定された。

現在、新湯に通じる車道や登山道はない。有峰林道と立山砂防事務所が管理している有峰材料運搬道路を通行して、刈込池西側まで車で行き (Fig. 2a)、その後、踏み跡を頼りに 40 分程度藪を漕いでアプローチする。

3. 調査方法

3.1 オルソモザイク画像と等深線図

2019 年 9 月 20 日、新湯は干上がって湖底が完全に露出していた。RTK (Real Time Kinematic)-GNSS (Global Navigation Satellite System : 衛星測位システム) 搭載型 UAV で、この日の新湯周辺の空中写真を 54 枚撮影し、SfM (Structure from Motion) ソフトでデジタル表層モデル (Digital Surface Model : DSM) とオルソモザイク画像を作成した (Fig. 3)。さらに SfM ソフト上で DSM から新湯湖盆の等深線図を作成した。使用した UAV と SfM ソフトはそれぞれ DJI 社製 Phantom

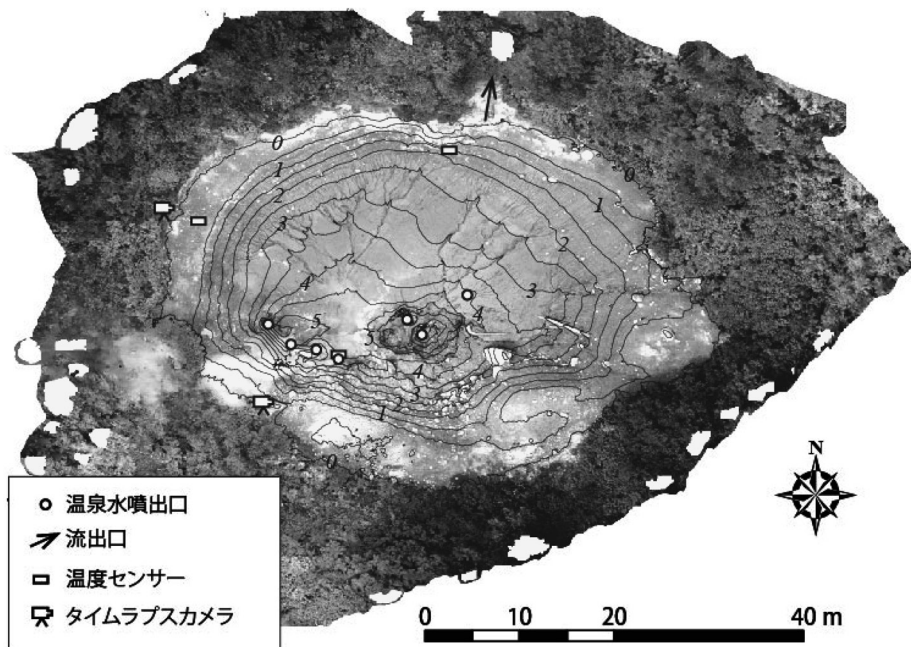


Fig. 3 Ortho-mosaic image and isobath diagram of the dried Shinyu hot spring pond. Photos taken on 20 September 2019. Contour interval is 0.5 m.

図 3 干上がった新湯のオルソモザイク画像と等深線図。
2019年9月20日撮影。等深線間隔は0.5m。

4 RTK と Agisoft 社製 Metashape 1.5 である。

オルソモザイク画像の範囲内にある倒木の両端や巨礫など5地点の位置を測量用GPS（イネーブラー株式会社製 GEM-2）で測定し、オルソモザイク画像上での位置と比較して誤差を求めた。その結果、水平誤差、鉛直誤差とも5cm程度であった。

3.2 水位観測

2014年6月11日～2018年10月23日に新湯の湖岸にタイムラプスカメラを2台設置して（Fig. 3）、湖面を10分間隔で撮影した。タイムラプスカメラの画像に写っていた湖面の範囲を、オルソモザイク画像と等深線図にプロットして、画像撮影時の水位をSfMソフト上で読み取った。水位は10cm間隔で読み取った。

使用したカメラはBrinno社製TLC200とTLC200proである。冬季は現地に行けないため、雪崩による破壊や電池切れの影響で欠測が多かった。

データが取得できた期間は2014年6月11日～10月29日、2015年6月1日～11月23日、2016年6月2日～11月8日、2017年6月14日～11月18日、2018年6月15日～10月23日である。

タイムラプスカメラによる水位観測では、夜間の水位を観測できない。このため、水深30cm（水位5.3m）と水深2m（水位3.6m）に温度データロガーを設置し（Fig. 3）、30分間隔で無人水温観測を行い水位の解析に利用した。温度が20～30℃急激に低下した時はセンサーが水面上に露出したと判断し、逆に急激に上昇したときは水没したと判断した。

使用した温度データロガーはT and D社製TR-52、温度センサーはTR-5106（測定精度は±0.3℃）

である。温度センサーはその上に礫を並べて湖底に固定した。データロガーは防水加工したプラスチックケースに入れペグを用いて湖岸に固定した。

観測期間は水深 30 cm (水位 5.3 m) が 2014 年 6 月 11 日～10 月 29 日, 2015 年 6 月 1 日～10 月 29 日, 2016 年 8 月 24 日～11 月 8 日, 2017 年 6 月 14 日～10 月 28 日, 2018 年 8 月 22 日～9 月 26 日である。水深 2 m (水位 3.6 m) は 2014 年 8 月 19 日～2015 年 7 月 29 日である。

なお, 硫化水素や温泉水噴出による酸性ミストの影響で, タイムラプスカメラおよび温度データロガーとも金属部分が半年程度で腐食した。このため, 1 年ごとの機材交換が必要であった。

3.3 温泉水の噴出口付近の温度観測

間欠泉は, 沸点に達した水が噴出する間欠沸騰泉かんけつふつとうせんと沸点に達しない比較的低温の水が噴出する間欠泡沸泉けつほうふつせんの 2 つに大きく分けられ, 噴出メカニズムも異なる (鏡, 2015)。新湯の表層水温は 65～70℃と高く, 間欠沸騰泉の可能性が高いものの, 間欠沸騰泉であると確定するには, 沸点を超える温泉水の噴出を確認する必要がある。

そこで, 新湯の温泉水の噴出口の 1 つで温度データロガーを用いた無人水温観測を行い (Fig. 3), 噴出時の温泉水の温度を明らかにした。観測期間は 2016 年 7 月 19 日～9 月 15 日の 58 日間である。

温度データロガーは T and D 社製 RTR-502, 温度センサーは白金抵抗温度センサー TR-8110 (測定精度は $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$) を用いた。温度センサーは噴出口付近の岩の割れ目 (水深 5 m 付近) に挟み込んで固定し, データロガーは防水加工したプラスチックケースに入れ, ペグを用いて湖岸に固定した。

4. 水位と水温の現地観測結果

4.1 湖盆地形と噴出口の配列

Fig. 3 は干上がった新湯のオルソモザイク画像と等深線図である。この図から新湯は東西方向の長さが約 47 m, 南北方向の長さが約 39 m, 最大水深が約 5.6 m, 湖水面積が約 1,330 m^2 , 湖水体積が約 2,642 m^3 であることが分かった。

温泉水の噴出口は少なくとも 7 つ確認できた (Fig. 3)。ほとんどの噴出口は湖盆の中央よりもやや南にある水深 5 m 以下の最深部に分布していた (Fig. 3)。噴出口の直径は 40～50 cm である。

噴出口は西南西～東北東の方向に配列していた (Fig. 3)。この配列方向は, 新湯付近まで伸びている活断層, 跡津川断層の走向 (Fig. 1) とほぼ一致する (金田, 2019)。したがって, 噴出口の形成には跡津川断層と同じ応力場が関与している可能性がある。

4.2 タイムラプスカメラの画像

Fig. 4 は 2016 年 6 月 27 日～7 月 5 日の新湯のタイムラプスカメラ画像の一部である。新湯では, 気泡を伴う温泉水の噴出が休止すると, 温泉水が噴出口に逆流して吸い込まれ水位が下降した (Fig. 4a)。水位下降中は, 湖面に気泡が見られない (Fig. 4a)。

温泉水は半日ほどで完全に排水した (Fig. 4b)。干上がっている期間, 噴出口からは間欠的に噴気が立ちのぼった。

干上がっている期間が 2 日間ほど続いた後, 水位が 0.7 m 程度まで 2～3 時間で上下動する前兆的な温泉水噴出が 3 回ほど発生した (Fig. 4c)。この前兆的な噴出がみられた期間は 1 日半程度であった。なお, 本格的な温泉水の噴出の前に前兆的な噴出 (minor eruptions もしくは preplay と呼ばれる) が起こることは, 海外の複数の間欠泉でも確認されている (Hurwitz and Manga, 2017)。

前兆的な噴出がみられた期間の後, 継続的な温泉水の噴出によって水位が上昇していき (Fig. 4d), 約4日間で新湯は満水になった (Fig. 4e). 満水期間は3日間ほど続いた.

なお, 新湯の温泉水噴出は, 気泡を伴う温泉水が長期間にわたって時間毎, 噴出口毎に強弱を繰り返しながら湧き出て湖底にたまり, 水位が徐々に上昇していくという特徴がある (Fig. 4d). 細い噴出管から温泉水が短時間に数~数十mの高さまで吹き上がる通常の間欠泉とは噴出様式が異なる.

4.3 水位変化の各期間の期間幅

Fig. 5に2016年6月26日~7月8日のタイムラプスカメラ画像から読み取った新湯の水位変化の1周期を示す. 新湯の水位変化は, 水位が下降していく期間 (以下, 下降期と呼ぶ), 完全に排水して干上がっている期間 (以下, 干上期と呼ぶ), 前兆的に水位が短時間で上下動する期間 (以下, 前兆期と呼ぶ), 継続的に水位が上昇していく期間 (以下, 上昇期と呼ぶ), 満水状態の期間 (以下, 満水期と呼ぶ) に分けられる (Fig. 5).

Fig. 6に2014年と2016~2018年の水位変化の各期間の期間幅を示す. 4.4で述べるように2015年は非常に不規則な水位変化であったため, 期間幅の分析から除いた.

各期間の期間幅は下降期が0.5~1日間程度 (平均約0.7日間), 干上期が2~5日間程度 (平均約3日間), 前兆期が0~2日間程度 (平均約0.5日間), 上昇期が3~5日間程度 (平均約4日間), 満水期が0~14日間程度 (平均約5日間) であった (Fig. 6).

満水期だけがばらつきが非常に大きかった. この原因については4.6で述べるように, 新湯の地下には, ガス・温泉水の供給源が少なくとも2つあり, 1つ

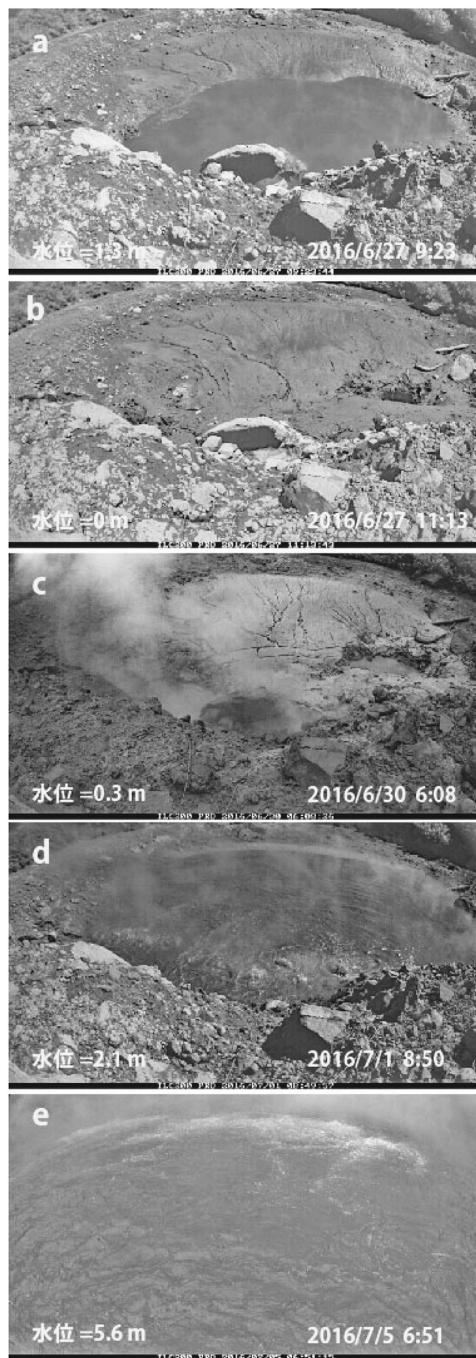


Fig. 4 Water level change of the Shinyu hot spring pond taken by a time-lapse camera.

a : Declining water level b : Dry condition, c : Predictive spurting, d : Rising water level, e : Full water.

図4 タイムラプスカメラで撮影した新湯の水位変化.
a : 水位下降, b : 干上がり, c : 前兆的な噴出, d : 水位上昇, e : 満水.

の供給源だけからガス・温泉水が供給される場合、満水期は短く、満水期の途中で、もう 1つの供給源からもガス・温泉水の供給がある場合、満水期は長くなるためと推測された。

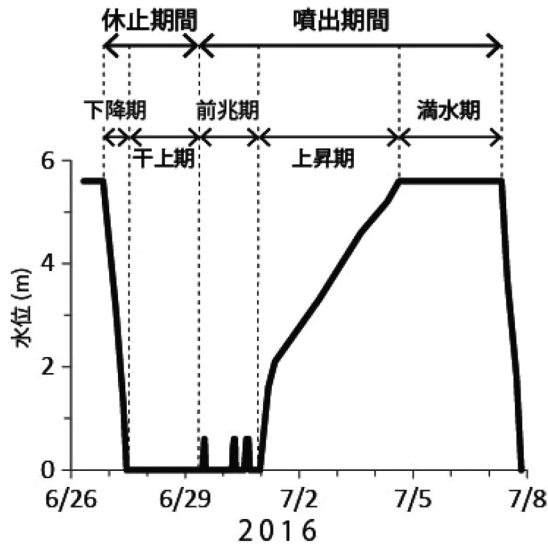


Fig. 5 One cycle of water level change of the Shinyu hot spring pond.

図 5 新湯の水位変化の 1 周期.

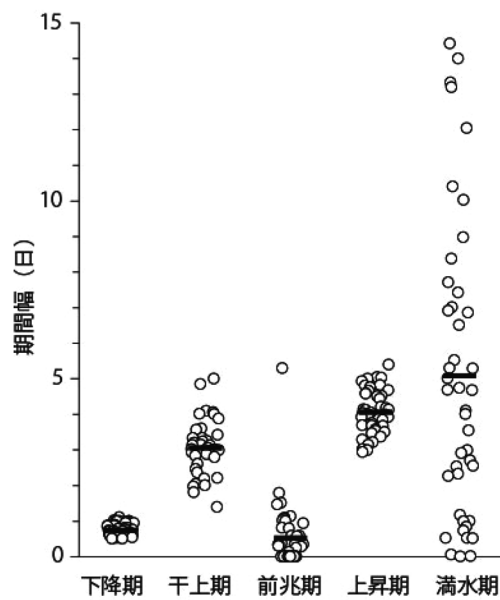


Fig. 6 Time duration of each state within the water level change of the Shinyu hot spring pond.

The horizontal bar indicates the average value.

図 6 新湯の水位変化の各期間の期間幅. 横棒は平均値を示す.

4.4 水位変化の経年変化

次に水位変化の経年変化をみている。Fig. 7に2014~2018年の約5年間の水位変化を示す。水位0mが干上がった時の水位、水位5.6mが満水時の水位である。

2014年6月11日~10月29日は約10日周期で干満を繰り返した (Fig. 7a)。この年の水位変化はほぼ周期的であったといえる。

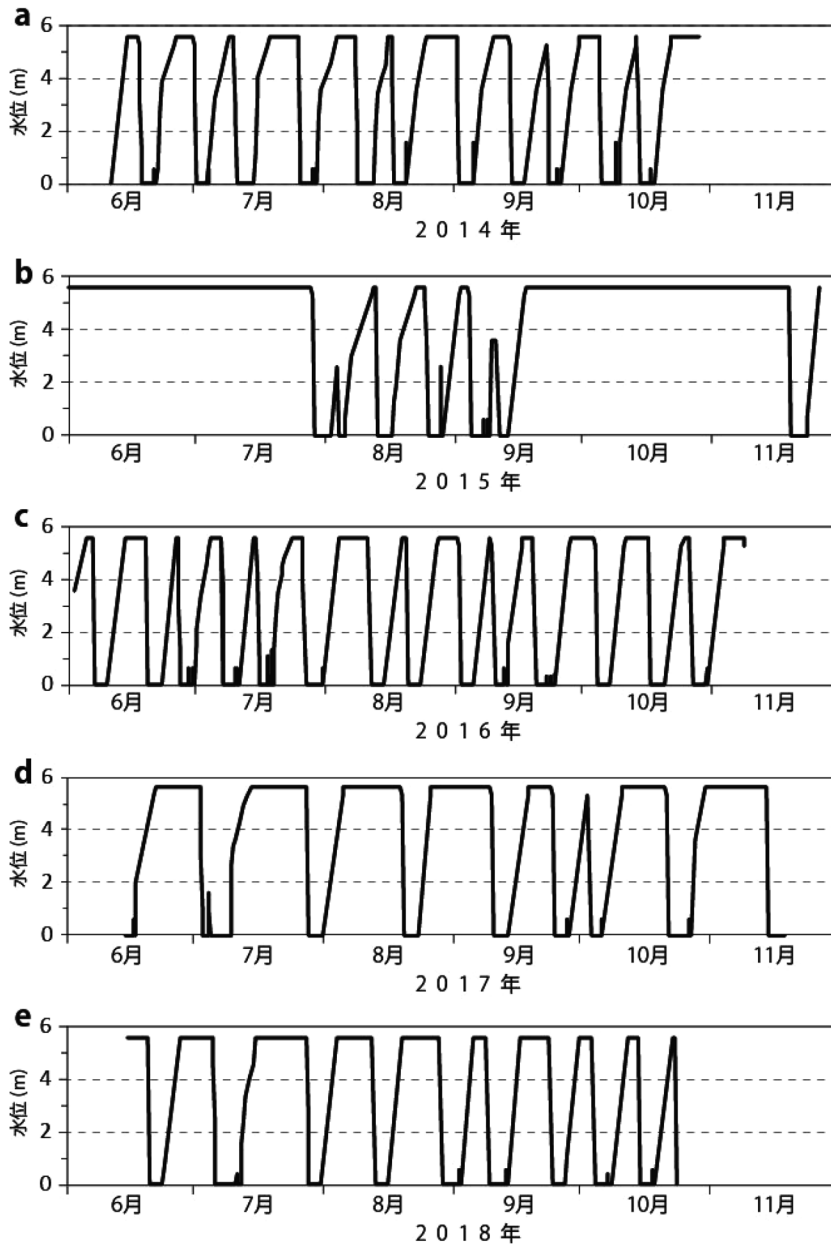


Fig. 7 Changes in the water level of the Shinyu hot spring pond between 2014 and 2018.

図 7 2014~2018 年の新湯の水位変化。

2015 年は 6 月 1 日から 7 月 28 日まで約 2 ヶ月間にわたって満水期が続く (Fig. 7b), その後, 7 月 28 日~9 月 17 日に 3 回干満を繰り返した. 8 月 3 日には水位が 2.6 m まで上昇してすぐに下降, 9 月 9 日には水位が 3.6 m まで上昇して 1.3 日後に下降するなど, 満水にならない水位変化パターンもみられた. 9 月 17 日からは 11 月 18 日まで再び約 2 ヶ月間にわたって満水期が続いた. この年の水位変化は, 非常に不規則であったといえる.

間欠泉は地震による岩盤の亀裂発達に伴う地下水浸透量の変化に敏感に応答してその周期を変化させる. 例えば, 500 以上の間欠泉が分布する世界最大の間欠泉地帯である米国のイエローストーン国立公園では, 2002 年アラスカ・デナリ地震 (M7.9) の直後, 震源から 3,000 km 以上離れているのにも関わらず, 間欠泉周期の顕著な変化がみられた (Magma and Brodsky, 2006). 周期の変化は数ヶ月間続いた.

新湯の周辺では, 2014 年 11 月 22 日に, 長野県神城断層地震 (M6.7) が発生している. この地震の震源は新湯から 30 km 程しか離れていない. 2015 年に新湯の水位変化が不規則になったのは, この地震によって新湯周辺の岩盤にも新たな亀裂が発達し, 地下水の浸透量が変わったことが原因である可能性がある.

2016 年 6 月 2 日~11 月 8 日は約 11 日周期で干満を繰り返した (Fig. 7c). この年には 2014 年に類似したほぼ周期的な水位変化がみられた. なお, 11 月中旬以降は周期が長くなる傾向がみられた.

2017 年 6 月 14 日~11 月 18 日は約 18 日周期で干満を繰り返した (Fig. 7d). この年の水位変化はほぼ周期的であったが, 周期自体は 2014 年や 2016 年よりも長かった.

2018 年 6 月 15 日~10 月 23 日もほぼ周期的に干満を繰り返した (Fig. 7e). 周期は 6~8 月が約 16 日であったが, 9~10 月になると約 11 日と短くなった.

以上のように, 2014 年と 2016~2018 年の新湯の水位変化は, 10~18 日周期であることが明らかになった. また, 2015 年のように不規則な水位変化を示す年もあることが分かり, その原因として地震の影響が推測された.

4.5 噴出・休止期間の比較

Fig. 8 に 2014~2018 年の新湯の噴出期間と休止期間の変化を示す. 噴出期間は, 前兆期, 上昇期, 満水期を合わせた期間, 休止期間は, 下降期と干上期を合わせた期間である (Fig. 5). 前述したように 2015 年は非常に不規則な水位変化であったため噴出・休止期間の分析から除いた.

休止期間は 4 日間前後でほぼ一定で推移した (Fig. 8). これに対して噴出期間は, 最短で約 4 日間, 最長で約 23 日間とばらつきが非常に大きかった (Fig. 8). 噴出期間の平均は約 10 日間で, 休止期間より約 2.5 倍も長い.

イエローストーンの間欠沸騰泉は, 噴出期間が数分間, 休止期間が数時間程度で, 休止期間の方が噴出期間よりも 1~2 桁ほど長いオーダーのものがほとんどである (たとえば Bryan, 2018). 新湯は噴出期間が平均約 10 日間ときわめて長く, しかも, 噴出期間の方が休止期間よりも平均で約 2.5 倍も長い. このため, 世界的にみても非常に特異な噴出・休止パターンをもつ間欠泉といえる.

4.6 噴出口付近の温度変化

噴出口付近の温度は, 水位上昇が始まった直後に約 90℃ まで急上昇し, 水位上昇が始まって 1 日程度経過してから, 振幅が 5℃ 程度, 数時間周期で, 振動するような温度変化が続くようになった (Fig. 9). 水温は, 振動するような温度変化が始まった直後がもっとも高く, 最高水温は 100℃ を超えることもあった (Fig. 9b). 新湯の湖面標高約 1,620 m の沸点は約 95℃ であり, 沸点に達した温泉水と水蒸気が噴出されているのは確実に, 新湯は間欠沸騰泉といえる.

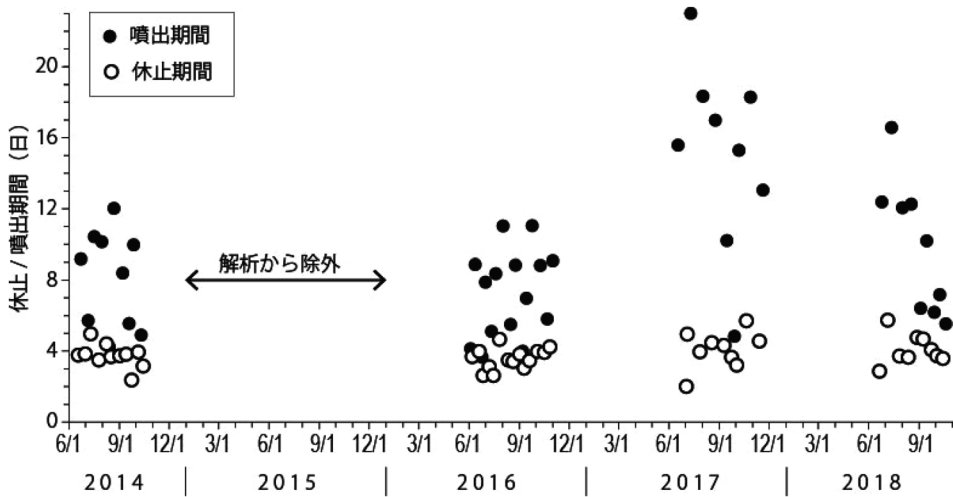


Fig. 8 The spouting and pause times of the Shinyu hot spring pond from 2014 to 2018.
 図 8 2014～2018 年の新湯の噴出・休止期間。

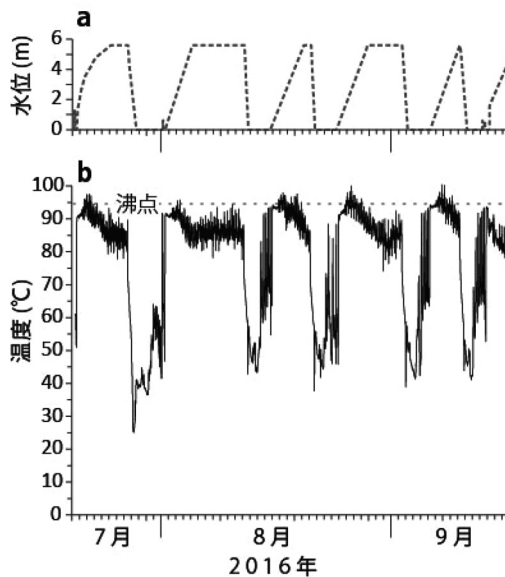


Fig. 9 Water level and temperature near the spouting vent (5 m in depth) in the Shinyu hot spring pond from 19 July to 15 September 2016.
 a : Water level. b : Temperature near the spouting vent. See Fig. 3 for location of temperature sensor.

図 9 2016 年 7 月 19 日～9 月 15 日の新湯の水位と噴出口付近（水深 5 m 付近）の温度。
 a : 水位, b : 噴出口付近の温度。温度センサーの位置は Fig. 3 に示した。

8 月 4 日～11 日と 8 月 27 日～9 月 1 日の満水期は比較的長く, 1 週間前後継続した。両満水期における噴出口付近の水温は, 期間前半に 85℃ 前後まで低下したが, 期間半ばもしくは後半になると, ほぼ横ばいもしくは緩やかな上昇に転じた (Fig. 9b)。

8月19~20日と9月9日の満水期はわずか1~2日間と短かった。噴出口付近の水温は、両満水期とも期間を通して低下し続けた (Fig. 9b)。

間欠泉化した新湯では、満水期直前の pH が6前後、満水期後半の pH が約3.4で、満水期の途中から酸性の温泉水が噴出している可能性が指摘されていた (齋藤, 2018)。これらのことから、新湯の地下には、ガス・温泉水の供給源が少なくとも2つあり、1つの供給源だけからガス・温泉水が供給される場合、満水期は短く、満水期の途中で、もう1つの供給源からもガス・温泉水の供給がある場合、満水期は長くなると推測された。

水位下降が始まると噴出口付近の温度は25~40℃まで急激に低下し、干上期に入ると25~55℃で推移した (Fig. 9b)。干上期には日射の影響を受けない深夜でも40℃を超える温度が記録されていることから、噴出口付近の湖底は地下から加熱され続けている可能性が高い。

5. 新湯の水位変化の特徴

新湯の水位変化の1周期について模式的に示したのが Fig. 10 である。噴出口からの温泉水の噴出がなくなると、温泉水は噴出口に逆流して吸い込まれ水位が下降する。水位下降中は、湖面に気泡が見られない。温泉水は0.5~1日間で完全に排水する (Fig. 10)。

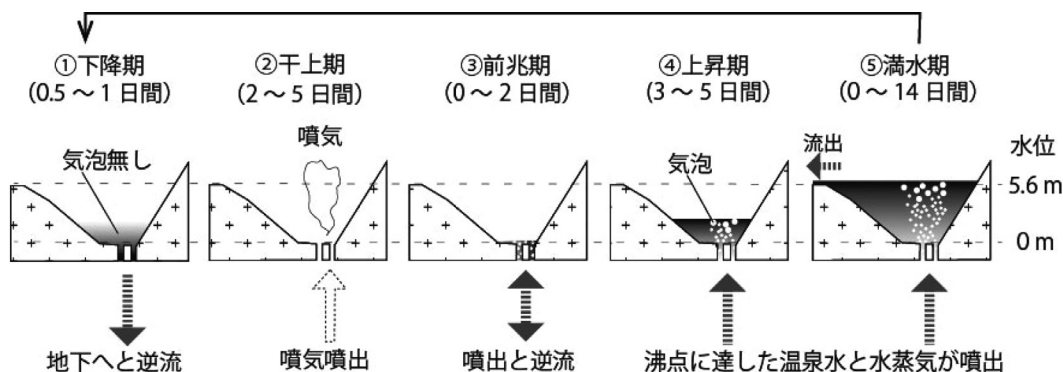


Fig. 10 Schematic diagram of 1 cycle of water level change in Shinyu hot spring pond.

図 10 新湯の水位変化の1周期の模式図。

干上期、噴出口からは間欠的に噴気が立ちのぼる。干上期が2~5日間程度続いた後、短時間に水位上昇・下降を繰り返す前兆期に入る (Fig. 10)。前兆期は最大でも2日間程度で、前兆期がないこともある。

前兆期の後、噴出口から気泡を伴う温泉水が継続的に噴出する上昇期に入り、3~5日間程度で満水になる (Fig. 10)。噴出する温泉水の水温は、上昇期が始まった時点で約90℃、1日経過すると沸点に達した。

満水期の期間幅は0~14日間程度とばらつきが大きかった (Fig. 10)。新湯の地下には、ガス・温泉水の供給源が少なくとも2つあり、1つの供給源だけからガス・温泉水が供給される場合、満水期は短く、満水期の途中で、もう1つの供給源からもガス・温泉水の供給がある場合、満水期は長くなると推測された。

6. おわりに

2014年から間欠泉に変化した立山カルデラの火口湖新湯で湖盆地形の測量と水位・水温の現地観測を行った。その結果、以下のことが分かった。

新湯湖底にある7つの温泉水の噴出口は西南西—東北東方向に配列していた。この配列方向は新湯周辺まで伸びている跡津川断層の走向に近い。噴出口の形成には跡津川断層を形成したものと同様の応力場が関与している可能性がある。

新湯の水位変化の1周期は以下であった。①噴出した温泉水が噴出口に逆流して排水（0.5～1日間程度）、②干上がった状態が継続（2～5日間程度）、③前兆的な温泉水の噴出と排水が繰り返される（0～2日間程度）、④噴出口から温泉水が継続的に噴出し水位上昇（3～5日間程度）、⑤満水状態（0～14日間程度）。

新湯の温泉水噴出は、気泡を伴う温泉水が長期間にわたって時間毎、噴出口毎に強弱を繰り返しながら湧き出て湖底にたまり、水位が徐々に上昇していくという様式であった。細い噴出管から温泉水が短時間に数～数十mの高さまで吹き上がる通常の間欠泉とは噴出様式が異なる。

2014～2018年の水位変化の周期は、不規則だった2015年を除くと10～18日周期であった。水位変化を温泉水噴出期間と休止期間で区分すると、噴出期間は平均10日間程度と極めて長く、休止期間は平均4日間程度と相対的に短かった。噴出期間がこれほど長期間にわたる間欠泉は例がなく、新湯は世界的にみても特異な噴出・休止パターンをもつ間欠泉であるといえる。

また、噴出される温泉水は沸点に達していた。このことから、新湯は間欠沸騰泉と判明した。

今後は、鏡・福井(2016)やKagami(2017)で検討したように数理モデルによる水位変化の数値実験を行い、新湯の水位変化のメカニズム解明に向けた研究を進めていく予定である。

謝 辞

本研究は国土交通省北陸地方整備局立山砂防事務所のご協力・ご支援によって実現した。また、環境省長野自然環境事務所、林野庁富山森林管理署、文化庁には中部山岳国立公園内および天然記念物での調査を許可して頂いた。富山県には県有地の使用を許可して頂いた。鏡 裕行氏（藤田医科大学）には研究全般にわたってご助言を頂いた。米谷正広氏（高岡西高校）には、2006～2007年の新湯の水温データを参照させて頂いた。後藤優介氏（茨城県自然博物館）には現地調査を補助して頂いた。2名の匿名査読者には、原稿について貴重なご意見を頂いた。

以上の皆様に心より感謝申し上げます。

引用文献

- 赤羽久忠 (1993) : 富山県立山温泉新湯における蛋白石の生成. 岩鉱, **88**, 469-477.
- 赤羽久忠・後藤道治・山本 茂 (1989) : 富山県立山温泉新湯産の鯛状珪石 (玉滴石) および蛋白石. 地球科学, **43**, 176-179.
- 赤羽久忠・古野 毅・宮島 宏・後藤道治・太田敏孝・山本 茂 (1999) : 温泉水の流れの中における珪化木形成—珪化の速度測定と珪酸の浸潤機構—. 地質学雑誌, **105**, 108-115.
- Bryan, T.S. (2018) : The Geysers of Yellow Stone Fifth Edition. 589 p, University Press of Colorado, Louisville.
- 中央防災会議 (2008) : 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 (1858 飛越地震). 205 p, 内閣府.
- 藤井昭二・植木忠夫・平田卓郎・藤川 浩 (1960) : 刈込池と新湯地獄 (新湯) (立山山系・湖沼群の研究, その3). 富山教育, **469**, 1-4.

- 福井幸太郎・菊川 茂・飯田 肇 (2018) : 立山カルデラ新湯で発生している激しい水位変動. 富山県立山カルデラ砂防博物館研究紀要, **15**, 29-35.
- 福澤仁之 (2006) : ミクリガ池年縞堆積物からみた立山信仰の開始—なぜ人は立山に登ったのか? 安田喜憲編「山岳信仰と日本人」, 125-146, NTT 出版.
- 原山 智・高橋 浩・中野 俊・荻谷愛彦・駒澤正夫 (2000) : 立山地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 218 p. 地質調査所.
- Hurwitz, S. and Manga, M. (2017) : The Fascinating and Complex Dynamics of Geyser Eruptions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **45**, 31-59.
- 神保小虎 (1898) : 立山の玉滴石と硫黄. 地質学雑誌, **5**, 544.
- 神保小虎 (1904) : 越中立山の鯛状玉髓 (俗称 玉滴石). 地質学雑誌, **11**, 372-375.
- 鏡 裕行 (2015) : 間欠泉の噴出機構の研究の現状と展望. 温泉科学, **65**, 120-126.
- 鏡 裕行・福井幸太郎 (2016) : 立山カルデラ内の火口湖「新湯」の水位変動への間欠泡沸泉の噴出動力学モデルの適用. 温泉科学, **66**, 40-45.
- Kagami, H. (2017) : The Mathematical Model that Describes the Periodic Spouting of a Geyser Induced by Boiling. *Proc. SPIE 10169* : 101692K-1-7, doi : 10.1117/12.2256620.
- 金田平太郎 (2019) : 1 : 25,000 活断層図 牛首断層帯及び跡津川断層帯とその周辺「立山」解説書. 9 p. 国土地理院技術資料 D1-No. 927.
- 小林武彦 (1990) : 立山火山とその周辺の第四系. 日本地質学会編「日本地質学会第 97 年学術大会見学旅行案内書」. 111-142, 日本地質学会.
- Magma, M. and Brodsky, E. (2006) : Seismic Triggering of Eruptions in the Far Field : Volcanoes and Geysers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **34**, 263-291.
- 中野 俊・伊藤順一 (1998) : 立山火山の噴火記録. 火山, **43**, 123-126.
- 中野 俊・奥野 充・菊川 茂 (2010) : 立山火山. 地質学雑誌, **116** (補遺), 37-48.
- Nishimura, T., Ichihara, M. and Ueki, S. (2006) : Investigation of the Onikobe Geyser, NE Japan, by Observing the Ground Tilt and Flow Parameters. *Earth Planets Space*, **58**, e21-e24.
- 野上健治 (2016) : 日本の火山観測と火山防災—温泉観測から得られるもの—. 温泉科学, **66**, 194-197.
- 奥野 充 (2008) : 立山火山の地獄谷類質テフラ層. 米谷正広編「再発見立山火山—アプローチ最前線—第 21 回企画展 展示解説書」, 40-45, 立山カルデラ砂防博物館, 富山.
- 大場 武・西野佳奈・沼波 望・谷口無我 (2018) : 2018 年本白根山噴火の原因について. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会予稿集. <https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jpgu2018/SVC41-38/public/pdf?type=in&lang=ja> (最終閲覧日 : 2019 年 2 月 1 日).
- 大塚専一 (1891) : 越中の蛋白石. 地学雑誌, **32**, 114.
- 齋藤直子 (2018) : 立山カルデラ新湯で観測された水位変動の現地観測結果. 東京管区調査研究会誌, **50**.
- 篠本二郎 (1895) : 玉滴石 (Hyalite). 地質学雑誌, **2**, 199.
- 篠本二郎 (1904) : 越中国立山新湯産玉滴石の神保氏の説に就きて. 地質学雑誌, **11**, 414-416.
- 高橋 泰・赤羽久忠・今井裕之・米谷正広・室井克則・國香正稔・山本 茂 (2007) : 立山温泉新湯のオパール調査報告. 立山カルデラ砂防博物館研究紀要, **8**, 1-4.
- Toramaru, A. and Maeda, K. (2013) : Mass and Style of Eruptions in Experimental Geysers. *Journal of Volcanology and Geothermal Reserches*, **257**, 227-239.
- Yamasaki, M., Nakanishi, N. and Miyata, K. (1966) : History of Tateyama Volcano. *Sci. Rep.*

Kanazawa Univ. 11, 73-92.

横江孚彦訳 (2010) : 口語訳 雲根志. 503 p, 雄山閣, 東京.

吉澤庄作 (1904) : 越中地質断片 (新湯, 玉滴石, 材木坂, 角閃石, 角石, 硫黄, 銅鉱床, 石器).
地質学雑誌, 11, 406-414.

吉澤庄作 (1925) : 立山. 162 p, 北陸出版社.