HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	しかべ間歇泉の多項目観測と特徴的な噴出周期変化について ： 序報
Author(s)	柘植, 鮎太; 青山, 裕
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 83, 49-70
Issue Date	2020-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.83.49
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/77091
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_83_p49-70.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 83, March 2020, pp. 49 － 70
doi : 10. 14943 / gbhu. 83. 49

論説

しかべ間歇泉の多項目観測と特徴的な噴出周期変化について：序報

柘植　鮎太
北海道大学大学院理学院自然史科学専攻
青山　　裕
北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

（2020 年 2 月 25 日受理）

Multi-parameter observations at Shikabe Geyser, and unique changes in interval between eruptions (preliminary report)

Ayuta TSUGE
Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University
Hiroshi AOYAMA
Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

(Received February 25, 2020)

We started multi-parameter observations on November 25, 2019 using several physical monitoring instruments at the Shikabe geyser in order to obtain new knowledge on the phenomena associated with the geyser eruption and to understand the mechanism of IBE(Interval between eruptions) change. We confirmed regular pattern of signals corresponding to eruption and quiescence in the observed data. Our data also show that IBE of the Shikabe geyser was not always constant but rather showing characteristic change in time. The average of IBE during normal eruption cycle is about 12.5 to 13.5 minutes. IBE sometimes becomes 2-3 minutes longer than the mean interval, and the next IBE is certainly about 1 minutes shorter than the average. Finally, we estimated the hydraulic head of the Shikabe geyser based on the following two conditions obtained from the observed data. 1. Ascent flow rate near the surface of the water level just before overflow; 2. Quiescence time between the end of previous eruption and the start of the next overflow. Hydraulic head value estimated from these two conditions was 1.03-3.73m above the ground surface.

BY-NC
この論文はクリエイティブ・コモンズ 表示 - 非営利 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています（http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/）.

Ⅰ．は　じ　め　に

間欠泉は水蒸気や非凝縮性ガスに駆動されて間欠的に地表に噴出する温泉であり，温泉や噴気孔が存在するような地熱地帯の特徴の一つとして知られる．また，間欠泉は噴出に伴う物理過程が火山噴火のそれに類似しているため，火山噴火のアナロジーとしても注目されている．

間欠泉の最初の噴出メカニズムはMackenzie（1811）によって提唱され（Mackenzie, 1811），空洞説と呼ばれる．地下にconduitに繋がる空洞の存在を仮定し，空洞内の地下水が周囲の高温な地熱によって熱せられる状況を考える．沸騰によって発生した水蒸気の圧力がconduit内の水柱による水圧を超えると，conduit内の水が押し出されて地表に噴出する．続いてBunsen（1847）によって提唱された噴出メカニズムは垂直管説と呼ばれ（Bunsen, 1847），単純な垂直管のconduitのみを仮定する．Conduit内の地下水が周囲の地熱によって熱せられる状況を考え，ある深さの地下水がその水圧に対する沸点に達すれば，発生した水蒸気によって沸騰面より上部の地下水が噴出する．空洞説と垂直管説は噴出メカニズムの古典的な力学モデルとして広く知られている．

空洞説と垂直管説は，地下水が周囲の地熱に熱せられることによって沸騰するという点で共通している．一方で，福富（1942b,c）は，地下水が自身の持つ熱によって沸騰を起こすモデルを提唱した（福富，1942b,c）．まず，帯水層に供給される地下水は，湧出口における沸点よりは高温であるが，帯水層の深さの水圧における沸点には達しない温度の温泉水であり，またその静止水頭は湧出口よりも高いという仮定を置く．静止水頭が湧出口よりも高いため，いずれかの時点で温泉水が湧出口より溢れ始めるが，最初の頃は上昇中にconduit壁から熱を奪われて温度が若干低下した温泉水が湧出する．しばらく湧出が続くと，conduit壁が十分に温められるため，温泉水がconduitを上昇する際の温度低下が小さくなり，湧出口近くまで十分高温のまま上昇してくる．この時，上昇による温度低下と減圧量の関係で，温泉水が上昇中に自身の持つ温度で沸騰しうる圧力に達すると沸騰を起こし，発生した水蒸気によって沸騰面より上部の温泉水が噴出する．間欠泉によって想定される地下の形状は異なるが，現在では噴出メカニズムは上記の減圧沸騰に基づくモデルで説明されることが多い．

間欠泉の大きな特徴である噴出の周期は，間欠泉によって大きく異なり，数分から数時間のものまで幅広い．また，周期は必ずしも一定ではなく，複数の周期を持つ間欠泉や，数ヶ月単位で周期が変動する間欠泉も存在する．例えば，チリのEl Tatioにある El Cobreloa 間欠泉は，約14分周期の小規模な噴出を数回繰り返した後，約1時間継続する大規模な噴出を約4時間周期で起こす（Namiki et al., 2014）．また，アメリカのイエローストーン国立公園にある複数の間欠泉は，降水量や河川流量に影響されているように見える，長期的な周期変化が確認された（Hurwitz et al., 2008）．しかしながら，このような周期変化のメカニズムを定量的に議論した例はまだ少ない．

しかべ間歇泉は噴出の規模が大きい日本でも有数の間欠泉である．また，噴出周期が比較的短周期のため観測データを収集しやすく，conduitが鉄管のため構造が制約しやすいという利点が

ある．しかし，しかべ間歇泉を調査した例は非常に少なく，大谷（1961）による観測調査以降は一度も観測が行われていない．そこで，本研究では間欠泉の噴出に伴って起こる物理現象について新たな知見を得るとともに周期変化のメカニズムを理解するために，しかべ間歇泉で物理観測機器を用いた多項目観測を行った．ここでは，まず観測内容と結果，そして観測によって明らかになった特徴的な噴出周期変化について紹介する．最後に，今後の議論に向けて行なった静止水頭の推定について述べる．

Ⅱ．しかべ間歇泉について

1. 概要

鹿部温泉は北海道渡島半島東岸の内浦湾が開く位置にあり，西北西の方向には北海道駒ヶ岳がある（Fig.1a，Fig.1b）．しかべ間歇泉は，鹿部温泉地帯にある「道の駅しかべ間歇泉公園」の中

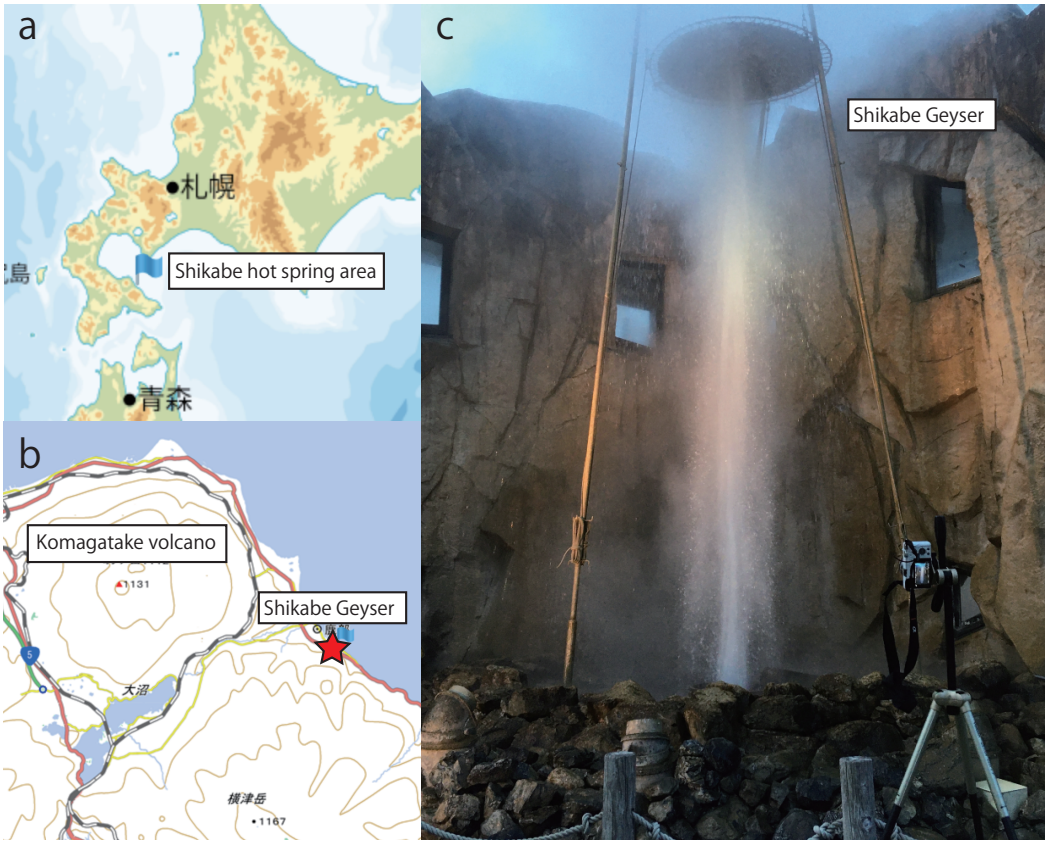


Fig. 1. (a) Map of Hokkaido showing the location of the Shikabe hot spring area (Geospatial Information Authority of Japan). (b) Map of southern Hokkaido showing the location of the Shikabe geyser and Komagatake volcano (Geospatial Information Authority of Japan). (c) The Shikabe geyser eruption.

にある間欠泉である（Fig.1c）．しかべ間歇泉は昭和 27 年（1952 年）に温泉掘削の過程で発見された（大谷，1961）．そのため，直径 150mm，長さ 26m の鉄管が埋め込まれており，それが conduit としての役割を果たしている．しかべ間歇泉における最初の地球物理観測は大谷（1961）によって行われ，当時は噴出時の高さが 2m 程度で，噴出周期は 4 分 59 秒～ 9 分 27 秒の間でばらつくような噴出状況だったようである（大谷，1961）．また，鉄管内の泉温が測定されており，地表面から 26m 下の泉温は 113℃と記録されている．現在では，大谷（1961）の調査当時から噴出状況が変化しており，噴出時の高さは 15m に達し，噴出周期は 10min 程度であるとされている．2019 年 12 月 19 日に園内に掲示されていた温泉分析表（2018 年 8 月 24 日発行）によれば，しかべ間歇泉の泉質はナトリウム－塩化物温泉（低張性弱アルカリ高温泉）で蒸発残留物は 4.113g/kg である．豊富な温泉成分のためにスケール対策は必須で，直径 3/8 インチ長さ 16m の薬注管が口元から鉄管内に伸びており，スケール抑制剤が一定時間ごとにモーターによって注入されている．それでも時間が経つにつれスケールによって鉄管が閉塞していくため，年に 1 回業者によ

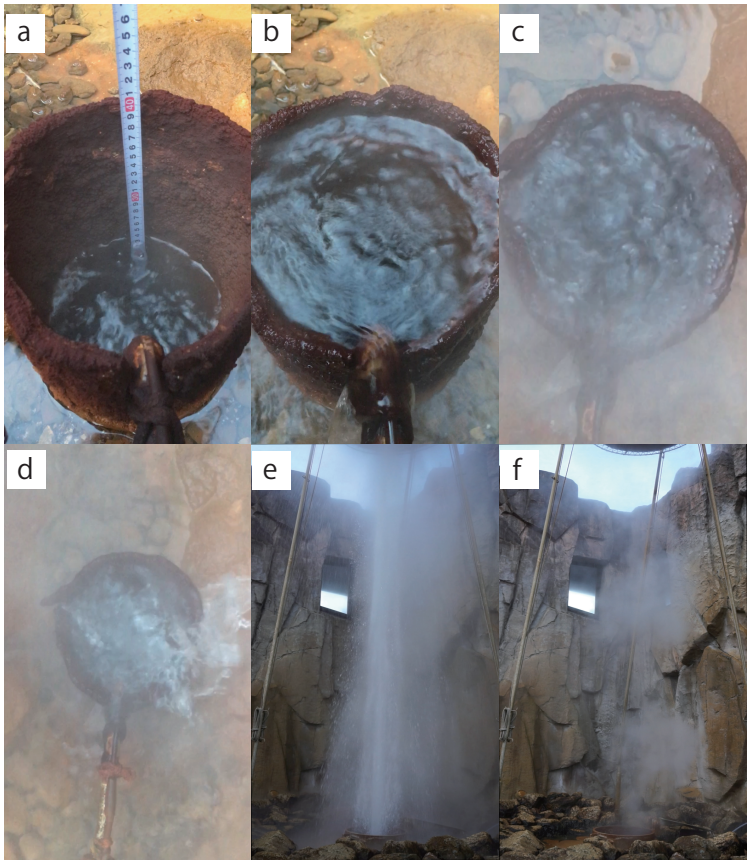


Fig. 2. Visuial observation of eruptions. (a)Water level rises gradually. (b) Water starts to overflow. (c) Water is completely boiling. (d) Water is boiling vigorously and erupting droplets. (e) Geyser starts major eruption. (f) End of eruption.

るボーリング清掃が行われている．また，しかべ間歇泉公園は観光客向けに整備されており，噴出時に高く吹き上がった温泉水が敷地外へ飛び出さないように，口元から高さ 7m の位置に蓋が設置されている．噴出した温泉水は水路を通って貯水槽に一旦貯留され，その後は園内に併設されている足湯に利用されている．

2. 噴出状況

初めは，水面が比較的静かな状態で，地表付近で約 1cm/s の速度で上昇してくる（Fig.2a）．しかべ間歇泉周辺の温泉では静止水頭が井戸の口元よりも高いことが知られており，しかべ間歇泉でも上昇してきた水面が口元まで達するとそのまま溢れ出す（Fig.2b）．湧出が続くにつれて鉄管の内部を上昇してくる気泡の数が増え，スラグのような大きな気泡も上がってくるようになる．湧出開始から 2 分も経つと完全な沸騰状態となり（Fig.2c），さらに 1 分後には沸騰の激しさを増して飛沫をあげるようになる（Fig.2d）．ついには沸騰の勢いにより上部に取り付けられた蓋まで水位が上昇し，本格的な噴出が始まる（Fig.2e）．噴出をしている最中は，約 1 秒間隔で脈動するように勢いが強くなっており，勢いが強い時は横方向にも飛沫が大きく飛散しているのが見える．50 秒程度噴出の勢いを維持した後は，次第に水位が下がり 10 秒程度で地表に噴出しなくなる（Fig.2f）．地表に噴出しなくなった後も，水面は目視できないがしばらくは管の中で地鳴りのような音が響き，沸騰が継続している様子を感じさせる．最終的には地鳴りのような音も無くなり，最初の静かに水位が上昇する状態に戻る．

Ⅲ．しかべ間歇泉の多項目観測

1. 観測内容及び方法

観測は 2019 年 11 月 25 日から開始した．観測項目は微気圧，空振，温度，地震，傾斜変動，熱赤外カメラ，ビデオカメラである．うち微気圧，空振，温度，地震，傾斜変動に関しては，道の駅のご厚意により 100V の商用電源を借りることができたため，連続観測を行なっている．微気圧計は東邦マーカンタイル製 NanoLogger NL-6000C（内蔵気圧センサー Nanobaro SN137325），空振計はアコー製 TYPE7744N，温度計は村山電機製プレジション・サーモ DPS-2020，地震計は Chongqing Geological Instrument Factory 製 CDJ-S2C-2（2Hz，3 成分），傾斜計は Applied Geomechanics 製 Model 701-2（2 成分）をそれぞれ 1 台用いた．空振計，温度計，傾斜計の信号は計測技研製 HKS-9700（4Ch）のデータロガーに，地震計の信号は計測技研製 HKS-9550（3Ch）のデータロガーにそれぞれ収録した．また，微気圧計は 100Hz，それ以外は 200Hz のサンプリングレートで収録している（ただし，12 月 19 日以降は全て 100Hz サンプリングに変更した）．

Fig.3 に連続観測している観測機器の配置図を示した．空振計はコンテナの端にぶら下げるように配置し，コンテナの中に配置している微気圧計と同じ位置で測定している．温度計は管の口元から湧出する泉温を測定するために，管内に伸びているスケール抑制剤の薬注管の口元部分に，

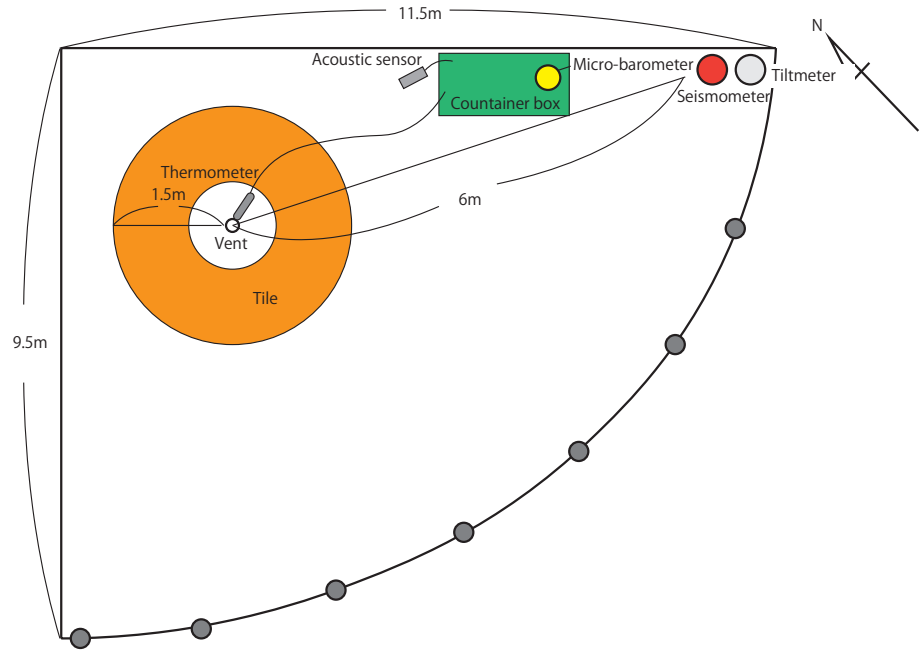


Fig. 3. Layout of instruments.

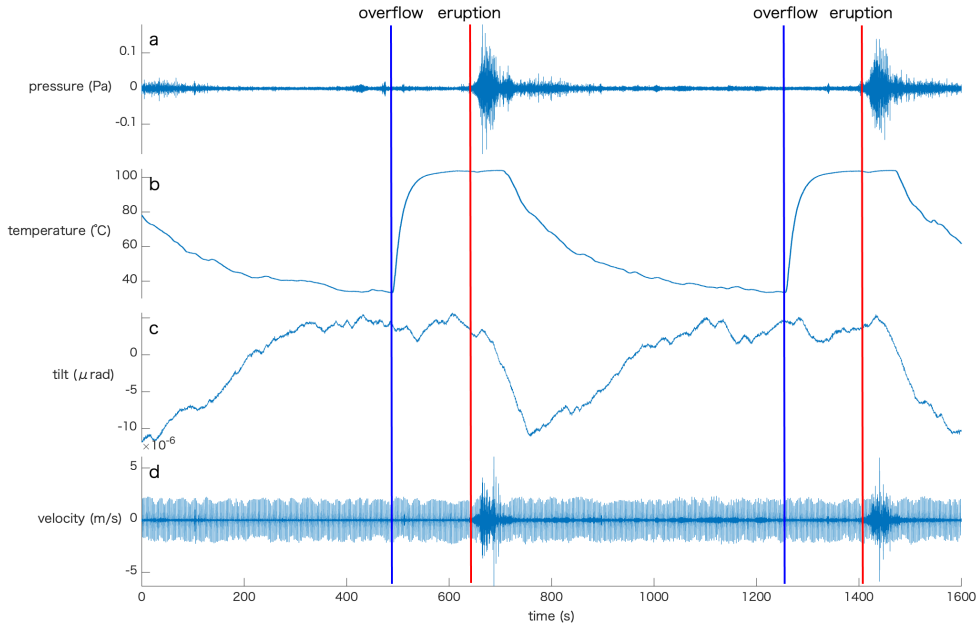


Fig. 4. Observed data at the Shikabe geyser from 3:53:20 am to 4:20:00 am on 29 November. (a) Acoustic pressure. (b) Temperature. (c) Ground deformation recorded by tiltmeter. (d) Seismic velocity. Blue lines indicate the timing of overflow and red lines indicate the timing of eruption.

白金抵抗体センサー部分をシート紐で括り付けた．地震計と傾斜計はそれぞれ管から約 6m 離れた同じ位置に設置した．ビデオカメラと熱赤外カメラは，管から約 5m の位置と，そして管から約 14m の 2 ヶ所に設置して撮影した．

2. 各観測データについて

本章では，11 月 25 日～ 12 月 19 日の間に取得した観測データを紹介する．Fig.4 は空振計，温度計，傾斜計，地震計の記録を 2 周期分かつ同じ時間軸でプロットした図である．ただし，空振波形と地震波形は，50Hz 付近のノイズを取り除くために 55Hz の通過帯域周波数でハイパスフィルターを施している．口元からの湧出（overflow）開始点は温度が急激に上昇し始める点とし，噴出（eruption）開始点はおおよそ空振と地震の振幅が大きくなる点として，それぞれ青色と赤色の線で示した．Fig.4 を見ると，それぞれのデータの変化はほぼ規則的に現れ，間欠的な熱水噴出に伴う井戸内外の物理過程は周期的に遷移することがわかる．まず口元から温泉水が溢れることに伴って温度が急激に上昇し，早い段階で 100℃に達する．その後 2 分ほど経ってから空振波形と地震波形の振幅がほぼ同じタイミングで増大し，50 秒ほど継続してから減少する．また，この時に温度も減少を開始するため，噴出終了に対応していると思われる．

2.1. 空振データと微気圧データ

Fig.5 に微気圧データと空振データの生波形を同じ時間軸で示した．280 秒付近の微気圧と空振の振幅が大きくなっている点が噴出開始に対応している．空振波形は噴出のタイミングで比較的明瞭に振幅が大きくなっているが，微気圧波形は振幅がやや大きくなっているものの，明瞭な変化を示していない．これは微気圧計が 22Hz を高周波のカットオフ周波数とする 100Hz サンプリングでの収録特性を持つためである．噴出期間の前後で両データに見られる長周期の波形はほぼ相似形になっている．Fig.5 の時間帯では微気圧計と空振計は同じ位置に設置されていたが，口元からの距離が等しい状態でそれぞれの位置を変えた時間帯のデータでは，両センサーの長周期波形は違っていた．これより，微気圧と空振の両方に見られる噴出前後の長周期の変動は，井戸からのシグナルではなく風などの影響によるノイズと考えられる．

次に，空振の，噴出に伴う周波数領域を確かめた．今回の観測では，100V の商用交流電源を用いていることによる，50Hz のノイズがデータに混入している．そこで，50Hz のノイズを取り除くために，45 ～ 55Hz の周波数帯域でノッチフィルター処理を行った．また，前述で述べたノイズと思われる長周期の帯域を取り除くために 0.2Hz のハイパスフィルター処理を行なった．Fig.6 にフィルター処理を行なった後の空振波形（Fig.6a）と，そのスペクトログラム（Fig.6b）を示した．波形の振幅が急激に増大している部分が噴出に対応する．Fig.6b を見ると，噴出時間帯に低周波から 80Hz 程度の高周波まで広い帯域でスペクトル強度が大きくなっており，特に 10Hz 以下の帯域は顕著である．10Hz 以下の周波数帯域を詳細に調べるために，Fig.7a に 0.2Hz ～ 10Hz のバンドパスフィルター処理を行なった空振波形を，Fig.7b にそのスペクトログラムを

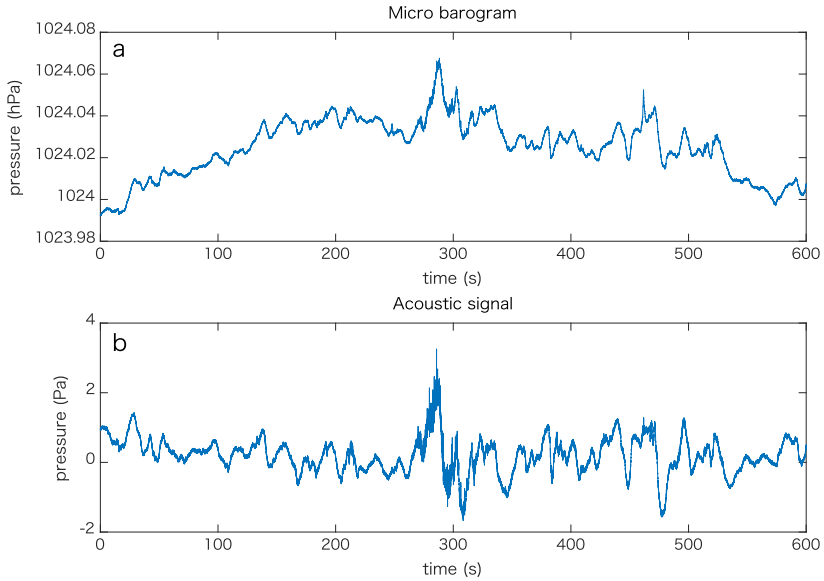


Fig. 5. (a)Micro barogram and (b) acoustic signal time series from 6:20:00 am to 6:30:00 on 29 November.

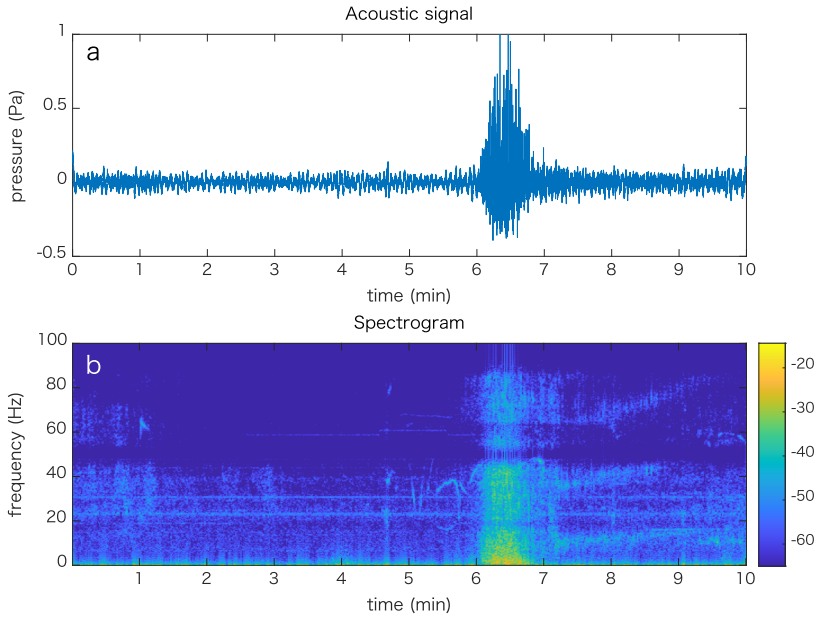


Fig. 6. (a) Acoustic signal time series from 7:00:00 pm to 7:10:00 pm on 30 November processed by 45-55Hz notch filtering and 0.2Hz highpass filtering. (b) Spectrogram of the acoustic signal (a).

示した．Fig.7b を見ると，噴出の最中に 5Hz 以下の周波数帯域でスペクトル強度が大きくなっている．噴出期間の 20 秒（Fig.7 において灰色の線で囲まれた領域）での空振波形に注目すると（Fig.7c），断続的にパルスのようなシグナルが出ていることがわかる．この期間におけるパワースペクトルを見ると（Fig.7d），1.465Hz でピークが立っている．噴出時の映像を見ると，約 1 秒間隔で断続的に噴出の勢いが強くなっている様子が確認でき，この挙動が空振を励起してパルスとして空振波形に現れている可能性がある．

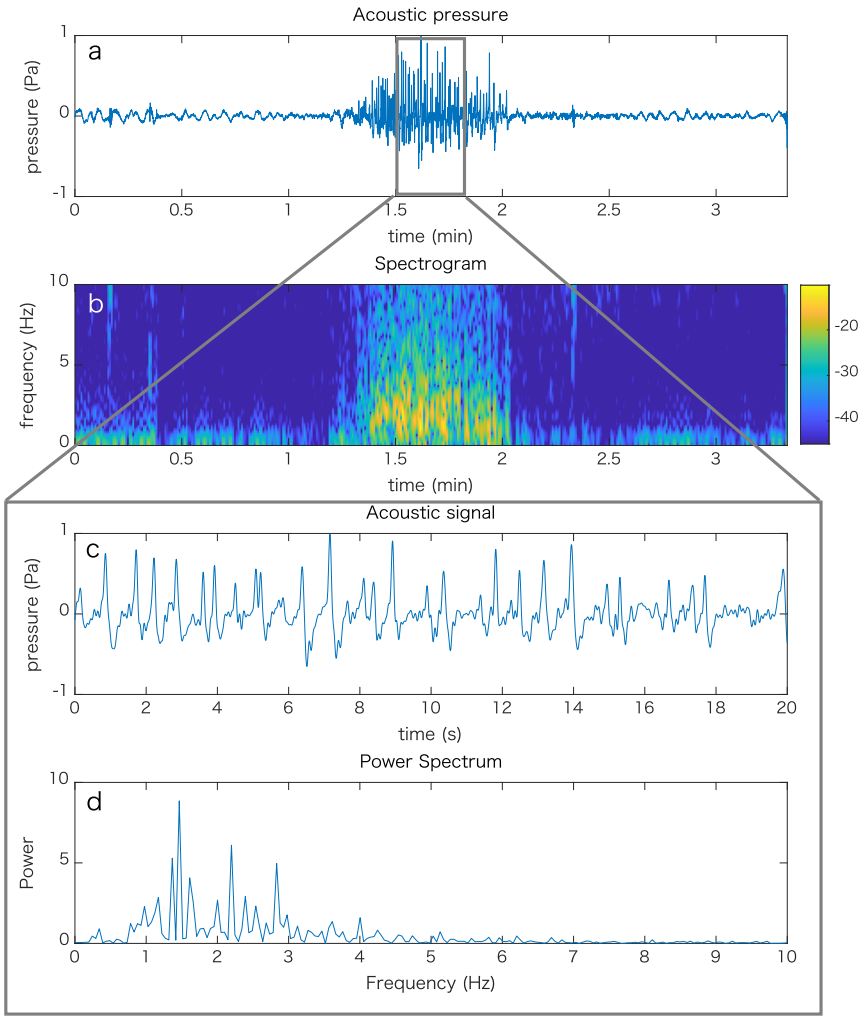


Fig. 7. (a) Acoustic signal time series from 8:06:40 am to 8:10:00 am on 27 November processed by 0.2-10Hz bandpass filtering. (b) Spectrogram of the acoustic signal (a). (c) Acoustic signal time series during the eruption indicated by a gray box. (d) Power spectrum of the acoustic signal during the eruption.

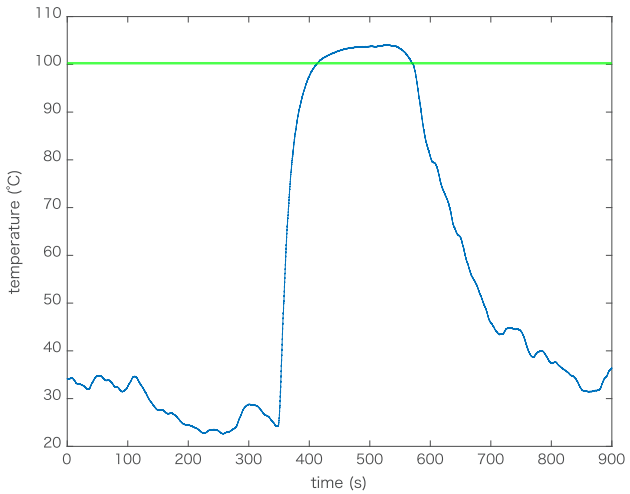


Fig. 8. Temperature signal at the geyser vent from 8:25:00 am to 8:40:00 am on 27 November. Green line indicates the boiling point of a pure water at 1022.6hPa.

2.2. 温度データ

Fig.8 に温度のデータを一周期間分示した．緑色の線は，温泉水が純粋な水であると仮定した場合の，この時刻に対応する大気圧 1022.6hPa での沸点 100.2℃を示している．Fig.8 において，温度が 25℃付近から急激に上昇を開始した点が，温泉水の湧出開始と一致する．温度センサーは応答に時間遅れがあるため，湧出開始時の正確な泉温はここからは判断できないが，口元の映像では湧出開始時には沸騰を示すような気泡はほとんど上がってこないため，少なくとも 100℃を下回った温度であると考えられる．また，噴出前に沸点以下の温泉水が湧出することは，多くの間欠泉で見られる特徴と一致する（例えば，イエローストーン国立公園の Old Faithful Geyser（Kieffer, 1984）や，宮城県鬼首温泉の鬼首間欠泉（Nishimura et al., 2006））．湧出開始後から 1 分もすると泉温は 100℃に達し，最高温度 103℃を維持して噴出に至っている．泉温が 100℃を超える要因の一つとしては，しかべ間歇泉が豊富な化学成分を持つことによる沸点上昇が考えられる．

2.3. 傾斜変動データ

傾斜変動は道の駅の営業時間である 8 時～ 17 時の間はほとんどシグナルを確認できず，一方で営業時間外の 17 時～翌 8 時の間には Fig.4c のような周期的なシグナルを確認できた．Fig.9 は，12 月 6 日 0 時 0 分～ 7 時 59 分までの傾斜変動データを 1 周期ごとに分けてスタックした図である．スタック処理の際には，噴出開始点に対応していると考えられる，変動の極性が大きく転換する点を基準点とし（目視で判断する），基準点から正に 290 秒，負に 910 秒に渡る範囲を 1 周期として切り分けた．Fig.9a が口元に対する transverse 方向成分，9b が radial 方向成分である．Fig.9a を見ると，指数関数的に緩やかに変化している期間と，その後急速に変化している期間がある．

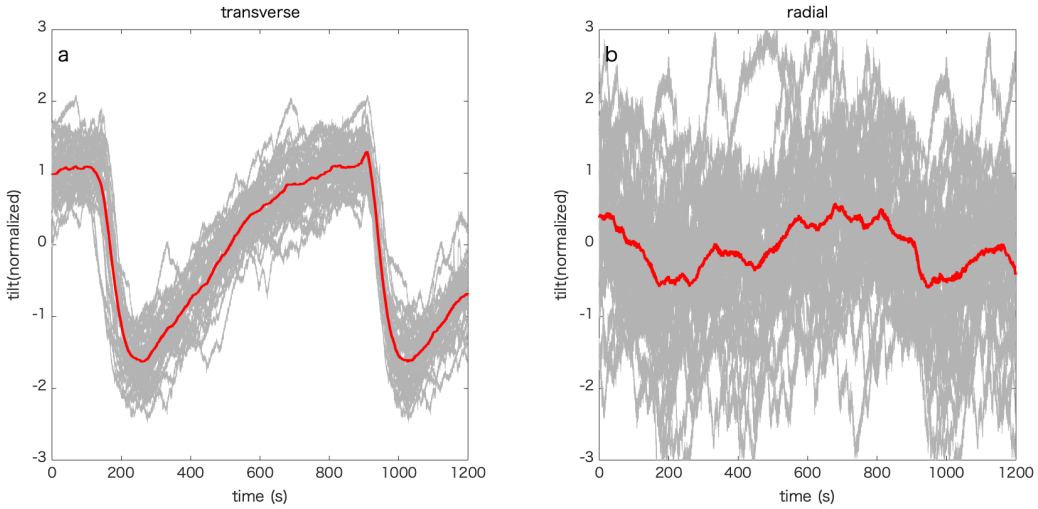


Fig. 9. Ground deformation recorded by the tiltmeter; (a) transverse direction and (b) radial direction, respectively. Grey curves show original signals and red curves are the stacked trace.

緩やかな変化と急速な変化のそれぞれの時間間隔は，温度データや空振データから推定される休止期間と噴出期間の時間間隔とほぼ一致しているため，観測された傾斜変動はしかべ間歇泉の噴出と休止に伴う reservoir の膨張と収縮を反映していると考えられる．一方で，Fig.9b の radial 方向の傾斜変動は，上昇してから下降に転ずる変化は見えるが，その変化量は非常に小さい．もし，一般的に考えられるような，reservoir が conduit の直下に存在する構造を仮定すれば，傾斜変動は radial 方向で現れるはずである．しかしながら，Fig.9a と Fig.9b を比較すると，実際には傾斜変動は transverse 方向で明瞭に現れている．しかべ間歇泉の reservoir は鉄管の直下の狭い領域に限られるというような単純な形状ではない可能性が示唆される．

2.4. 地震データ

Fig.10a は，空振波形と同様に 45 ～ 55Hz の周波数帯域でノッチフィルター処理を行なった地震波形（transverse）であり，Fig.10b はそのスペクトログラムである．噴出に対応する期間を橙色の線で囲っている．Fig.10b を見ると，スペクトル強度が噴出期間に 50 ～ 70Hz 周波数帯域でわずか大きくなるが，それ以外の帯域ではほとんど噴出に対応するとみられるシグナルは確認できない．次に，スペクトル強度が大きくなった 50 ～ 70Hz の周波数帯域に着目し，地震波形に 55 ～ 70Hz のバンドパスフィルター処理を行い，そのスペクトログラムを計算した（Fig.10c と Fig.10d）．Fig.10c を見ると，Fig.10a に比べて噴出時に地震波の振幅が明瞭に増大していることがわかる．また，Fig.10d において，特に 55 ～ 60Hz の周波数帯域でスペクトル強度が大きくなっているが，一般的に火山や間欠泉で観測される地震波の周波数を大きく上回っているため，その要因については慎重な検討が必要である．

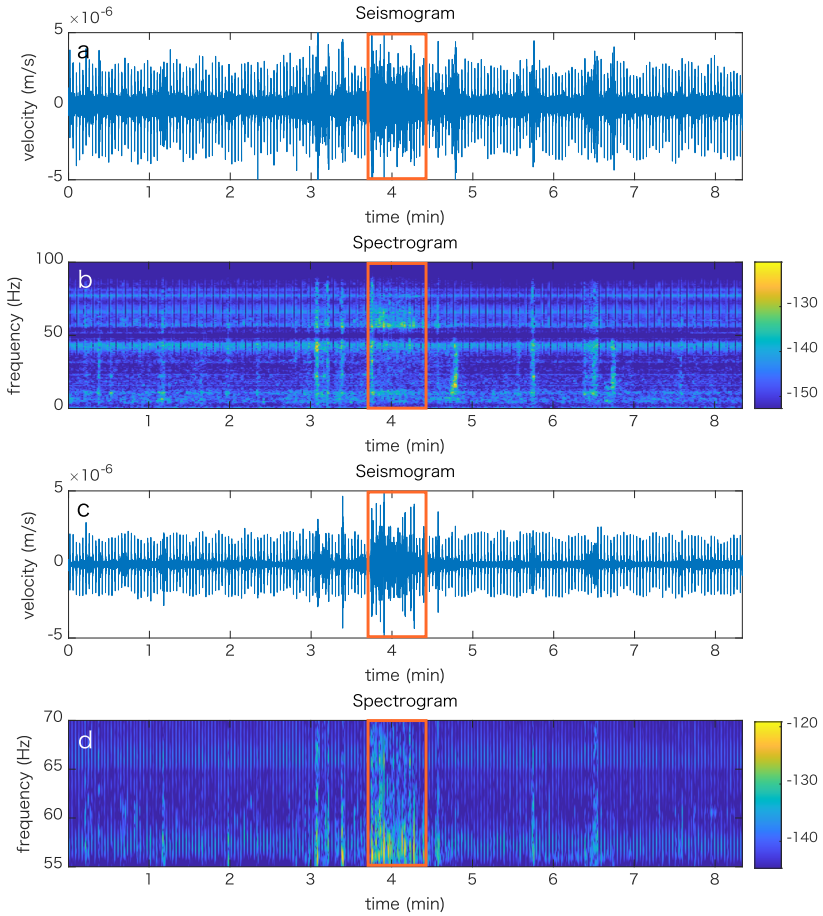


Fig. 10. (a) Seismic signal time series from 8:10:00 pm to 8:18:20 pm on 28 November processed by 45-55Hz notch filtering. (b) Spectrogram of seismic signal (a). (c) Seismic signal time series which is the same time as (a) processed by 55-70Hz bandpass filtering. (d) Spectrogram of seismic signal (c). Orange boxes show the eruption period.

3. 特徴的な噴出周期変化について

しかべ間歇泉における噴出周期（Interval between eruptions：IBE）変化を調べるため，11 月 26 日～ 12 月 18 日までの日毎の周期をまとめた．Fig.11 に全期間，Fig.12 に 11 月 26 日～ 12 月 7 日まで，Fig.13 に 12 月 8 日～ 12 月 18 日までの周期のヒストグラムを示している．噴出周期を調べる際には，温度データにおける湧出開始点同士の時間差を計測した．すなわち，ある時点での湧出開始から，次の湧出開始までを 1 つの周期と見なしている（Fig.4 の青線同士の時間差）．

全期間における平均周期は約 12.5 ～ 13.5 分であるが，Fig.11 を見ると，約 15.5 分にもう一つの小さなピークがあるのがわかる．Fig.12 と Fig.13 を見ると，この長い周期の発生頻度は日によって異なっており，例えば，12 月 6 日は一度も発生せず，12 月 2 日は高頻度で発生している．Fig.14 に 11 月 28 日の噴出周期変化を示した．Fig.14 において，平均的な周期から大きく上回る時が 2 回現れているのがわかる．さらに，2 回とも周期が長くなった後（赤矢印），続いて短い周期に変化（青矢印）しているのがわかる．短い周期は平均 10 ～ 11 分である．ただし，この変化は湧出開始点間の時間変化を見ているため，しかべ間歇泉の間欠過程において具体的にどの時間が変化しているのかがわからない．そこで，上記を確かめるために，温度データを確認した．Fig.15 に長い周期と短い周期の両方を含んだ温度データを示した．Fig.15 を見ると，平均的な周期の時と比較して（黒矢印），長い周期の時は湧出前の休止時間と，その後に続く湧出時間の両方が長くなり（赤矢印），短い周期の時は休止時間と湧出時間の両方が短くなっていることがわかる（青矢印）．長い周期の休止時間は 680 秒，湧出時間は 290 秒である一方で，短い周期の休止時間は 430 秒，湧出時間は 200 秒と，明瞭な差が現れている．また，長い周期の後に短い周期が続く変化は発生しているが，逆に長い周期を引き起こすような先行変化は確認できなかった．この特徴的な周期変化をより詳細に調べていくためには，休止時間と湧出時間をより長期的なデータを用いて分類するだけでなく，湧出時間において，噴出前の期間と噴出期間がどのように変化しているのかも確かめる必要がある．ただし，現状は空振データや地震データから噴出期間を見積もっており，湧出時間や休止時間の不確定性が高い．本当に振幅の増大開始が噴出開始に当たるかどうかなど，他の観測量との突きあわせも行なって正確に計測する方法を考案中である．また，周期変化の発生頻度と周囲の気象条件（気温，気圧，降水量など）の関連も詳細に調べていく予定である．今後は前述を踏まえてこの噴出周期変化のメカニズムを定量的に説明することを目指す．

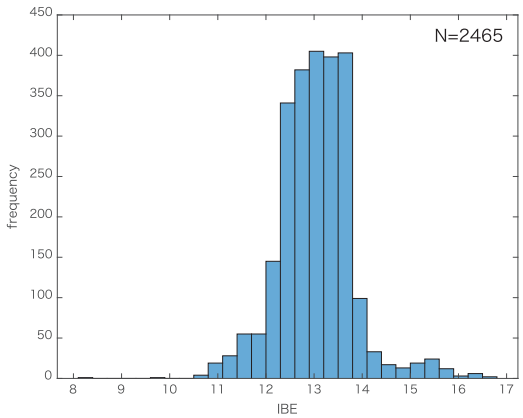


Fig. 11. Histogram of interval between eruptions（IBE）for all period.

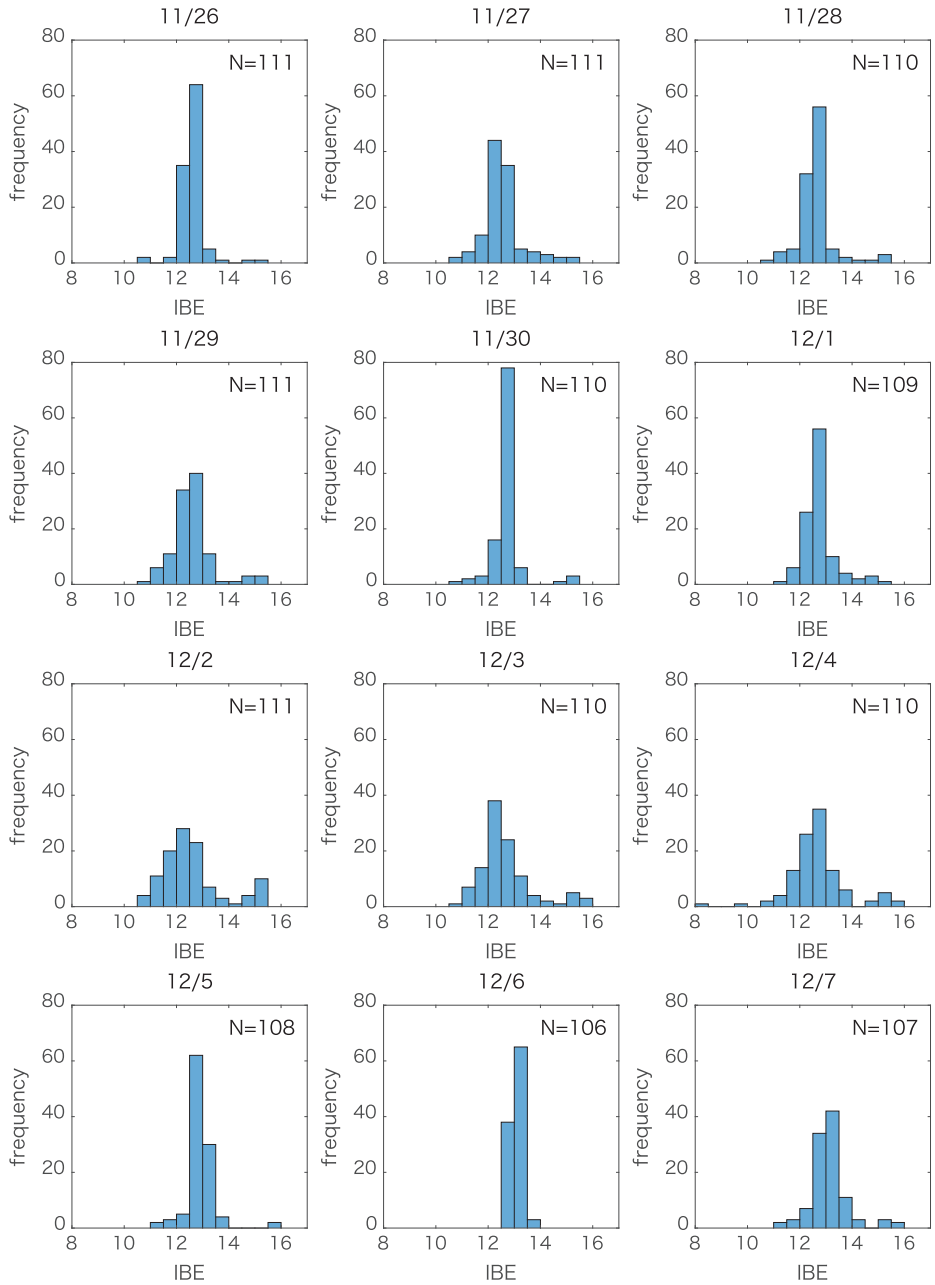


Fig. 12. Daily histogram of IBE from November 26, 2019 to December 7, 2019.

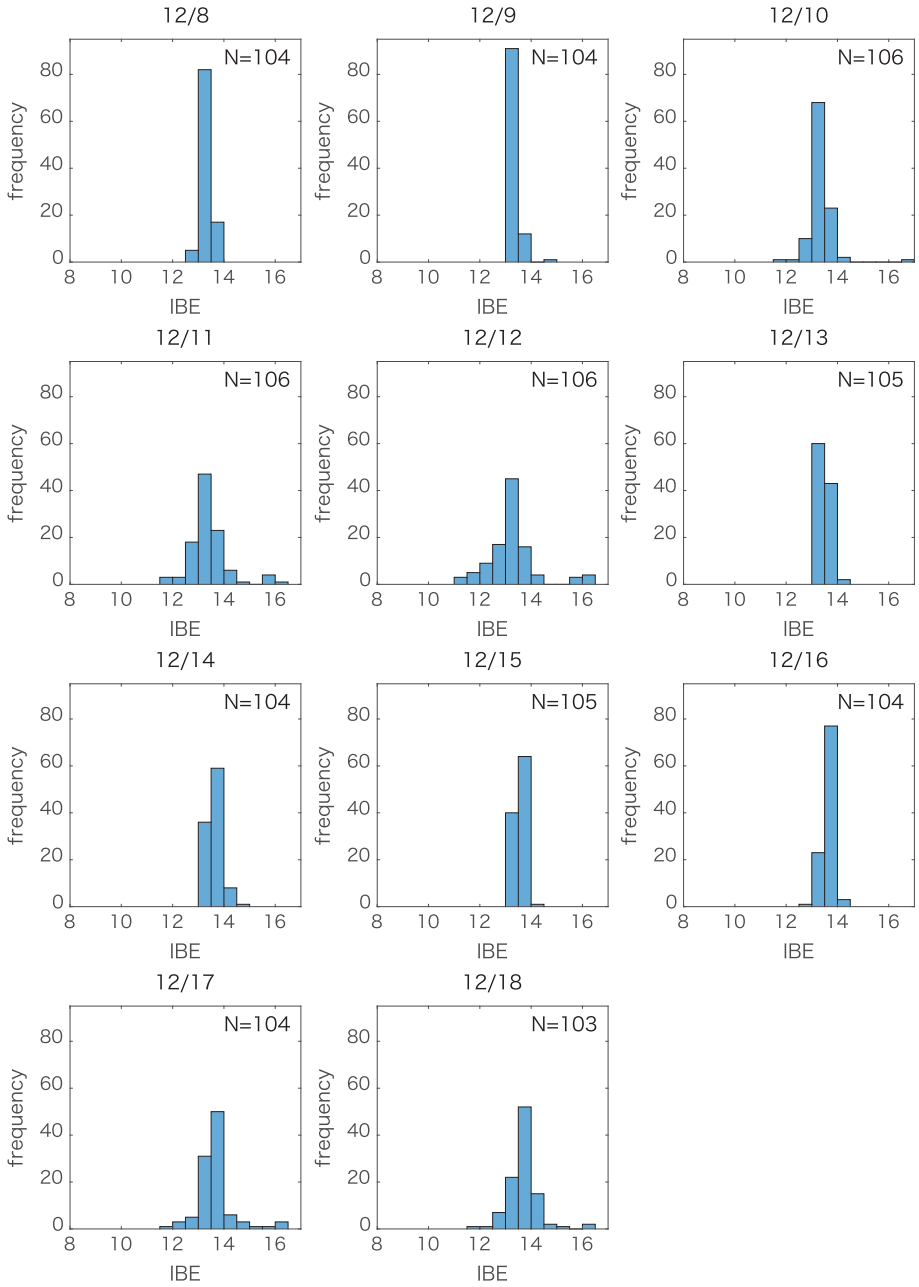


Fig. 13. Daily histogram of IBE from December 8, 2019 to December 18, 2019.

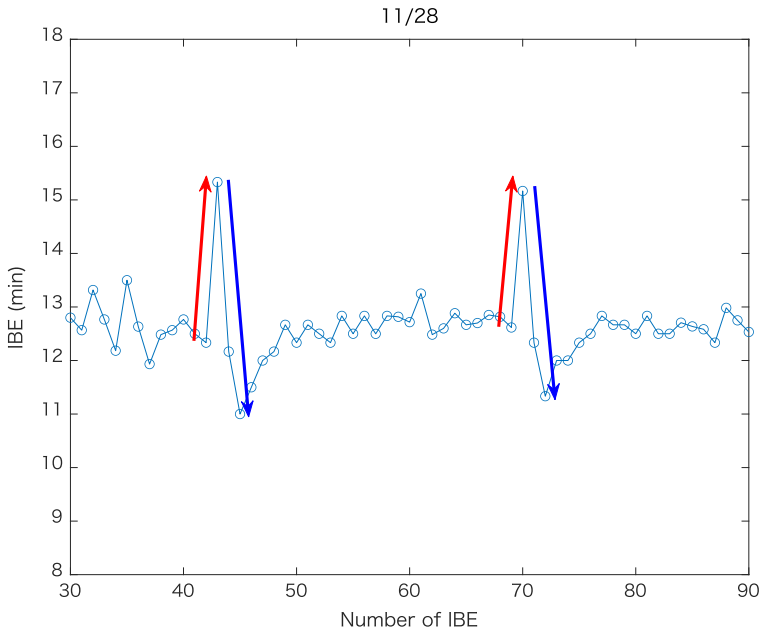


Fig. 14. IBE on November 28, 2019. Red arrow shows the increase of IBE and blue arrow shows the decrease of IBE.

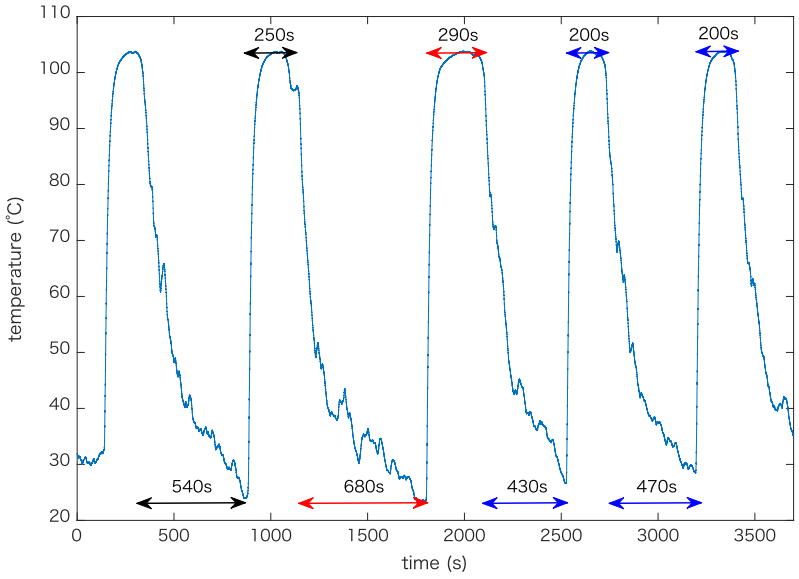


Fig. 15. Temperature signal of the long IBE and short IBE from 8:46:40 am to 9:48:20 am on 28 November. Black arrows indicate the average quiescence period and overflowing period. In the long IBE, both quiescence period and overflowing period increase (red arrow). In the short IBE, both quiescence period and overflowing period decrease (blue arrow).

Ⅳ．ダルシーの法則にもとづく静止水頭の推定

間欠泉の噴出周期変化のメカニズムを定量的に議論するためには，間欠噴出を支配するパラメータの制約が必須である．間欠噴出の支配パラメータの一つに，reservoir への温泉水の供給率が挙げられる．一般的に温泉水の流動は，地下水流動の理論に従うので，しかべ間歇泉に温泉水を供給する帯水層が被圧帯水層であると仮定すれば，その供給率は静止水頭と帯水層の物理的な性質に支配される．Fig.16 に静止水頭の推定において想定する状況の地下の概念図を示した．また，以下の計算に用いるパラメータは Table1 にまとめている．Conduit 内においてある高さに存在する水面の相当する水頭を h' とすると，その上昇率は dh'/dt ダルシーの法則に関連する以下の式で表すことができる．

$$Q(t)=S\frac{dh'}{dt}=c(h-h') \tag{1}$$

今回，上式を用いて静止水頭を推定するにあたって，観測に基づく以下の 2 つの条件を用いた．それぞれの条件から別々に比例定数 c を計算し，それらが一致する時の h を最適解とする．これは，比例定数 c がその帯水層の透水係数などで定められる帯水層固有の定数である，という仮定に基づいている．

１．湧出直前の水面の地表付近での上昇速度（0.01 ± 0.002m/s）．

２．前回の噴出終了から次の湧出開始までの間の休止時間（7 ～ 10 分）．

まず条件 1 について，水面の地表付近での上昇速度は，口元にメジャーを入れて水位が口元に達する様子をビデオカメラで撮影した映像から推定した（Fig.2a）．上昇速度のおおよその推定値は 0.01m/s であるが，以下では誤差を含めて 0.01 ± 0.002m/s の範囲を検討に用いる．上昇速度から比例定数 c を計算するために，式 (1) を以下のように変形する．

$$c_1=\frac{S\frac{dh'}{dt}}{h-h'} \tag{2}$$

続いて，地表付近での水頭の高さ h_s を式 (2) に代入すると，以下のようになる．

$$c_1=\frac{S\frac{dh_s}{dt}}{h-h_s} \tag{3}$$

よって，$\frac{dh_s}{dt}$ に推定された上昇速度 0.01 ± 0.002m/s，に h_s 基準面（管の孔底）からの地表面の高さ 26m を代入すると，c_1 を得ることができる．

条件 2 については，温度のデータから，前回の噴出終了から次の湧出開始までの休止時間 T

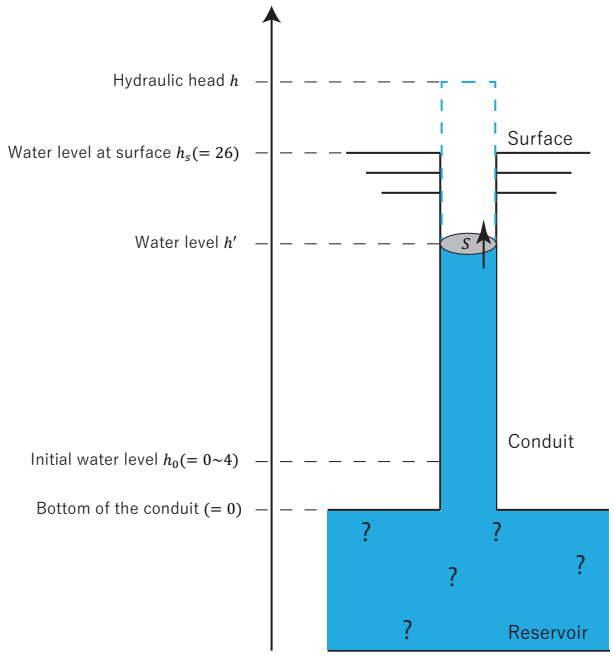


Fig. 16. Schematic illustration of the geyser showing parameters used in the estimation of hydraulic head.

Table 1. Summary of parameters in the equations.

Parameter	Value	Unit	Description
$Q(t)$	-	$m^3\,s^{-1}$	Volumetric flow rate in the conduit.
S	1.767×10^{-2}	m^2	Cross section of the conduit.
h	-	m	Hydraulic head.
h'	-	m	Water level in the conduit.
h_s	26	m	Height from datum level to ground surface.
h_0	0-4	m	Initial water level.
c	-	$m^2\,s^{-1}$	Proportional constant between h and $Q(t)$.
c_1	-	$m^2\,s^{-1}$	c value calculated by using condition 1.
c_2	-	$m^2\,s^{-1}$	c value calculated by using condition 2.
t	-	s	Time.
T	420-600	s	Time to rise from Initial water level to ground surface.

を平均 8.5 分と推定した．この休止時間 T は，水頭が初期水位 h_0 から地表面 h_s まで上昇するまでにかかった時間に対応すると仮定する．休止時間から比例定数 c を計算するために，式 (1) を初期条件 $(t=0,h'=h_0)$ と境界条件 $(t=T,h'=h_s)$ を用いて微分方程式を解くことによって以下の式を導く．

$$c_2=\frac{S}{T}\log\frac{h-h_0}{h-h_s} \qquad (4)$$

初期水位である h_0 を制約するのは難しいが，しかべ間歇泉のスケール除去作業を施工している業者による，「孔底から上 3m までの範囲で硬いスケールが付いている」という情報から，おおよそその深さまでは噴出後に水位が下がっていると仮定し，ここでは h_0=0~4m の範囲で 1m 間隔で値を設定する．また，温度のデータから推定される噴出の終了時間にも不確定性が大きいため，現実的な範囲として 7 分～ 10 分の範囲で 30 秒ずつ異なる値を設定する．以下では，設定する T と h_0 の値をそれぞれ変えながら，同一の h に対して c_1 と c_2 が等しくなる時（式 (3) と (4) の右辺同士が等しくなる時）の c および h の値を求めた．

Table2 に，h_0=0 に固定して休止時間 T を変化させた場合の，地表面からの静止水頭の高さ（h-h_s）とその時の c の値を，地表付近での上昇速度 dh_s/dt ごとに示した．それぞれの T に対して，上から dh_s/dt=0.008,0.01,0.012 の順に（h-h_s）と c を示している．休止時間 T が長くなると静止水頭は高くなり，c の値は小さくなっていることがわかる．また，同じ休止時間 T では，dh_s/dt が大きくなるほど静止水頭は高くなり，c の値は小さくなっていることがわかる．同じ計算条件の時に式 (3) と式 (4) から得られる c_1，c_2 それぞれの値の変化を Fig.17a に示した．黒色の c_1 の線と色つきの c_2 の線が交わる点が，h および c の推定値を与える．Fig.17a で T の変化に対する c_2 の振る舞いに注目すると，T が大きくなるほど同一の静止水頭 h に対して c_2 は小さな値を取ることがわかる．実際に最適値として得られる c は c_1 と c_2 の交点であるので，T が大きくなるにつれて h-h_s も大きくなっている．

Table3 には，T=600 に固定して初期水位 h_0 を変化させた場合の，地表面からの静止水頭の高さ（h-h_s）とその時の c の値を，地表付近での上昇速度 dh_s/dt ごとに示した．それぞれの h_0 に対して，上から dh_s/dt=0.008,0.01,0.012 の順に（h-h_s）と c を示している．Table3 を見ると，初期水位 h_0 が高くなると静止水頭 h は高くなり，c の値は小さくなっていることがわかる．また同じ h_0 では，dh_s/dt が大きくなるほど静止水頭は高くなり，c の値は小さくなっていることがわかる．この計算条件の時に式 (3) と式 (4) から得られる c_1，c_2 それぞれの値の変化を Fig.17b に示した．Fig.17b で h_0 の変化に注目すると，h_0 が大きくなるほど同一の静止水頭 h に対して c_2 は小さな値を取る．

最後に，Fig.17ab において地表付近での水面上昇速度 dh_s/dt の変化に注目すると，c_1 は dh_s/dt の変化に大きく影響を受けることがわかる．dh_s/dt が大きくなるほど Fig.17ab での c_1 のグラフは右側へ移動するので，同一条件の下での c の値は小さくなり，h の値は大きくなる．また，今

Table 2. Elevation of calculated hydraulic head from the ground surface and c values under the condition of h_0=0 for different quiescence time T.

Quiescence time (s)	$h-h_s$ (m)	c
420	1.03	1.38×10^{-4}
	1.42	1.25×10^{-4}
	1.86	1.14×10^{-4}
450	1.13	1.25×10^{-4}
	1.57	1.13×10^{-4}
	2.07	1.02×10^{-4}
480	1.24	1.14×10^{-4}
	1.73	1.02×10^{-4}
	2.29	9.25×10^{-5}
510	1.36	1.04×10^{-4}
	1.90	9.31×10^{-5}
	2.52	8.40×10^{-5}
540	1.48	9.56×10^{-5}
	2.07	8.53×10^{-5}
	2.77	7.66×10^{-5}
570	1.60	8.83×10^{-5}
	2.25	7.84×10^{-5}
	3.02	7.01×10^{-5}
600	1.73	8.17×10^{-5}
	2.45	7.23×10^{-5}
	3.30	6.44×10^{-5}

Table 3. Elevation of calculated hydraulic head from the ground surface and c values under the condition of T=600 for different initial water level h_0.

Initial water level (m)	$h-h_s$ (m)	c
0	1.73	8.17×10^{-5}
	2.45	7.23×10^{-5}
	3.30	6.44×10^{-5}
1	1.77	8.01×10^{-5}
	2.50	7.06×10^{-5}
	3.39	6.26×10^{-5}
2	1.80	7.84×10^{-5}
	2.57	6.88×10^{-5}
	3.49	6.08×10^{-5}
3	1.85	7.66×10^{-5}
	2.64	6.70×10^{-5}
	3.60	5.89×10^{-5}
4	1.89	7.47×10^{-5}
	2.72	6.50×10^{-5}
	3.73	5.69×10^{-5}

回の計算で用いた T と h_0 の範囲では，h の変動幅は h_0 よりも T の変動幅に影響されている．

今回計算で与えたパラメータの範囲では，推定された静止水頭の高さは $h=h_s+1.03\sim3.73$，比例係数は $c=5.69\times10^{-5}\sim1.38\times10^{-4}$ と求められた．またこれらの値は，休止時間 T や水面上昇速度 dh_s/dt の変化に敏感であることが分かった．今回は観測から得られた条件だけを用いて簡易的に静止水頭を推定したが，この推定値が妥当であるかどうか，今後の観測データだけでなく周囲の温泉の情報なども加味して検討していく必要がある．

V．ま と め

2019 年 11 月 25 日から，北海道鹿部町にあるしかべ間歇泉で微気圧計，空振計，温度計，傾

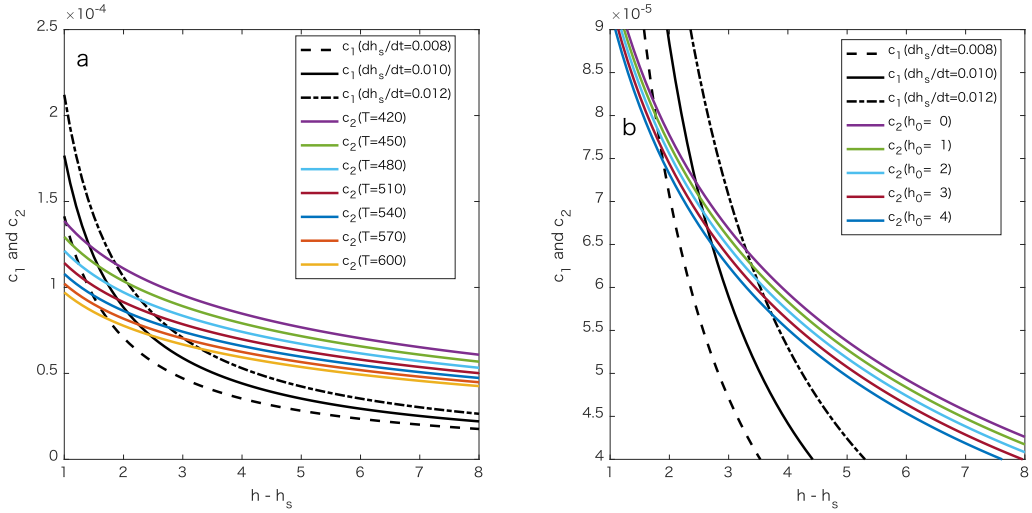


Fig. 17. (a) c_1, c_2 values with respect to (h-h_s) under the condition of h_0=0 for different quiescence time T. Black(Broken line): c_1 (dh_s/dt=0.008), Black(Solid line): c_1 (dh_s/dt=0.01), Black(Chain line): c_1 (dh_s/dt=0.012), purple: c_2(T=420), green: c_2(T=450), light blue: c_2(T=480), dark red: c_2(T=510), blue: c_2(T=540), orange: c_2(T=570), yellow: c_2(T=600). (b) c_1, c_2 values respect to ($h-h_s$) under the condition of T=600 for different initial water level h_0. Black(Broken line): c_1 (dh_s/dt=0.008), Black(Solid line): c_1 (dh_s/dt=0.01), Black(Chain line): c_1 (dh_s/dt=0.012), purple: c_2(h_0=0), green: c_2(h_0=1), light blue: c_2(h_0=2), dark red: c_2(h_0=3), blue: c_2(h_0=4).

斜計，地震計，ビデオカメラ，熱赤外カメラを用いた多項目観測を開始した．

観測開始から 12 月 19 日までの観測データをまとめた結果，全ての観測項目において，噴出と休止に対応すると見られる規則的なシグナルが確認された．微気圧と空振は噴出に伴って高周波成分の波が卓越する．温度は湧出開始のタイミングをよく捉え，また温泉水の最高温度が 100℃を上回る記録を示した．地震計は噴出時に高周波成分が卓越するが，火山や間欠泉の観測で一般的に見られるような周波数帯域を大きく超えており，その要因については慎重な検討が必要である．傾斜変動は口元に対する transverse 方向の変動が顕著で，reservoir の膨張と収縮に対応すると見られる変化を示した．ただし，radial 方向においては明瞭な変動が見られず，地下の帯水層が複雑な形状をしている可能性が示唆される．

また，しかべ間歇泉の噴出周期は必ずしも一定ではなく特徴的な変化が起こっていることがわかった．平均周期の 12.5 ～ 13.5 分とは別に，時々 15 ～ 16 分程度の長い周期が現れ，続いて 10 ～ 11 分程度の短い周期が現れる．さらに，この一連の周期変化の発生頻度は日によって異なっている．長い周期と短い周期を具体的に調べると，長い周期では湧出前の休止時間とそれに続く湧出時間の両方が長くなり，短い周期では両方が短くなっていることがわかった．

上記の噴出周期変化を定量的に議論していくために，ダルシーの法則に基づいて静止水頭を簡易的に推定した．Conduit 内の水面の上昇率は，静止水頭と水面の高度差に比例する，ダルシー

の法則に基づいた式で表すことができる．今回は観測データから得られた以下の２つの条件を用いた；①湧出直前の水面の地表付近での上昇速度，②前回の噴出終了から次の湧出開始までの間の休止時間．計算の結果，静止水頭は与えたパラメータの範囲では h_s+1.03~3.73m と求められた．

今後は，得られた観測データをより詳細に解析し，間欠泉噴出に伴う力学現象を抽出するとともに，今回の観測によって明らかになった特徴的な噴出周期変化について定量的に議論していく．

謝辞　今回の観測研究を行うにあたって，鹿部町ならびに道の駅しかべ間歇泉公園には観測機材の長期設置の許可や，100V 電源の提供など多大なるご配慮を頂きました．大地コンサルタントの村田氏・中里氏には，井戸の形状や清掃作業時の様子について情報を頂きました．ここに感謝を表明致します．

文　献

Bunsen, R. W. 1847. Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geysir Islands. Ann. Phys. Chem. 83, 159-170.

福富孝治 , 1942. 伊豆にある定常沸騰泉の理論的考察 . 地震 14,1-25.

福富孝治 , 1942a. 伊豆にある二種類の定常沸騰泉 . 地震 14,33-45.

福富孝治 , 1942b. 間欠泉沸騰の一新機構について（其の一）. 地震 14,157-174.

福富孝治 , 1942c. 間欠泉沸騰の一新機構について（其の二）. 地震 14,189-202.

Hurwitz, S., Kumar, A., Taylor, R. and Heasler, H. 2008. Climate-induced variations of geyser periodicity in Yellowstone National Park, USA.*Geology*, 451-454.

Ingebritsen, S. E., W. E. Sanford, and C. E. Neuzil, 2006. Groundwater in Geologic Processes, 536 pp., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.

Kieffer, S. 1984. Seismicity at Old Faithful Geyser: an isolated source of geothermal noise and possible analogue of volcanic seismicity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 22, 1-2, 59-95.

Machenzie, G., 1811. Travels in the Island of Iceland, Edinburth vol.27.Alam and Company, Edinburth.

Munoz‐Saez, C., Namiki, A. and Manga, M. 2015. Geyser eruption intervals and interactions: Examples from El Tatio, Atacama, Chile.*Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 120, 11, 7490-7507.

Munoz-Saez, C., Manga, M., Hurwitz, S., Rudolph, M., Namiki, A. and Wang, C-Y. 2015. Dynamics within geyser conduits, and sensitivity to environmental perturbations: Insights from a periodic geyser in the El Tatio geyser field, Atacama Desert, Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 292, 41-55.

Namiki, A., Muñoz‐Saez, C. and Manga, M. 2014. El Cobreloa: A geyser with two distinct eruption styles.*Journal of Geophysical Research*: Solid Earth. 119, 8, 6229-6248.

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 and Space*. 58, 6, e21-e24.

大谷清隆，1961．鹿部、鶴ノ湯間歇熱泉の研究，北海道大学地球物理学研究報告 , 8, 51-65.

湯原浩三・瀬野錦蔵 , 1969. 温泉学 . 地人書館.