

霧島・硫黄山西火口で確認された間欠的熱水噴出現象に対する多項目観測

田辺暖柊¹, 松島 健¹, 相澤広記¹, 村松 弾², 安仁屋智³, 吉永光樹¹, 渡辺卓司¹
(九大理¹・東大地震研²・気象庁福岡管区気象台³)

Multi-parametric observations of intermittent hydrothermal water discharge in West Crater of Iwo-Yama volcano, Kirishima Volcanic Complex, Japan

H. Tanabe¹, T. Matsushima¹, K. Aizawa¹, D. Muramatsu², S. Aniya³, K. Yoshinaga¹, T. Watanabe¹
(SEVO, Kyushu Univ.¹, ERI, Univ. of Tokyo², Fukuoka Regional Headquarters, JMA³)

2021年4月から7月にかけて、霧島・硫黄山西火口で間欠的熱水噴出現象が確認された。西火口W4には3つの噴気孔(Fn, Fs, Fc)が形成され、熱水噴出はFs孔から生じた。熱水噴出の間隔は14~70時間で、その1サイクルは次の通りであった。(i) Fs・Fn孔からの噴気噴出が停止する。(ii) 20~40分後、Fs孔から熱水が湧出し、湯溜まりを形成し噴気孔は水没する。(iii) 次第にFs・Fn孔からの噴気が目立つようになる。(iv) 次の熱水噴出の1~1.5時間前に、湯だまりの水が噴気孔内に逆流(drain-back)し、噴気が停止する。我々は火口近傍において、カメラ、温度、地電位(SP)、地震、空振、傾斜による多項目観測を行い、周期的な熱水噴出の原因解明を目指した(観測機器の配置はFig. 1を参照)。

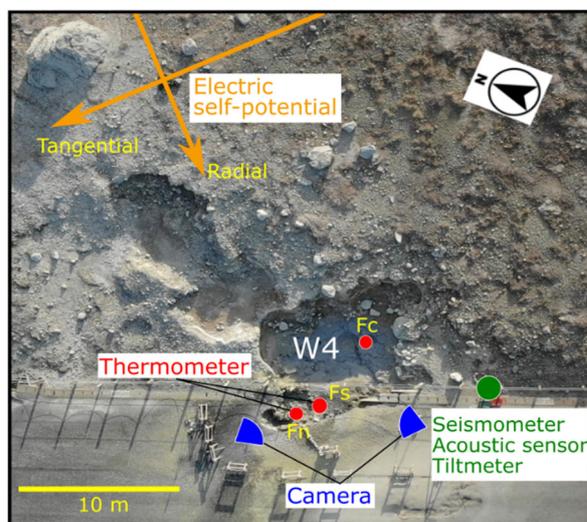


Fig. 1: Annotated drone photograph of the layout of observational equipment in and around crater W4. Red circles in the figure indicate the locations of the three vents (Fn, Fs, and Fc).

Fig. 2に各観測データを示す。熱水噴出は80~90℃程度の低温からはじまるが、7~14分後、この標高(1233m)における沸点である96℃を保つようになる(Fig. 2a)。SPデータは熱水噴出開始のおよそ2時間前に変動が生じる(Fig. 2b)。ただし、SP変動は生じるものの地表では熱水噴出は認められず、一時的に微小な温度低下を生じさせている場合も確認できた。これらのSP変動は、地下の多孔質媒質中を地下水が流動することで生じる流動電位(e.g., Mizutani *et al.*, 1976)による可能性が考えられる。Fig. 3に熱水噴出を伴う場合と伴わない場合のSPパーティクルモーションと振幅を示す。振幅については、変動開始から噴気停止に向かい徐々に増加し、その振幅が減少に転じたところで熱水噴出が生じる(Fig. 3a)。また、熱水噴出を伴う場合の方が伴わない場合と比べて比較的大きな振幅を示す。これは、熱水噴出のおよそ2時間前に大量の地下水の流れが生じていることを示唆している。また、パーティ

クルモーションからは、SP が Radial 成分の正方向に変動しており、冷たい地下水が噴気孔に向かって流れたことが推定される (Fig. 3cd) . これは SP 変動とともに傾斜データ (Fig. 2e) も噴気孔側が隆起する変動を示していることや、熱水噴出直後の熱水温度は 80–90°C と比較的低温ということからも支持される。

空振データ (Fig. 2d) は噴気孔上部の湯だまりがなくなる (drain-back) とともに信号が減少している。つまり、噴湯により生じた地表での水の振動をとらえているとみられる。一方で地震データ (Fig. 2c) のうち、20 Hz 以上の周波数帯域では空振データと同期した信号の変化がみられた。ただし、20 Hz 以下の周波数帯域では SP 変動後に信号の減少がみられ、噴気停止と共に信号が増加している。これらの信号は噴気孔下部につながる地下システム内部での熱水中の気泡活動 (e.g., Kieffer, 1984) をとらえている可能性がある。

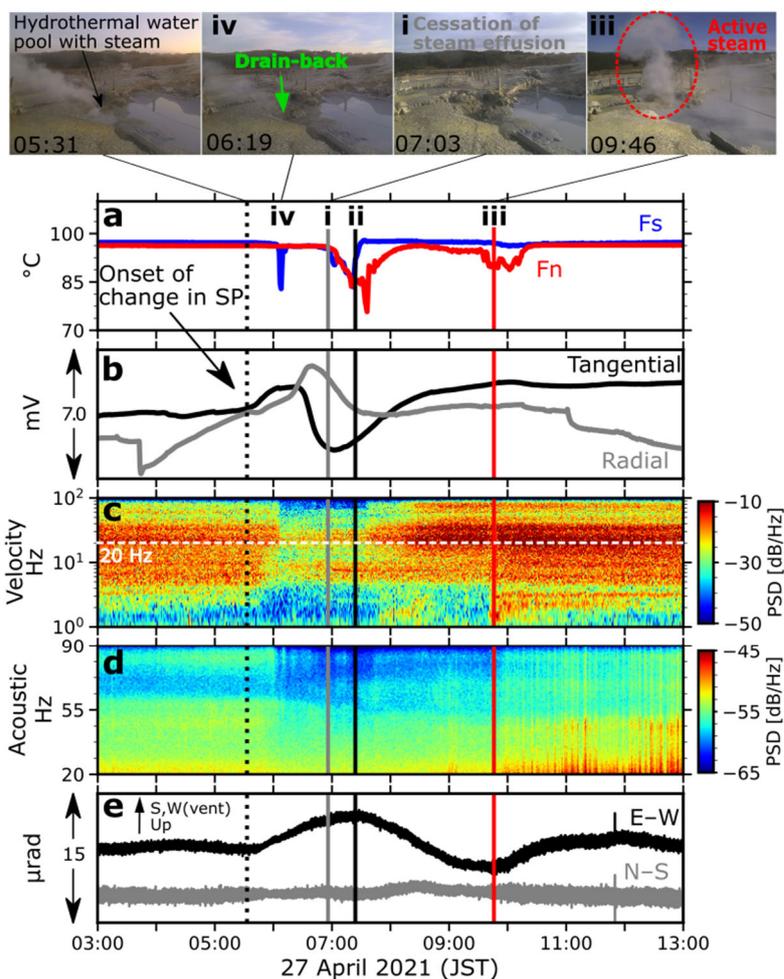


Fig. 2: Example of multi-observational data during a hydrothermal water discharge event [03:00 to 15:00 on 27 April 2021 (JST)]. The snapshots are from Camera 1 of vent Fs. The times of the photographs correspond to those in the time-series graph. (a) Temperature, (b) electric self-potential, (c) spectrogram of seismic signal (U–D), and (d) spectrogram of acoustic signal, and (e) tilt. Power spectral density (PSD; dB/Hz) is $(\mu\text{m/s})^2/\text{Hz}$ for panel (c) and $(\text{Pa})^2/\text{Hz}$ for panel (d). The presented time series are part of Fig. S1 and Movie S1. The timings of onset of change in SP (dotted line), cessation of steam discharge (gray line), onset of hydrothermal water discharge (black line) and onset of active steam discharge (red line) are indicated.

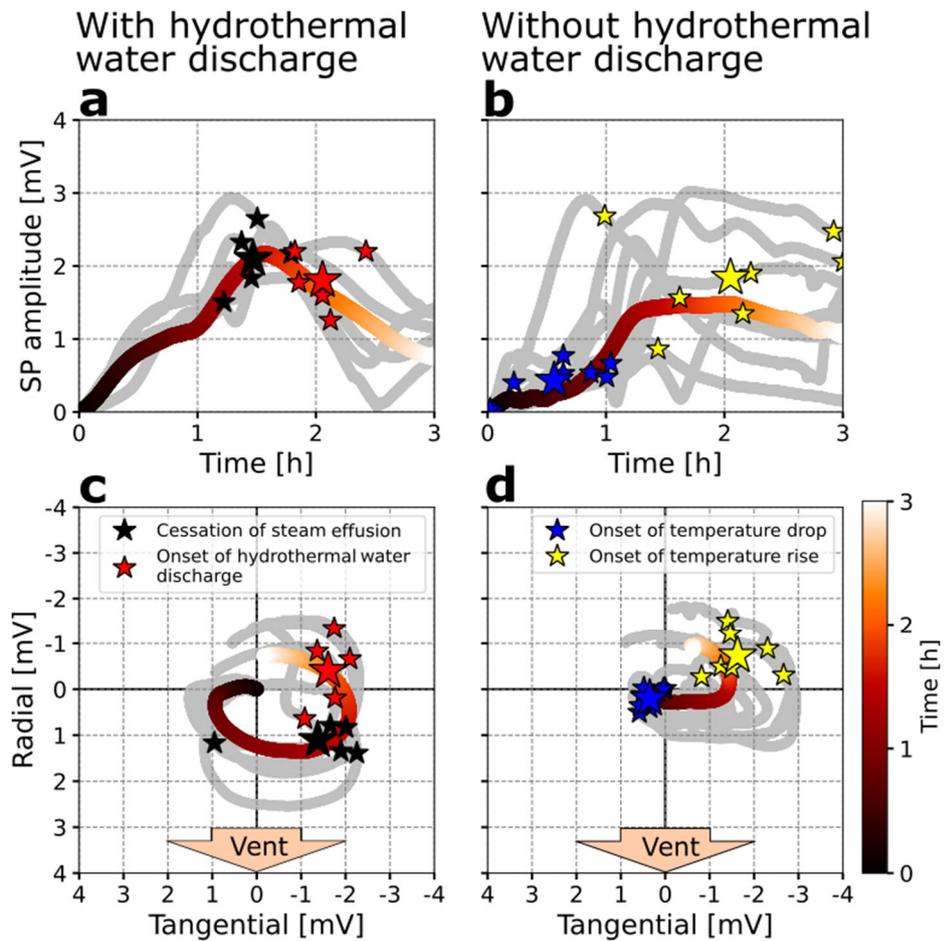


Fig. 3: Temporal variation in electric self-potential (SP). (a) Temporal change in the amplitude of SP associated with hydrothermal water discharge, using data only from those events for which the occurrence of hydrothermal water discharge was confirmed by visual camera images. Gray lines correspond to events, and the colored line represents the average of all events. Black and red stars correspond to the timings of the cessation of steam effusion and the onset of hydrothermal water discharge, respectively (large stars show their averages). (b) Temporal change in the amplitude of SP without hydrothermal water discharge. Blue and yellow stars correspond to the timings of temperature rise and fall at vent Fs, respectively. (c) Particle motions of change in SP with the occurrence of hydrothermal water discharge. Note that the dipole lengths of the radial and tangential directions are the same (30 m). (d) Particle motions of change in SP without the occurrence of hydrothermal water discharge.

これらの観測事実から間欠的熱水噴出現象の発生メカニズムを検討する。Fig. 4 にモデル図を示す。なお、噴気孔下部には、図のような導管と空洞からなる地下システムの存在を仮定する。硫黄山周辺の地質は 4.3ka に生じた韓国岳の山体崩壊による岩屑なだれ堆積物でおおわれている (Tajima *et al.*, 2020) ためこのような地下構造を仮定するのに十分である。まず、熱水噴出のおよそ 2 時間前に地電位変動開始と共に、噴気孔下部につながる地下システム内に周辺部から冷水が流入する (Fig. 4a)。これにより、地下システム内でもともと生じていた熱水の沸騰を一時的に弱める。またこれに伴い、噴気の勢いも弱まることで、drain-back が生じる。その後、より大量の地下水が流入することで、噴気停止が生じる (Fig. 4b)。つまり、浅部の地下水が噴出を抑制する働きをしている。しかし、地下システム下部では熱源から継続的に気泡を含む熱水が供給されるため、圧力が高まり、さらに冷水の地下システム内への流入がなくなることで、地下水を押し上げて噴出に至る (Fig. 4c)。その後、導管上部の熱水が湧出することで導管内では減圧による沸騰が加速され、噴気が支配的な噴出に移行することが考えられる (Fig. 4d)。

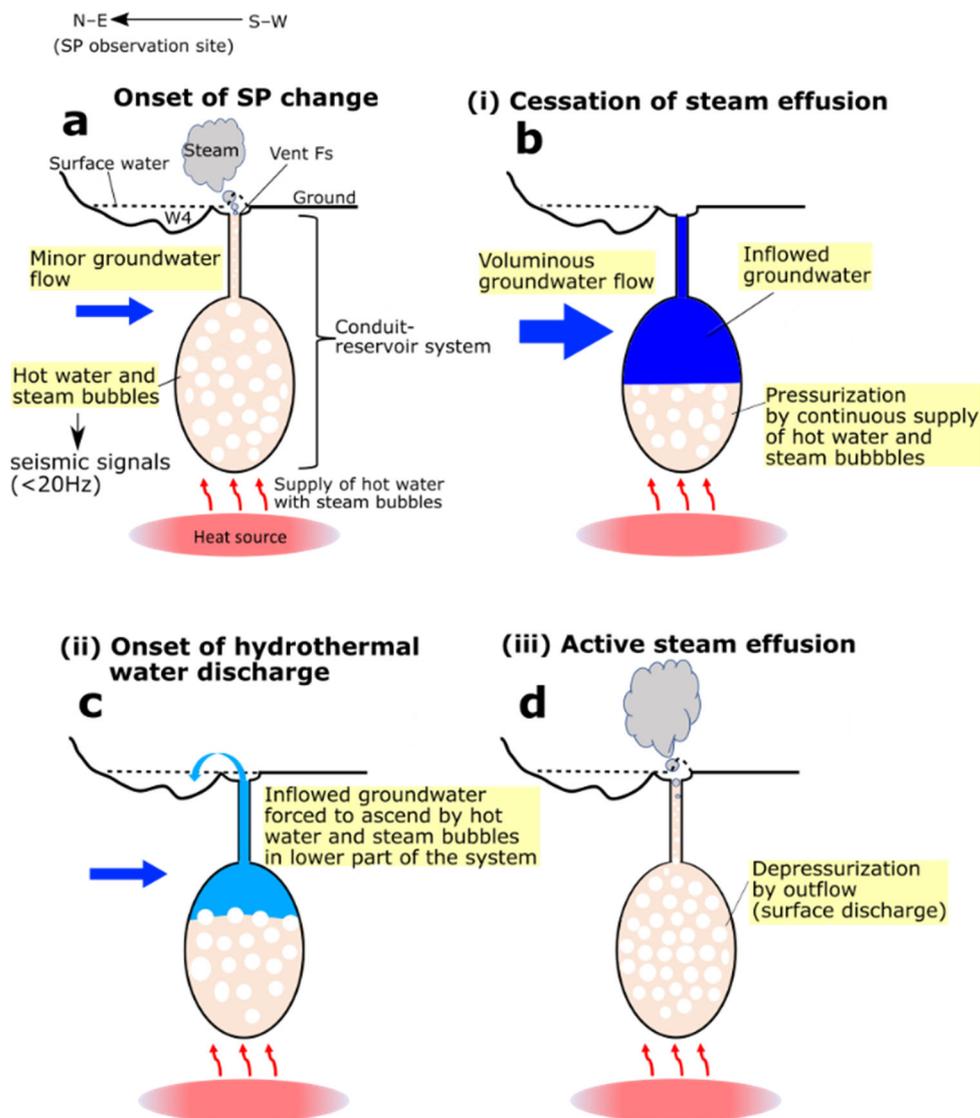


Fig. 4: Schematic model of intermittent hydrothermal water discharge. Red and blue colors represent high and low temperatures, respectively.

本研究では、熱水噴出のおよそ 2 時間前に生じる地下水の移動が間欠的な熱水噴出に重要であることが示された。なお、今回得られたものと類似した SP 変動が 2018 年硫黄山の小規模な水蒸気噴火の際にも報告されている (Aizawa *et al.*, 2022)。間欠的な熱水噴出現象 (間欠泉現象) と水蒸気噴火の間には類似した地下水の流動イベントが生じている可能性がある。なお、本研究の詳細な内容は [こちら](#) を参照していただきたい。