



原 著

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

鏡 裕行^{1)*}, 福井幸太郎²⁾

(平成 28 年 4 月 30 日受付, 平成 28 年 6 月 8 日受理)

Application of the Dynamical Model of a Geyser Induced by Gas Inflow to the Changes in Water Level of the Shinyu Hot Spring Pond in Tateyama Caldera

Hiroyuki KAGAMI^{1)*} and Kotaro FUKUI²⁾

Abstract

Tateyama Caldera is a huge oval depression area adjacent to the south of Tateyama-Midagahara. The East-West direction or the North-South direction of the width of it is 6.5 km or 4.5 km, respectively. In the center of the Tateyama Caldera there is a crater pond called “Shinyu”. The Shinyu pond was returned to the geyser for the first time in 70-80 years since June 2014. The diameter of the Shinyu pond is about 30 m and the depth of it is about 5.6 m. The Shinyu pond repeats the ebb and flow in a long period of about 12 days period.

We apply the dynamical model of a geyser induced by gas inflow to the quasi-periodic water level fluctuation of the Shinyu pond so as to estimate the underground structure of it. The Shinyu pond is significantly different from the well-known normal short-period geyser and has the characteristics of long period and large amplitude (large volume of spouted water). Therefore the Shinyu pond is likely to have a different underground structure from the normal short period geyser and there are many unknowns of it. It is suggested that there is an underground cavity of the very large volume under the Shinyu pond through numerical simulation of the dynamical model.

In the future, we will strive to gather more detailed observation data of the Shinyu pond. Then we reflect the observation data to each parameter value in numerical simulation of the model so as to achieve more accurate numerical simulation. As a result, we estimate the underground structure of the Shinyu pond more accurately. Simultaneously, we would like to realize the observation for verifying the existence of underground cavities of large

¹⁾ 藤田保健衛生大学医学部 〒470-1192 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98. ¹⁾ School of Medicine, Fujita Health University, 1-98 Dengakugakubo, Kutsukake-cho, Toyoake, Aichi 470-1192 Japan. *Corresponding author : E-mail kagami@fujita-hu.ac.jp, TEL 0562-93-2578, FAX 0562-93-4593.

²⁾ 立山カルデラ砂防博物館 〒930-1405 富山県中新川郡立山町芦崎寺字ブナ坂 68. ²⁾ Tateyama Caldera Sabo Museum, 68 Ashikuraji-bunazaka, Tateyama-machi, Toyama 930-1405 Japan.

volume which is predicted from the model.

Key words : geyser, dynamical model, numerical simulation, Tateyama Caldera, crater pond

要 旨

立山・弥陀ヶ原の南に隣接する東西 6.5 km, 南北 4.5 km の巨大な楕円形のくぼ地である立山カルデラの中央には「新湯」とよばれる火口湖があり, この新湯が, 2014 年 6 月より 70~80 年ぶりに間欠泉に戻った. 新湯は, 直径約 30 m, 水深約 5.6 m あり, 約 12 日周期という長周期で干満を繰り返している.

この新湯の準周期的水位変動に間欠泡沸泉の噴出動力学モデルを適用し, 地下構造の推定を試みた. 新湯は, よく見られる通常の短周期の間欠泉と大きく異なり, 長周期, 大振幅(多噴出量)といった特徴があり, 通常の短周期の間欠泉とは異なる地下構造が存在する可能性も含め, 未知の部分が大きい. 間欠泡沸泉の噴出動力学モデルの数値シミュレーションによる解析から, 地下に非常に大きな体積の地下空洞が存在する可能性が示唆された.

今後は, より詳細な観測データの収集に努め, その結果をモデルの数値シミュレーションの際の各パラメータ値に反映させ, より正確な数値シミュレーションを実施することで地下構造の予測を正確なものとしつつ, モデルから予測された大体積の地下空洞の存在を検証するための観測をすすめていきたい.

キーワード: 間欠泉, 動力学モデル, 数値シミュレーション, 立山カルデラ, 火口湖

1. はじめに

立山・弥陀ヶ原の南に隣接する東西 6.5 km, 南北 4.5 km の巨大な楕円形のくぼ地である立山カルデラの中央には「新湯」とよばれる火口湖があり, この新湯が, 2014 年 6 月より 70~80 年ぶりに間欠泉に戻ったことが, 福井らにより報告された(福井ほか, 2014; 福井ほか, 2015). 新湯は, 直径約 30 m, 水深約 5.6 m, 表層の水温は 65~70℃であり, 池底にある複数の噴出口から熱水が湧出することで火口湖に水が供給され, 溢れた分は, 北側の切れ口から立山カルデラ内を東西に流れる常願寺川の支流湯川に流れ込んでいる. 干満時の新湯の様子を Fig. 1 に示す.

新湯は室堂平のミクリガ池や地獄谷と同じ立山火山第 4 期(4 万年前~現在)の活動期に起こった水蒸気噴火による爆裂火口のひとつであり(原山ほか, 2000), 1858 年の安政飛越地震(M7.3)を境に冷水の池から熱湯の池に変化したといわれている(富山県郷土史会, 1976). その後, 1935 年ごろまでは間欠泉だったという記録が残っているが(吉澤, 1904), 戦後撮影された新湯周辺の空中写真には, 常に満水状態である様子が記録されている.

福井ほか(2015)によれば, 2014 年 6 月より新湯では, Fig. 2 のような間欠泉の水頭変化にも似た水位変化が続いているという. また, 2015 年以降では, この水頭変化が, 不規則なものに変化している. Fig. 2 を見ると, 水位変化が完全に周期的とは言えないものの, ほぼ周期的な準周期的変化をしていると見なせるだろう. その大まかな周期は, 約 4 ヶ月で 10 回振動していると読み取れるため, 約 12 日周期と考えられる. また, 新湯の湖面は, 満水のときから干上がったときまでずっと直径 30 m の円だと仮定し, Fig. 1 から, 満水時に切れ口からの湯川への水の流出がないものと仮定すると, 干上がったときの湖面から最高で約 6 m の高さまで水位が上昇するものとみなせる. 新湯を, このような周期, 最高の噴出高さの間欠泉とみなし, 以下で間欠泡沸泉の噴出動力学モデルを適用して, 地下構造の推定を試みる. なお, 本論文では, モデルの数値計算結果を中心に取り扱い, 新湯の近年の水位・水温変動など現地観測結果の詳細は別の論文で報告する予定である.

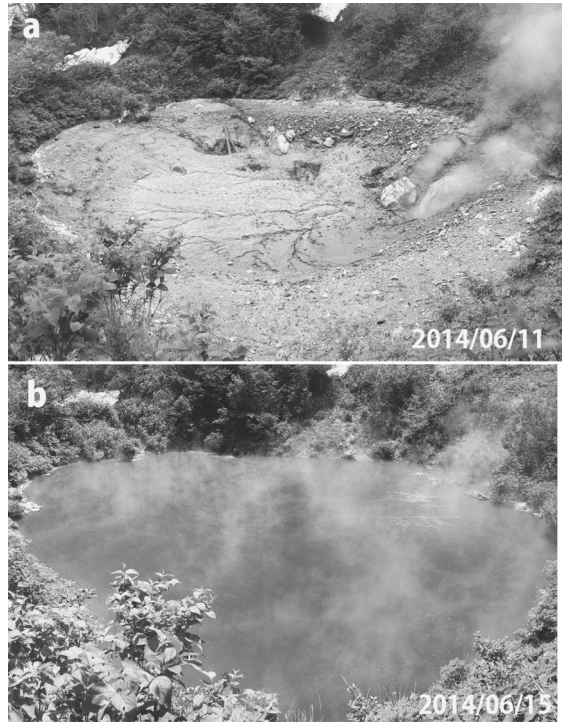


Fig. 1 Change in water level of the Shinyu hot spring pond in Tateyama Caldera (a : Completely dried-up Shinyu, b : Shinyu water level is restored) (Fukui *et al.*, 2014)

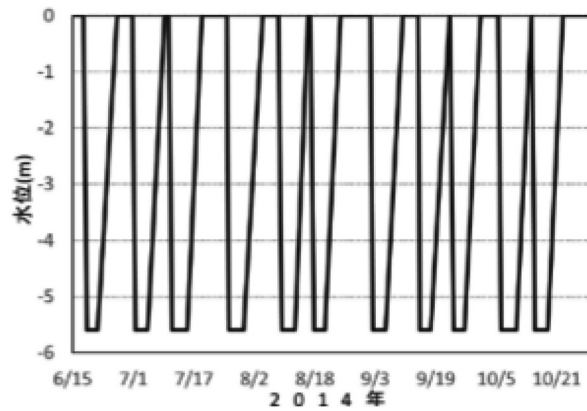


Fig. 2 Change in water level of the Shinyu hot spring pond in Tateyama Caldera (Fukui *et al.*, 2015)

2. 温泉としての新湯

新湯がある立山カルデラは砂防工事が行われているため、工事関係者以外の立入が現在制限されている。このため、新湯は温泉としての利用が行われていない。明治時代の記録によると、本湖沼

を開発して有峰鉱泉の名で開業する計画があったことが知られている (廣瀬, 1984)。

新湯では 1990 年代に水質分析が行われている (赤羽, 1993; 朴木ほか, 2000)。分析の結果、pH 3 前後の強酸性でナトリウムイオンが 171.9 mg/L、塩化物イオンが 156.3 mg/L、硫酸イオンが 321.6 mg/L、比色ケイ酸イオンが 386.7 mg/L と高く (朴木ほか, 2000)、炭酸水素イオンと炭酸イオンは全く含まれていない (赤羽, 1993) ことが分かっている。

3. 間欠泡沸泉の噴出動力学モデルによる新湯の地下構造の推定

3.1 間欠泡沸泉の噴出動力学モデル

間欠泡沸泉の噴出動力学モデルの導出については、既に他の文献 (Kagami, 2016) 等に記載があるため、以下には結果のみを示す。なお、モデルの各変数の意味については、本質的な部分で問題が生じなければ、本稿の内容に合わせ、他の文献で定義した意味とは若干変えてある。

噴出管壁と噴出する温泉水との摩擦を考えない場合、噴出管中の温泉水柱の水面の高さ x の時間変化は、(1)式によって表される。

$$\left\{ \frac{V_0}{RT} (p_0 + \rho g H + f_k) + \beta t \right\} (V_0 + Sx) \rho H \frac{d^3 x}{dt^3} + \left\{ \left(\frac{V_0}{RT} (p_0 + \rho g H + f_k) + \beta t \right) \right\} p S \frac{dx}{dt} = (V_0 + Sx) p \beta \quad (1)$$

ここで、 V_0 は地下空洞の体積、 R は気体定数、 T は地下空洞内のガスの温度、 p_0 は大気圧、 ρ は温泉水の密度、 g は重力加速度、 H は噴出孔のある地面から地下空洞までの深さ、 f_k は休止モードから噴出モードに遷移する瞬間に温泉水柱を支えている表面張力などの地下空洞内のガス圧以外の単位面積当たりの力、 β は単位時間当たりの地下空洞へのガス供給量 (モル数)、 S は噴出管の断面積、 p は地下空洞内のガス圧である。

3.2 新湯への間欠泡沸泉の噴出動力学モデルの適用

新湯では、上述のように、細い噴出管から勢いよく高く温泉水が噴出するよく見られる間欠泉と違い、長い時間をかけて噴出孔から温泉水が滲み出すようになってきて新湯に溜まるといった特徴を持っている。一方、間欠泡沸泉の噴出動力学モデルでは、噴出管中の温泉水柱の水面の高さの時間変化を記述するものとなっている。新湯の特徴にこのモデルを適用するため、新湯の水面の高さの時間変化をモデルで再現するのではなく、新湯の湖に蓄えられた温泉水の体積変化を、モデルで扱う間欠泉の系での水面の高さ変化に換算することで、モデルで扱えるようにすることにする。

具体的には、上述のように満水時に新湯に蓄えられる温泉水の体積が直径 30 m、高さ 6 m の円柱の体積に等しいと考え、この体積を、モデルで扱う断面積 0.01 m² の噴出管に満たしたときどの程度の高さになるかを算出し、その高さを間欠泉の水面の高さの振幅とみなす。なお、毎分約 1,000 l の温泉水の蒸発が生じるが、蒸発の影響は新湯に蓄えられる温泉水の体積の 0.5% 未満と見積もれるので、ここでは無視することにする。すると、換算した間欠泉の水面の高さの振幅は約 4.2×10^3 m と見積もることができる。この振幅と、先述のように 12 日 $\approx 1 \times 10^6$ 秒の周期をもつ間欠泡沸泉とみなして、噴出動力学モデルを適用することとする。

3.3 噴出動力学モデルによる新湯の地下構造の推定例

噴出動力学モデルの数値シミュレーション結果に基づいた新湯の地下構造の推定の例を以下に示す。なお、上述のように、モデルのパラメタ数は多く、それぞれのパラメタが間欠泉の振幅、周期にそれぞれの特長で影響を与えるため、ある振幅、周期をもつ数値シミュレーション結果を与えるパラメタ値群は唯一ではないことを断っておきたい。

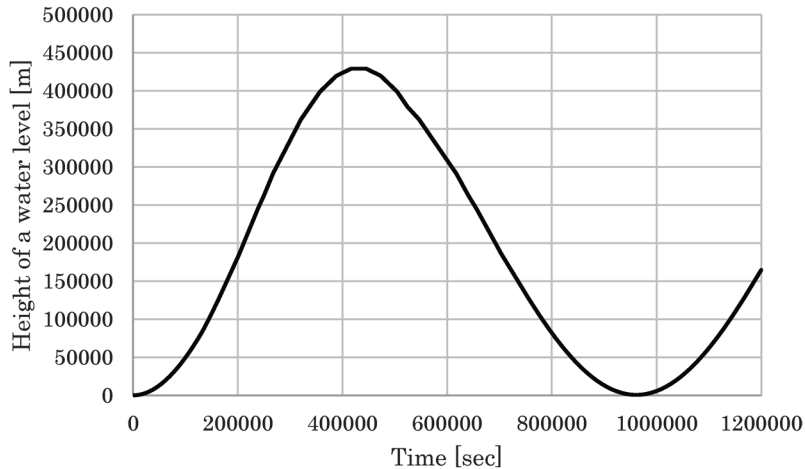


Fig. 3 Temporal variation of height of a water level based on numerical simulation of the dynamical model of a geyser induced by gas inflow

間欠泉の水面の高さの振幅約 4.2×10^5 m, 周期約 1×10^6 秒に近い数値シミュレーション結果の例を Fig. 3 に示す. このとき用いたパラメタ値は, Table 1 のとおりである. このパラメタ値群の中で最も特徴的な点は, 地下空洞体積の値で, 2.0×10^9 m³ と, よく見られる通常の短周期の間欠泉の場合に予測される体積と比べ, 5桁ほど大きいオーダーとなっている点である. これは, 新湯ほどの長い周期を実現するには, 地下空洞体積の値を大きくするしか方法がないためで, 他のパラメタ値の操作ではこれだけの長周期は決して再現できないといえる. 例えば, 地下空洞体積の値を, 上記の値より1桁小さい値, すなわち 2.0×10^8 m³ にして数値シミュレーションを行うと, 間欠泉の噴出の周期は3分の1以下まで短い周期となってしまう. 別の言い方をすれば, 数値シミュレーション結果を与えるパラメタ値群は唯一ではないことは前述したが, 新湯が“空洞説”によるメカニズムで間欠泉となっているなら, 少なくとも地下空洞体積は, よく見られる通常の短周期の間欠泉のそれと比べて, 著しく大きい可能性があるということがいえると考えられる.

Table 1 Adopted values of parameters in numerical simulations

f_k	5.24×10^{-1} [N/m ²]
ρ	1.0×10^3 [kg/m ³]
S	1.0×10^{-2} [m ²]
p_0	1.01×10^5 [N/m ²]
g	9.8×10^0 [kg·m/s ²]
V_0	2.0×10^9 [m ³]
β	1.0×10^{-3} [mol/s]
R	8.31×10^0 [N·m/K/mol]
T	3.20×10^2 [K]
H	5.0×10^1 [m]

4. まとめと今後の展望

立山カルデラ内の火口湖「新湯」の準周期的水位変動に間欠泡沸泉の噴出動力学モデルを適用し, 地下構造の推定を試みた. 新湯は, よく見られる通常の短周期の間欠泉と大きく異なり, 長周期, 大振幅(多噴出量)といった特徴があり, 通常の短周期の間欠泉とは異なる地下構造が存在する可能性も含め, 未知の部分が大きい, 間欠泡沸泉の噴出動力学モデルの数値シミュレーションによる解析から, 地下に非常に大きな体積の地下空洞が存在する可能性が示唆された.

今後は、より詳細な観測データの収集に努め、その結果をモデルの数値シミュレーションの際の各パラメータ値に反映させ、より精確な数値シミュレーションを実施することで地下構造の予測を精確なものとしつつ、モデルから予測された大体積の地下空洞の存在を検証するための観測をすすめていきたい。

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.
- 福井幸太郎, 菊川 茂, 飯田 肇, 後藤優介 (2014) : 立山カルデラの温泉の池「新湯」が一時的に干上がった現象について. 日本地理学会 2014 年秋季大会予稿集, 100075, 2014 年 9 月 20 日
- 福井幸太郎, 菊川 茂, 飯田 肇, 後藤優介 (2015) : 2014 年に発生した立山カルデラ内の火口湖「新湯」の激しい水位・水温変動. 日本地理学会 2015 年春季大会予稿集, 100277, 2015 年 3 月 29 日
- 原山 智, 高橋 浩, 中野 俊, 苅谷愛彦, 駒沢正夫 (2000) : 立山の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 190 p.
- 廣瀬 誠 (1984) : 立山黒部奥山の歴史と伝承. 桂書房, 635 p.
- 朴木英二, 赤羽久忠, 山本 茂, 金山昌一 (2000) : 立山カルデラ内の温泉および湯川の主要溶存成分組成—湯川のイオン組成に対する温泉と支流の役割—. 立山カルデラ砂防博物館研究紀要, 1, 7-9.
- Kagami, H. (2016) : A dynamical model of a geyser induced by gas inflow. 温泉科学, 65, 234-245.
- 富山県郷土史会 (1976) : 越中安政地震見聞録—立山大鷲崩れの記—. KNB 興産出版部, 228 p.
- 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.