

## 日本温泉科学会大会第52回大会

## 特別講演

## 火山流体の生成と火山活動

東京工業大学草津白根火山観測所

平林 順一

Formation of Volcanic Fluid Reservoir  
and Volcanic Activity

Jun-ichi HIRABAYASHI

Kusatsu-Shirane Volcano Observatory, Tokyo Institute of Technology

## Abstract

Kusatsu-Shirane volcano is one of the active volcanoes in Japan. Eight phreatic eruptions occurred in the recent 20 years. The chemical and isotopic compositions of acidic hot spring waters, lake water and fumarolic gases around the volcano were analyzed to elucidate of the hydrothermal system, which is related to volcanic activity of Kusatsu-Shirane volcano. About  $1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/day of volcanic gas from the magma is almost condensed under the summit, and is formed the volcanic fluid reservoir. The concentration of Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> of the thermal water in the reservoir are 22 g/l and 33 g/l, respectively.

The volcanic earthquake increased from the end of 1989, and the total magnetic-force decreased. At the same time, the concentration of H<sub>2</sub>S in the fumarolic gas at the summit decreased and Cl<sup>-</sup> content in the crater lake water of "Yugama" increased. These variations of observation data suggest that volcanic activity increased due to the increasing of the flux of volcanic gas from the magma to the volcanic fluid reservoir.

キーワード：火山流体貯留槽，火山活動，温泉，火山ガス

Key words : Volcanic fluid Reservoir, Volcanic activity, Hot spring, Volcanic gas

## 1. はじめに

日本で起こる火山噴火の約7割は水蒸気爆発であるが，その発生機構については十分に理解が進んでいない。最近マグマを含めた熱水，火山ガスなどを火山流体と呼び，その特性とダイナミクスの解明が噴火の発生機構を議論する上で重要な課題として取り上げられている。山体浅部の火山流体について，古くは福富ら(1956)により，アトサヌプリの噴気活動と周辺の温泉活動の熱測定によって，深部からの熱水が浅所で気相と液相に分離し，気相は噴気ガスとして，液相は温泉水として

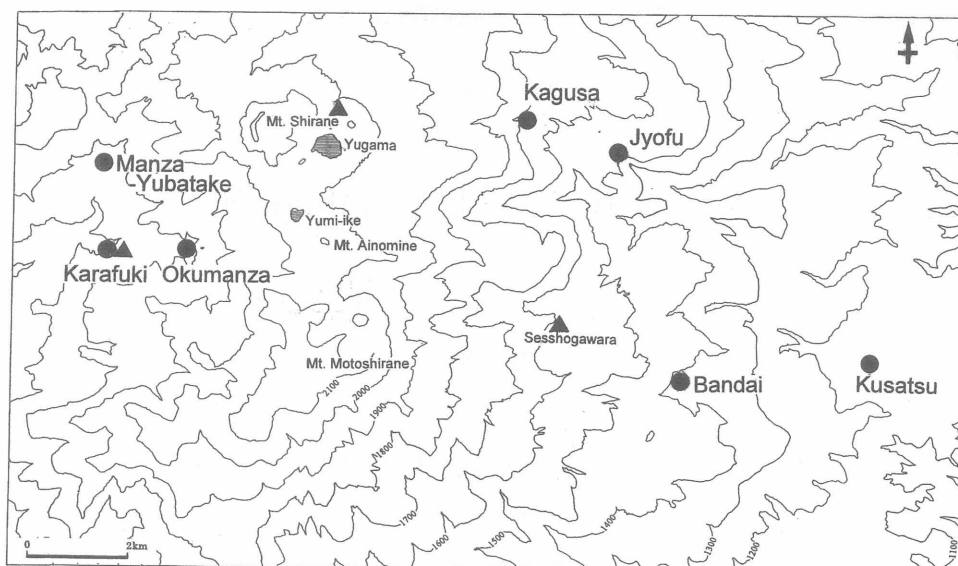


Fig. 1 Location map of hot springs and fumaroles around Kusatsu-Shirane volcano.  
● : Hot spring, ▲ : Fumarole

湧出するモデルが提唱されている。また江原ら(1981)は大分県の九重硫黄山の地下に370°Cの気液2層熱水貯留層の存在を指摘している。このほか、温泉の湧出機構説明のため箱根や倶多楽火山など多くの火山での熱水構造のモデルが提唱されている。これらのモデルで示されている地下の熱水系は、温泉の湧出機構だけでなく、熱水系の発達した火山での水蒸気爆発発生に強く関係していると考えられる。

典型的な水蒸気爆発を繰り返す草津白根山は、最近の20年間に8回の水蒸気爆発が発生した活動的な火山の一つである。同火山の山頂には、湖底に噴気ガスや熱水の噴出がある活動的な火口湖「湯釜」があり、強酸性の湖水を湛えている。近年の噴火の多くは同火口を中心に発生している。また、山頂周辺には活発な噴気活動や火山性の酸性温泉活動がある。特に東麓の草津温泉の歴史は古く、これまで多岐にわたる研究が進められている(Fig. 1)。大橋(1966)は、草津温泉の湧出は、地下水を噴気ガスが温め、ガス成分が溶解して湧出する噴気伏流型として説明している。

本稿では、草津白根山における浅部火山流体の存在とその生成機構、東麓の酸性温泉の湧出機構などについて論じた。内容は1990年の議論(平林ほか)を踏まえ、データを一部変更し、総括的なものとした。

## 2. 草津白根山における浅部火山流体の存在

草津白根山における地震観測や地磁気観測などの研究から得られた知見は、

- 1) 草津白根山では火山性地震は水釜と湯釜の東側で発生し、その深さは山頂下500~2,000mに集中する(及川ほか, 1996)。
- 2) 同火山山頂下で起こる火山性微動は、気液2相の共鳴体内でおこる固有振動であると説明されている(及川ほか, 1996)。
- 3) 火山活動に伴う全磁力の変化は、震源域の深さ500~700mで起こる熱消磁で説明されている(山崎ほか, 1992, 手塚ほか, 1996)。

などが挙げられ、一方、温泉水、火山ガスなどの化学組成、同位体組成などからは、

- 1) マグマに由来する温泉水中の塩化物イオン、硫酸イオン濃度は、山頂に近い温泉ほど濃度が高く、山頂から遠い温泉水中の両成分の濃度は低い。
- 2) 山頂に近い温泉水の酸素・水素同位体組成は、マグマ起源の水を多く含んでいる。
- 3) 温泉水中のトリチウム濃度は山頂に近い温泉ほど低く、遠い温泉ほど高い。遠い温泉には古い天水が多く混合していることを示している。
- 4) 山頂に噴出する噴気ガスは、水蒸気濃度が約97%で、酸性ガス成分は $\text{H}_2\text{S}$ と $\text{CO}_2$ が主で、 $\text{HCl}$ 、 $\text{SO}_2$ はほとんど含まれない。

などの知見が得られている。

これら化学的研究の結果は、山頂付近の地下にマグマからの火山ガスに由来する高濃度の塩化物イオン、硫酸イオンを含む熱水の存在を示唆しており、これが流下過程で天水が混合し温泉水として湧出していることが推察される。また、地震や全磁力の研究結果と併せると、熱水は山頂下500~1,000m付近でガスとともに流体貯留層を形成していることが考えられる。

### 3. 火山流体の生成

#### 3.1. 初期熱水中の塩化物イオンと硫酸イオン濃度

草津白根山山頂下に存在が推定される流体貯留槽中の熱水(初期熱水)の塩化物イオンと硫酸イオンの濃度を、マグマからの火山ガスが完全に凝縮して生成するとし、またマグマ起源の水の水素同位体比を $\delta D = -30\%$ と仮定して、温泉水の水素同位体比と両イオンの濃度の関係から求めると、初期熱水中の塩化物イオン濃度は22g/l、硫酸イオン濃度は33g/lとなる。この濃度はマグマ水の酸素同位体比を用いても大きく変わらない。

#### 3.2. 初期熱水を作るマグマからの火山ガス組成

高温の火山ガス組成の化学組成などを参考にして、マグマから分離する火山ガスの $\text{H}_2\text{O}$ 濃度を90v%と仮定し、また硫酸イオンは、二酸化硫黄の自己酸化還元反応( $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{SO}_3$ ,  $3\text{H}_2\text{SO}_3 = 2\text{H}_2\text{O}_4 + \text{S} + \text{H}_2\text{O}$ )で生成するとし、 $\text{Cl}^- : 22\text{g/l}$ ,  $\text{SO}_4^{2-} : 33\text{g/l}$ の濃度を持つ初期熱水を作る火山ガス組成を求めると、 $\text{H}_2\text{O} : 90\%$ ,  $\text{HCl} : 1.0\%$ ,  $\text{SO}_2 : 0.83\%$ となる。残りは $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ などのガス成分で構成される。 $\text{SO}_2$ の自己酸化還元反応には上記反応のほかに、 $4\text{H}_2\text{SO}_3 = 3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{S}$ もあるが、両反応の割合などが不明であり、ここでは議論を単純化するために先に示した自己酸化還元反応のみで硫酸イオンが生成するとした。計算で求めたマグマから起源の火山ガスの $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ 濃度は、例えば薩摩硫黄島で、定常的に噴出が続いている約800°Cの火山ガス中の両ガス成分濃度はそれぞれ0.56%, 0.66% (Matsuo et al., 1974)である。インドネシアジャワ島メラピ火山山頂にある約800°Cの火山ガス中の両ガス成分濃度はそれぞれ0.4%, 0.95% (Hirabayashi et al., 1998)であり、アイスランドSrutsey火山1963年噴火時に採取された1123°Cの火山ガス中の $\text{HCl}$ 濃度は、0.4~1.15%,  $\text{SO}_2$ 濃度は1.8~5.4% (Sigvaldason and Elisson, 1968)である。これらのマグマから直接もたらされたと考えられる高温の火山ガス中の両ガス成分濃度と較べて、今回推定した草津白根山のマグマから分離した火山ガス中の $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ 濃度は矛盾しない。

#### 3.3. マグマからの火山ガス供給量

草津白根山に噴出している噴気ガスには $\text{HCl}$ と $\text{SO}_2$ はほとんど含まれないことから、マグマからの火山ガス中の $\text{HCl}$ と $\text{SO}_2$ はすべて温泉水中の $\text{Cl}^-$ と $\text{SO}_4^{2-}$ として地表に放出されているとして、マグ

マからの火山ガス供給量を見積もった。見積もりに必要なデータはそれぞれの温泉水中の両イオン濃度と湧出量である。草津白根山周辺に湧出する温泉水のうち最も湧出量の多い温泉は草津温泉で、代表的な「草津湯畑」の化学組成を持つ温泉の湧出量は15,000 l/minである。万代鉱温泉の湧出量は5,000 l/minでこれに次ぐ。このほか西麓の万座温泉などの水質、湧出量も加えて、草津白根山周辺から温泉水として湧出するマグマ起源の $\text{Cl}^-$ 量は $12.8 \times 10^3 \text{ kg/day}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 量は $27.5 \times 10^3 \text{ kg/day}$ と計算される。これを賄うためのマグマからの火山ガス量は、 $\text{Cl}^-$ を基準にすると約 $8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ を基準にすると $11.6 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}$ となる。

### 3.4. 草津白根山の浅部火山流体貯留層の生成

草津白根山のマグマ溜りの位置は十分に明らかにされていないが、1993年7月に本白根山の東側約1.5km、海面下1~2kmの深さでマグマ活動に関連したと考えられている比較的大きな地震が2回発生した。このことも考慮すると、草津白根山の浅部火山流体は、山頂下3km付近のマグマ溜りからの $\text{H}_2\text{O}$  : 90%,  $\text{HCl}$  : 1%,  $\text{SO}_2$  : 0.83%, 残り :  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ などの組成を持つ火山ガスが1日あたり約 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ 供給され、これが山頂下500~700m付近でほとんどが凝縮して生成する熱水を主とし、これに水に対する溶解度が小さい $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ などのガス成分からなる気相が加わった気液2相であると考えられる。浅部火山流体貯留層では火山ガス中の $\text{HCl}$ ,  $\text{SO}_2$ は $\text{Cl}^-$ と $\text{SO}_4^{2-}$ になって高濃度・強酸性の熱水を形成する。熱水の流下過程では、地下に浸透した天水の混合と、流路での周辺岩石との相互作用による岩石中の金属成分の溶脱が起こり、熱水は周辺に火山性酸性温泉として湧出すると考えられる (Fig. 2)。この考えは、山頂の東側中腹から草津温泉にかけて実施さ

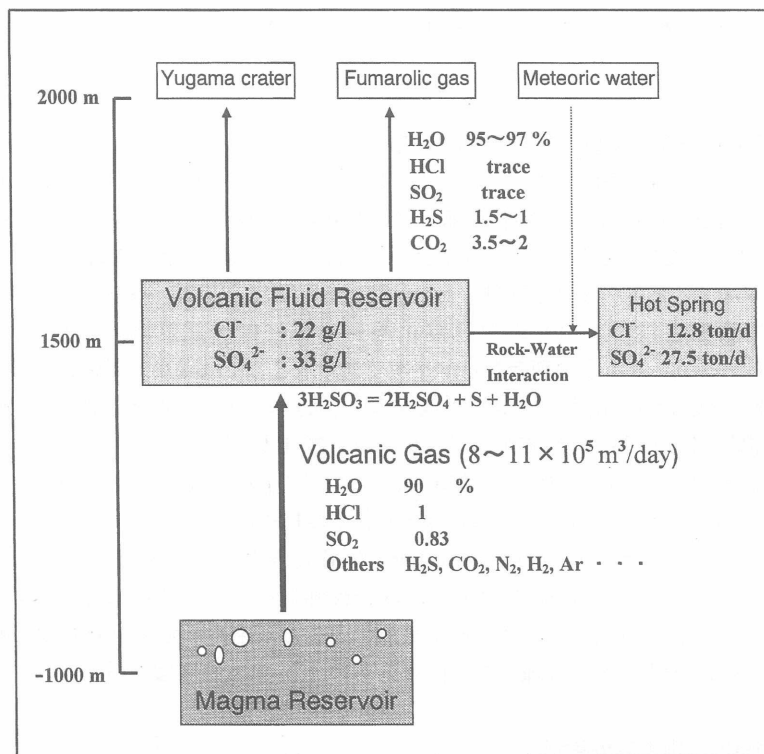


Fig. 2 Hydrothermal system and budget of volatile components at Kusatsu-Shirane volcano.

れた空中 $\gamma$ 線探査(草津町資料)の結果でも、地下に温泉水の流れがあることが示唆されており、その結果と矛盾しない。また、流体貯留層では、水に比較的溶けにくい $H_2S$ 、 $CO_2$ 、 $N_2$ などは水蒸気とともに噴気ガスとして地表に噴出する。

#### 4. 草津白根山の火山流体と火山活動

草津白根山では、火山活動が静穏な期間の地震の発生は少なく、月に20~30回であるが、1989年末から1993年頃まで地震活動が極めて活発となった。この間1日あたりの地震回数は最高42回であった。同時期に、山頂北側にある同火山で最も温度が高く活発な噴気ガス中の硫化水素濃度も減少しはじめた。同噴気ガス中の $H_2S$ 濃度の変化は火山活動と密接に関連しており、その濃度が10%程度まで低下すると噴火が発生することが経験的に明らかとなっている(平林, 1997)。このことは、火山活動の活発化でマグマからの $SO_2$ 供給量が増加し、地下で $SO_2$ に対して2倍の $H_2S$ が消費される $SO_2 + 2H_2S = 3S + 2H_2O$ の反応が進み、地表に噴出する噴気ガス中の $H_2S$ 濃度が低下することで説明される。山頂北側噴気ガス中の $H_2S$ 濃度の減少とともに、湯釜湖水中の $Cl^-$ 濃度が増加をはじめた。この濃度変化は、マグマからのHCl供給量の増加と考えることができる(Fig. 3)。さらに、前述の地震の震源域での全磁力の低下も時期を同じくして始まった(手塚ほか, 1996)。これらの変化は、草津白根山の火山活動が活発化したことを示唆するもので、噴火発生が危惧されたが噴火には至らず、1992年~1993年頃から沈静化に転じた。

これらの諸現象は、いずれもマグマからの火山ガス供給量が増加したことによる浅部火山流体貯留層での温度上昇あるいは高温域(貯留層)の拡大、貯留槽内での流体の流動、火山ガス成分間の反応の変化などで説明され、浅部火山流体貯留層付近での変化と火山活動との関連が強いことを意味している。

#### 5. ま と め

草津白根山の山頂下浅部に生成する気液2相からなる火山流体貯留槽は、水蒸気爆発を起こす多くの火山体内部にも生成していることが予想され、水蒸気爆発の発生に大きく関ると考えられる。特に流体の化学的特性およびその変化、流体のダイナミクスや温度変化を知ることが、火山活動の推移、噴火の前駆現象の捕捉、噴火の発生機構を知る上で重要な研究課題である。

典型的な水蒸気爆発を起こし、現在火山活動が活発な草津白根山においては、これまで年次的に

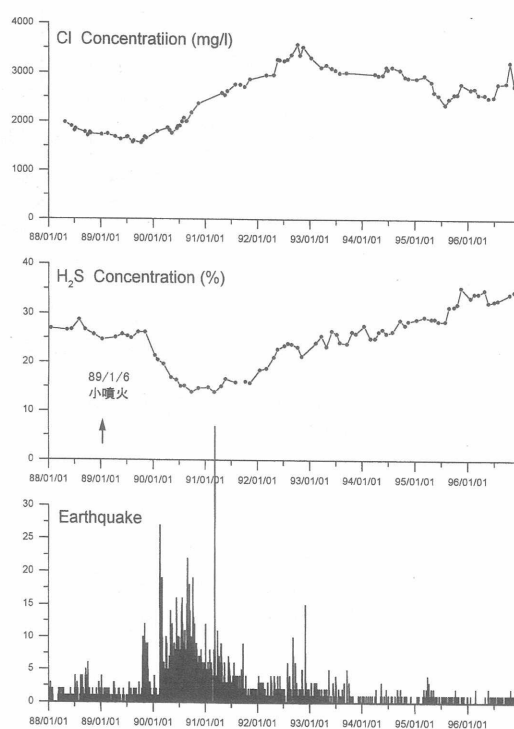


Fig. 3 Variation of  $Cl^-$  content in "Yugama" lake water, concentration of  $H_2S$  in fumarolic gas at the summit, and frequency of volcanic earthquake.

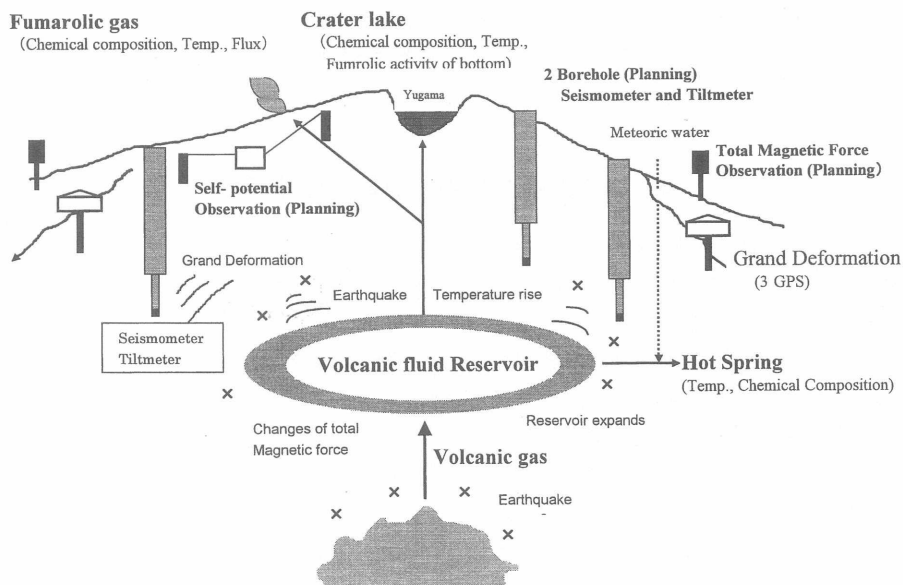


Fig. 4 Observation system for the volcanic fluid under the summit of Kusatsu-Shirane volcano.

火口湖湯釜の水温、水位、水質、湖底噴気活動などの化学的観測設備、地震や傾斜計、GPSによる地殻変動の観測設備が整備されているが、今後さらに地中地震傾斜観測網の整備と併せて全磁力および自然電位などの電磁気学的観測設備の整備を図ることで、同火山の火山活動の的確な把握と噴火ポテンシャル評価を行うことが計画されている(Fig. 4)。

## 文 献

- 江原幸雄, 湯原浩三, 野田徹郎(1981) 九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれから推定される熱水系と火山ガスの起源. 火山, 26, 35-56.
- 福富孝治, 須川 明, 藤本忠義(1956) 川湯温泉の地球物理学的研究. 北大地球物理学研究報告, 4, 39-64
- 平林順一・松葉谷 治・垣内正昭(1990) 水の同位体組成からみた草津白根山の地下水の流れ. 化学的手法による噴火予知ワーキンググループニュース, 6, 26-31.
- 平林順一(1997) 草津白根山の最近の活動と地球化学的観測研究. 月刊地球, 号外18, 70-75.
- Matsuo, S., Suzuoki, T., Kusakabe, M., Wada, H. and Suzuki, M., (1974) Isotopic and Chemical Compositions of Volcanic gases from Satsuma-Iwojima, Japan. *Geochem. J.*, 8, 65-73.
- 及川 純, 井田喜明, 行田紀也, 辻 浩, 山本圭吾, 藤田英輔, 羽生 毅, 山岡耕春, 奥田 隆, 金島 聡(1996) 草津白根山における火山性地震・微動の稠密観測. 第3回草津白根山の集中総合観測報告書, 13-26.
- 大橋良一(1966) 草津白根火山と草津温泉. 地学研究, 特別号, 57-64.
- Sigvaldson G. E. and Elisson G. (1968) Collection and analysis of volcanic gases at Surtsey, Iceland. *Geochem. et Cosmochim. Acta*, 32, 797-805.

手塚雅美, 山崎 明, 中谷 清, 中島新三郎, 小島美都子(1996) 草津白根山の全磁力観測. 第3回草津白根山の集中総合観測報告書, 53-59.

山崎 明, 中禮正明, 角村 悟, 中島新三郎(1992) 草津白根山における全磁力変化の解析—1990年の顕著な全磁力変化と熱消磁モデル—. 地磁気観測所要報, 24, 53-66.