

原 著

草津白根火山水釜の湖水組成ならびに 湖水色の変化と火山活動との関係

小坂文予¹⁾, 木川田喜一²⁾

(平成 21 年 6 月 8 日受付, 平成 21 年 7 月 21 日受理)

Changes in Water Chemistry and Color of Mizugama, a Crater Lake of Kusatsu-Shirane Volcano and Its Implications for Volcanic Surveillance

Joyo OSSAKA¹⁾ and Yoshikazu KIKAWADA²⁾

Abstract

The phreatic eruption had occurred at the Mizugama crater of Kusatsu-Shirane volcano in March, 1976. Before the eruption, the color of the Mizugama crater lake had changed from the conventional yellowish brown to bluish color due to the supply of the spring water with high concentration of Fe^{2+} from the lake bottom. In the summer of 2005, the Mizugama water changed to yellowish green with the increasing of the $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratio in the lake water, while the water color had been brown since the 1980s at least. After that, signs of increasing volcanic activity have been observed around the Mizugama crater since 2007. The chemistry and color of the Mizugama water thus may be a good indicator of the volcanic activity of Kusatsu-Shirane volcano.

Key words : Kusatsu-Shirane volcano, Mizugama crater, crater lake, prediction of eruption

要 旨

草津白根山では 1976 年 3 月に水釜火口で水蒸気爆発を生じた。この噴火に先立ち、水釜湖底からは Fe^{2+} に富む湧水が供給され、その結果、水釜の湖水色は黄褐色から青色に変化した。噴火後の水釜湖水は、少なくとも 1980 年代以降、再び褐色を帯びていたが、2005 年夏期に、水釜湖水がきわめて Fe^{2+} に富む状態になり、湖水色が褐色から黄緑色に変化しているのが確認された。その後、2007 年より水釜周辺での火山活動の活発化を示す兆候が認められるようになり、今日に至っている。水釜の化学組成ならびに湖水色の変化は火山活動と連動しており、草

¹⁾ 東京工業大学名誉教授 〒152-0012 東京都目黒区洗足 2-5-7. ¹⁾ Professor emeritus, Tokyo Institute of Technology, 2-5-7 Senzoku, Meguro, Tokyo 152-0012, Japan.

²⁾ 上智大学理工学部物質生命理工学科 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1. ²⁾ Department of Materials and Life Sciences, Faculty of Science and Technology, Sophia University, 7-1 Kioicho, Chiyoda, Tokyo 102-8554, Japan.

津白根山の火山活動モニタリングにおける有効な指標となる可能性がある。

キーワード：草津白根山, 水釜, 火口湖, 噴火予知

1. はじめに

群馬県の北西部, 長野県との県境に位置する草津白根山は, 今日も継続的に活動を続ける活火山である (Fig. 1). 1976年3月には山頂火口湖の一つ, 水釜火口において水蒸気爆発が発生し, その後, 1982年から1983年にかけて, 最大の火口湖である湯釜火口においても水蒸気爆発が発生した. この水釜火口における水蒸気爆発は, 同火山としては1942年以来34年ぶりの噴火であった. 東京工業大学と上智大学では, それ以前から, 同火山地域の噴気孔, 湧水 (温泉) 等の地球化学的調査・研究を行っており, 1) 草津白根火山の3主要噴気孔より噴出するガスの H_2S 中に, 時々 SO_2 が含まれるようになった. 2) 噴気地域内で H_2S の滞留面積が拡大した. 3) 自記録による H_2S 測定の結果, 高濃度ピークの出現回数が増加した. 4) 山頂水釜付近に SO_2 を含むガス噴気孔が多数出現した. などの理由により, 同火山の活動の活発化が進んでいるとの結論に達した (小坂, 1975; 東京工業大学工学部理学部・上智大学理工学部, 1976; 小坂ら, 1978). さらに, もし異変があるなら水釜付近の可能性が高いことを予想して, 噴火発生約2年前に火山噴火予知連絡会に通告しており, はじめて地球化学的手法による, 火山噴火の実質的な事前予測に成功した. 近年, 水釜火口の北側外斜面の噴気, 地熱活動の活発化が認められ (たとえば, 気象庁, 2009), 2008年7月には湯釜火口の水釜側の内壁に新規噴気孔が確認されるなど, 再び水釜周辺での火山活動の活発化の兆候が見られることから, 本稿では, 1976年の水釜噴火の前後に捉えられた水釜湖水の変化を整理し, その火山活動との関連性を検討する. なお, 水釜に続き1982年から1983年にかけて噴火した湯釜の水質と火山活動との関係については, 別途多くの議論がなされている (たとえば, Takano, 1987; Takano and Watanuki, 1990; 小坂ら, 1997).

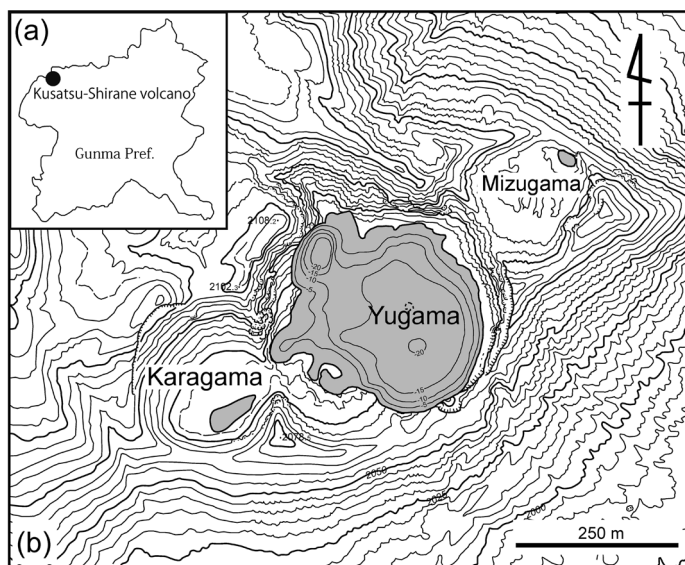


Fig. 1 (a) The location of Kusatsu-Shirane volcano in Gunma Prefecture, and (b) a map around the summit of Kusatsu-Shirane volcano. Contours are in meters.

2. 1976 年噴火前後の水釜湖水の組成変化

Table 1 に、1976 年の噴火前後に採取された水釜湖水の化学組成を示す。残念ながら噴火前の湖水の分析値はきわめて限られたものであり、主要な溶存成分濃度がほぼ揃っているのは 1966 年、1975 年の 2 点しかない。水釜では、1976 年の水蒸気爆発によって湖底に生じた新たな爆裂火孔のためにそれまでの湖水が火孔底へと流失し、一旦は湖水が消滅したが (Photo 1b)、その翌年の 1977 年には再び湖水が戻り始めた。その際の水釜湖水は pH が 2.35 と 3 を下回る酸性であり、塩化物イオンがほとんど含まれないのに対し、硫酸イオンは数 100 mg/L のオーダーで含まれているのが特徴と言える。このような水質の特徴は噴火前の湖水においても噴火後に再生された湖水においても同様である。ここで噴火の 8 ヶ月前の 1975 年 7 月の分析値を見ると、 Fe^{2+} 濃度の顕著な上昇が認められ、その前年、前々年に対して Fe^{2+} と Fe^{3+} との量比が大きく逆転していたことがわかる。このような変化は、噴火の前兆現象に類するものであったのではないかと考えている。

噴火直後の調査において、水蒸気爆発により生じた爆裂火孔の内壁に、黒色の沈殿を伴う湧水の存在が確認されている (Photo 1c)。このような 1976 年の水蒸気爆発により生じた爆裂火孔内に確認された湧水の分析値を Table 1 に示した。これら湧水の pH は水釜湖水 (pH 2.35) と同等の 2.3 から 2.8 であり、水質の特徴としてはやはり水釜湖水と同じく塩化物イオンに乏しく、硫酸イオンにきわめて富んでいる。また、溶存成分濃度的には水釜湖水より数倍高濃度であり、溶存する鉄イオンの全ては Fe^{2+} であった。このような高濃度の Fe^{2+} イオンの存在が湧水中に黒色の沈殿 (Fe^{2+} と Fe^{3+} との混合水酸化物) を生じさせたのであろう。したがって噴火前の水釜湖水の $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 濃度比の大きな変動は、このような湧水の湖底への供給によるものであると考えられる。

一方、噴火翌年の 1977 年に再び現れた水釜湖水は、鉄濃度が 300 mg/L を越え、噴火前に較べて極めて高い鉄濃度を示すものであった。また、その Fe^{2+} と Fe^{3+} の量比は圧倒的に Fe^{2+} に富むものであった。これは先のような Fe^{2+} に富む湧水が爆裂火孔内に溜まったことを示している。水釜には流入する河川が存在せず、その湖水は降水と水釜火口内の小規模な湧水により保持されているものと考えられることから、水釜湖水の水質とその変動は、このように火口内の湧水の水質やその供給量の変化に支配されていると考えられる。

Table 1 The water chemistry of lake and spring waters in the Mizugama crater before and after the phreatic eruption in 1976.

| | Sampling date | Atmos. Temp. (°C) | Water Temp. (°C) | pH | Content (mg/L) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------|-------------------|------------------|------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|--|
| | | | | | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | T-Fe | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Al ³⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | H ₂ SiO ₃ | |
| Lake water | 6-Jul-1966 | — | — | 2.8 | 5.6 | 1.2 | 94.4 | 3.7 | 15.8 | — | — | 39.4 | 0.5 | 637 | 36.4 | |
| | 11-Jul-1967 | 14.2 | 17.4 | 2.73 | — | — | — | — | 32.8 | 23.8 | 9.0 | — | — | — | — | |
| | 4-Aug-1968 | 22.5 | 21.5 | 2.8 | — | — | — | — | 43.6 | 13.4 | 30.2 | — | — | — | — | |
| | 29-Jul-1969 | 15.3 | 18.9 | 2.6 | — | — | — | — | — | 13.3 | — | — | — | — | — | |
| | 24-Jul-1973 | 18.6 | 20.6 | 2.69 | — | — | — | — | 12.8 | 6.3 | 6.5 | — | — | — | — | |
| | 29-Jul-1974 | 18.6 | 20.3 | 2.70 | 7.5 | 1.5 | 101 | 3.6 | 52.8 | 9.3 | 43.5 | — | — | — | — | |
| | 29-Jul-1975 | 19.3 | 21.6 | 2.7 | 5.8 | 1.2 | 95.9 | 0.29 | 39.9 | 31.3 | 8.6 | 37.6 | 0.7 | 518 | 42.5 | |
| | 2-Aug-1977 | 19.5 | 27.2 | 2.35 | 23.8 | 2.8 | 252 | 15.9 | 310 | 300 | 10.0 | 172 | 1.3 | 2496 | 170 | |
| Spring water ^a | 13-Mar-1976 | -8.8 | 10.2 | 2.6 | 33.8 | 10.4 | 260 | 18.1 | 78.0 | 78.0 | 0.0 | 195 | 2.6 | 2080 | 183 | |
| | 1-Aug-1976 | 21.0 | 18.9 | 2.31 | 28.8 | 8.4 | 288 | 6.9 | 332 | 294 | 38.0 | 208 | — | 2864 | 195 | |
| | b 1-Aug-1976 | 19.8 | 22.8 | 2.8 | 20.7 | 5.8 | 305 | 5.9 | 55.9 | 51.6 | 4.3 | 135 | 1.7 | 1553 | 182 | |

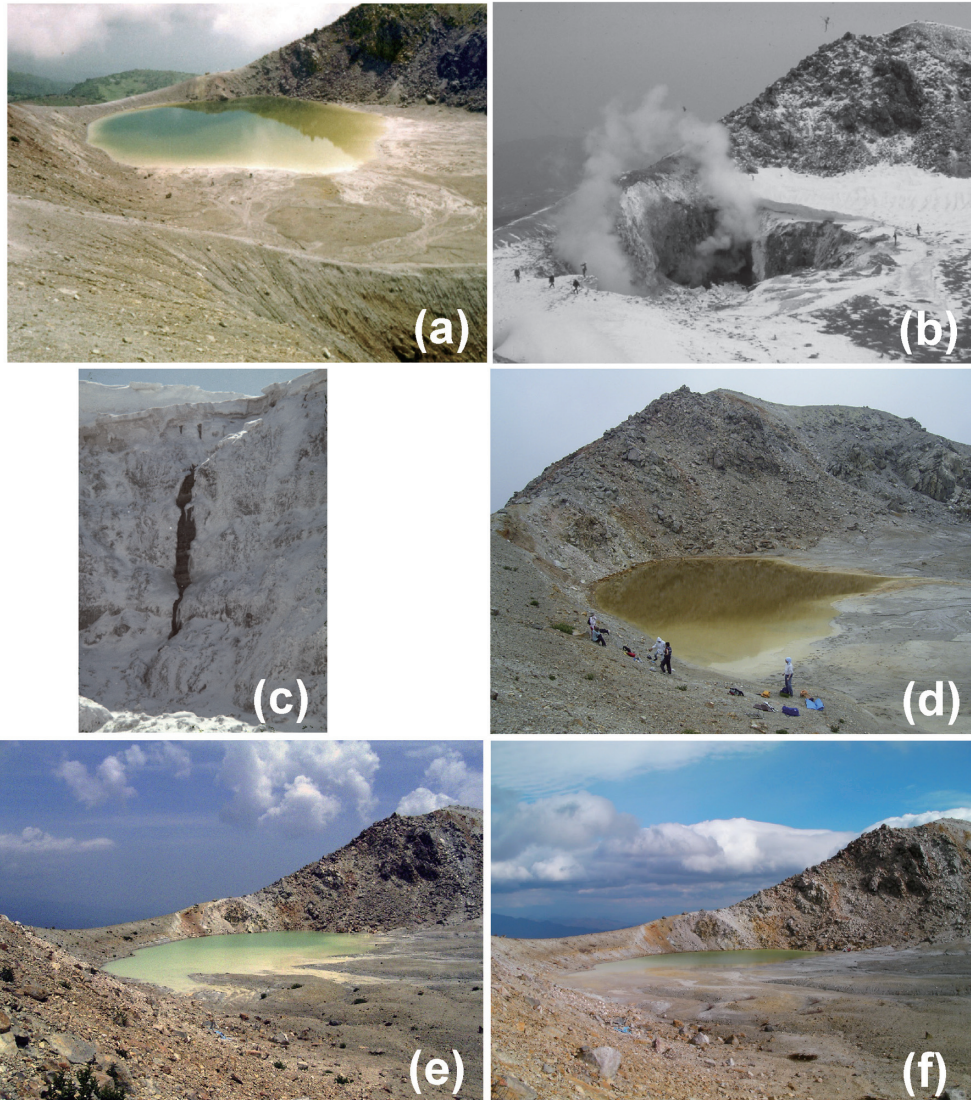


Photo 1 Photograph of (a) Mizugama before the eruption occurred in 1976 (July 25, 1975), (b) the new explosion crater formed by the eruption at Mizugama in 1976 (March 13, 1976), (c) the “black” spring water found in the new explosion crater in 1976, (d) Mizugama on August 1, 2003, (e) Mizugama on July 29, 2005 and (f) Mizugama on October 29, 2008.

3. 1976年噴火前の湖水色の変化

1975年当時撮影された水釜の遠望写真を後日見直したところ、それまで日頃の水釜湖面は黄褐色に映って見えていたのに対し、この夏の写真ではその一部が青色に映って見える事が確認された (Photo 1a)。これは、おそらくは Fe^{3+} の水酸化物からなる懸濁物により黄褐色を呈していた湖水が、 Fe^{2+} に富むようになったために、結果として青色味を帯びて見えるようになったものと想像される。また噴火の前年末の水釜では、噴火後に発見された Fe^{2+} に富む湧水の位置の真上に当たる湖

面が結水せずに気泡が認められており(前橋地方气象台, 1977), 噴火に先だって, 水釜湖底に Fe^{2+} の濃度の高い, やや暖かい湧水が上昇し, 湖水へと供給されていたことが強く示唆されるものである. 筆者の一人の小坂は, 海上保安庁水路部の南西諸島海域火山定期調査の際に, 硫黄島島の硫黄岳の小火口湖の湖水の色が淡黄褐色または淡緑青色に変化しているのをしばしば認めるなど, 火山活動に関連すると思われる火山湖の呈色の変化は, 他の火山でも報告されるものである(たとえば, 川邊ら, 2002). このような湖水の色調変化が火山活動に伴う周辺環境の変化を知る上でのひとつの手がかりとなることは間違いない.

4. 水釜の水質および湖水色と火山活動との関係

以上, ここまで示したように, 1976 年の水釜火口における噴火に際しては, その前兆現象と見られる, Fe^{2+} が卓越した湧水の供給と, それに伴う湖水色の黄褐色から青色への変化が認められた. これは水釜火口下での火山活動の活発化に誘引された現象であると思われ, Fe^{2+} を高濃度に含むきわめて還元的な湧水は, 山頂付近の降水が短期間の伏流の後に火口底から再浸出したようなものでないことは明らかである. おそらくは同時期に活発化を示していた水釜周辺の噴気活動に関連したものであろう.

その後, 1980 年代以降は黄褐色もしくは褐色を呈していたが水釜湖水であるが (Photo 1d), 2005 年の夏期に湖水が黄緑色に変化しているのが確認された (Photo 1e). この前後における湖水の化学組成は Table 2 に示すとおりであり, 2005 年の夏期においては, 溶存する鉄イオンの全てが Fe^{2+} となっていた. この $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 濃度比の急激な上昇および湖水色の変化は 1976 年の噴火前の状況を連想させたため, 水釜周辺での火山活動の変化を推察するに至った(木川田ら, 2006). そのような中で, 2008 年 7 月には, 水釜と接する湯釜の北側内斜面に新たな熱活動と噴気が見つかり, 以後, その範囲を広げるようになった. また, 水釜の北側外斜面の熱活動にも活発化と範囲の拡大が見られることが明らかになった. これらの観測結果に基づき, 気象庁は 2009 年 4 月に草津白根山に対して火山活動の活発化を注意すべく噴火予報を発表した. なお, 2008 年 11 月の時点における水釜の湖水色は, 2005 年夏期のような黄色味は帯びてはいないものの, 明らかに従来の褐色とは異なる緑色があった色調を維持している (Photo 1f).

5. ま と め

1976 年の噴火前の水釜では, 高濃度に Fe^{2+} を含む湧水が湖水に供給され, その湖水色が黄褐色から青色に変化した. また, 2005 年夏期には類似の湖水色の変化が認められ, その後, 水釜周辺における火山活動の活発化を示す熱活動が明らかになった. このように水釜湖水の化学組成と呈色の変化は火山活動と密接に関係していると考えられ, 今後も注意深くその変化を監視していくことが

Table 2 The water chemistry of Mizugama lake water in recent years.

| Sampling date | Atmos. Temp. (°C) | Water Temp. (°C) | pH | Content (mg/L) | | | | | | | | | | |
|---------------|-------------------|------------------|------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------|
| | | | | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | T-Fe | Fe ²⁺ | Fe ³⁺ | Al ³⁺ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | H ₂ SiO ₃ |
| 1-Aug-2003 | 15.2 | 18.4 | 2.54 | 11.0 | 2.3 | 103 | 3.6 | 36.6 | 7.2 | 29.4 | 44.7 | 0.0 | 822 | 11.2 |
| 29-Jul-2005 | 23.8 | 19.6 | 2.76 | 4.8 | 0.7 | 47.2 | 1.7 | 32.0 | 32.0 | 0.0 | 20.4 | 0.8 | 429 | 55.6 |
| 29-Oct-2008 | 2.3 | 3.8 | 2.73 | 7.5 | 3.3 | 84.5 | 2.9 | 32.3 | 12.6 | 19.7 | 29.5 | 1.0 | 622 | 53.4 |

求められる。湖水色の変化は、火口に直接に立ち入らずとも、上方あるいは遠方からの観測によって捉えることが可能なため、立ち入りを躊躇するような状況下においても、火山活動の推移を推察するひとつの手段として有効であるかもしれない。

謝 辞

上智大学理工学部化学科の地球化学研究に携わられた多くの卒業研究生、大学院生、ならびに故小坂知子先生をはじめとする歴代の教職員に感謝いたします。群馬県草津町の関係各位には、調査に際し多くの便宜を図っていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 前橋地方気象台 (1977) : 草津白根山の火山活動. 火山噴火予知連絡会会報, **7**, 25-30.
- 川邊禎久, 宮城磯治, 東宮昭彦, 伊藤順一, 中野 俊, 高田 亮, 宇都浩三, 松島喜雄, 山元孝広, 石塚吉浩, 星住英夫, 濱崎聡志, 佐藤久夫, 斎藤元治, 須藤 茂, 栗原 新, 浦井 稔, 風早康平, 篠塚広志, 石塚 治, 下司信夫, 金子克哉 (2002) : ヘリ観測による三宅島 2000 年カルデラの様子. 地質ニュース, **574**, 10-15.
- 木川田喜一, 井上 綾, 大井隆夫 (2006) : 2005 年に観測された草津白根山山頂火口湖水釜の湖水色の変化. 日本地球惑星科学連合 2006 年大会予稿集, V101-P010.
- 気象庁 (2009) : 草津白根山の火山活動解説資料 (2009 年 4 月 10 日 14 : 00 発表).
- 小坂丈予 (1975) : 草津白根火山噴気ガス成分の変化. 火山噴火予知連絡会会報, **2**, 15-20.
- 小坂丈予, 平林順一, 小澤竹二郎 (1978) : 地球化学的手法による噴火予知. 火山, **23**, 33-40.
- 小坂丈予, 小坂知子, 平林順一, 大井隆夫, 大場 武, 野上健治, 木川田喜一, 山野真由美, 油井瑞明, 福原英城 (1997) : 群馬県草津白根山火口湖“湯釜”の水質変化と火山活動. 地球化学, **31**, 119-128.
- Takano, B. (1987) : Correlation of volcanic activity with sulfur oxyanion speciation in crater lake. *Science*, **235**, 1633-1635.
- Takano, B. and Watanuki, K. (1990) : Monitoring of volcanic eruption at Yugama crater lake by aqueous sulfur oxyanions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **40**, 71-87.
- 東京工業大学工学部理学部・上智大学理工学部 (1976) : 草津白根火山 1976 年活動とその前後の水質・ガス成分の変化. 火山噴火予知連絡会会報, **7**, 11-19.
- (本論文の一部は、2001 年 8 月 24 日、日本温泉科学会第 54 回大会にて発表)