

## 草津白根火山の巡検案内書

上木賢太\*・寺田暁彦\*\*

## Field Excursion Guide to Kusatsu-Shirane Volcano

Kenta UEKI\* and Akihiko TERADA\*\*

## 1. はじめに

本稿は、2012年10月16日から17日に渡って行われた日本火山学会2012年度秋季大会現地討論会Bコース・草津白根山巡検(日本火山学会2012年度秋季大会報告、本号)の際に配布した資料を元に作製したものである。

草津白根火山は熱水系のよく発達した火山であり、東山麓には草津温泉を、西側には万座温泉を有する。山上には多様な高山植物が繁茂し、湯釜と呼ばれる美しい火口湖が静かに水を湛え、山は多くの観光客で賑わっている。一方で、草津白根山は活火山でもある。同火山の典型とされる水蒸気爆発は、地震活動などの前兆現象が発現しにくいとされるが、草津白根山では多数の観光客が火口至近にまで訪れるため、たとえ小規模な爆発であっても、突然発生した場合には人的被害が懸念される。

一方、草津温泉街は湯釜火口から約6km離れており、地形的に見ても、噴火が中・小規模にとどまる限り、温泉街が直接的に被災する可能性は低い。しかし、規模がどうであれ、噴火が起きれば、観光業が受ける影響は甚大である。また、各所から湧き出でる温泉水のために周辺河川は強酸性を呈し、これまで、流域の人々の暮らしは様々な制約を受けてきた。山体の各所から噴出している硫化水素ガスにより、人命が失われたこともある。

このような草津白根山の特徴を理解することは、火山現象ばかりでなく、火山山麓に住む人々の暮らしも含めた視点で火山を考える良い機会になるであろう。草津白根山の巡検案内書としては主として火山地質に注目した早川(1992)や高橋・小林[編](1998)がある。本稿では、草津市街地における温泉関連施設の紹介も重視すると

ともに、最新の研究成果を取り入れながら、草津白根山で最新のマグマ噴火が発生した本白根火口周辺や、湯釜、殺生河原の案内と解説を行う。

## 2. 草津温泉の概要

## 2-1 草津町

草津町は群馬県北西部、標高1,200m付近の高原に開けた人口7,006人(2012年10月1日現在、草津町資料より)の小さな町である(Fig. 1a)。町内の森林面積の8割は国有林で、町東部の東京工業大学草津白根火山観測所の構内にも野生のイノシシが訪れるなど、今も手付かずの自然が残されている。

夏は冷涼で、最高気温が30℃を超えることは5年に1日程度しかない。その一方、1月の平均気温は-4.2℃、降雪の深さの年平均は638cmに達する雪国でもある。草津温泉街から草津白根山山頂を通り志賀高原へと抜ける国道292号線(Fig. 2)も、例年、11月中旬から翌年4月までの約半年間にわたり冬季閉鎖される。

草津温泉の存在が広く知られるようになったのは、鎌倉時代、源頼朝の頃と言われている。温泉には優れた治癒効果があるとされ、江戸時代には年間約10,000人の来湯客が往来し、豪華な家々が立ち並んでいた(草津町役場, 1976)。2005年における町内の宿泊施設は172件、収容可能人数は、町の人口を凌ぐ11,700人である(草津町観光課調べ)。

都心から草津温泉へは、直線距離で約150kmに過ぎないが、公共交通機関を乗り継いで片道3~4時間を要する。車両通行台数に基づき算出された草津町への来客

\*〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
東京工業大学火山流体研究センター  
Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8551

\*\*〒377-1711 群馬県吾妻郡草津町草津 641-36  
草津白根火山観測所  
東京工業大学火山流体研究センター

Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology, 641-36 Kusatsu, Agatsuma, Gunma 377-1711, Japan.

Corresponding author: Kenta Ueki  
e-mail: kenta\_ueki@ksvo.titech.ac.jp

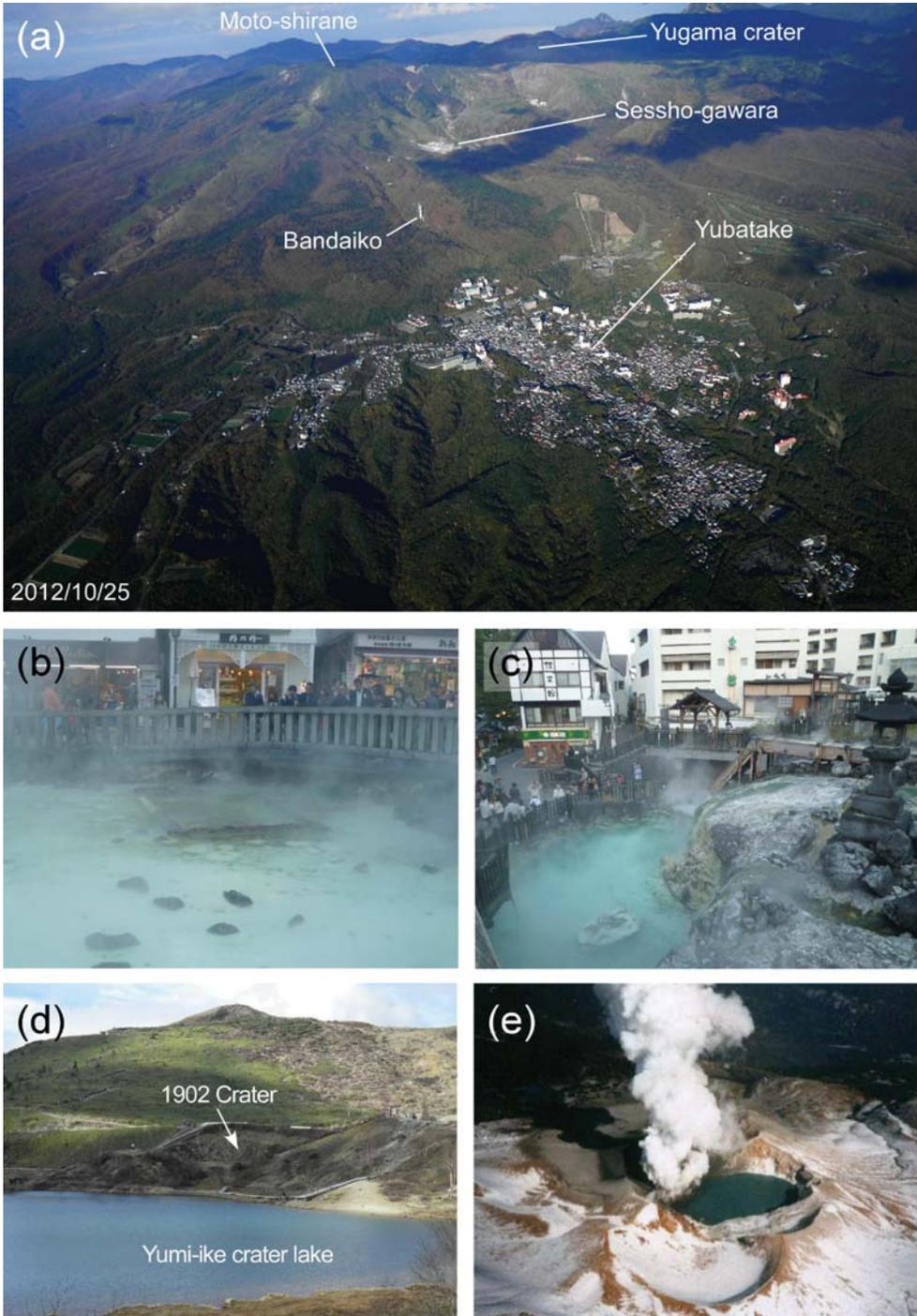


Fig. 1.1) (a) Aerial photograph of Kusatsu-Shirane volcano and city area of Kusatsu town. Photographs of (b) hot water sources and (c) hot waterfall at Yubatake, and (d) Yumi-ike crater lake. (e) Aerial photograph of volcanic plume emitting from the new vent taken by Joyo Ossaka on 29 December 1982.

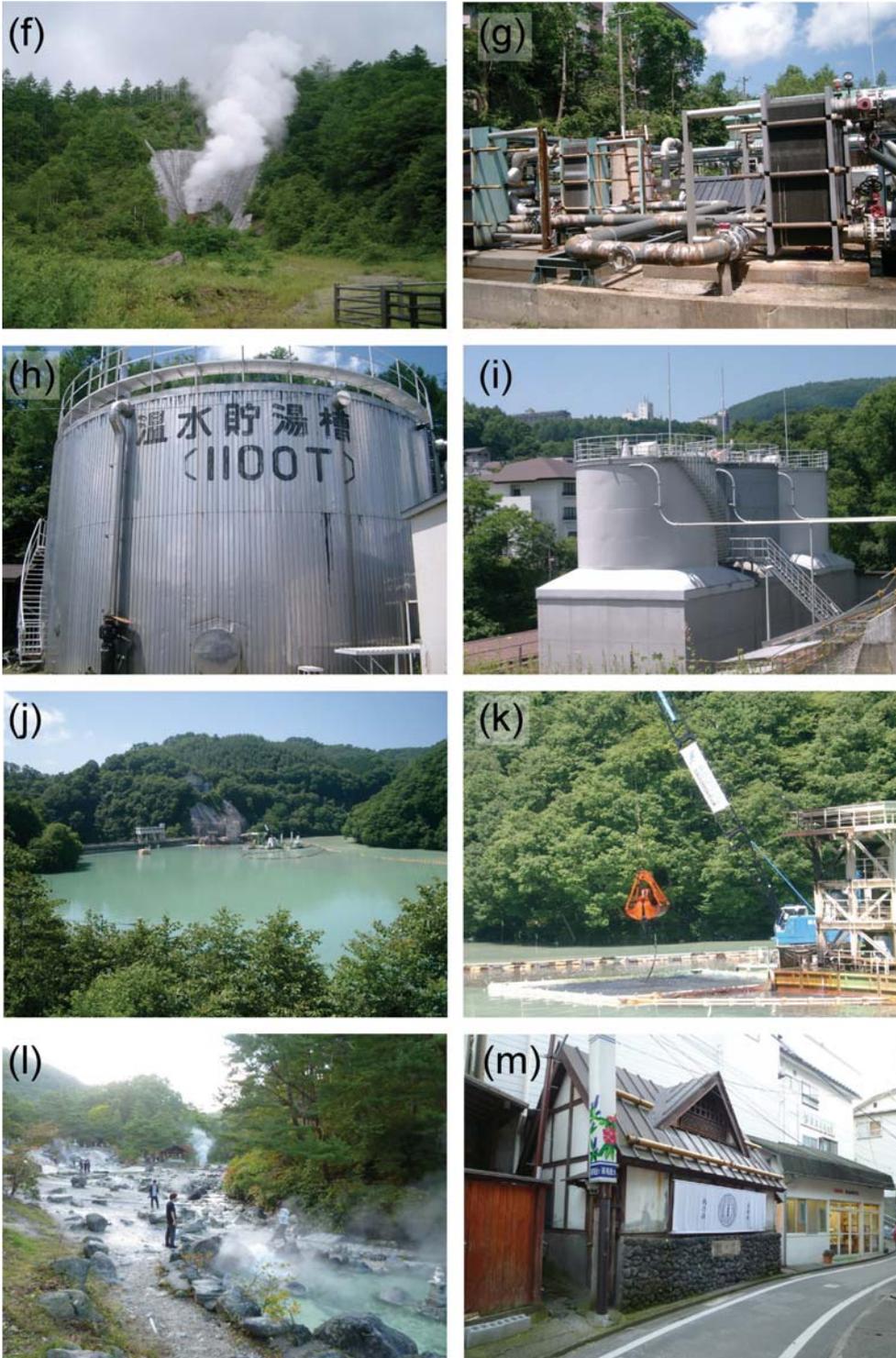


Fig. 1.(2) Photographs of (f) fumarolic gas from the Bandaiko tunnel, (g) a heat exchange system operated by department of hot springs, Kusatsu town, (h) a tank reserving heated pure water, (i) office of the Sinaki dam, brunch office of Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, (j) Sinaki dam, (k) a dredge ship for lacustrine sediments operated by the office of Sinaki dam, (l) Saino-kawara geothermal area, and (m) a small public bathhouse that is maintained by inhabitants.

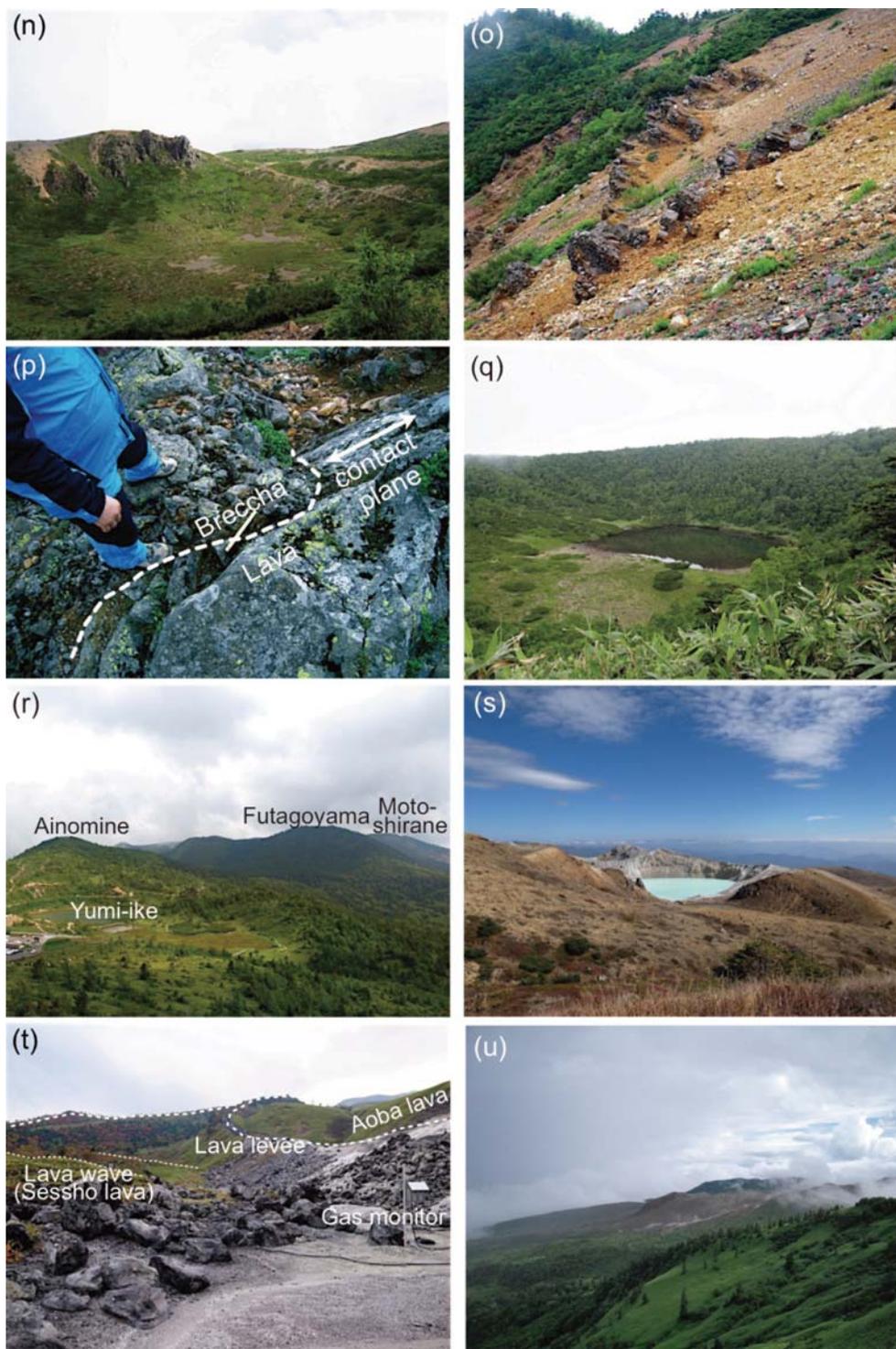


Fig. 1.(3) Photographs of (n) Moto-shirane crater (view from point E), (o) Volcanic breccia (point F), (p) Contact plane of the volcanic breccia and the Moto-shirane summit lava (point I), (q) Kagami-ike crater (view from point J), (r) Moto-shirane, Ainomine pyroclastic cone, Futagoyama dome and Yumi-ike crater, (s) Yugama crater (view from point M), (t) Lava levee and lava wave of the Sessho lava, Aoba lava (knoll covered with vegetation at the right side of the picture) and H<sub>2</sub>S gas monitor at Sessho-gawara (point N), (u) Shirane pyroclastic cone (view from Shibu touge).

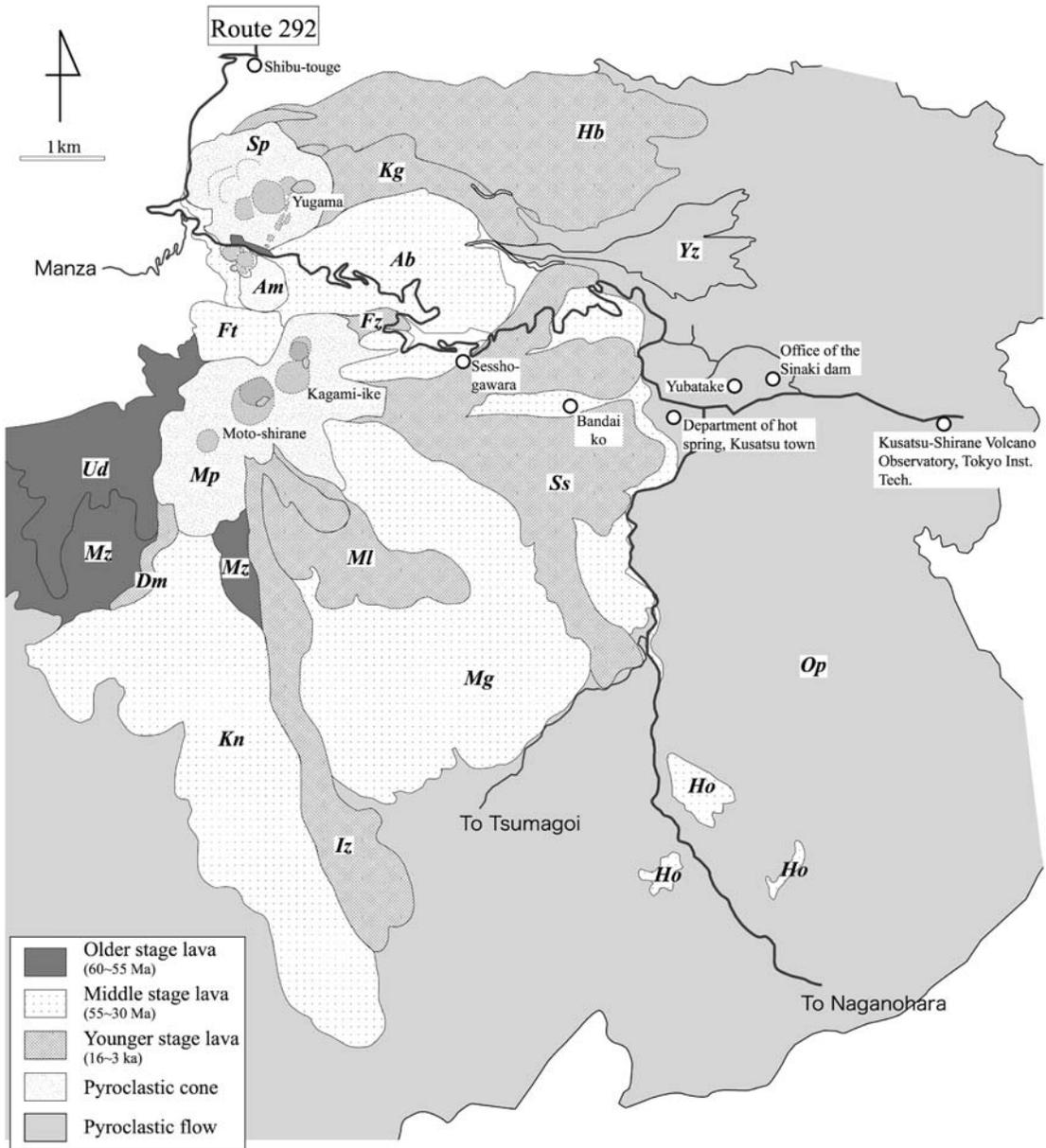


Fig. 2. Geological map of Kusatsu-shirane volcano (modified after Uto *et al.*, 1983; Hayakawa and Yui, 1989). Mz: Matsuozawa volcano (~0.6 Ma); Ud: Udogazawa lava (> 0.3 Ma); Op: Oshi pyroclastic flow (ca. 0.55 Ma); Kn: Komenashi lava (> 0.3 Ma); Mg: Maeguchi lava (> 0.3 Ma); Ab: Aoba lava (> 0.3 Ma); Ho: Horaguchi lava (> 0.55 Ma); Ft: Futagoyama lava dome (Middle); Yz: Yazawahara Pyroclastic flow (< 0.3 Ma); Hb: Heibeike lava (ca. 16 ka); Am: Ainomine pyroclastic cone (< 13 ka); MI: Motoshirane lava (< 13 ka); Kg: Kagusa lava (ca. 7 ka); Dm: Daimyozawa lava (ca. 7 ka); Sp: Shirane pyroclastic cone (< 7 ka); Ss: Sessho lava (ca. 3 ka); Iz: Ishizu lava (ca. 3 ka); Fz: Furikozawa lava (ca. 3 ka); Mp: Motoshirane pyroclastic cone (ca. 3 ka).

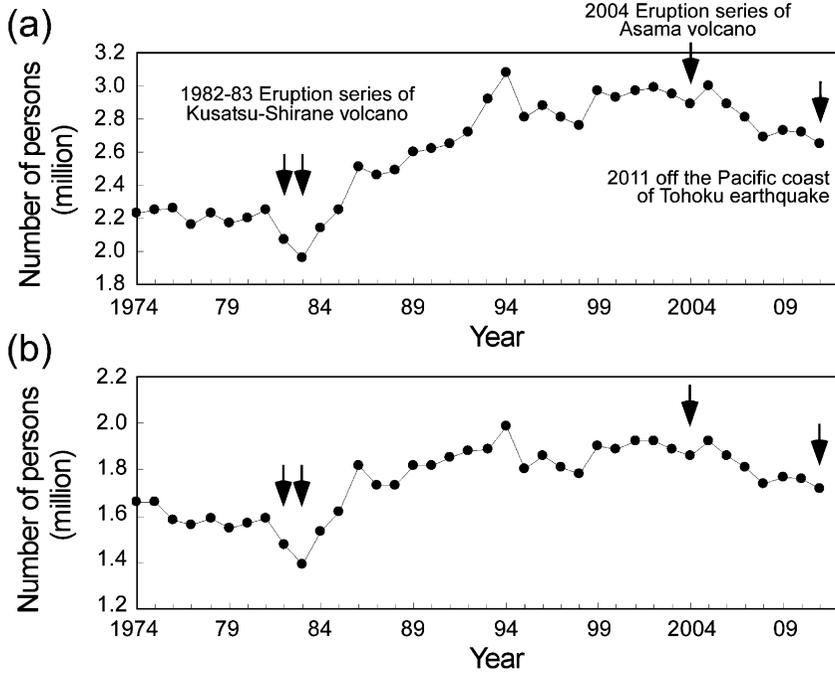


Fig. 3. Yearly number of (a) total visitors estimated by traffic volume and (b) overnight visitors reported by hotels. Data are from Kusatsu town.

数は年間 272 万人に達する (2010 年, 草津町調べ, Fig. 3)。これは東京ディズニーランドおよび同ディズニーシー (株式会社オリエンタルランド) における 2010 年度入場者数の 1.3ヶ月分に相当する。交通事情を考えれば、草津温泉は顕著な集客力を有する観光地であることがわかる。

2-2 温泉の特徴

草津町を特徴づけるのは、何と言っても豊富な温泉である。中でも、町中心部の広場で自噴する湯畑源泉 (Fig. 1b, c) は、草津温泉の象徴的な存在である。湯畑を含めて、主要源泉は 7つ (Table 1)、小規模なもの、温度の低いものを含めると 32 箇所以上あると言われている。温泉水の pH は 2 前後と強酸性で、五寸釘を入れて置くと 10 日ほどで融け去る。実際に、温泉に投入された硬貨が朽ち果ててゆく様子を湯畑などで観察できる。

万代<sup>ばんだいこう</sup>源泉を除く多くの源泉の湧出温度は 50℃前後で、古来よりそのまま浴用として利用されてきた。しかし、この温度では浴用としてはやや高すぎるため、温泉を薄めることなく湯温を下げる「湯もみ<sup>1</sup>」が行われてきた。その際、うたわれる草津節「草津よいとこ いちどはおいで」の民謡は有名である。また、体質改善を

<sup>1</sup>湯もみ板を使い、歌に合わせて湯面に擾乱を与えることで湯温を下げること。

Table 1. List of hot water sources at Kusatsu Spa.

Source	Temperature (°C)	pH	L/min
万代 (Bandai)	94.5	1.6	6,200
湯畑 (Yubatake)	52.7	2.1	4,040
西の河原 (Saino-kawara)	44.9	2.1	> 1,073
煮川 (Nikawa)	48.5	2.1	817
白旗 (Shirahata)	52.2	2.1	659
熱の湯 (Netsunoyu)	50.7	2.1	298
地藏 (Jizo)	49.9	2.2	252
その他 (The others)			3,063
未利用 (Untapped hot water)			15,898
合計 (Total)			32,300

的とした「時間湯<sup>じかんゆ</sup>」と呼ばれる高温入浴法が現在まで受け継がれている。

これらの温泉は、各旅館の内風呂 (内湯と呼ばれる) のほか、株式会社草津観光公社が運営する 2 箇所の有料公共浴場 (大滝の湯, 西の河原露天風呂) で利用できる。さらに、町内 18 カ所の無料共同浴場 (外湯<sup>そとゆ</sup>と呼ばれる) が、各町区ごとに、地域住民の手で維持・管理されている<sup>2</sup>。温泉の乱用防止のため、温泉の引用には草津町議

<sup>2</sup>観光客も利用できるが、基本的には地域のための施設である。一般観光客向けとしては、白旗の湯, 千代の湯, 地藏の湯の、3つの外湯の利用が推奨されている。

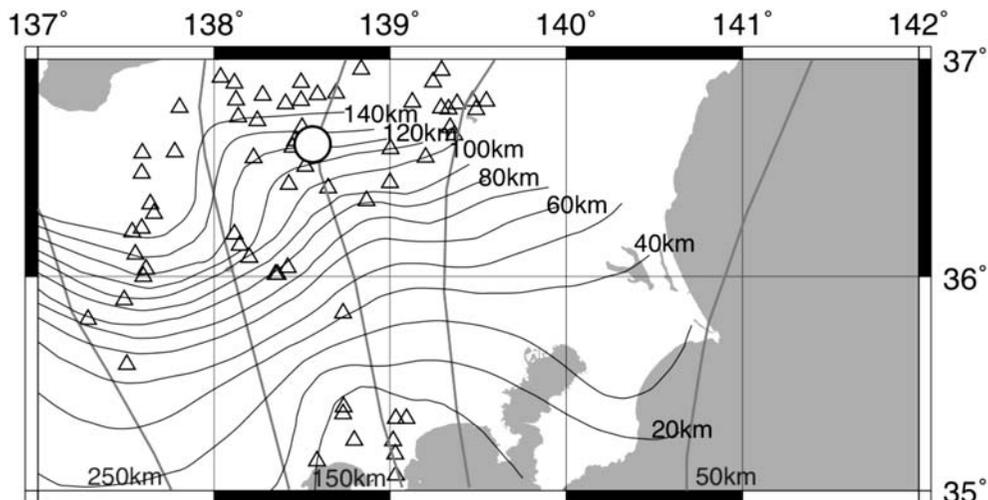


Fig. 4. Location of the Kusatsu-Shirane volcano (open circle) and the Quaternary volcanoes (Committee for Catalogue of Quaternary volcanoes in Japan, 1999). Gray and black solid lines represent depth contour of the upper boundary of the Pacific plate at intervals of 50 km (Nakajima and Hasegawa, 2006), and Philippine Sea slab at intervals of 10 km (Hirose *et al.*, 2008), respectively.

会の議決が必要であり、個人利用目的で引湯することはできない。

### 2-3 温泉湧出量

草津温泉で湧出し、あるいは使用された温泉水はほぼ全て町内を流れる湯川に合流する。このため、湯量は正確に測定されており、平均 32,300 L/min 前後である (Table 1, 2005 年調べ, 草津町温泉課資料)。このうち管理・利用されている温泉は 16,400 L/min に過ぎない。すなわち、湧出した温泉の半分は、未利用のまま河川を流下している。

平均湧出温度を 50°C とすれば、温泉から大気へと運ばれる熱エネルギーは約 110 MW と見積もられる。一方、草津温泉と同じく豊富な湯量を誇る別府温泉の湧出量は 95,000 L/min、熱エネルギーは 350 MW である (大分県, 2001)。しかし、別府温泉において自然湧出が占める割合は 15% 足らずである。草津温泉は全て自然湧出であることは、活動的の火山としても特筆すべき特徴と言える。なお、草津白根山山頂周辺には、火口湖「湯釜」や噴気域が広がっている。これら山頂周辺からの放熱量は合計 20 MW 前後と推定され (例えば Ohba *et al.*, 1994)、山麓で温泉水として放出されている熱量より 1 桁少ない。

## 3. 草津白根火山の地質学的背景

### 3-1 概要

草津白根山は、中部日本の火山フロントを形成する浅間山の背弧側、北方約 25 km に位置する活火山である (Fig. 4)。太平洋プレートとフィリピン海プレートの 2 枚

の海洋プレートが沈み込んでいる場であり、草津白根直下では太平洋プレート表面は深さ 150 km に位置する (Nakajima and Hasegawa, 2006)。フィリピン海プレートは草津白根地下付近では地震波では検知することが出来ないが、表面の深さは周囲から外挿することで約 110 km だと推定されている (Hirose *et al.*, 2008)。地震波がこの付近のフィリピン海プレートが見えない理由はまだよく分かっていない。草津白根地下でのモホ面の深さは約 40 km であり (Zhao *et al.*, 1992)、モホ面上下の深さ約 60 km から約 20 km に渡って、背弧側から前弧側に向かって水平方向に伸びた地震波の低速度域が発達している (Nakajima and Hasegawa, 2007 など)。

草津白根山は、山頂付近に発達した小型の多数の火口や溶岩流の噴出口の集合体からなる、単成火山群的な構造を示す (Fig. 2)。火口群は北東-南西方向に数本の列をなして並んでいる。この火口列の配置及び地震の震源分布などから、草津白根山の山体地下ではマグマが北東-南西方向の走向で板状に貫入していると推定されている (高橋, 1994)。草津白根山の噴火は、火砕流や降下堆積物の噴出が多くを占める浅間山や榛名山などの近傍の火山と比べて本質物を伴う爆発的噴火の割合が比較的少なく、大規模な溶岩流の噴出と本質物を伴わない水蒸気爆発が主体であるという特徴がある。青葉溶岩や殺生溶岩を始めとして、それぞれの溶岩流の噴出量が非常に多いことも特徴である。例えば中期と新期の活動期における溶岩流の総噴出量はそれぞれ 6.5 km<sup>3</sup> と 0.9 km<sup>3</sup> と推定さ

れていて(早川・由井, 1989), 富士山の青木ヶ原溶岩の噴出量  $0.16 \text{ km}^3$  (津屋, 1968) などと比べても非常に大きい。

### 3-2 草津白根火山の発達史と地質

草津白根火山の地質図(宇都ほか, 1983及び早川・由井, 1989に加筆)を Fig. 2 に示した。草津白根山の基盤岩は第三紀の火成岩だとされているが(早川・由井, 1989), 変質が激しいこともあり, 詳しい情報はまだ得られていない。全体として圧縮応力場にあり基盤岩の標高が高いため, 草津白根山の総噴出量は浅間山などと比較して小さいが標高最高地点は  $2,171 \text{ m}$  に達している。山体西側では標高  $2,000 \text{ m}$  を越えても基盤岩が露出している。草津白根山はこの基盤岩の作る南東側に傾斜する斜面に噴出しており, 溶岩や火砕流は南東側に流下しているため山体は非対称な形になっている。

草津火山の活動史は主にテフラ年代によって制約されており(早川・由井, 1989), 間に休止期を挟んで, 旧期, 新期, 中期の3つの活動期に大きく分かれる。

50~60 万年前の松尾沢火山の噴出から草津白根火山の活動は始まった。松尾沢火山の噴出物は, 現在の草津白根山の南西部に分布している (Fig. 2)。松尾沢火山は厚さ  $5\sim 10 \text{ m}$  の複数の溶岩流から構成されている。溶岩と火砕岩の互層の露頭が見つかっているために, 成層火山体だったと推定されている(早川・由井, 1989)。松尾沢火山の溶岩は草津白根の噴出物の中では例外的にやや  $\text{MgO}$  に富み  $\text{SiO}_2$  に乏しい玄武岩質安山岩の組成を示し, 斑晶としてかんらん石を含む。組成幅だけではなく,  $\text{K}_2\text{O}$  や  $\text{Al}_2\text{O}_3$  などほかの主要元素でも草津白根におけるほかの時期の噴出物とは顕著に異なる全岩組成トレンドを示し, 中~新期の主体となる安山岩やデイサイト質マグマとは異なる起源や分化場を持っていたことが示唆される (Fig. 5)。

約 55 万年前に, デイサイト質の太子火砕流が噴出した。総噴出量は  $8 \text{ km}^3$ , 噴出口は松尾沢火山の東山腹だったと推定されている(早川・由井, 1989)。太子火砕流の噴出物は草津白根山の南部から東側に広く分布しており (Fig. 2), 草津白根山の南西~北部に広がる台地を形成しており, 草津町の市街地もこの火砕流台地の上に広がっている。火砕流は南部では吾妻川を挟んで浅間山の鎌原火砕流/岩屑なだれの堆積物に面している。太子火砕流の噴出から, 現在の草津白根山の山体を形成する, 中期の活動が始まった。中期活動期は約 55~30 万年前の約 25 万年の間続いたと推定されており, 噴出物の  $\text{SiO}_2$  含有量は  $60\sim 65 \text{ wt. \%}$  の幅を示す(高橋ほか, 2010)。青葉溶岩, 前口溶岩や米無溶岩など非常に噴出量の大きい安山岩溶岩流が主体の活動であった。溶岩流の噴出に

続く谷沢原火砕流の噴出を最後に, 草津白根山の活動は約 30 万年間の長い休止期に入った(早川・由井, 1989)。

休止期を挟んで, 16,000 年前の湯釜付近からの平兵衛池溶岩の噴出から新期の活動が始まった。平兵衛池溶岩の  $\text{SiO}_2$  含有量は  $65 \text{ wt. \%}$  程度のデイサイト質で,  $\text{SiO}_2$  含有量が  $60 \text{ wt. \%}$  前後の安山岩が主体である新期の活動の中では例外的に珪長質であり, 太子火砕流と並んで草津白根山の噴出物では最も  $\text{SiO}_2$  に富む組成を示す (Fig. 5)。その後の本白根側での本白根溶岩の噴出や逢ノ峰火砕丘の形成に続いて, 約 7,000 年前に香草溶岩が湯釜側から噴出した。香草溶岩を最後に, 湯釜側からの溶岩流の噴出は起きていない。山頂付近での坑井資料の記載から, 白根火砕丘を構成する, 角礫からなる堆積物は香草溶岩の上を直接覆っていることが分かっているため(宇都ほか, 2004), 現在の白根火砕丘や湯釜・湯釜・水釜や水釜溶岩ドームは, 7,000 年前以降の噴火活動で形成されたと考えられる。約 3,000 年前に本白根山頂で, 殺生溶岩, 振り子沢溶岩, 石津溶岩の噴出や, 本白根火砕丘, 本白根火口や鏡池火口などの形成を伴う大規模な噴火活動が起きたと考えられている。

新期活動期の噴出物の組成幅は狭いが溶岩や岩体ごとにやや異なる組成を示し, それぞれ独立のマグマ貫入イベントによるものであったことが推定される。これらの安山岩は斜長石, 斜方輝石, 単斜輝石, 磁鉄鉱を斑晶とし, 希にかんらん石を含む。このかんらん石に含まれるメルト包有物には気泡や角閃石が含まれ, オーバークロースを補正したメルト組成は  $\text{SiO}_2$  含有量が  $47\sim 53 \text{ wt. \%}$ ,  $\text{MgO}$  含有量が  $3\sim 9 \text{ wt. \%}$  の苦鉄質の組成だと推定されていて, 硫黄を含有する(山口ほか, 2005)。このことは, 草津白根山の新期活動期における安山岩の生成に, 水や硫黄を含む苦鉄質マグマが関与していることを示唆している。

近年も水蒸気爆発や熱水活動が認められる湯釜火砕丘では, 約 7,000 年前の香草溶岩の噴出以降は本質物を伴った噴火活動は起きていない。また, 本白根山においても, 約 3,000 年前の大規模な一連の噴火活動を最後に, 本質物を伴う噴火は知られていない。最近も活発な熱活動が継続している湯釜火砕丘と, 静穏であるが新期の溶岩流噴出の主体となった本白根火砕丘の違いは, 防災の観点からも, 草津白根山の地下構造を考える面でも, 興味深い。

### 3-3 草津白根火山における研究成果

町内に観測所を有する東京工業大学では, 主として地球化学および電磁気学的手法に基づき, 同火山の研究を進めてきた。草津白根火山体内の電気抵抗分布(東西地下断面)を Fig. 6a に示す(Nurhasan *et al.*, 2006 を改変)。

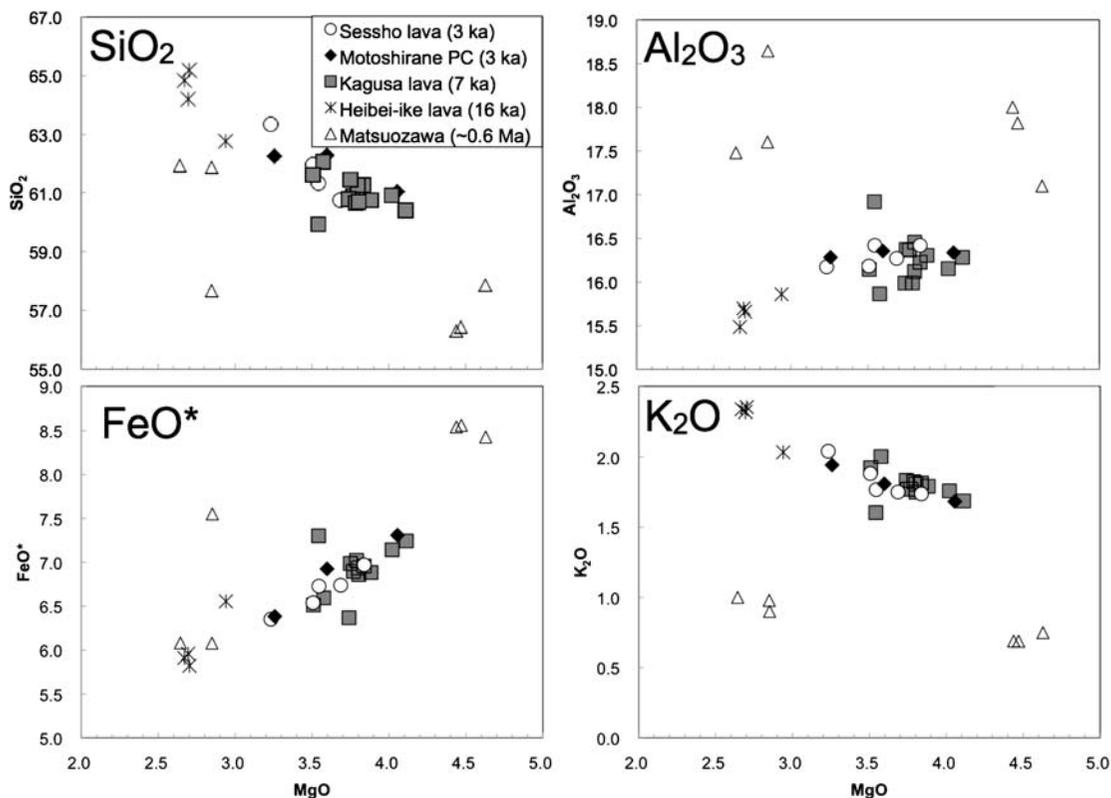


Fig. 5. Whole-rock compositions of Matsuzawa, Heibei-Ike, Kagusa and Sessho lavas (Ueki, unpublished data).  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}^*$  (total iron as  $\text{FeO}$ ),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{K}_2\text{O}$  contents are plotted against  $\text{MgO}$  content.

表層付近の抵抗の低い部分（赤，low）は粘土に相当し、熱水や水を通しにくい領域と考えられている。特に湯釜周辺の低比抵抗領域はスメクタイトであることが、坑井資料の分析からも確かめられている（横山・他，2010）。低比抵抗層の厚みが薄くなっている場所と殺生河原や万代鉱などの地熱活動が存在する場所が一致していることも偶然ではないであろう。一方、抵抗の高い部分（青，high）は、高温の火山ガスの流動経路に対応しているらしい。

一方、草津白根山周辺の噴気孔から採取した火山ガスや温泉水、湯釜湖水の分析結果を統一的に説明することは難しい。水・酸素同位体および塩素濃度に注目すると（Fig. 6b）、マグマ M から脱ガスした高温火山ガス（HTVG）と地下水（Mw）が混じった一次流 Pf を山体内に想定すると都合がよい（大場・他，2000）。この Pf は、上昇とともに減圧沸騰し、気相（Vp）と液相（Lp）へ分離する。Lp は湯釜の湖底から噴出する一方、さらに Mw（雨水）と混合して中腹の香草温泉や常布温泉から湧出している（Hsc）。気相 Vp は湯釜周辺から噴気 F として

放出されていると考えられる。万座温泉や草津温泉 Hs の詳細は不明であるが、Pf が地下水で希釈されたものと解釈している。

#### 4. 近年の草津白根火山の活動

##### 4-1 噴火活動の特徴

明治以前の火山活動は概ね静穏であった。山上には木が生い茂り、湯釜火口内では硫黄の採掘も行われていた。1882 年の噴火再開とともに火口周辺の植生は破壊されて荒涼とした景色に一変した。現在、山上のレストハウス駐車場周辺でも、立ち枯れた樹木や、飛来した大小無数の岩片を観察することができる。

1900 年以降、草津白根山で噴火が記録された年は 19 回に達するが（気象庁，2005）、いずれも水蒸気爆発であり、マグマが噴出した証拠はない。噴火活動の特徴として、爆発発生場所が湯釜火口に限定されないことが挙げられる。特に 1902 年噴火は弓池のほとりで（Fig. 1d）、1942 年噴火は湯釜外側の南東斜面等で発生した（Minakami *et al.*, 1943）。なお、弓池も爆裂火口と考えら

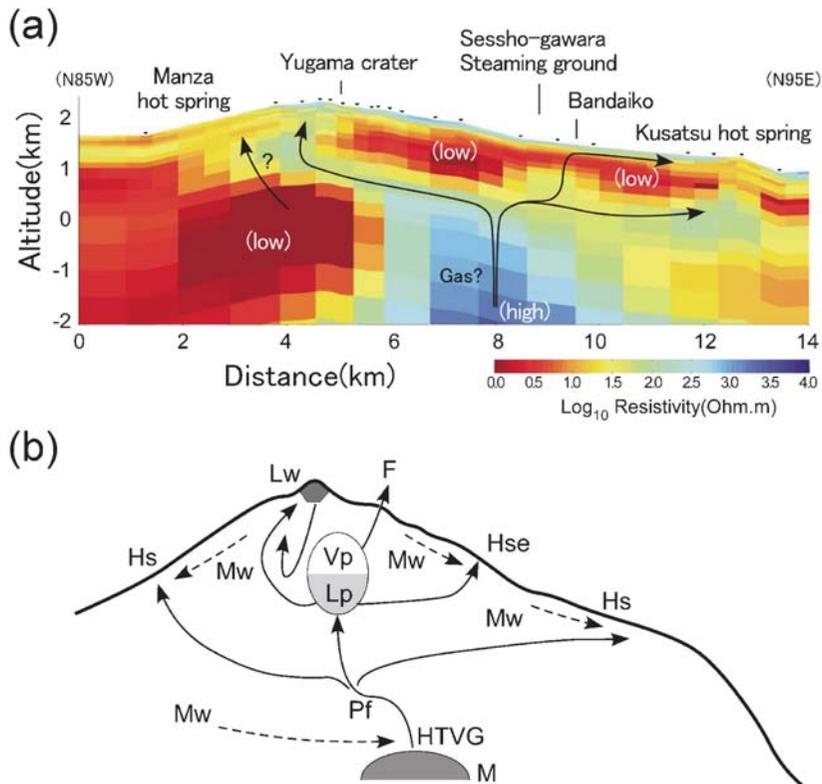


Fig. 6. (a) The resistivity model imaged by audiomagnetotellurics (after Nurhasan *et al.*, 2006) and inferred path of volcanic fluid. (b) Schematic structure of hydrothermal system. M, degassing magma; HTVG, the high temperature magmatic fluid; MW, local meteoric water; Pf a parental fluid; Vp, Vapor phase; Lp, Liquid phase; F, fumarolic gas on the northern flank; Hse, the hot spring on east flank (Kagusa and Jyofu); Hs, the acidic hot springs on the volcanic flank (after Ohba *et al.*, 2000).

れるが、噴火年代は不明である。

#### 4-2 1980年以降の噴火および異常現象

最近の顕著な活動は、1982～83年にかけて湯釜火口内で起きた一連の噴火である。1982年10月26日、群発地震などの前兆現象が観測されることなく、09時05分頃に突如として水蒸気爆発が湯釜火口壁で発生した。直径5-20cmの岩塊が噴出口から約450m飛散し、降下火山灰は殺生河原付近でも確認された。噴出物は湿って変質の進んだ粘土鉱物であった(東工大・他, 1983)。

この噴火直後、通常15℃前後の湯釜の水温は、表面付近のみ55℃を越え、一時的に火口内に湯気が立ちこめる状態となった。これは、高温の湧水が低温の湖水の上に、薄く広がったためである。この水温は1週間後には低下した。また、湖底に開口した爆裂火口内へ湖水が流入するなどして、水位が3ヶ月で約8m低下した。

その後、同12月29日(Fig. 1e)、1983年7月26日、11月13日にも同様の水蒸気爆発が発生した。特に1983年

11月の噴火では、人頭大の大きさの放出岩塊が600-700mの範囲に落下し、降灰は東へ約40km離れた渋川市でも確認された。このときの噴火で、湯釜北側火口壁下部に長さ約45mの亀裂が生じた(気象庁, 2005)。

一連の噴火活動が終息した後も、例えば1990年前後には活発な地震活動が認められている。湯釜火口内の活動としては、冬季に凍結した氷が湖岸に大量に打ち上がる(1996年)、湖面上へのガス突出やwater domeの目撃情報(1997年)、微噴火(1989年)、水柱(2004年)等の現象が確認されてきた(例えば井田・他, 1989など)。

2008年以降、湯釜の北側斜面の噴気において、温度の上昇や地熱領域の拡大が認められている。さらに、2008年7月には、気象庁が上空から実施した赤外カメラ観測により、湯釜火口内でも地表面温度の高い場所が新たに見つかった。これを受けて、草津町は湯釜中心から半径500m以内への立ち入りを規制した。この状態は現在(2012年11月)も続いている。

#### 4-3 2011年5月27日未明の活動

東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の発生後、草津白根火山でも一時的な地震活動の高まりが認められた。そして5月27日0時30分頃、火山性微動とともに火口周辺に展開された4台のボア・ホール型傾斜計が一斉に異常な変動を検知した。草津白根火山に傾斜計で地殻変動が観測されたのは、同設置が最初に設置された1990年以降、今回が初めてである。

解析の結果、本白根山頂の東方1km、深さ1km付近が約4分間かけて膨張し、さらにその2分後には、本白根山頂と湯釜火口との中間地点が膨張したことが分かった。その後、同地点は半日かけて収縮した。体積変化量は $10^4\text{m}^3$ 前後と少なく、短時間で膨張・収縮が起きたことから、本活動の主体は熱水であったと思われる(寺田・他, 2011)。これら圧力変動源の位置は、比抵抗構造から推定されている流体輸送経路 (Fig. 6a) と概ね一致することも興味深い。

当時は夜間・濃霧であり、東京工業大学が設置している湯釜監視カメラでは状況を監視することはできなかったが、湯釜火口湖に設置した水位・水温およびハイドロフォン (Fig. 7) の記録に異常は認められなかった。翌朝の現地調査でも、火口周辺で降灰跡などは確認されなかった。しかし、今回の地殻変動は群発地震や火山性微動を伴ったことから、気象庁は噴火警戒レベル1 (平常) を継続する一方で、火山の状況に関する解説情報を2回にわたり公表するなど、特別な社会対応がなされた。

### 5. 草津白根火山の火山防災

#### 5-1 地方自治体

1982年~83年噴火を契機として、草津白根山防災会議協議会が草津町、嬭恋村、旧六合村 (現中之条町) に設置された。同協議会は災害対策基本法第17条に定める法定協議会である。同協議会は草津町長を長とする委員18名で組織され、東京工業大学も専門委員として参画している。毎年春に定例会議が開催され、通常は年間観測状況の報告や、登山規制範囲についての協議がなされている。1995年には草津白根山火山噴火災害危険区域予測図が製作・公表されている。同予測図は、草津町役場ホームページで公開されている。

一方、草津白根山の各所では、噴火の有無に関わらず常に硫化水素ガス ( $\text{H}_2\text{S}$ ) が噴出している。硫化水素は無色で、空気よりも密度が大きいため窪地に溜まって局所的な高濃度空間を形成することがある。低濃度では「玉子が腐ったような」と表現される悪臭を感じるが、恐ろしいことに、100ppmを越えると嗅覚が麻痺して、臭いを感じなくなる。さらに濃度が上がると、眼の損傷、

呼吸障害、肺水腫を引き起こすことから、死亡を含む重大事故は全国各地で繰り返されている。草津白根山でも、温泉造成のボーリング孔から硫化水素ガスが漏れ、スキーヤー6名が死亡した事故(1971年12月27日)と、滞留火山ガスによる登山者3名(女子高生2、引率教諭1)の死亡事故(1976年8月3日)が起きた。

このため、群馬県自然環境課長を会長とする「草津白根山系硫化水素ガス安全対策連絡協議会」が1976年に組織された。同会は立入禁止の標識や防護柵を整備する一方、殺生地区(草津町)と万座地区(嬭恋村)に硫化水素ガス自動警報装置を設置し、24時間測定を行なっている。同装置は、危険濃度に達すると警報放送が自動的に流れる仕組みである。さらに、草津白根山に点在する29ヶ所の硫化水素ガス噴出域で定期調査を年4回実施し、ガス濃度、地熱、植生の観察、看板及び防護柵の点検を行っている。

このような対策を施して以降、約40年にわたって事故は起きていない。

#### 5-2 気象庁

草津白根山では、2007年12月1日より噴火警戒レベルが導入された。これに伴い、周辺市町村および地元防災機関は、気象庁発表の噴火警戒レベルに連動した防災対応を取る事になった。同火山の噴火警戒レベルを解説したリーフレットは、気象庁のホームページでも公開されている。

現在(2012年11月)の噴火警戒レベルは1で、山頂レストハウスなどは通常通り営業している。しかし、近年は湯釜周辺の火山ガスや熱活動に変化が認められていることから、2008年以降、湯釜中心から半径500m以内への立ち入りが制限されている。この措置に伴い、湯釜火口内の展望台へと至る遊歩道は閉鎖された。同歩道は、火山活動が特に静穏である場合にのみ、立ち入りを認めるという位置づけである。観光客は、500m圏外にある展望所から湯釜を望むことができる (Fig. 8b の地点M)

噴火警戒レベルが2に引き上げられると、半径1kmの立ち入りが制限される。このとき、国道292号線は殺生河原 (Fig. 2) の駐車場より上側が通行止めになる。この場合でも、万座温泉から志賀高原へ向かう国道292号線の通行は維持される場合もある。過去の噴火を当てはめると、レベル2は1983年11月の湯釜噴火や、1902年の弓池噴火が相当する。レベル3-5に相当する規模の噴火は、有史以来起きていない。

#### 5-3 東京工業大学における火山観測

1974年、東京工業大学は噴火予知の実用化に向けた国家プロジェクト「火山噴火予知計画」に参画した。その結果、水釜噴火(1976年)においては、予測が難しいと

されている水蒸気爆発の発生を世界で初めて地球化学的に予見し、事前に警告を発することに成功した (Ossaka *et al.*, 1980). 1984年、第3次火山噴火予知計画の策定にあたって、草津白根火山は活動的で重点的に観測研究を行なうべき12火山の一つに取り上げられ、観測を強化すべきとされた。これを受けて、1985年に特別施設「草津白根火山観測所」が発足、1988年には省令施設(学内共同利用教育研究施設)に昇格した。主として地球化学的手法に基づく火山研究を進めてきたが、2000年には地球電磁気学研究分野を導入し、火山流体研究センターが組織された。

本観測所の観測網の特徴は、火口に極めて近接して観測網を展開していることである (Fig. 7)。これは、噴火前兆現象が出にくいとされる水蒸気爆発の発生過程をターゲットにしている為である。常時観測を行っているのは、3ヶ所のボア・ホール型地震・傾斜計(深度200~50m)、地上設置型地震計4台、GPS4台、地磁気4台、さらに湯釜火口内にカメラ、地中温度計、火口湖内に水位・水温・ハイドロフォンなどである。これらは、いずれも湯釜火口中央から約1km圏内に設置されている。このほか、各所で火山ガスや温泉水採取、赤外カメラを用いた地表面温度の定期観測が実施されている。

その一方で、本白根山周辺の観測は手薄である (Fig. 7)。2011年5月には本白根山周辺で地殻変動を伴う地震活動が発生していること、本白根山では以前から湯釜直下と同程度の地震活動が継続していること(森・他, 2006)、同山は草津白根火山最後のマグマ噴火が起きたとされる場所(早川・由井, 1989)であることから、今後の研究の進展が望まれる。

## 6. 見学地点

本章では、草津市街地編と草津白根山編に分けて巡検の見学ポイントを解説する。それぞれの見学地点の詳細な位置はFig. 8を参照されたい。

### 6-1 草津市街地編

#### 〈地点A 万代鉦〉

万代鉦 (Fig. 1f) は、熱水および硫化水素ガス事故の危険があること、後述の通り草津町にとって重要施設であることから、立ち入りは厳しく制限されている。当地では1967年、民間業者が硫黄鉦山として水平坑を掘削中、入口から約500mの地点において、突如として94℃の温泉水が大量に噴出した。このために、当初の鉦山開発計画は放棄された。その後、草津町は万代鉦の温泉水を積極利用することとし、1974年には旅館等へ温泉水として供給するシステムの運用を開始した。Table 1に示した通り、万代鉦源泉は現在草津温泉で使用されている温泉

水の半分を占めている。さらに、熱交換器を用いて温められた水道水は、一般家庭へ温水として分配されて広く利用されている。

このように、万代鉦は町の生命線とも言える重要施設である。しかし、掘削から既に50年近くが経過し、落盤による閉塞が危惧されている。しかし、噴き出す高温蒸気のために坑内の状況は全く不明であり、今後の維持管理に苦慮している。

#### 〈地点B 温泉基地(草津町温泉課)〉

草津町温泉課は職員10名からなり、草津町役場から離れた温泉基地(第一配湯所, Fig. 2)を拠点として温泉供給配管の維持・管理のほか、万代鉦から湧出する高温源泉の管理および熱交換システムの運用を担っている。

最初の熱交換器は1976年に稼動を開始した。現在の熱交換システムは、チタン製の板172枚 (Fig. 1g) を介して万代鉦源泉(約94℃)の温度を下げ、上水(約7℃)の温度を上げる。この結果、浴用に適した55℃前後の温泉水と、様々な用途に使用できる温水が得られる。

得られた温水は大型タンクに貯められ (Fig. 1h)、町内約2,700軒に常時供給されている。草津町の主要地域(大字草津)に限れば、その普及率は87%に達し、家事や風呂などの生活用途に使用されている。すなわちこの温水を導入している家庭では、ガス電気等の給湯設備は不要である。温水は冬季の道路融雪にも使用されている。一方で、温度を下げた万代鉦の温泉は、これまで引き湯が困難であった宿泊施設や新興のリゾートマンションなどで広く利用されている。

熱交換による温水生成は、ほとんど動力を必要としない。温水事業・融雪事業を併せて灯油換算で年間約620万リットルに達し、価格に換算すると年間約6億円の価値を生んでいることになる。

#### 〈地点C 関東地方整備局品木ダム水質管理所)〉

草津白根山周辺の河川水の多くは強酸性のため、魚が住めず、下流域では農業用水として河川水を使用することが困難であった。また、流域ではコンクリート製の橋脚を建設する事ができなかった。建設省は1962年、草津温泉の中心街を流れる湯川をはじめとする、3つの河川に粉末状にした石灰石を24時間投入することでpHを5前後に維持する取り組みを開始した (Fig. 1i)。

同事業は、現在は品木ダム水質管理所に引き継がれ、中和生成物は下流の品木ダムに沈殿させ、定期的な浚渫作業が行なわれている (Fig. 1j, k)。近年、同ダムではフナの子息も確認されるようになった。

#### 〈地点D 西の河原~湯畑)〉

西の河原では、至るところから温泉水が湧き出している (Fig. 1l)。1967年に万代鉦が出現して以後、本地域か

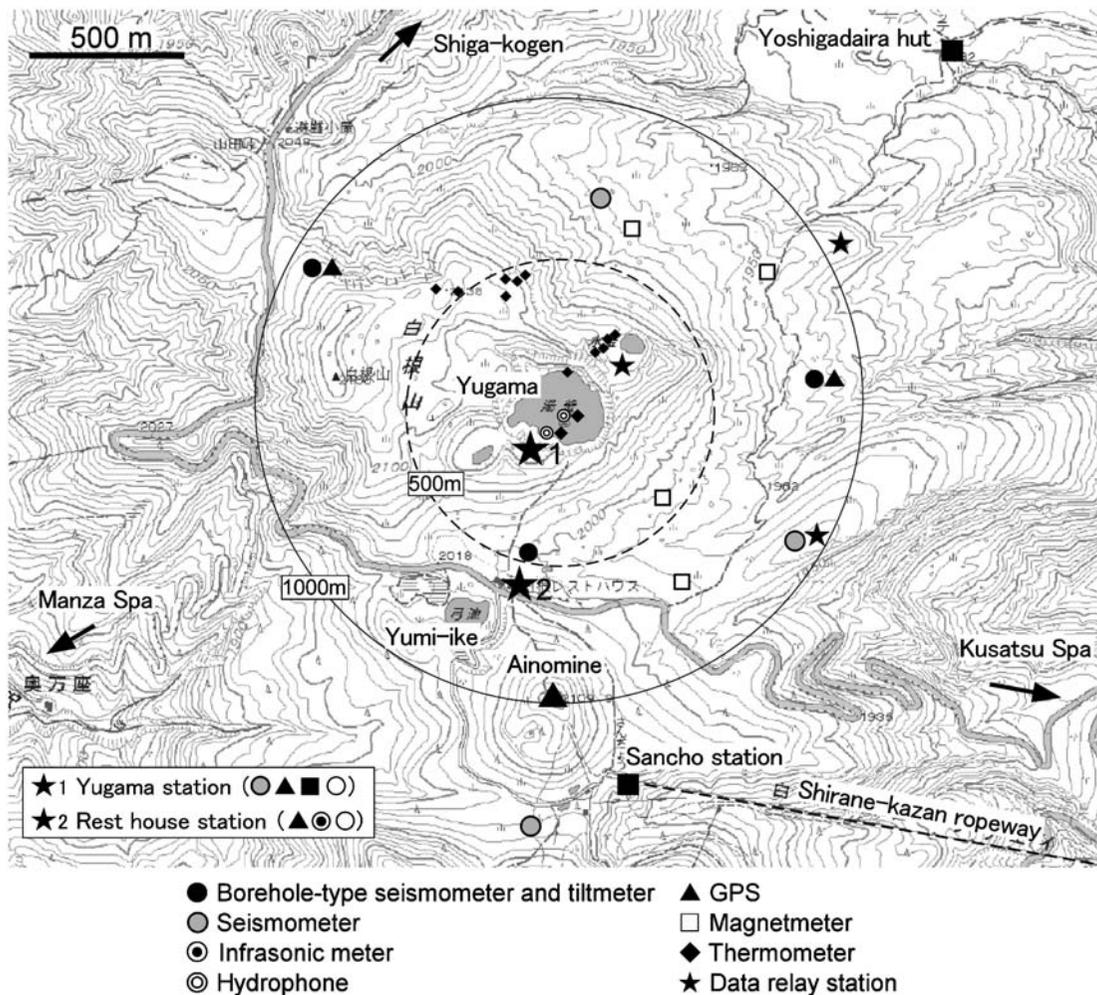


Fig. 7. Locality map of observation stations. These observations are operated by Kusatsu-Shirane Volcano Observatory, Tokyo Institute of Technology. The topographical map is provided by Geographical Survey Institute of Japan.

らの湧出量は減少した。この減少量は、万代鉱からの湧出量とほぼ同程度であり、万代鉱の出現は草津白根火山の水収支に影響していない。西の川原から湧出した温泉水は、各源泉や旅館からの排湯を集めつつ、湯川となる。これら温泉水のpHは2前後であり、品木ダム水質管理所によって石灰を投入された後、品木ダムへ流入する。

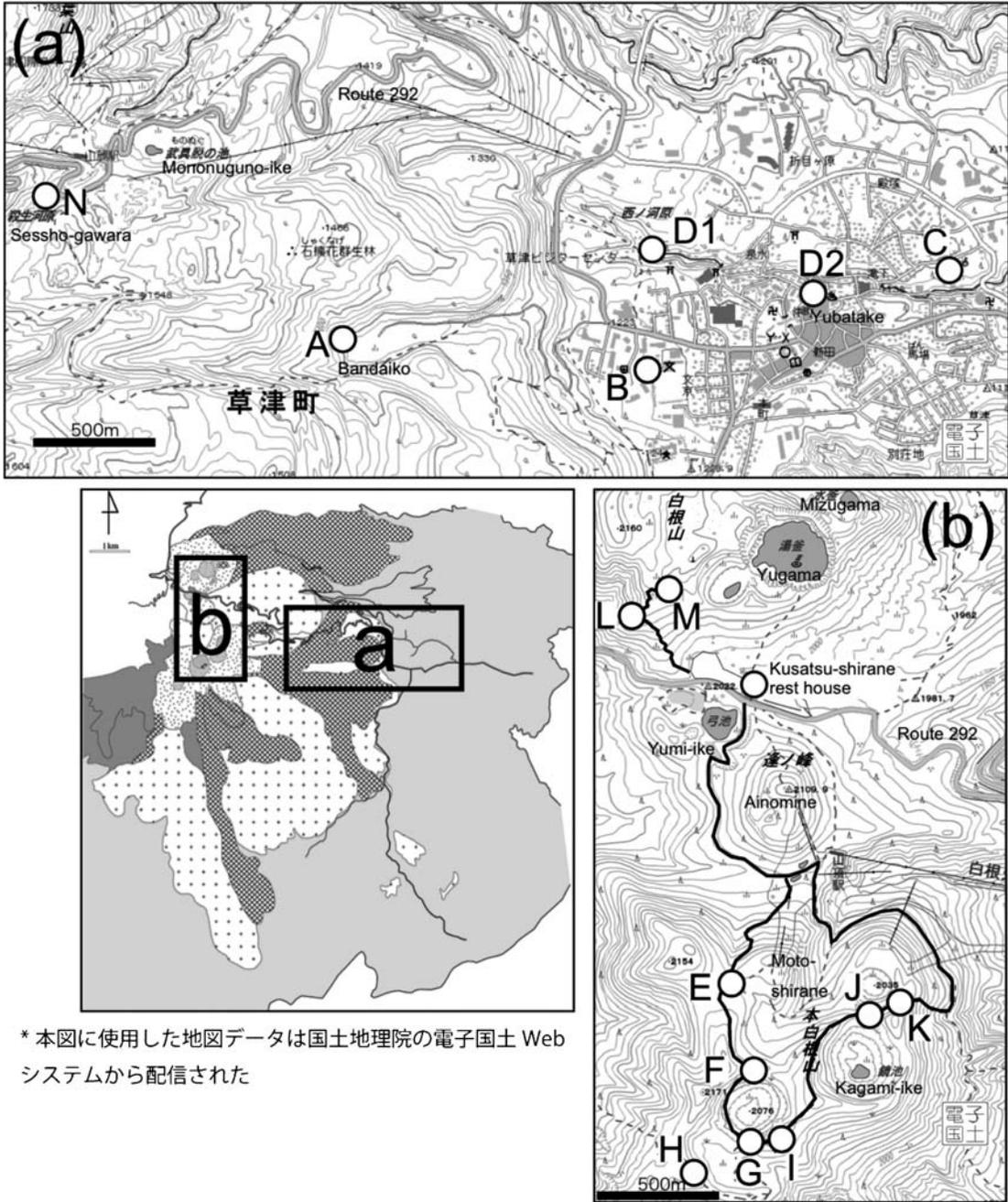
西の河原から湯畑へと続く道沿いには、温泉旅館やお土産店が立ち並び、散策場所として有名である。また、いくつかの外湯 (Fig. 1m) を見ることも出来る。

湯畑は古くから草津温泉の中心地である。湯畑の上流部には、江戸幕府8代将軍・徳川吉宗へ献上する湯を汲み上げるために使用した木杵 (Fig. 1b) が現存する (草津町役場, 1976)。この木杵の中の湯を「御汲上りの湯」と呼

んでいる。温泉水は下流部へ向かって、木造の水路を流れる。これにより、湯温を自然低下させるほか、沈殿した硫黄を「湯の花」として販売している。

湯畑最下流では、温泉水は滝となって流れ落ちる (Fig. 1c)。かつては、ここに温泉施設が存在し、天然の打たせ湯として利用されていた。元祖「大滝の湯」である。現在、滝つぼにあたる温泉のプールの底から、各温泉施設に配湯するためのFRP製配管が伸びている。なお、湯畑内に現存する燈籠は、江戸時代・文政13年(1830年)とされている (草津町役場, 1976)。

なお、湯畑の樋や露天風呂の浴槽などには濃緑色の藻類がよく見られる。これはイデユコゴメ (種名: *Cyanidium caldarium*) と呼ばれ、世界各地の高温強酸性



\* 本図に使用した地図データは国土地理院の電子国土 Web システムから配信された

Fig. 8. Detailed topographical maps of the Kusatsu city (Fig. 8a) and that of the summit of Kusatsu-Shirane volcano (Fig. 8b). Modified after the topographical map provided by Geospatial information authority of Japan. Locations of the field excursion stops are shown by open circles; A: Bandaiko; B: Department of hot spring, Kusatsu town; C: Office of the Sinaki dam, a brunch office of Japanese government (MLIT); D1: Saino-kawara; D2: Yubatake; E-I: Moto-shirane crater; J-K: Kagami-ike crater; L-M: Shirane pyroclastic cone; N: Sessho-gawara.

温泉に分布する、好酸性・好熱性の光合成生物である。pH5以下、温度40℃以上の熱水環境を特に好む (Doemel and Brock, 1971)。

各源泉の温度は、長期的な温度低下が続いてきた。例えば、現在は52.7℃の湯畑源泉は、明治時代には64℃程度あったらしく (大橋, 1915)、この泉温低下の原因はよく分かっていない。この低下傾向は、2004年頃から底を打ち、2009年頃から上昇傾向に転じている (草津町温泉課調べ)。東工大による湯畑「御汲上の湯」での湯温測定でも、年間0.2℃程度の上昇傾向が認められる。また、万代鉱の出現以後、活動をやめていた西の河原にある温泉湧出口のひとつ「鬼の茶釜<sup>3</sup>」が、2011年頃から湧出を再開した。

## 6-2 草津白根山編

草津白根山の巡検ではまず、本白根山頂を一周する登山道を歩いて、火口群や噴出物を観察する (Fig. 8b)。本白根山頂に分布している本白根火口や鏡池火口をはじめとした火口群や、本白根山頂溶岩などの溶岩の露頭は約3,000年前の一連の噴火イベントで形成されたと考えられているが、詳しい噴火の順序や噴火形式、本白根火砕丘 (Mp, Fig. 2) 自体の形成プロセスはまだよく分かっていない。殺生溶岩 (Ss, Fig. 2)、振り子沢溶岩 (Fz, Fig. 2) や石津溶岩 (Iz, Fig. 2) もこの時期に本白根山頂付近から噴出したと考えられているが、これらの大規模な安山岩溶岩流の噴出・流下メカニズムや正確な噴出場所未解明である。殺生河原では、これらの新期の溶岩流では最大の噴出量を示す殺生溶岩の地形や表面構造を観察する。さらに、湯釜火口の熱水や近年の噴火で形成された山頂付近の爆裂火口群、そして殺生河原の噴気地帯を観察し、活火山である草津白根山の、現在も続いている活発な活動に触れる。

### 〈地点E 植生と冬期の積雪〉

ロープウェイ山頂駅から斜面を登って、活動期中期に形成されたと推定されている双子山溶岩円頂火砕丘 (Ft, Fig. 2) の山体の上に出る。この地点E付近では極相に達した亜高山帯針葉樹林が発達している。冬期の積雪に覆われた枝は雪の重みで下に引っ張られてしまう一方、雪に埋もれていない枝は強風を受けて発達が悪くなることから、オオシラビソの枝の形で冬期の積雪量を推定することができる (小泉, 2007)。しばらく登山道を進むと正面に、新期の本白根火口からの噴出物に覆われた火砕丘が見えてくる。

<sup>3</sup> かつては、地中から茶釜が煮えたぎるように「ぐつぐつ」と音がしており、人が近づくとピタリと止んだと言われていたが、万代鉱の出現以後、枯渇していた。

### 〈地点F 本白根火口全景と凝灰角礫岩〉

針葉樹林を抜けて本白根火口の縁に出ると、植生がなくなると一気に景観が開ける。この地点Fから本白根火口のパノラマを見通すことができる (Fig. 1n)。本白根山頂は、楕円形をした外側火口の内側に円形の小型の火口が複数分布する、2重のカルデラ状の地形を示す (Fig. 8b)。目の前に見える本白根火口 (から釜) はそのなかでも最大の火口である。右手正面奥の火口壁には本白根山頂溶岩の露頭が見える。

地点F付近の登山道沿いの火口壁斜面に、成層構造をした凝灰角礫岩を観察することができる (Fig. 1o)。角礫岩から砂礫が供給されるため、角礫岩の露頭の下位には砂礫斜面を好むコマクサが生育している。ただし、この地点のコマクサは人の手で植えられたものである。凝灰角礫岩の層理面は、山頂のどの部分でも、外側火口の壁に沿った走向と火口中心部から外側に向かって落ちる傾斜を示す。凝灰角礫岩は良く溶結していて、ブロック状の部分は、斜方輝石、単斜輝石、斜長石、磁鉄鉱を含む安山岩である。

### 〈地点G・H 本白根山頂の火口群〉

登山道に沿って、火口内部を歩いてゆく。火口壁を見上げると、先ほど観察した層状の凝灰角礫岩の露頭が連続的に続いていることが確認できる。登山道の分岐点がある地点Gは平地になっており、周囲に分布する直径数10m程度の小規模な爆裂火口群や、外側火口の縁を観察することができる。

分岐点から看板に従って「万座温泉方面」に直進すると、外側火口の火口壁の縁に出ることができる。火口壁からは本白根山頂の火口群を確認できるほか、山腹方向を見下ろすと殺生溶岩などの溶岩地形や草津の市街地などの景観を見渡すことができる。登山道をさらに進むと、外側火口の南側の火口壁にも凝灰角礫岩の露頭が分布していることを観察することができる (地点H)。

### 〈地点I 本白根山頂溶岩〉

地点Gから鏡池方面へと登山道を歩いて斜面を登り、露出している本白根山頂溶岩を観察する。この地点Iでは凝灰角礫岩と本白根山頂溶岩の接触面を観察することができる (Fig. 1p)。接触面の分布から、溶岩は角礫岩に貫入した厚さ10m程度の数枚の岩体で構成されていることが分かる。岩体全体の走向は北東-南西方向であり、本白根-鏡池火口の並びと一致する。岩石は斜方輝石、単斜輝石、斜長石、磁鉄鉱を含むSiO<sub>2</sub>含有量が約60wt.%の安山岩である。また、天気が良いればこの付近から浅間山や榛名山、男体山 (日光) の山影を望むことができる。

### 〈地点J 鏡池火口〉

登山道を進むと、ハイマツの群落を経て、亜高山帯針

葉樹林の植生が発達した地域に入る。しばらく進むと右手下方に鏡池火口湖が見えてくる。地点Jから鏡池火口の全景を観察することができる (Fig. 1q)。鏡池火口の直径は本白根と比べてやや小さい。植生が発達しており、本白根より古い時期の噴火活動だった可能性がある。火口内部に下りると、直径1m以下から数mまでの様々なサイズのパン皮状火山弾を観察することができる。火山弾は斜方輝石、単斜輝石、斜長石、磁鉄鉱を含むSiO<sub>2</sub>含有量約60wt.%の安山岩である。鏡池の底には、構造土と呼ばれる、表土の粗粒部分と細粒部分で作る多角形状の模様が見られる。多角形の直径は最大で1~2mに達する。冬期に表土が凍結と融解を繰り返すことで礫と細粒部分の分別が起きることで形成される構造だと考えられている。

#### 〈地点K 鏡池溶岩ドーム〉

植生が発達しているため全景を観察することはできないが、登山道の木道沿いに、鏡池火口の北東方向に位置する鏡池溶岩ドームの露頭を観察することができる。火口と火口壁付近に分布する溶岩の露頭の組み合わせは、本白根火口や白根火砕丘の水釜でも見られる。

#### 〈地点L・M 湯釜火口〉

2012年現在、湯釜火口中心から半径500mは立ち入り禁止されているため、近傍で観察することはできない。白根山頂の駐車場から湯釜展望所に登って遠望することになる。展望台への登山道から南方向を眺めると、近年の水蒸気爆発で形成された弓池火口群や、溶岩ドームだと考えられている逢ノ峰火砕丘 (Am, Fig. 2)、そして本白根の山体などを見渡すことができる (Fig. 1r)。登山道途中の避難シェルター (地点L) の裏手からは、基盤岩が広がる西側や万座の噴気を眺望することができる。天気が良いれば遠方に、飯綱、黒姫、妙高などの第四紀火山や北アルプスの山稜も望むことができる。草津白根山の噴出物は東側に傾いた基盤岩の斜面の上に噴出していて東側に流下している為、登山道の付近がほぼ草津白根山の噴出物の分布の西端である (Fig. 2)。

地点Mの湯釜展望台から、酒釜、湯釜、水釜の爆裂火口群や湯釜火口の熱水、そして水釜溶岩ドームを展望することができる (Fig. 1s)。湯釜はマグマ起源の熱水が爆裂火口に溜まって生じた火口湖で、湖底から湧出するエメラルドグリーンの湖水はpH1.1の強酸性であり、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>やCl<sup>-</sup>などを高濃度で含有する。湖底には116℃の溶融硫黄が溜まっている (宇都ほか, 1983)。湖底からは熱水や火山ガスが噴出し、水温は季節によって上下するが気温よりも常に6℃から16℃高い (Ohba *et al.*, 2000)。湯釜北側には約1kmに渡って弧状に活発な噴気帯が分布している。

湯釜の周辺の岩石は高温かつ高酸性の火山ガスとの反応によってSiO<sub>2</sub>以外の元素が選択的に溶脱してSiO<sub>2</sub>・nH<sub>2</sub>O組成のオパールに変化している (野上・吉田, 1993)、白色に変化している。火口壁には、水蒸気爆発で飛び散った噴出物が成層している。展望台周辺でも噴石が落ちていたのを観察することができる。

#### 〈地点N 殺生河原と殺生溶岩〉

ロープウェイ山麓駅前の駐車場に車を止める。駐車場から、約30万年前に噴出した青葉溶岩 (Ab, Fig. 2) の、比高200mに達する分厚い末端崖を観察することができる。この付近では国道は約3,000年前に噴出した殺生溶岩の溶岩堤防の上を走っている。駐車場入り口付近で、殺生溶岩の溶岩堤防を観察することができる。国道を渡って、やや低地になっている部分が殺生河原である。殺生河原では活発な噴気活動が続いているため硫化水素の濃度は常時モニタリングされており、濃度が高い場合は自動的にスピーカーから警告が発せられる。殺生河原の岩石はSiO<sub>2</sub>含有量が約60wt.%の両輝石安山岩である。足下の岩石は湯釜周辺と同様に火山ガスとの反応で元素が溶脱したためSiO<sub>2</sub>に富んだ組成になり、白色に変化している。殺生溶岩の上流を見上げると、溶岩流の両端に発達した溶岩堤防を観察することができる (Fig. 1t)。殺生河原周辺では、殺生溶岩の表面は、なだらかな丘や窪地などの、溶岩堤防と直交方向に細長く伸びた起伏のある地形を示す。この地形が溶岩じわである。殺生河原付近はもともと地形的に平坦だったため、殺生溶岩が流下して突入した際に減速して、溶岩じわが形成されたと考えられる。溶岩流の表面は自破砕された塊状溶岩が積み重なった構造をしている。殺生河原から右手を見上げた方向の植生に覆われた丘は中期の活動で噴出した青葉溶岩である。殺生溶岩が青葉溶岩の上を覆っていること、青葉溶岩の上を降下テフラが覆っていることが確認できる。

ロープウェイ山麓駅前の駐車場から道路を渡ると山麓方面に見える窪地内の池は武具脱の池と呼ばれていて、殺生溶岩が流下する際に水と接触して二次爆発が起きたことで形成されたと考えられている (早川・由井, 1989)。

#### 〈国道292号沿いの風景〉

武具脱の池、殺生溶岩の溶岩堤防と溶岩じわなど殺生河原付近の景観は、草津白根山頂までの登山道路であり志賀高原へと至る国道292号の車窓からも観察することができる。国道の車窓からはさらに、振り子沢溶岩の先端部や青葉溶岩などの地形や、振り子沢と殺生河原の噴気地帯も観察することができる (Fig. 2)。草津白根山の北側に位置する、日本国道標高最高地点 (標高2172m) である洪峠 (Fig. 2) からは、白根火砕丘 (Sp, Fig. 2) の地形

や火砕丘北側の活発な噴気地帯を観察することができる (Fig. 1u).

## 7. 謝 辞

本原稿を執筆するに当たり、草津町温泉課、および町観光課には未公表データの提供および公表についてご快諾を頂きました。国土交通省関東地方整備局品木ダム水質管理所からは多くの情報提供を受けました。2012年10月に実施した現地討論会の際には、草津町温泉課のほか、自然公園財団草津支部のご協力を頂きました。火山編集委員会には、本巡検案内書の掲載の機会を与えて頂きました。査読者の寅丸敦志氏、吉本充宏氏からのコメントによって本稿は大幅に改善されました。ここに記して深く感謝します。

## 引用文献

- 第四紀火山カタログ委員会 [編] (1999) 日本の第四紀火山カタログ
- Doemel, W.N. and Brock, T.D. (1971) The Physiological Ecology of *Cygnidium caldarium*. *J. Gen. Microbiol.*, **67**, 17-32.
- 早川由紀夫 (1992) 火山の地質巡検案内 1: 浅間山と草津白根山, 群馬大学教育学部紀要, 自然科学編, **40**, 65-81.
- 早川由紀夫・由井将雄 (1989) 草津白根火山の噴火史, 第四紀研究, **28**, 1-17.
- Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2008) Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography. *J. Geophys. Res.*, **113**, B09315, doi: 10.1029/2007JB005274
- 井田喜明・長田 昇・沢田宗久・小山悦郎・鍵山恒臣 (1989) 草津白根山における常設地震観測と 1989年1月6日の小噴火, 東京大学地震研究所彙報, **64**, 325-345.
- 気象庁 (2005) 日本活火山総覧 (第3版), 635p.
- 小泉武栄 (2007) 自然を読み解く山歩き, JTB パブリッシング, 191p.
- 草津町役場 (1976) 草津温泉誌, 第壹巻, 1127p.
- Minakami, T., Matsuita, K. and Utibori, S. (1943) Explosive Activities of Volcano Kusatsu-Shirane during 1938 and 1942 (Part II). *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **20**, 505-526.
- 森 健彦・平林順一・野上健治・鬼沢真也 (2006) 草津白根山における新たな地震観測システムの構築, 火山, **51**, 41-47.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2006) Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: reactivation of subducted fracture zone?. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L16309, doi: 10.1029/2006GL026773.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A. (2007) Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism. *J. Geophys. Res.*, **112**, B08306, doi: 10.1029/2006JB004770.
- 野上健治・吉田 稔 (1993) 岩石の酸性変質にともなう主要成分の溶脱過程, 日本化学会誌, **1993** (3), 251-258.
- Nurhasan, Ogawa, Y., Ujihara N., Tank, S.B., Honkura, Y., Onizawa, S., Mori, T. and Makino, M. (2006) Two electrical conductors beneath Kusatsu-Shirane volcano, Japan, imaged by audiomagnetotellurics, and their implications for the hydrothermal system. *Earth Planets Space*, **58**, 1053-1059.
- Ohba, T., Hirabayashi, J. and Nogami, K. (1994) Water, heat and chloride budgets of the crater lake Yugama at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan. *Geochem. J.*, **28**, 217-231.
- Ohba, T., Hirabayashi, J. and Nogami, K. (2000) D/H and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ratios of water in the crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **97**, 329-346.
- 大場 武・平林順一・野上健治 (2000) 草津白根山の火山熱水系, 温泉科学, **49**, 163-175.
- 大橋良一 (1915) 草津温泉の温度の變化, 地質學雜誌, **22**, 191-202.
- 大分県 (2001) 大分県温泉管理基本計画. 74p.
- Ossaka, J., Ozawa, T., Nomura, T., Ossaka, T., Hirabayashi, J., Takaesu, A. and Hayashi, T. (1980) Variation of chemical compositions in volcanic gases and waters at Kusatsu-Shirane Volcano and its activity in 1976. *Bull. Volcanol.*, **43**, 207-216.
- 高橋正樹 (1994) 複成火山の構造と地殻応力場 2. P-type・O-type 火山, 火山, **39**, 207-218.
- 高橋正樹・河又久雄・安井真也・金丸龍夫 (2010) 草津白根火山噴出物の全岩主化学組成—分析データ 306 個の総括—, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **45**, 205-254.
- 高橋正樹・小林哲夫 [編] (1998) フィールドガイド 日本の火山 1 関東・甲信越の火山 I, 築地書館, 166p.
- 寺田暁彦・青山 裕・野上健治・山脇輝夫・齋藤政城 (2011) 草津白根火山で 2011 年 5 月 27 日に観測された火山性微動を伴う地殻変動-傾斜変動から示唆される浅部流体輸送過程-, 日本火山学会講演予稿集 2011, 44.
- 東京工業大学・上智大学理学部・埼玉大学工学部 (1983) 草津白根火山 1982 年 10 月の活動と地球化学的調査研究 (1), 火山噴火予知連絡会会報, **26**, 8-19.
- 津屋弘達 (1968) 富士山地質図 (1: 50,000) 富士火山の地質, 地質調査所.
- 宇都浩三・栗原 新・平林順一 (2004) 草津白根火山, 白根火砕丘周辺地震観測井のボーリングコア記載, 第 4 回草津白根火山集中観測報告書, 59-68.
- 宇都浩三・早川由起夫・荒牧重雄・小坂丈予 (1983) 草津白根火山地質図, 地質調査所
- 山口佳昭・山口珠美・太田靖 (2005) 浅間および草津白根火山のカンラン石斑晶に捕獲されたメルト包有物の角閃石娘結晶, 地球科学, **59**, 57-61.
- 横山達也・野上健治・小川康雄 (2010) 草津白根火山のボーリングコアの粘土鉱物分析, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, SVC061-02, CD-ROM
- Zhao, D., Horiuchi, S. and Hasegawa, A. (1992) Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands. *Tectonophysics*, **212**, 289-301.