

富山県立山地獄谷で2010年5月に発生した硫黄溶岩流の産状と
記載岩石学的特徴*

増渕 佳子

富山市科学博物館

939-8084 富山市西中野町一丁目8-31

**Field occurrence and petrological characteristics of sulfur lava flow formed
in May 2010 in Jigokudani, Tateyama Volcano**

Yoshiko Masubuchi

Toyama Science Museum

1-8-31 Nishinakano-machi, Toyama-shi, 939-8084 Japan

In Tateyama-Jigokudani geothermal area, located about 40 km east of Toyama city, central Japan, sulfur is produced through the activities of fumarolic gas. In May 2010, a combustion event led to the melting of the sulfur in Jigokudani, forming a sulfuric lava flow. This lava flow can be divided into two types of formations called 'a'ā lava and pāhoehoe lava. On the basis of chemical analysis of rock samples, records, and the occurrence of the sulfuric lava flow as well as the differences in these formations and the fact whether the sulfur combusted while flowing, it was clear that the differences in temperature at the time of the downward flow led to differences in sulfur viscosity.

Key words : Tateyama Volcano, Sulfur lava flow, Volcanic geology, Petrology

キーワード : 立山火山, 硫黄溶岩流, 火山地質, 岩石学

はじめに

地球上に存在するほとんどの溶岩はケイ酸塩(SiO_2)を主成分としているが、他に炭酸塩を主成分としたカーボナタイト溶岩や硫黄の溶岩なども存在する。火山の噴気活動に伴い硫黄が産出したり、火山の火口付近等で硫黄が燃焼したりする現象は頻繁に起こるが、硫黄の溶岩流については発生場所あるいは間近に観察できるところが少ないため、その形成メカニズムや流動様式、岩石学的特徴についての研究は少ない。立山の地獄谷は従来硫黄の溶岩流が産出することで知られる。2010年5月6日に立山地獄谷に分布する硫黄の溶融・燃焼と流下が起こり、硫黄の溶岩が形成された。本研究では、発生した多様な硫黄溶岩の発生状況や分布の記載および試料のサンプリングを行い、その岩石学的研究と当時の記録から、硫黄溶岩がどのように発生し、流れ、広がっていったかを明らかにする。

1 地質概説および研究史

北アルプス北部に位置する立山地獄谷（以後地獄谷）は、立山火山（弥陀ヶ原火山）の活動の末期に起こった



図1 火山ガス活動の活発な立山地獄谷
地獄谷東部から2011年10月に撮影。

* 富山市科学博物館研究業績第444号





図3 燃焼しながら流れる硫黄溶岩流

小丘上部から低地に向かい斜面を川のように流れる。(2010年5月6日撮影, 写真提供 渋谷茂氏)

県ナチュラリストや山小屋関係者などにより視認されている(図3)。6日の夜間に撮影された写真(北日本新聞7月8日号)には、青い炎をあげて燃焼する硫黄溶岩が記録されており、写真と地形を対比させると、夜間には図2-II部に加え図2-I部で硫黄溶岩が燃焼しながら流下していたと考えられる。8日の環境省および立山カルデラ砂防博物館による現地調査では、図2-I部の硫黄溶岩は沈静化しつつあり、図2-IV, V部で硫黄溶岩の発生・燃焼が確認されており(丹保, 2010)、硫黄溶岩の燃焼が鍛冶屋地獄の東部から西部へと移動していったことがわかる。

その後の筆者による現地調査では、色や発泡度の異なる多様な硫黄の溶岩が形成されていることが明らかとなった。発生の初期段階で硫黄の溶融・燃焼が起こった図2-I部では、丘の上部から下部に向かい幅約2m、長さ20m、厚さ最大15cm程の溶岩ローブが形成されていた。表面はパホイホイ状を示し、外観は灰色～黄色を呈する。溶岩ローブの流出開始地点に火口のようなものは存在しな

いが、小丘上部が一部陥没・消失しブリッジ状になっている(図4-II A部; 以後地点A)。この穴は、溶岩発生以前には確認されなかったものである。地点Aは歩道から見えにくい場所であるため、6日時点での硫黄溶岩の発生状況は不明だが、8日にこの地点から小規模な硫黄溶岩が燃焼しながら燃えているのが確認されている。地点Aには、数mm程度に剥離しやすい層状の硫黄が分布する。地点A付近の溶岩ローブの表面には、流下方向に平行な溝状のくぼみがみられる。

鍛冶屋地獄の小丘の南斜面(図2-II, IV, V部)には黒色のアア溶岩状の硫黄溶岩が広く分布する。硫黄溶岩は斜面の上部から低所に向かって流下し、平地で幅10～50cm、長さ最大15mの溶岩ローブを形成している。溶岩じわや溶岩堤防も観察される。また、小丘上部の割れ目からの流下(図2-III部, 図4-III)や穴状の窪地からの流下(図4-IV-a)も見られる。溶岩ローブの下面や溶岩堤防部は一部赤褐色を呈する。

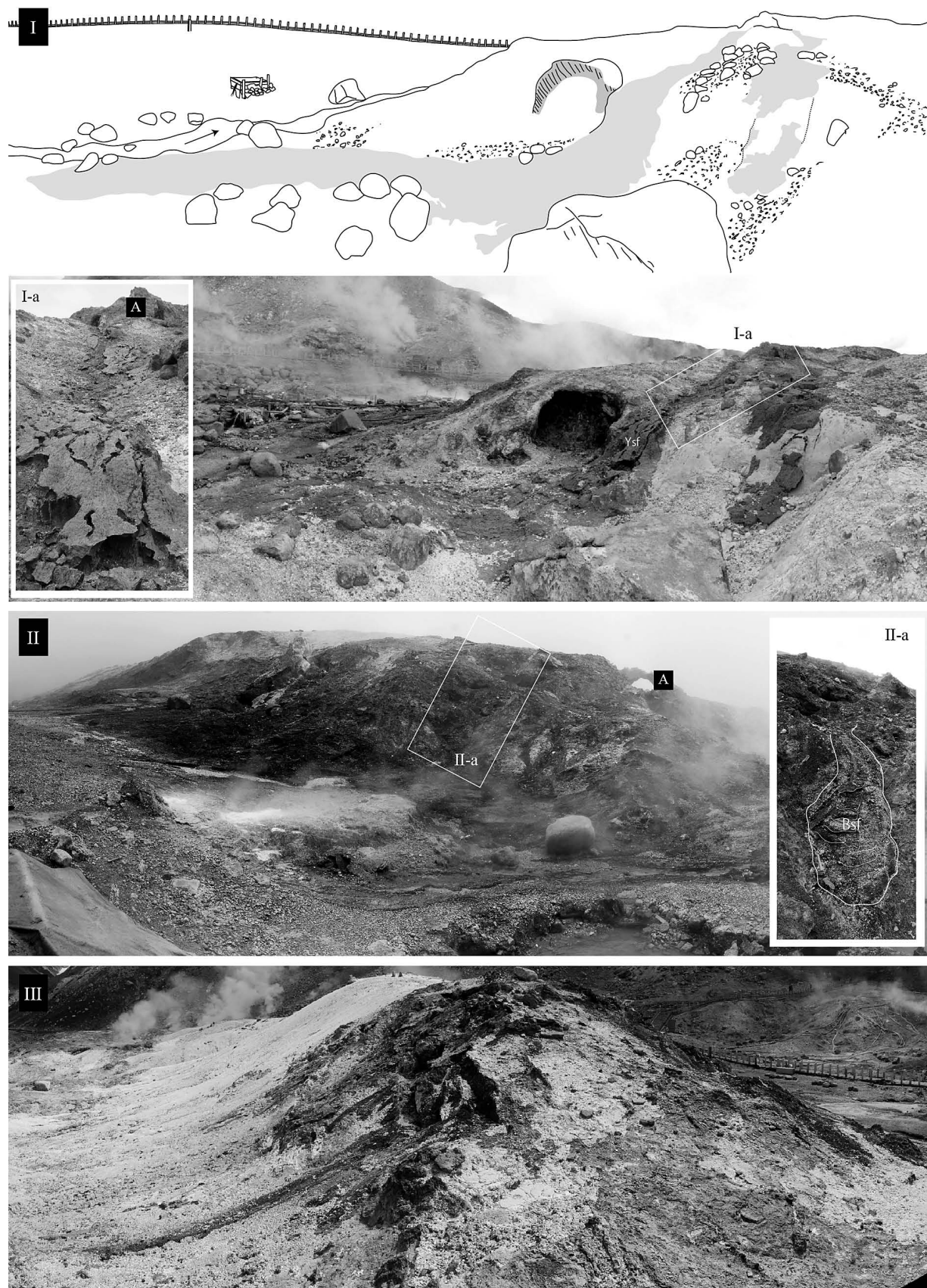
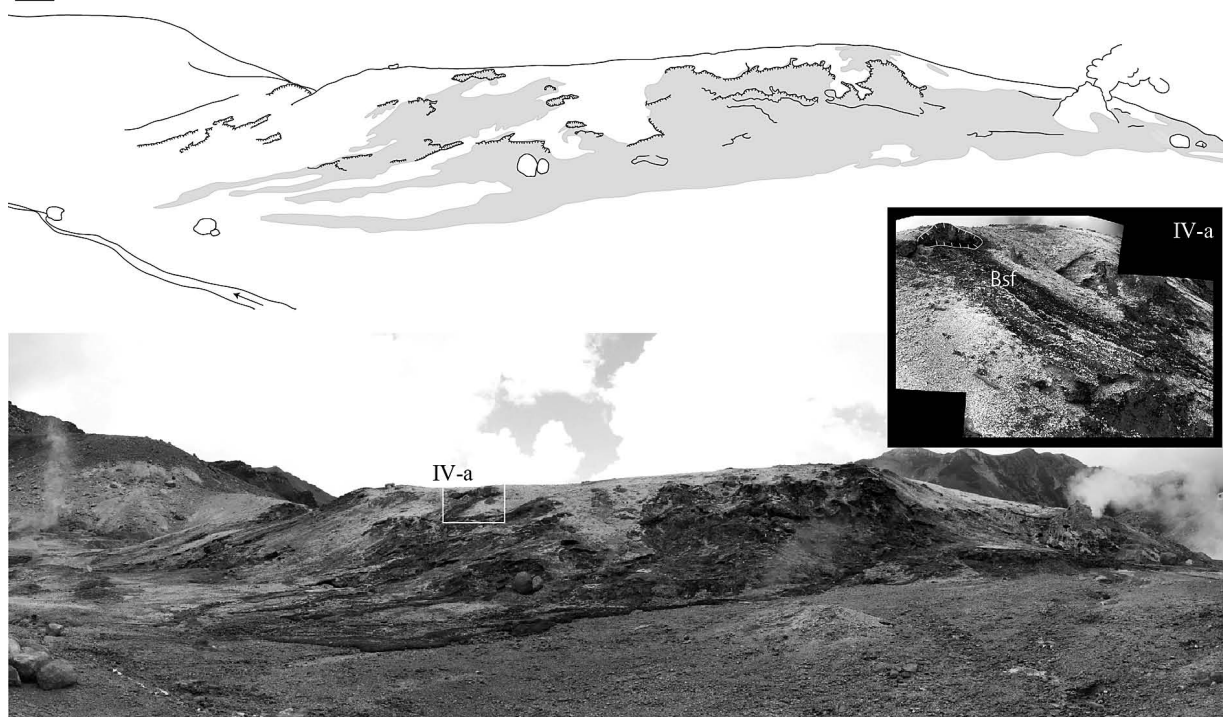


図4 2010年5月に形成された硫黄溶岩の産状とスケッチ

撮影範囲は図2のI～Vと対応している。写真中の黒色の部分およびスケッチで灰色に塗った部分が2010年に形成された硫黄溶岩。Ysf：黄色溶岩，Bsf：黒色溶岩，Gsf：灰色溶岩（詳しくは本文および図5参照）

IV



V

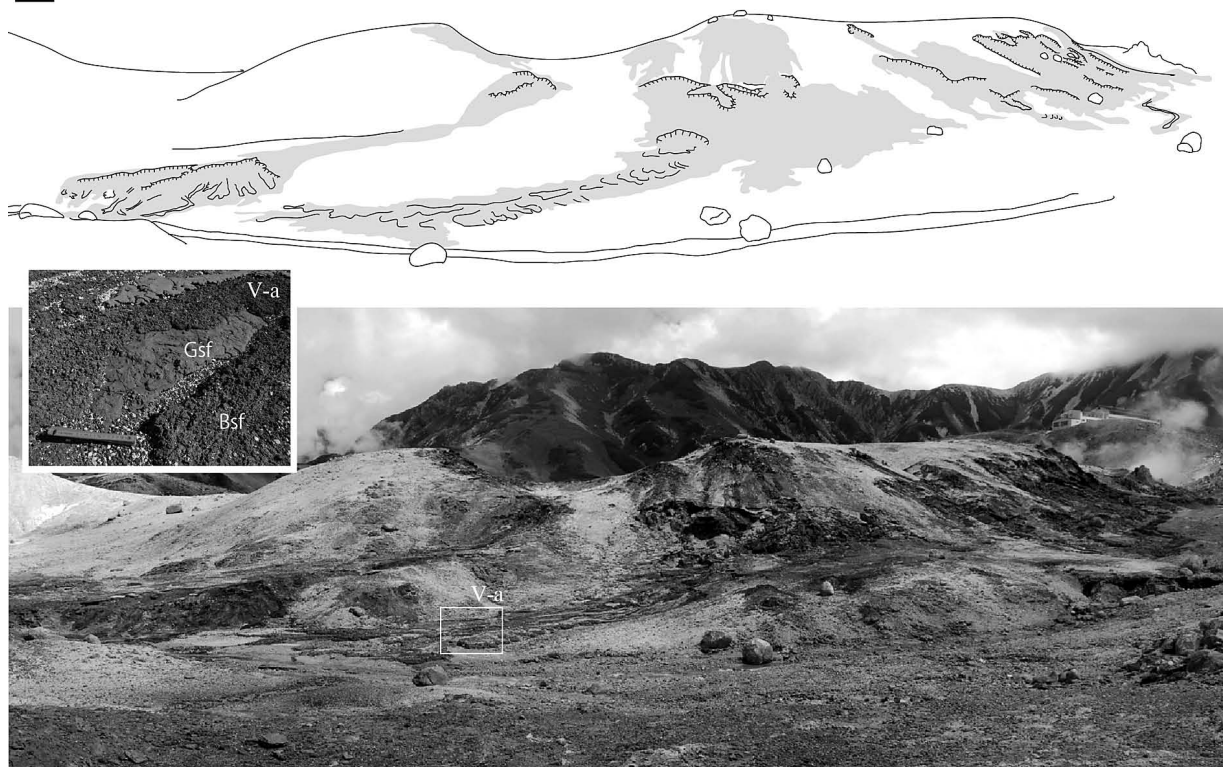


図4 続き

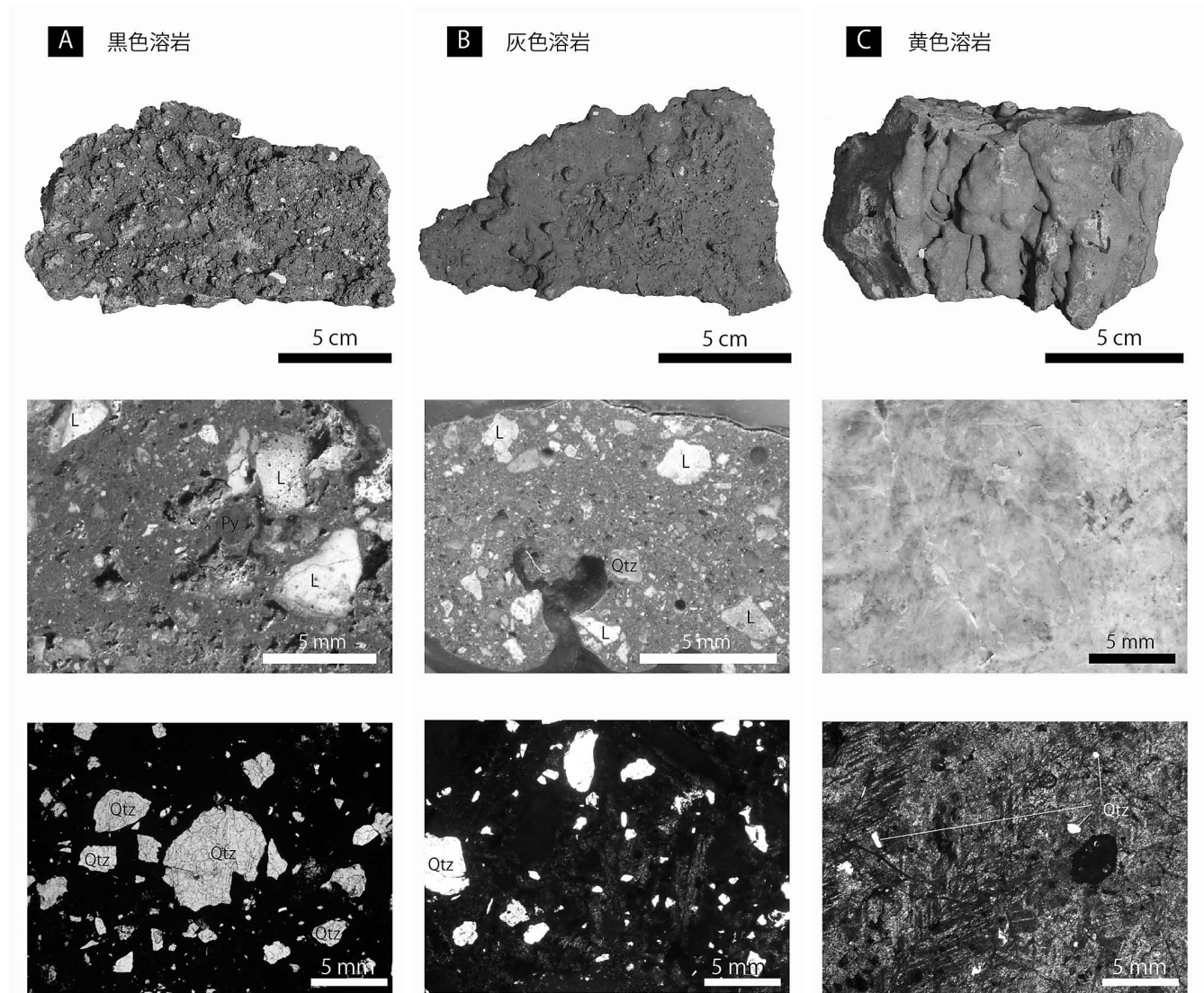


図5 2010年に発生した3タイプの硫黄溶岩

上段から手標本写真，研磨片写真，薄片写真（単ポーラー） Qtz：石英，L：異質岩片，Py：黄鉄鉱

3 岩石記載

発生した硫黄溶岩を，色や発泡度の違いから3種類（黒色溶岩・灰色溶岩・黄色溶岩）にタイプ分けした（図5）。ここでは，それぞれの岩石学的な違いについて記載する。なお，試料は低粘性エポキシ樹脂を使用し真空室内で包埋し，岩石薄片および研磨片を作成した。各岩石タイプについて，透過光で石英（0.5mm以上）の含有量（vol.%，ポイントカウンティング法により2000pt測定）を，反射光で黄鉄鉱・岩片・気泡（0.5mm以上）の含有量（同方法により1000pt測定）を測定した（表1）。

3-1 黒色溶岩

黒色溶岩は，鍛冶屋地獄小丘の南斜面に広く分布する発泡度の高いアア溶岩状の黒色の硫黄溶岩である（図5A）。2010年5月に発生した硫黄溶岩は，ほとんどがこのタイプである。異質岩片（変質した火山岩片）と最大5mmの

石英の結晶片を多く含み，また，最大で1mmの黄鉄鉱が含まれる（表1）。石英は破碎形を呈し，不規則な細かいひび割れが発達している。

表1 各タイプの溶岩のモード測定結果

石英は透過光で2000ptカウント，不透明鉱物，岩片，気泡の量は反射光で1000ptカウントし含有量（vol.％）を測定した。

	黒色溶岩	灰色溶岩	黄色溶岩
石英 ※1	11.5	8.2	0.1
不透明鉱物 ※2	6.7	2.1	0.0
岩片 ※2	9.1	15.1	0.0
気泡 ※2	20.9	8.9	6.2

※1 透過光で2000pt測定

※2 反射光で1000pt測定

3-2 灰色溶岩

灰色溶岩は、黒色溶岩の溶岩ロープの本体の割れ目から流出して産出する、パホイホイ状の表面形態をもつ発泡度の低い緻密な硫黄溶岩である（図5B）。灰色を呈し、表面に肉眼で最大2cmのスピニフェックス組織状の硫黄の結晶を確認することができる。また最大で3mmの変質した岩片を多く含む。鏡下では、石英や岩片と少量の黄鉄鉱を含む。

3-3 黄色溶岩

黄色溶岩は、鍛冶屋地獄東部の地点Aから流下した溶岩流でのみ見られるタイプで（図4-I）、表面はパホイホイ溶岩状の産状を示す緻密な硫黄溶岩である（図5C）。表面は灰色を呈すが、内部はクリーム色～黄色を呈す。鏡下では、内部に0.5～1mmの石英の結晶片をわずかに含むが、黄鉄鉱と岩片は含まない（図5C、表1）。また内部には最大約3cmのスピニフェックス組織状の硫黄の結晶が発達している。

4 化学組成

2010年5月に発生した硫黄溶岩3種、噴気塔の昇華硫黄および黄色溶岩の流出地点である地点Aに分布する層状硫黄の硫黄含有量（表2）を、次の方法により測定した。

硫黄の融点が112.8～119℃（結晶構造により異なる）であるため、70℃で24時間以上加熱し乾燥させた試料約250mgを使用し、ソックスレー抽出器を用いてアセトン中に抽出した。抽出時間は、純粋な硫黄粉末が12時間抽出でアセトン中に約300mg溶解したので、12時間とした。アセトン中には予め秤量済みの金属銀粉末を入れてあり、アセトン中に溶解した硫黄と化合して硫化銀となる。この硫化銀を回収し、重量増加分から硫黄の含有量を測定した。

硫黄含有量は、黄色溶岩と灰色溶岩で約60wt.%と高く、黒色溶岩は約50wt.%であった。また黄色溶岩の流出地点（地点A）に分布する層状硫黄は68.4wt.%であった。噴気塔（鍛冶屋地獄）の昇華硫黄の硫黄分は90.5wt.%であったが、硫黄の昇華により形成されているためほぼ純粋な硫黄からなると想定される。全体的に10wt.%ほど低く測定されている可能性もあるため、化学組成分析については、今後EDS（エネルギー分散型X線分析装置）等によるより正確な計測を行いたい。

5 考察

5-1 各溶岩タイプの成因について

一般に硫黄溶岩は玄武岩質溶岩流と似た流動様式や表

表2 各タイプの溶岩の硫黄含有量(wt.%)の測定結果
測定方法は本文参照。

	硫黄含有量 (wt.%)
黒色溶岩	49.2
灰色溶岩	62.1
黄色溶岩	59.0
層状硫黄（地点A）	68.4
昇華硫黄（噴気塔）	90.5

面形態をとることが知られているが（例えば渡邊・下斗米, 1937）、硫黄溶岩は温度によって粘性と色が複雑に変化する（Sagan, 1979）ことで特徴づけられる。硫黄（環状硫黄）は融点直上の温度では黄色で粘性も低いが、温度が上昇するにつれて結晶構造が直鎖状へと変化し、159.4℃以上では暗赤色となり粘性が増大しほとんど流動性を失う。さらに加温すると、直鎖状の分子が切れて再び流動性を取り戻し、沸点の445℃にいたる。

2010年に燃焼しながら流下した硫黄溶岩流は、主にア溶岩状の黒色溶岩として定置した。丹保（2010）の報告によれば、燃焼中の黒色硫黄溶岩の温度は240℃程度、炎の部分では500℃以上である。黒色硫黄溶岩は、岩片や石英の結晶片を含むため純粋な硫黄より粘性が高くなると考えられ、硫黄の温度と粘性の関係からすると、約10⁴P以上の高い粘性をもっていたと考えられる。

黒色溶岩と灰色溶岩の違いは、黒色溶岩が溶岩流の主体を形成するのに対し、灰色溶岩は黒色溶岩の外皮のすき間から流出していること、発泡度に違いがあり黒色溶岩がア溶岩状なのに対し、灰色溶岩はパホイホイ溶岩状であることである。小林（1990）では、流出口付近で凸凹の硫黄溶岩が遠方でパホイホイ状になるのは、溶岩中の異質岩片がこし去られたためであるとしているが、岩片量に違いはなく、上記のモデルは当てはまらない。2010年に発生した溶岩の産状から考察すると、次のようなモデルが考えられる。黒色溶岩を形成した硫黄溶岩流は燃焼しながら流れたため、表面ほど高温で粘性が高く、ア溶岩状の溶岩を形成した。しかし燃焼が終了し冷却が進むにつれ溶岩の粘性は低下し、内部の低粘性な硫黄溶岩がア溶岩状の外皮のすき間から外側に流出することで灰色溶岩を形成したと考えられる。硫黄の含有量が黒色溶岩より多いことも、灰色溶岩が燃焼せずに定置したことを支持する。

黄色溶岩は発生地点が限られており、また溶岩の色やモード組成において、黒色溶岩や灰色溶岩とは明らかに異なる。表面がパホイホイ状であること、内部にはスピ

ニフェックス組織が成長しているなどの特徴は、知床硫黄山で1936年に噴出した硫黄溶岩と似るものであり、黄色溶岩はImai and Geshi (1999) で言われているように、低粘性の溶融硫黄が急冷したものであると考えられる。硫黄の温度と粘性の関係から、低粘性であったことを考慮すると、120~160℃程度であったことが示唆される。また表面には幾筋も溶融硫黄が流れたあとが見られることから、この溶岩流は非燃焼の溶岩流であったと考えられる。

5-2 硫黄溶岩の由来

硫黄溶岩を形成した硫黄の供給源について、知床硫黄山やポアス火山（コスタリカ）の場合は、地下に溶融した硫黄が溜まっている硫黄溜りのようなものがあり、それが地表に噴出したと考えられている（渡邊・下斗米，1937；Oppenheimer, 1992）。しかし地獄谷の場合は、黄色溶岩の流出開始地点で消失した堆積物の量（小丘上部で一部消失したため、ブリッジ状の地形を形成）と、流下した黄色溶岩流の量が概ね等しいことから、黄色溶岩の供給源は、地点A付近に堆積する層状の硫黄堆積物であると考えられる。黒色溶岩についても、鍛冶屋地獄の小丘斜面のあちこちで地表付近が広く燃焼し、そこから低地に向かい溶岩ロープが流下して形成されていること、また岩石には、地獄谷の地表付近堆積する岩片や石英の結晶片などの碎屑物を多く含むことから、この硫黄溶岩流の供給源は、地獄谷の地表付近の硫黄に富む堆積物であると考えられる。

5-3 硫黄溶岩の分布と産状からの考察

上記の様に地獄谷小丘東部（図4-I部）に分布する黄色溶岩は非燃焼の硫黄溶岩流であったと考えられる。しかし、5月6日夜間に撮影された写真からは、黄色溶岩の分布域で青い炎が確認でき、また5月8日時点で黄色溶岩の一部が燃焼しているのが目撃されている。黄色溶岩の流出地点である地点A付近では、溶岩流の表面の一部が溝になっている。イタリアのVulcano火山で燃焼しながら流れた硫黄溶岩が溝を形成したというHarris et al. (2000) の研究などから考えると、最初に非燃焼の硫黄溶岩流が発生した後、少なくとも5月6日夜間の時点でその一部が燃焼した可能性が高い。溶岩流の上部付近で溝が多いことを考えると、発火の中心は地点A付近であったと考えられる。

上記のように、硫黄溶岩の供給源は地表付近の硫黄に富む堆積物であると考えられるが、局所的な地点から黒色溶岩が流下しているということは、熱源が局所的であるか、硫黄の分布が局所的であるかのどちらかであるが、

燃焼範囲が東部から西部に移動してきたことや近年噴気活動がなかった場所から溶岩が流下していることを考えると、東部での燃焼熱により硫黄濃度の高い部分が、外部からの熱により発火した可能性が高い。地獄谷では噴気孔の位置が年単位で頻繁に変わることから、かつての硫黄噴気が上昇していた部分など硫黄に富む部分が外部からの熱により燃焼し、溶岩形成場が拡大したと考えられる。

6 まとめ

2010年5月には、パホイホイ状の硫黄溶岩流（黄色溶岩・灰色溶岩を形成）とアア状の硫黄溶岩流（黒色溶岩を形成）が発生した。これらの表面形態の違いは、流下時の燃焼の有無すなわち温度の違いによって粘性が変わることでもたらされた。また硫黄溶岩形成場（燃焼域）が鍛冶屋地獄東部から西部へ移り変わっていったこと、独立した複数の地点から燃焼硫黄溶岩が流下していること、硫黄が可燃性固体であることを考えると、溶岩形成場最東部に位置する非燃焼硫黄溶岩が最初に発生し、その後何らかの原因で発火し、黒色硫黄溶岩が形成されたと考えられる。そしてその燃焼熱により、硫黄溶岩形成場が拡大していったと考えられる。

7 謝辞

富山県立水橋高等学校の寺島禎一教頭には、本研究を行うきっかけを頂いた。立山カルデラ砂防博物館の丹保俊哉氏には、貴重な資料を提供していただくとともに真摯な議論を頂いた。富山大学理工学研究部の石崎泰男准教授には全般にわたって丁寧なご助言を頂いた。富山県ナチュラリストの渋谷茂氏には発生当時の貴重な写真と証言を頂いた。立山自然保護センターの皆さまには、現地調査の際にお世話になった。（独）産業技術総合研究所の下司信夫主任研究員には標本を見て頂き、ご助言頂いた。中部山岳国立公園立山自然保護官事務所と富山県自然保護課には、環境省より調査および標本採集の許可を受けるに当たり、便宜を図って頂いた。なお、本研究は富山県博物館協会の平成23年度研究助成を使用し行なった。以上の皆様・機関に心より御礼申し上げます。

文献

- 地学団体研究会編（1996）新版地学事典，平凡社，p.1348.
Harris, A. J. L., Sherman, S. B., Wright, R. (2000) Discovery of self-combusting volcanic sulfur flows. *Geology*, 28 : 415-418.
Imai, A. and Geshi, N. (1999) Spinifex textures of native sulfur: A cooling product of sulfur

- flow wruptions at Shiretoko-Iwozan Volcano, Hokkaido, Japan. Resource Geol., 49 : 99-104.
- 河野俊夫 (1988) 立山地獄谷産“火口”硫黄について. 島根大学地質学研究報告, 7 : 91-97.
- 北日本新聞社 (2010) 2010年7月8日朝刊「地獄谷で硫黄火災」.
- 小林武彦 (1990) 立山火山とその周辺の第四系. 日本地質学会第 97年学術大会見学旅行案内書 : 111-142.
- Oppenheimer, C. (1992) Sulfur eruptions at Volcan Poas, Costa Rica. J. Volcanol. Geotherm. Res., 49 : 1-21.
- Sagan, C. (1979) Sulphur flows on Io. Nature, 280 : 750-753.
- 丹保俊哉 (2010) 地獄谷であった硫黄の流下と発火現象について. 立山カルデラ砂防博物館編, 博物館だより, 49 : 2-3.
- 寺島禎一 (2007) 立山地獄谷の“硫黄の溶岩”について. 富山県 [立山博物館] 研究紀要, 14 : 3-6.
- 渡邊武男・下斗米俊夫 (1937) 北見國知床硫黄山 特に昭和11年の活動に就いて. 火山, 3 : 213-262.
- Yamasaki, M., Nakanishi, N. and Miyata, K. (1966) History of Tateyama Volcano. Sci. Rep. Kanazawa Univ., 11 : 73-92.