

新潟大学災害・復興科学研究所
共同研究報告書

水蒸気噴火および粘着性土石流を多発する現象発生場の地質・岩石学的特徴
の解明：安達太良火山沼ノ平での事例研究

研究代表者 井村 匠 1)

研究分担者 片岡香子 2), 長橋良隆 3), アガンジ アンドレア 4)

研究協力者 アリバス アントニオ 5)

1) 山形大学 2) 新潟大学 3) 福島大学 4) 秋田大学 5) テキサス大学

研究要旨

安達太良火山山頂西部では発達した熱水変質帯に起因する水蒸気噴火ならびにそれに伴う粘着性土石流がこれまでに多数生じている。このため水蒸気噴火がトリガーとなる大規模な粘着性土石流の発生が現在も危ぶまれており、現象発生場と想定される山頂域の物質科学的特性を把握することは危急の課題である。そこで本研究では、安達太良火山において、現在の活動中心である沼ノ平火口周辺域ならびに山頂西部で広範に露出する熱水変質帯の地質・岩石学的特徴に基づき、現象発生場の時空間変遷を解析した。2020～2021年度の結果から、鉱物組み合わせおよび地質構造に基づく変質帯の分類、各変質帯の空間分布および新旧関係が明らかになり、それらの変質帯は少なくとも7万年以降に形成された可能性が示された。本研究成果は、熱水系卓越型火山の長期活動把握に貢献し、今後の安達太良火山で起こり得る水蒸気噴火および粘着性土石流の発生地点予測のための基礎データとして期待される。

A. 研究目的

安達太良火山では、過去約5万年間において、山頂西部の熱水変質帯および沼ノ平火口内を発生源とした水蒸気噴火ならびにそれに伴う粘着性土石流が多発している (Kataoka and Nagahashi, 2019)。同様式の噴火に起因する火山災害は将来的に生ずる可能性は高いといえる。このため、現象発生場となった火山熱水系の現在の状態および将来的な活動遷移を評価する必要がある。一方で、安達太良火山山頂域の熱水変質帯を対象とした調査事例は少ない (阪口, 1995)。従って、現象発生場がこれまで辿ってきた時空間変遷は未詳である。

そこで、安達太良火山西部の熱水変質帯および山頂部の堆積物に対して、地質調査と構成物分析を実施する。本研究では、鉱物組み合わせおよび地質構造に基づく変質帯の分類、各変質帯の空間分布および新旧関係を明らかにすることで、水蒸気噴火と粘着性土石流を生じた火山熱水系の時

空間変遷を解析する。これによって現在の火山熱水系の実態把握を目指す。

本報告では2020～2021年度の調査 (共同研究2020-17, 2021-14) で得られた知見を総括し、同熱水変質帯の地表踏査結果、推定される地質構造と形成時期について概要を述べる。

B. 研究方法

研究対象地域は、安達太良火山山頂西部沼ノ平火口から硫黄鉱山跡にわたって全域に露出している熱水変質帯となる (図1)。当該地域において、熱水変質帯の岩相区分および地質構造把握を目的とした野外地質調査を実施した。この野外地質調査では、研究対象区間の地表踏査、岩石試料採取を行うとともに、UAV (Mavic 2 Pro, DJI, Co. Ltd.) を用いて地質構造を鳥瞰的な視点から3次元的に認識することで、熱水変質帯の構造記載、岩相マッピングを効率的に進めた。

採取した岩石試料は、粘土～細粒砂サイズの砕

屑粒子からなる混合物であり、これらが変質帯の大部分を構成している。このような試料に対して、粉末 X 線回折実験 (powder X-Ray diffraction) を実施し、同試料に含まれる鉱物種を同定した。本実験では山形大学設置の X 線回折装置 (Miniflex II) を使用した。また、著しく珪化が進んだ岩石試料 (後述の Zone 2) については、研磨薄片を作成し、山形大学設置の走査型電子顕微鏡 (JEOL 社製 IT-100) を用いて、微小領域の化学組成分析結果に基づき鉱物相を同定した。

C. 研究結果

熱水変質帯の岩相分類と特徴

前年度共同研究 (2020-17) では、岩相変化に注目し、本調査地域 (図 1) に分布する変質帯について、4 つのカテゴリーに分類した。それぞれ Zone 1, Zone 2, Zone 3, Zone 4 と呼ぶ (表 1, 図 1)。本調査地域の大部分は Zone 1 および Zone 3 の変質帯が占める。詳細な岩相記載は共同研究報告書 (2020-17) および Imura et al. (2021, 資源地質学会) にて報告済である。本年度共同研究 (2021-14) では、この岩相記載結果に基づき、更に上記の変質帯の岩相分布および各 Zone の境界部を追跡し、変質帯分類とその層序を確立した。

各変質帯に共通する地質産状を以下の 3 点にまとめる。(1) Zone 1, Zone 3 とともにパイライトと自然硫黄に富む黒色部と白色細粒変質部のセットからなる。両者の色調、構成物は河床 (黒色部) から谷部稜線 (白色部) へと岩相変化する。(2) 各変質帯は調査地域周辺の火山岩類に胚胎される。特にユニット間境界部ないし溶岩内部の板状節理では強く変質している。(3) 白色細粒変質部の鉱物組み合わせと産状は標高に応じて変化する (図 1, 表 1)。Zone 1 の表層は Si-Al 粘土鉱物とクリストバライト主体の白色粘土化変質部からなる。一方、沼ノ平火口周辺の Zone 3 は石英に著しく富む白色溶脱珪化岩である。

熱水変質帯の地質層序

変質帯のうち、下流側の Zone 1 と Zone 2 およびは Zone 3 と Zone 4, 現地の地質産状より互いに同時期ないし連続的に形成したものと判断できる。Zone 2 は著しい珪化変質作用ならびにパイライトの付加作用を受けた礫岩様の珪化岩であり、Zone 1 の分布域中に点在している (主に観察

地点 5 周辺)。これらに対応する岩石は周囲には分布していないことから、Zone 2 は転石ではなく、Zone 1 と同時期かつ同分布域で形成した現地性 (*in-situ*) の変質岩である。このような岩相は熱水角礫岩に酷似しており (Hedenquist and Henley, 1985), かつての熱水湧出孔の痕跡を示している。

上流側～山頂域の Zone 3 および Zone 4 は主に現世の噴気変質作用を被っている。Zone 3 の母岩は、20～5 万年前に噴出した山頂域の火山岩類 (たとえば沼ノ平溶岩, 胎内岩降下火砕物, 藤縄ほか 2001; 藤縄・鎌田, 2005) であり、変質帯はそれらのユニットを跨いで産する。沼ノ平周辺には現在多数の硫黄孔が点在しており、Zone 3 の変質岩中および Zone 4 に属する沼ノ平火口底堆積物中には大小さまざまな自然硫黄脈が認められる。従って、Zone 3 と Zone 4 は最新の噴気変質作用 (地表) あるいは熱水変質作用 (火口直下) を被っており、最新期の熱水活動を反映している。

Zone 1 と Zone 3 の岩相境界は観察地点 6 (図 1, 図 2) に分布する溶岩ローブ (未記載) にて認められる部分変質部となる。本溶岩上部では Zone 3 の灰白色溶脱珪化岩, 下部河床部では Zone 1 と同様のパイライトに富む黒色粘土化変質岩と、異なる様式の変質を部分的に被っている。本溶岩の中腹部は未変質の両輝石安山岩溶岩が残存する。このような産状は Zone 1 と Zone 3 が不連続である上、各変質帯が Zone 1 ⇨ Zone 2 → Zone 3 ⇨ Zone 4 の順序で形成したことを示している。

表 1 : 変質帯分類まとめ

変質帯分類	岩相	鉱物組み合わせ	観察地点
Zone 1	黒色粘土化変質岩および黄白色粘土化変質岩	黒色: Crs+Py+S 黄白色: Crs+Sme+Kl	1, 3, 4, 6
Zone 2	暗灰色珪化変質角礫岩 (熱水角礫岩)	Qz+Py+Ba+Da+TiO ₂ minerals	2, 5
Zone 3	黒色粘土化変質岩と灰白色溶脱珪化岩	黒色: Crs+Py+S 灰白色: Qz+S	7, 9, 8
Zone 4	灰色泥質未固結堆積物	Qz+Crs+Trd+Alu+Gyp +Kl+Pyh+Py+Sme	10, 11, 12

鉱物名の略称は Qz: quartz, Crs: cristobalite, Trd: tridymite, Kl: kaolin-group minerals, Pyh: pyrophyllite, Sme: smectite-group minerals, Alu: alunite, Gyp: gypsum, Ba: barite, S: Native sulfur, Da: diaspore となる。観察地点番号は図 1 と共通する。

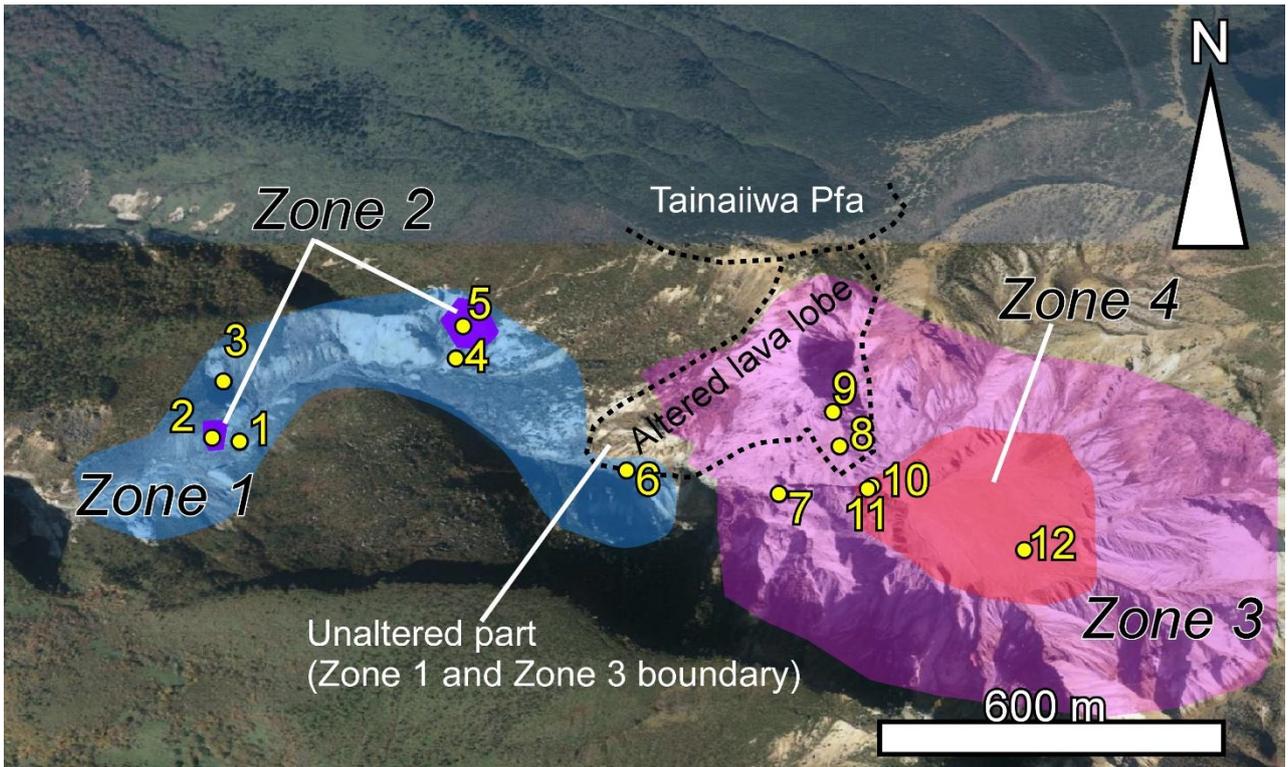


図1：安達太良火山変質帯マッピング結果

図中の番号1～12は観察地点。図中右に沼ノ平火口。



図2：観察地点6付近で見られる岩相境界部

D. 考察

熱水変質帯の岩相変化と対応する熱水

変質帯を構成する岩石の鉱物種は、いずれも地下浅部～地表酸性変質帯に典型的に産する。これらが酸性流体による熱水変質作用でもたらされたことは明らかである。しかしながら、その条件にはそれぞれの Zone で差異がある。

調査地域下流部の Zone 1 ではクリストバライト主体かつ粘土鉱物主体であり低温酸性熱水による浅部変質帯に対応する。Zone 2 の熱水角礫岩は、周囲の Zone 1 の変質帯とは異なり、石英、バライト、パイライトに富むことから Zone 1 よりも高温かつ還元的な変質作用により形成した可能性がある。このことは熱水湧出孔の存在を示す熱水角礫岩の産状を示すこととも整合する。

上流の Zone 3 では石英優勢になり、多数の硫黄孔を伴い自然硫黄とも共存している。この特徴は熱水変質というよりは、地表浅部で酸化された硫酸によって生ずる珪化変質作用を支持し、蒸気加熱型の地表噴気変質帯に相当する。

沼ノ平火口底の Zone 4 では、ミョウバン石、石膏に著しく富むほか、石英、パイロフィライト、カオリナイト（ディッカイト）が含まれる。これらは、発達した高温酸性熱水によって形成される高度粘土化変質帯で認められる鉱物組み合わせに類似する。またミョウバン石の存在は硫酸酸性流体の関与を示唆する。一方、これらの組み合わせは他の変質帯の構成物とは対応しない。沼ノ平火口が現在の活動中心であることを考慮すると、上記の硫酸酸性変質帯となる Zone 4 は、定常的な火山ガスの供給路とされる沼ノ平直下の火道周辺の変質帯に由来する可能性がある。

山頂域の熱水変質帯の形成・活動時期

現地での産状観察に基づき、Zone 1～Zone 4 の変質帯の形成順序はおおよそ Zone 1⇨Zone 2⇨Zone 3⇨Zone 4 である。このうち、Zone 2 を含む Zone 1 および Zone 3 の大部分は、約 7 万年前後に噴出した沼尻廃坑溶岩・迷い沢溶岩（藤縄ほか 2001；藤縄・鎌田，2005）に胚胎されている。また、Zone 1 および Zone 3 の境界部に産する溶岩は、沼尻廃坑溶岩・迷い沢溶岩を地形的に被覆しかつ胎内岩降下火砕物（約 5 万年前、藤縄ほか 2003）に覆われていることから 7～5 万年前には噴出し定置したと考えられる。Zone 1 の終了時期

と Zone 3、Zone 4 の活動開始時期は一部重なっていたのかもしれない。少なくとも上記の現地観察結果は、Zone 1 および Zone 2 の変質帯は 7～5 万年前もしくはそれ以前に活動した過去の熱水系の痕跡を示している。

Zone 3 および Zone 4 の沼ノ平周辺域の変質帯は、20～5 万年前に噴出した山頂域の火山岩ユニットを跨いでいること（たとえば沼ノ平溶岩、胎内岩降下火砕物、藤縄ほか 2001；藤縄・鎌田，2005）、最新の噴気活動が認められる場所であることを考慮すると、Zone 1 および Zone 2 を形成した熱水系よりも新期の熱水系に由来すると考えられる。その活動期は少なくとも 5 万年から現在までとなるが、その間の熱水活動がさらにステージ区分できるかどうかは現地時点では未詳である。

熱水変質帯と粘着性土石流堆積物との対比

Kataoka and Nagahashi (2019) では、本研究調査地域よりも下流に位置する猪苗代湖湖底にて、安達太良火山に由来する粘着性土石流堆積物の遠方相 (Gm, Gs) が見出されている。5 万年前～現在まで数十層の堆積物が認定されており、これらの大半は多量の硫黄とともに粘土鉱物を多く含む (Kataoka and Nagahashi, 2019)。これらの多くは、本研究で定義された Zone 1、Zone 3 と同様の鉱物組み合わせをもち、特に山頂域にのみ分布する Zone 4 にのみ認められるミョウバン石、石膏（硬石膏）の硫酸塩鉱物を含むことが顕著である。これによれば過去 5 万年以降に生じた粘着性土石流の発生源としては沼ノ平火口周辺域が有力であり、このことは本研究により検討した熱水変質帯の形成・活動時期とは大きく矛盾しない。

上記の粘着性土石流堆積物をもたらした要因としては、山頂西部の地形的特徴から安達太良火山西部で山体崩壊イベントがあったとは考えにくく、沼ノ平火口周辺で繰り返し生じた水蒸気噴火による熱水変質帯の爆発破砕による可能性が高い。従って、7～5 万年前に Zone 1 および Zone 2 を形成した熱水系が活動停止した後、新規の熱水系が沼ノ平火口直下を移動、形成したことで Zone 3 および Zone 4 の変質帯が現在生じていると考えられる。Zone 3、Zone 4 を伴う沼ノ平火口周辺域では 5 万年～現在にかけての主要な現象発生場となっているようである。

E. 結論

安達太良火山西部では、かつて地下で生じた熱水活動履歴が、地表露出する熱水変質帯によく保存されている。これを読み解くと、硫黄川上流域では7~5万年前までに活動した過去の熱水系による熱水変質帯 (Zone 1 と Zone 2) が分布し、これらが、現在の沼ノ平火口周辺および火口直下に広がる Zone 3 および Zone 4 として記載された最新期の熱水変質帯に被覆されていることがわかった。このことは火山熱水系およびそれに伴う現象発生場の時空間進化、ならびに地形発達に伴い、現在の熱水ないし火山活動の中心部が沼ノ平火口周辺域に移動したことを示唆する。噴火を発生させる熱水の物質科学条件については、完新世のテフラ群 (山元・阪口, 2000) や一連の粘着性土石流堆積物 (片岡ほか, 2015; Kataoka and Nagahashi, 2019) と、本研究で示した現象発生場の構造やサイズとの対比により、明らかにすることができるであろう。

これまでの歴史記録 (1900年噴火, 藤縄ほか, 2006), 既往研究報告 (片岡ほか, 2015; Kataoka and Nagahashi, 2019) から、沼ノ平火口周囲では将来的に噴火や泥流発生が起こり得る可能性は高い。本火山での火山観測, 調査研究は今後もより一層注意して実施していき, 活動把握のためのデータ蓄積を進めていく必要がある。

F. 参考・引用文献

- 藤縄明彦, 林信太郎, 梅田浩司 (2001) 安達太良火山の K-Ar 年代: 安達太良火山形成史の再検討. 火山, 3, p. 95-106.
- 藤縄明彦, 鎌田光春 (2005) 安達太良火山の最近 25 万年間における山体形成史とマグマ供給系の変遷. 岩石鉱物科学, 34, p. 35-58.
- 藤縄明彦, 鴨志田毅, 棚瀬充史, 谷本一樹, 中村洋一, 紺谷和生 (2006) 安達太良火山, 1900 年爆発的噴火の再検討. 火山, 51 (5), p. 311-325.
- Hedenquist, J.W. and Henley, R.W. (1985) Hydrothermal eruptions in the Waitapu Geothermal System, New Zealand: Their Origin, Associated Breccias, and Relation to Precious Metal Mineralization. *Economic Geology*, v. 80, p. 1640-1668.

片岡香子, 神野成美, 長橋良隆, 木村勝彦 (2015) 安達太良火山西麓, 酸川流域に分布するラハール堆積物: 過去 14000 年間の層序・年代と堆積過程. 火山, 60 (4), p. 203-218.

Kataoka, K.S. and Nagahashi, Y. (2019) From sink to volcanic source: Unravelling missing terrestrial eruption records by characterization and high-resolution chronology of lacustrine volcanic density flow deposits, Lake Inawashiro-ko, Fukushima, Japan. *Sedimentology*, v. 66(7), p. 2784-2827.

阪口圭一 (1995) 二本松地域の地質. 5 万分の 1 地質図幅 新潟(7)第 33 号 NJ-54-22-11, 地質調査所発行.

山元孝広, 阪口圭一 (2000) テフラ層序からみた安達太良火山, 最近約 25 万年間の噴火活動. 地質学雑誌, 106 (12), p. 865-882.

G. 研究発表

Imura, T., Arribas, A., Kataoka, K.S., Nagahashi, Y., 2021, Geological dissection of hydrothermal alteration zone exposed at Adataro volcano, Fukushima, Japan, 資源地質学会第 70 回年会講演会, 東京 (オンライン開催), 2021. 7

H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む) なし