

令和元年5月21日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03745

研究課題名(和文)カルデラ形成・珪長質巨大噴火の多様性と噴火準備過程に関する研究

研究課題名(英文) Research on diversity and preparing processes of caldera-forming silicic eruptions

研究代表者

中川 光弘 (Nakagawa, Mitsuhiro)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：50217684

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：カルデラを形成するような巨大噴火について、マグマ供給系の構造と生成過程、そして破局的噴火過程について時間軸を含めて検討した。対象とした事例は、屈斜路・支笏および鬼界火山におけるカルデラ形成噴火である。それぞれの事例で、大規模珪長質マグマは2種類の珪長質マグマの混合マグマからなり、その混合過程は噴火前の数十年から数百年前に起こっていることが明らかになった。そして破局的噴火では、その混合マグマにマフィックマグマが直前に貫入して噴火に至ったことが明らかになった。さらに破局的噴火は、いずれの事例でも時間間隙を挟む複数の噴火フェーズからなることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低頻度におこるカルデラ形成噴火は観測事例がないため、噴火までの過程や噴火プロセスを明らかにするには、過去の噴火について地質学および物質科学的に検討することが重要である。この研究では、カルデラ形成噴火に先行する噴火の実体や、カルデラ形成噴火を生じた大規模珪長質マグマの成長過程や噴火過程を明らかにすることができた。これらの成果により、カルデラ形成噴火の準備過程の理解が進んだ。この成果は地球の地殻の進化過程の理解だけではなく、低頻度・大規模噴火に備えるための基礎的な知見であり、防災上の意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The formation and eruption processes of the silicic magma plumbing system of a caldera volcano was investigated, with a special attention to the time scale of magma processes. We focused on caldera-forming eruptions of Kutcharo, Shikotsu and Kikai volcanoes. Petrological analysis revealed that the voluminous silicic magma in each eruption was the mixing product of two silicic magma, and that the silicic products had been developed at least since several hundred years before each eruption. Then, we also clarified that each caldera-forming eruption was triggered by the injection of mafic magmas into the mixed silicic magma occurring just before the eruption. In addition, we point out that each caldera-forming eruption was complex, and can be divided into several eruption phases by the presence of dormant periods.

研究分野：火山学

キーワード：カルデラ形成噴火 大規模珪長質マグマ 噴火準備過程 マグマ混合 マグマ滞留時間 プリニー式噴火 火砕流 カルデラ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

カルデラを形成するような巨大噴火を引き起こす珪長質マグマの発生・移動・蓄積過程の解明は、大陸地殻形成・進化を理解する上で重要である。またそのような巨大噴火は、発生頻度は低いものの、発生した場合には破局的な災害をもたらす。2011年の東日本大震災以降、巨大噴火についても関心が高まり、特に近年、原子力発電所に与える影響が社会的に懸念されるようになった。このような深刻な災害を軽減するためには、モニタリングをすることによって巨大噴火の発生を予測できるかが重要となる。しかし、近代火山学は巨大噴火を経験しておらず、どのような現象が巨大噴火の前兆となるか、そしてそれはどのような時間スケールで進行するのが不明である。

観測事例のない巨大噴火現象を理解するには、過去の巨大噴火を地質学的・物質科学的に解析することが唯一の手法である。火山噴火では、噴火前にマグマ溜りにマグマが再注入され、それによって噴火が引き起こされる事例が多く報告されているが、巨大噴火事例においても、その再注入の時期を検討することにより、観測可能な噴火前兆現象の有無と時間スケールを議論できるようになってきた (Sanders et al., 2010; Druitt et al., 2012 など) しか、国内のカルデラ噴火ではそのような議論はまだ行われていない。一方で、これまでの研究では噴火前のマグマ注入・混合のタイミングが議論されているが、噴火の主体をなす大規模珪長質マグマ系の構造 (マグマタイプの種類と成因関係など) およびその生成過程、さらに共存するマフィックマグマとの関係など、巨大噴火の先行・前兆現象をより理解するためには、再注入だけではなく、考慮しなければならない多くの現象がある。それらの理解に関しても不十分な状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、カルデラ形成噴火の噴火準備過程を明らかにすることを目的とする。そのために、カルデラ火山の深部での大規模珪長質マグマ供給系が形成されるまでを長期の噴火準備過程、そしてその系が巨大噴火に至るまでを短期の準備過程として、それぞれのプロセスを時間軸を入れて理解することを目的とする。また珪長質巨大噴火には、長期あるいは短期の噴火準備過程に多様性があり、それを把握した上で一般性を議論する必要がある。そこで長期噴火準備過程では大規模噴火を繰り返すタイプ (L-1) と単発の巨大噴火が起こっているタイプ (L-2) の2タイプ、短期噴火準備過程では直前先行噴火のあるタイプ (S-1) とないタイプ (S-2) の2タイプに分けて検討する。それぞれの事例について地質学的手法により、カルデラ形成噴火の推移を解明し、それに基づいて採取したサンプルを物質科学的に解析して長期と短期の噴火準備過程を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では屈斜路 120ka 噴火 (上記の L-1 および S-1)、支笏 46ka 噴火 (L-2 と S-2)、7.3ka の鬼界アカホヤ噴火 (L-1 および S-1)、インドネシアのリンジャニ火山の 13 世紀 (大型成層火山に伴う S-1) の4つの巨大噴火について検討を行った。これらの噴火に関して、地質調査と別研究課題で実施した掘削調査でのコアの解析により、カルデラ形成噴火の噴火推移を調べた。上記により採取した試料の物質科学的解析を加えた。巨大噴火の噴出物の斑晶鉱物組み合わせと量比による多様性、そして全岩主・微量化学組成 および同位体比による多様性を明らかにする。そして、全岩化学組成および斑晶鉱物組成・組み合わせより、噴出物多様性の成因を明らかにして、活動したマグマの種類とそれらの相互作用を明らかにする。その結果と、噴火推移と噴出物の性質の時間変化を考慮して、噴火直前の大規模珪長質マグマ系の構造を構築し、そこからの噴火プロセスを明らかにする。これを基本的な情報として、以下の検討を行う。

・巨大噴火で活動したマグマの解析によって明らかになった個々のマグマの地球化学的特徴を明確にして、マグマの成因関係を明らかにし、大規模珪長質マグマ系の生成・成長モデルを構築する。また巨大噴火以前の噴出したマグマの地球化学的性質も加えて、長期的な巨大珪長質マグマ系の生成過程を議論する。

・次に、これらのマグマ系の構造を解明することによって明らかになった、マグマそれぞれを代表する斑晶鉱物を明確にしたうえで、斑晶の組成累帯構造を検討する。そして拡散プロファイルと見なせる組成プロファイルから、マグマプロセスについての時間スケールを抽出する。

・最後に、巨大噴火開始までの様々なマグマプロセスとそれぞれの時間スケールを、個々の巨大噴火で詳細に検討する。

4. 研究成果

本研究によって以下の成果が得られた。

(1) カルデラ形成噴火の噴火推移に関する研究成果

これまでカルデラ形成噴火では、プリニー式噴火から始まり、その後大規模な火砕流噴出の破局的噴火に推移することが一般的であり、これは地質学的には連続していると考えられてきた。本研究では特に支笏 46ka 噴火について、露頭調査および別研究課題で得られたボーリング掘削およびトレンチ調査の成果をもとに、これまで支笏カルデラ形成噴火とされた堆積物を、あらたに A~F の6のユニットに、さらに噴火フェーズとして 1~5 に大別した (図 1)。そして

4 回の時間間隙の証拠を認めた。中でも噴火フェーズ 3 と 4 では比較的長期の時間間隙が存在

し、噴出するマグマタイプも、その前後で大きく変化することから、カルデラ形成噴火はフェーズ 1 から 3 まで、4 以降は後カルデラ噴火と考えた。またカルデラ形成噴火でも、プリニー式噴火(フェーズ 2)と火砕流噴出期(フェーズ 3)との間にも、明瞭な時間間隙を見出した。いわゆるカルデラ形成噴火での時間間隙は、本研究で対象とした 7.3ka 鬼界アカホヤ噴火 (Maeno and Taniguchi, 2007) や屈斜路 120ka 噴火 (Hasegawa et al., 2016) でも指摘されている。カルデラ形成噴火推移については、時間間隙が存在することが一般的である可能性を指摘できる。

Time		1		2			3		4		5	
Eruptive phase	Eruptive unit	A		B			C		D	E	F	
		A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	D	E	F1	F2
Eruption style		blast?	phreato-plinian & base surge	plinian	plinian & pyroclastic flow	pyroclastic flow	pyroclastic flow	pyroclastic flow with lag breccia	pyroclastic flow	pyroclastic flow	sub-plinian?	pyroclastic surge
Juvenile	CP-type	[Shaded bar]										
	CR-type	[Shaded bar]										
Lithic breccia (wt.%)			↑ -30	↑ -30	↑ -70		↑ 100	↑ -30			↑ -40	
Remarks			largest scale stable eruption column	unstable eruption column	caldera collapse?	largest scale	caldera formation?	new crater?	gas-rich pyroclastic flow	new crater?	new crater?	
			enlarging of crater(s)			break		break	break	break		

図 1 . 46ka 支笏噴火堆積物から見た噴火推移 (中川ほか, 2018) . マグマタイプおよび岩片量も示す . この推移と時間間隙の存在 (望月ほか, 2018) から、カルデラ形成噴火はフェーズ 1~3 であり、4 以降は後カルデラ活動と考えるべきである .

(2) 長期噴火準備過程について

支笏カルデラ形成期の噴出物は珪長質マグマが主体であり、それに微量のマフィックマグマが存在する。全岩化学組成および鉱物化学組成を検討すると、珪長質マグマは流紋岩質とデイサイト質の 2 種の珪長質マグマの混合マグマであり、その混合マグマに安山岩質~玄武岩質なマフィックマグマが貫入していることがわかった (図 2) 。さらに、2 種の珪長質マグマのマグマ混合の時間スケールを直方輝石の組成累帯構造の解析によって検討した。累帯構造形成後の元素拡散から見積もった結果、珪長質マグマ混合は噴火の数百年前から起こっており、数十年前まで断続的に起こっていたことが明らかになった (図 3) 。これはあくまでも珪長質マグマにおけるマグマ混合の時間スケールであり、カルデラ火山のマグマ供給系生成に関しては、珪長質マグマ生成プロセスを考える必要があり、より長期の過程が存在することになる。珪長質マグマにおいて図 2 の様な関係は、屈斜路 120ka 噴火 (Hasegawa et al., 2016; Matsumoto et al., 2018) および 7.3ka 鬼界アカホヤ噴火 (松本ほか, 2017; Nakagawa et al., 2017) でも認められおり、カルデラ形成噴火の大規模珪長質マグマ系の本質的な特徴であると考えられる。

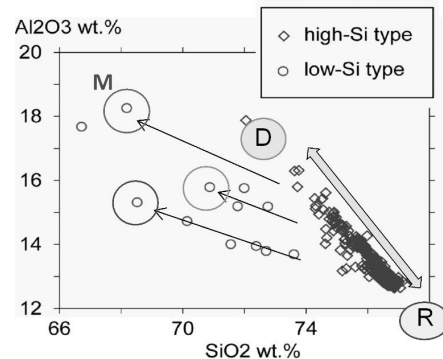


図 2 . 46ka 支笏噴火のカルデラ形成期の主要な本質物の全岩化学組成。流紋岩質 (R) とデイサイト質マグマ (D) の混合珪長質マグマに複数のマフィックマグマ (M) が混合している。

(3) 先行噴火とカルデラ形成噴火の関係について

7.3ka 鬼界アカホヤ噴火において先行する長浜溶岩、および屈斜路 120ka 噴火での pre-KpIV 噴火について岩石学的特徴を検討した。その結果、いずれの場合も先行噴火とカルデラ形成噴火の珪長質マグマの岩石学的特徴は酷似するが、全岩化学組成や鉱物化学組成で、両者は区別できることが明らかになった (松本ほか, 2017; Matsumoto et al., 2018) 。これまではカルデラ形成噴火で活動した珪長質マグマ溜まりから、一部のマグマが先行して噴出したとかがえられていたが、本研究によって先行噴火で噴出したマグマは、カルデラ形成噴火時のマグマ溜まりとは別の、独立したマグマ溜まりが存在していたことが明らかになった。

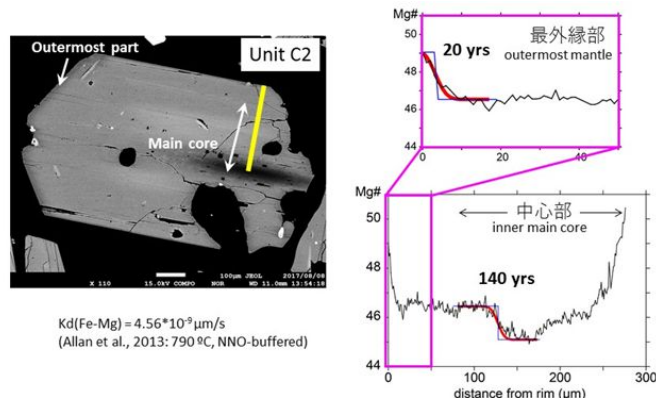


図 3 . 46ka 支笏噴火の珪長質噴出物に含まれる直方輝石の BSE 像 (左) と、BSE 像のライン分析結果 (右) 。分析ラインは BSE 像中に示す。この斑晶では 2 段階の混合過程を記録し、元素拡散を仮定すると、それぞれの混合過程は噴火の 140 年および 20 年前となった。

(4) 短期準備過程について

支笏 46ka および屈斜路 120ka において、前述した珪長質マグマにマフィックマグマが混合していること、またそのマフィックマグマは図 2 に示すように、多様であることが明らかになった。この複数のマフィックマグマが認められることから、複数のマフィックマグマが存在し、それぞれが異なる火道システムを上昇して珪長質マグマに貫入したことが明らかになっている。その貫入のタイミングは、屈斜路 120ka 噴火では斑晶鉱物の組成累帯構造の解析から、噴火前の数時間から数週間前であることが明らかになった。一方で、支笏 46ka 噴火では、貫入したマフィックマグマは珪長質マグマと十分に混合しておらず、縞状軽石やマフィック包有物の形状を示す。また斑晶鉱物の最外縁の組成累帯構造も認められない。このことから、噴火の直前にマフィックマグマが貫入し、速やかに噴火しマフィックマグマが急冷されたために、これらの特徴が形成されたと考えられる。このように屈斜路および支笏火山では、長期の噴火準備過程を経て形成された混合珪長質マグマに、マフィックマグマが噴火前に貫入し、数週間以内の準備過程を経て噴火に至ったことが明らかになった。

(5)カルデラ形成噴火のマグマ供給系の構造とその形成過程について

本研究によって、大規模珪長質マグマ系の形成とその噴火機構に関して、そのモデルを提案する。そのために、まず大規模珪長質マグマの成因について検討した。支笏 46ka および屈斜路 120ka 噴火噴出物の微量元素組成および Sr-Nd 同位体比組成の検討により、混合珪長質マグマの 2 種の珪長質マグマ(流紋岩とデイサイト質マグマ)はそれぞれが異なる起源物質から生じたマグマであることが分かった。またそれらとは別に、マントル起源と考えられるマフィックマグマが共存している。そのことから大規模珪長質マグマの生成機構に関しては次のようなモデルを提唱した。まず、マントル起源のマフィックマグマを熱源として、地殻の部分溶融によって珪長質マグマが生ずる。地殻は不均質であるので、その異なる部分が溶融することによって不均質な珪長質マグマが生ずるであろう。その中で、地殻の大きな構造、例えば下部地殻と中部地殻を反映して、大きく 2 種に大別できる珪長質マグマが生ずる。そしてそれらが集積(混合)することによって、大規模な混合珪長質マグマが形成される。この混合過程は噴火前の少なくとも数百年前から始まっている。そしてその混合珪長質マグマに複数のマフィックマグマが、噴火直前に次々と貫入してカルデラ形成噴火に至る(図 4)。この過程の中で、珪長質マグマ同士の混合過程では、マグマの移動を伴う現象く、それは地殻変動や地震観測などでモニターできる

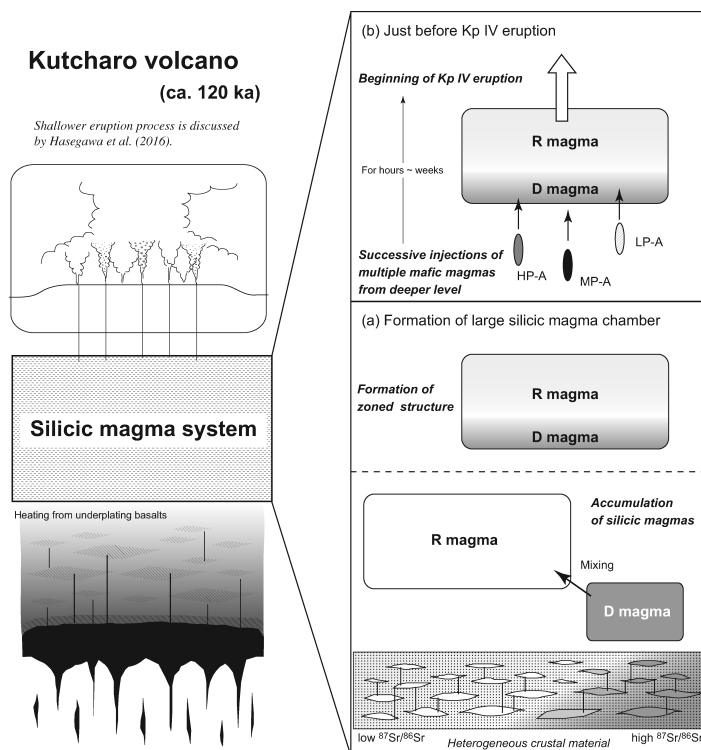


図 4 . 屈斜路 120ka 噴火のマグマ供給系の形成過程と噴火過程のモデル (Matsumoto et al., 2018) .

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 1 件)

Yoshimura Shumpei, Kuritani Takeshi, Matsumoto Akiko, Nakagawa Mitsuhiro, Fingerprint of silicic magma degassing visualized through chlorine microscopy. Scientific Reports, 査読有, 9, 2019.

10.1038/s41598-018-3734-0

Nakamura Hitomi, Iwamori Hikaru, Nakagawa Mitsuhiro, (10 名の 3 番目), Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs. Gondwana research, 査読有, 70, 2019, 36-49. 10.1016/j.gr.2019.01.007

Matsumoto Akiko, Hasegawa Takeshi, Nakagawa Mitsuhiro, Petrology of the 120 Ka caldera-forming eruption of Kuchino volcano, eastern Hokkaido Japan: Coexistence of multiple silicic magmas and their relationship with mafic magmas. Journal of Petrology, 査読有, 59, 2018, 771-793. 10.1093/ptrology/egy043

中川光弘, 宮坂瑞穂, 富島千晴, 松本亜希子, 長谷龍一, 支笏湖南方地域の火口近傍堆積物層序からみた 46ka 支笏カルデラ形成噴火層序 . 地学雑誌, 査読有, 127, 2018, 247-271.

10.5026/jgeography.127.247

宮坂瑞穂、中川光弘、支笏火山 60ka 社台噴火の噴火推移 - トレンチ調査およびボーリング調査による再検討. 地学雑誌、査読有、127、2018、229-246. 10.5026/jgeography.127.229

西来邦章、石毛康介、島田駿二郎、中川光弘. 北海道中央部、美瑛 - 上川地域に分布する十勝カルデラ周辺の火砕流堆積物の FT 年代及び U-Pb 年代. 火山、査読有、62、2017、83-94. 10.18940/kazan.62.2.83

Bergal-Kuvikas O., Nakagawa Mitsuhiro, Kuritani, Takeshi, (他 6 名), A petrological and geochemical study on time-series samples from Klyuchevskoy volcano, Kamchatka arc. Contributions to Mineralogy and Petrology, 査読有、172, 2017, 35. 10.1007/s00410-017-1347-z

Hasegawa Takeshi, Nakagawa Mitsuhiro, Large scale explosive eruptions of Akan volcano, eastern Hokkaido, Japan: A geological and petrological case study for establishing tephro-stratigraphy and -chronology around a caldera cluster. Quaternary International, 査読有、397, 2016, 39-51. 10.1016/j.quaint.2015.07.08

Kuritani Takeshi, Tanaka Mayumi, Yokoyama Tetsuya, Nakagawa Mitsuhiro, Matsumoto Akiko, Intensive hydration of the wedge mantle at the Kuril arc-NE Japan arc junction: Implications from mafic lavas from Usu volcano, northern Japan, Journal of Petrology, 査読有、57, 2016, 1223-1240. 10.1093/petrology/egw038

Hasegawa Takeshi, Matsumoto Akiko, Nakagawa Mitsuhiro, Evolution of the 120 ka caldera-forming eruption of Kutcharo volcano, eastern Hokkaido, Japan: Geologic and petrologic evidence for multiple vent systems and rapid generation of pyroclastic flow. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 査読有、321, 2016, 58-72. 10.1016/j.jvolgeores.2016.04.030

Razzhigaeva N.G., Matsumoto Akiko, Nakagawa Mitsuhiro, Age, source and distribution of Holocene tephra in the southern Kurile islands: Evaluation of Holocene eruptive activities in the southern Kurile arc. Quaternary International, 査読有、397, 2016, 63-78, 10.1016/j.quaint.2015.07.070

[学会発表](計 15 件)

Nakagawa Mitsuhiro, Matsumoto Akiko, Iguchi Masato, Petrological monitoring of the eruptive activity since AD 2006 of Sakurajima volcano, Japan. 日本地球惑星連合 2018 年大会 (国際学会) 2018.

中川光弘、前野深、松本亜希子、薩摩硫黄島での火山体掘削調査: 鬼界アカホヤ噴火 (K-Ah 噴火) の噴火準備過程解明を目指して. 日本地球惑星連合 2018 年大会, 2018.

望月伸竜、長谷川健、中川光弘、支笏カルデラ噴火堆積物の古地磁気学的測定: 大規模噴火堆積物の時間間隙の推定へ向けて. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.

松本亜希子、中川光弘、宮坂瑞穂、井口正人. 輝石斑晶の累帯構造から見るマグマ噴火の準備プロセス. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, 2018.

Kuritani Takeshi, Xia Q., Lin J. Zhao D. Nakagawa Mitsuhiro, Origin of a transition zone-derived mantle plume at Changbai volcano, Goldschmidt 2018 (Boston), 2018.

中川光弘、松本亜希子、長谷川健. 大規模珪長質マグマ系の多様性とその成因. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017.

松本亜希子、中川光弘、小林恭平、前野深. 九州南部、7300 年前の鬼界カルデラ形成噴火 (K-Ah) の岩石学的研究. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017.

Matsumoto Akiko, Mitsuhiro Nakagawa, Iguchi Masato. Petrological monitoring of eruptive activity since AD 2006 at Sakurajima volcano, southern Kyushu, Japan: Implications of the activation in AD 2015. IAVCEI 2017 meeting (Portland), 2017.

Nakagawa Mitsuhiro, Matsumoto Akiko, Hasegawa Takeshi, Maeno Fukashi. Diversity and origin of large silicic magma system: Comparative petrological studies of recent caldera-forming eruptions in Japan. IAVCEI 2017 meeting (Portland), 2017.

Nakagawa Mitsuhiro, Amma-Miyasaka Mizuho. Tephrostratigraphy and tephrochronology of the Shikotsu-Toya volcanic field, Hokkaido, Japan: Beginning and development of silicic volcanism at an arc-arc junction. 2017 Geoscience Society of New Zealand Annual Conference (Auckland), 2017.

Yoshimura Shumpei, Nakagawa Mitsuhiro, Matsumoto Akiko. Chlorine mapping as a new tool to investigate the degassing processes of silicic magma. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, 2017.

Nakagawa Mitsuhiro. Petrology and geochemistry of 40 ka caldera-forming eruption of Shikotsu volcano, Hokkaido, Japan: Structure and growth processes of large magma reservoir system by multiple silicic and mafic magmas at a caldera volcano. 6th International Workshop on Collapse Caldera (Hokkaido), 2016.

中川光弘、高橋良輔、宮坂瑞穂、栗谷豪 (他、3 名). インドネシア、リンジャニ火山の岩石学的研究: マグマ変化から見た西暦 1257 年カルデラ形成噴火およびその準備過程について. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015.

宮坂瑞穂、中川光弘、長谷川龍一. 北海道南西部、支笏火山先カルデラ噴出物 (社台火砕流) に関する岩石学的研究: カルデラ形成噴出物との比較. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015.

中川光弘、宮坂瑞穂、松本亜希子、古川竜太. 支笏カルデラ形成噴火に先行する噴火は存在するか. 日本火山学会 2015 年秋季大会 (富山) 2015.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：栗谷 豪

ローマ字氏名：(KURITANI Takeshi)

所属研究機関名：北海道大学

部局名：理学研究院

職名：准教授

研究者番号(8桁)：80397900

研究分担者氏名：吉村 俊平

ローマ字氏名：(YOSHIMURA Shumpei)

所属研究機関名：北海道大学

部局名：理学研究院

職名：助教

研究者番号(8桁)：20706436

研究分担者氏名：松本 亜希子

ローマ字氏名：(MATSUMOTO Akiko)

所属研究機関名：北海道大学

部局名：理学研究院

職名：技術職員

研究者番号(8桁)：20528260

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。