

RREP-2024-4002

安全研究成果報告

S/NRA/R Research Report

大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る 研究

Investigation of a Large-Scale Eruption Process

安池 由幸 西来 邦章 廣井 良美 佐藤 勇輝
大野 鷹士

YASUIKE Yoshiyuki, NISHIKI Kuniaki, HIROI Yoshimi, SATO Yuki, and ONO Takato

地震・津波研究部門

Division of Research for Earthquake and Tsunami

原子力規制庁

長官官房技術基盤グループ

Regulatory Standard and Research Department,

Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

令和6年6月

June 2024

本報告は、原子力規制庁長官官房技術基盤グループが行った安全研究プロジェクトの活動内容・成果をとりまとめたものです。

なお、本報告の内容を規制基準、評価ガイド等として審査や検査に活用する場合には、別途原子力規制委員会の判断が行われることとなります。

本報告の内容に関するご質問は、下記にお問い合わせください。

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門
〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル
電 話：03-5114-2226
ファックス：03-5114-2236

大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究

原子力規制庁 長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門

安池 由幸 西来 邦章 廣井 良美 佐藤 勇輝 大野 鷹士

要 旨

近代において国内外での大規模噴火の観測事例がなく、噴火のメカニズムや前駆活動の有無、マグマプロセス等の知見が少ないこと、水没したカルデラ下の地下構造探査に関する知見が少ないこと等の状況から、火山活動可能性評価の判断指標を示すまでに至っていない。本研究では、大規模噴火を起こした火山を対象に、過去の大規模噴火に至るまでの準備・開始プロセスについて、プレカルデラ活動、マグマ供給系の時間・空間発達過程の知見を蓄積し、過去のカルデラ火山の長期的な活動を評価した。さらに、活動的なカルデラ火山において地下構造や地殻変動等のマグマ・火山活動に関する知見を蓄積した。得られた知見に基づいて、カルデラ火山の噴火準備過程のモデル・シナリオ、火山活動を捉える観測項目及びそれらの関係についての考え方を提案した。モデル・シナリオとしては、カルデラ噴火を経て次のカルデラ噴火へ向かうような輪廻カルデラに共通するマグマプロセスのモデルは、地殻浅部に大規模なマグマ溜まり（上面深さ約 4-7 km）を形成する。このようなマグマ溜まりの形成には、最短でも数百～千年程度の時間スケールが必要となり、この期間には噴火活動が低下する。火山活動を捉える観測項目としては、カルデラ下の地下構造が得られていることが前提となるが、人工地震を用いた反射法探査は、地下の地震波低速度領域での反射波を捉えると同時に低速度領域内の物性変化を検知できる可能性があることから新たな観測項目となり得ることを示した。カルデラ火山の現状評価においては、評価対象のカルデラ火山の地下構造を把握することが重要であり、カルデラの大部分が水没したカルデラ火山であっても、陸上での広帯域 MT 法探査によって地震波による探査と比べて短期間で深さ 4-10 km 程度の地下構造が推定できることを示した。カルデラ火山にはポストカルデラの火山活動によるマグマ供給系が存在することを考慮する必要があるが、カルデラ火山の噴火準備過程のモデル・シナリオとカルデラ周辺の地下構造を合わせて現状を評価することを提案した。

降灰プロセスに関しては、地質調査により過去の火山噴火による降灰量の最適調査手法、降灰シミュレーションにおいて設定する TGSD 値を推定する最適手法及び噴火による降灰現象を直接観測し降灰時の気中降下火砕物濃度が得られた。

本研究では、過去の大規模噴火プロセスに係る知見取得について国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託、活動的カルデラ火山に係る知見取得について国立大学法人京都大学及び国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託を実施したほか、阿寒カルデラに係る知見取得のため国立大学法人茨城大学との共同研究、十和田カルデラに係る知見取得のため国立大学法人東北大学との共同研究、U/Th法による年代測定のため国立大学法人東京大学との共同研究、気中火山灰濃度観測のため国立大学法人京都大学及び国立研究開発法人産業技術総合研究所との共同研究を実施した。

Investigation of a Large-Scale Eruption Process

YASUIKE Yoshiyuki, NISHIKI Kuniaki, HIROI Yoshimi, SATO Yuki, and ONO Takato
Division of Research for Earthquake and Tsunami,
Regulatory Standard and Research Department,
Secretariat of Nuclear Regulation Authority (S/NRA/R)

Abstract

In the recent past, no large-scale eruptions have been observed in Japan or overseas, and there is little knowledge of eruption mechanisms, precursor activities, magmatic processes, etc., and little knowledge of subsurface structural exploration beneath submerged calderas, etc. Therefore, we have not yet provided concrete criteria for evaluating eruptive activity. In this study, by accumulating knowledge on the preparation and onset processes leading up to past large-scale eruptions, such as pre-caldera activity and time-spatial development processes of magma supply systems, we evaluated the long-term activities of past caldera volcanoes. Furthermore, we accumulated knowledge on magmatic and volcanic activities such as subsurface structure and crustal deformation in active caldera volcanoes. Based on the obtained knowledge, we proposed a model scenario of the eruption preparation process of caldera volcanoes, items to observe in volcanic activities, and the relationship between them. As a model scenario, the common magmatic process model for a caldera in a cycle, such as going from one caldera eruption to the next, is the formation of a large magma reservoir (roof depth ~4-7 km) in the shallow crust. The formation of such magma reservoirs requires a time scale of at least a few hundred to a thousand years, and eruptive activity decreases during magma accumulation. Although it is a precondition that the subsurface structure beneath the caldera is available as an item when observing volcanic activities, a reflection survey using synthetic earthquakes has shown that it can be a new observation item because it has the potential to detect changes in physical properties within the low-velocity region as well as to identify seismic waves in the upper surface of the low-velocity region of the subsurface. It is important to understand the subsurface structure of a caldera volcano in order to assess the current status of the volcano, and we have shown that even for a caldera volcano where most of the caldera is underwater, a land-based broadband Magnetotelluric survey can estimate the subsurface structure to a depth of 4-10 km in a shorter time than a seismic survey. Although it is necessary to consider the existence of a post-caldera volcanic magma supply system in caldera volcanoes, we proposed to assess the current status by combining the model scenarios of the eruption preparation process of caldera volcanoes with the

subsurface structure around the caldera volcano.

As for the ash fall process, we obtained the optimal method for investigating the amount of ash fall due to past volcanic eruptions and the optimal method for estimating the Total Grain Size Distribution value to be set in the ash fall simulation through geological surveys. In addition, the concentration of pyroclastic material in the air at the time of ashfall was obtained through direct observation of ash fall caused by volcanic eruptions.

In this study, the accumulation of knowledge of past large-scale eruptions was conducted by Advanced Industrial Science and Technology under the auspices of the NRA. The accumulation of knowledge of active caldera volcanoes was conducted by Kyoto University and Advanced Industrial Science and Technology under the auspices of the NRA. Accumulating knowledge of Akan caldera was performed under a multilateral agreement of the joint research project with Ibaraki University. Accumulating knowledge of Towada caldera was performed under a multilateral agreement of the joint research project with Tohoku University. U-Th dating was done under a multilateral agreement of the joint research project with the University of Tokyo. Observation of the concentration of pyroclastic material in the air at the time of ashfall was done under a multilateral agreement of the joint research project with Kyoto University and Advanced Industrial Science and Technology.

目次

1.	序論	1
1.1	背景	1
1.2	目的	2
1.3	全体行程.....	2
2.	本論	4
2.1	地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究	4
2.1.1	大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究	4
2.1.2	降灰プロセス等に関する地質調査及び観測	7
2.2	岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究	16
2.3	地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究	22
2.3.1	カルデラ火山の地下構造調査	22
2.3.2	カルデラ火山の地球化学的調査	24
2.3.3	火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査	26
2.4	観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討	32
3.	結論	37
3.1	成果の要点	37
3.2	目的の達成状況	38
3.3	成果の公表等	39
3.3.1	原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表	39
3.3.2	委託先による公表	40
3.4	成果の活用等	46
3.5	今後の課題等	47
	参考文献一覧	48
	執筆者一覧	55

表 目 次

表 2.1	始良カルデラ形成噴火に至る火山活動年代.....	6
表 2.2	降灰観測結果.....	11

目 次

図 1.1	全体行程.....	3
図 2.1	降下火砕物の産出状況の例 (Ta-a)	12
図 2.2	樽前火山噴出物の距離と中央粒径の関係図.....	13
図 2.3	ボロノイ法 (Method V)、Method Ip 及び Method DIp を用いて計算した中央 粒径と標準偏差.....	14
図 2.4	Method Ip を用いたコンターの選択に対する不確実性の検討	15
図 2.5	相平衡実験で決定した十和田火山におけるカルデラ形成噴火噴出物の相関 係	20
図 2.6	石英斑晶の累帯構造とその拡散プロファイル解析結果 (始良カルデラ入戸火 砕流堆積物の例)	21
図 2.7	始良カルデラ中心付近を通る P 波速度及び S 波速度	28
図 2.8	九重火山周辺の地下水の a) C/Cl 比及び b) Cl/H ₂ O の分布	29
図 2.9	阿蘇カルデラ周辺における地下水試料のクラスタ毎の希土類元素組成	30
図 2.10	粘弾性地殻変動モデルの概略図	31
図 2.11	カルデラサイクルの概念図	36

略 語 表

ChRM	Characteristic Remanent Magnetization (特徴的な残留磁化成分)
DRE	Dense Rock Equivalent (噴出前の地下のマグマの状態に換算した体積)
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (エネルギー分散型 X 線分析装置)
GNSS	Global Navigation Satellite System (衛星測位システム)
ka	kilo annum (現代から千年前を表す単位)
LVZ	Low Velocity Zone (低速度領域)
Ma	Million annum (現代から百万年前を表す単位)
MT	Magnetotelluric (地磁気地電流)
REE	Rare Earth Element (希土類元素)
RSS	Residual Sum of Squares (残差平方和)
SEM	Scanning Electron Microscope (走査型電子顕微鏡)
TGSD	Total Grain Size Distribution (全粒径分布)
UNV	Uniform Viscosity (一様粘性)

用語の定義

イグニブライト	大規模火砕流。多くの場合給源火山から全方位・広範囲に流下し、大量の噴出物とその自重と長期間の熱保持能力によって溶結凝灰岩となる規模のものを指す。
エアガン	圧縮した空気を水中で一気に放出し、周りの水塊（海水や湖水など）を大きく振動（音の発振）させるための装置。この強力な音は水中を伝わって海底下（湖底下）に伝わり、地層の境界で跳ね返った音波を受振して地下構造を得る。
カルデラ	火山の噴火によって形成された鍋型の凹地形。一般的に直径 2 km 以上のものを指す。
観測アレイ	複数の計器による同時観測をするために、適切に空間配置された観測網。
巨大噴火	噴出量が 10 km ³ 以上の噴火。原子力規制委員会においては地下のマグマが一気に地上に噴出し、大量の火砕流によって広域的な地域に重大かつ深刻な災害を引き起こすような噴火で、かつ噴火規模として数十 km ³ 程度を超えるような噴火を指す。
苦鉄質	珪酸塩鉱物や岩石において、SiO ₂ 含有量の少ない性質。
珪長質	珪酸塩鉱物や岩石において、SiO ₂ 含有量の多い性質。
元素拡散法	結晶が晶出した際に形成される累帯構造（化学組成の不均質性）が、時間とともに元素拡散することを利用した手法。磁鉄鉱（元素拡散はきわめて速い）、斜長石（きわめて遅い）、輝石（両者の中間）のそれぞれの元素拡散の特徴を利用することで、マグマの生成過程を読み解くことが出来る。
高次元データ AI 統計解析	データ縮約次元やクラスタの数などのハイパーパラメータを選定・決定する等の解析の前処理の際に AI 技術を用いる統計解析手法。
古地磁気学的な調査手法	本報告書では、数年から数千年程度の時間スケールで生じる規模の磁場変動（地磁気永年変化）を利用した調査手法を指す。ユニット毎の古地磁気方位の差異に対して、過去数万年間の永年変化データからその最速の変化率を参照して、両者の間の時間間隙を見積もる。
地質温度・圧力計	特定の鉱物において、鉱物が晶出や相転移をする際の化学組成が温度と相関があることを利用し、鉱物の化学組成から鉱物晶出時

	の温度・圧力を推定する手法。輝石を用いる輝石温度計、鉄チタン鉱物を用いる鉄チタン鉱物温度計などがある。
地震波トモグラフィ	地震波の伝搬時間を用いて、地球内部の3次元速度構造を求める手法。
中央粒径	各粒径の重量比を細粒側ないし粗粒側から順に積算した際に、中央値である50 wt.%に到達するときの粒径。
大規模噴火	噴出量が0.1 km ³ 以上の噴火。原子力規制委員会においては噴出量が1 km ³ 以上の噴火を指す。
ネットワーク MT 法	メタリック通信回線を用いて長基線での電位差を計測する MT 観測方法。通常の MT 法観測に比べ、数 km～数十 km にも及ぶ長基線での観測が可能となるため、表層付近の不均質な成分の影響を取り除くことができ、また、波長の長い成分を観測できるため、探査領域が通常の観測方法に比べて深部までのデータを得ることができる。
粘弾性地殻変動モデル	観測される地表での膨張・収縮から、変動源の膨張・収縮を推定する際、弾性層だけではなく、粘弾性層の効果を取り込んだモデル。
放射非平衡法	放射壊変系列における放射性核種の半減期の差を利用して年代を測定する方法。鉱物等に放射性元素が取り込まれる際に分配が生じると、取り込まれた放射性元素と放射壊変で生成する娘核種との間で非平衡が生じる。この非平衡は半減期の約5倍の時間で放射平衡に達する。
メルト包有物	マグマから鉱物が成長する際、鉱物中に取り残されたマグマが結晶化せずにガラス化したもの。鉱物が割れずに残っている場合かつ固化前に発泡しなかった場合、ガラスは結晶成長時のマグマの状態を保持しているとみなせる。
茂木モデル	地殻を半無限の弾性体と仮定し、地殻変動（鉛直変位及び水平変位）から変動力源の場所を推定するモデル。なお当該モデルでは数学的な解を得るため、変動力源の半径は深さよりも小さくなると仮定している。
レシーバ関数	遠方で発生した地震波の水平動成分に対して、上下動成分を用いてボケを取り除いたもの。
¹⁴ C 年代測定法	動植物の遺骸に含まれる ¹⁴ C 量を用いて、動植物が死んだ年代を測定する手法。生きている動植物中の ¹⁴ C 量は一定であるが死後は約5730年の半減期で減少していく性質を利用し、約5万年前から現代までの年代測定が可能である。ただし、測定年代には実

年代との隔たりがあるため、1950 年を基準年とした暦年較正を行う必要がある。

- FT 年代測定法 ^{238}U が自発核分裂を起こした際に生じる、長さ $10\ \mu\text{m}$ 程度の線状損傷 (Fission Track; FT) の計数に基づく年代測定法。
- ITP-FT 年代測定法 火山ガラスの FT 年代の補正方法のひとつ。ガラス中では FT が常温下において短縮するフェーディング現象が起こるため、その補正 (Isothermal Plateau; ITP) を行う。
- K-Ar 年代測定法 ^{40}K の放射性崩壊を利用した放射年代測定法。半減期 12.5 億年の ^{40}K が電子捕獲により放射壊変した ^{40}Ar の量を求めることで、時間が算出される。
- TL 年代測定法 石英や長石が微弱な自然放射線や宇宙線を浴び、捕獲電子を蓄積することを利用した年代測定法のうち、試料を加熱したときの発光を測定する熱ルミネッセンス (Thermoluminescence; TL) を利用した手法。鉱物中に蓄えられる捕獲電子は、熱や光刺激を与えることにより再結合して発光する性質を利用する。
- U/Th 年代測定法 半減期約 5 万年の ^{238}U の娘核種 ^{230}U を質量分析計で測定することにより、現在からの経過時間から鉱物が晶出した年代を推定する方法。主にジルコン結晶 (^{238}U の含有量が高い) の結晶生成年代が測定されている。調査対象の国内のカルデラ火山はジルコン結晶を含まないため、本研究ではスイス連邦工科大学の協力を得てイルメナイトの結晶生成年代を推定した。

1. 序論

1.1 背景

平成 25 年 7 月に施行された「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（平成 25 年原子力規制委員会規則第 5 号）において、地震・津波以外の「外部からの衝撃による損傷の防止」（第六条）が明記された。その中で安全施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており、敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして、火山の影響を挙げている。火山影響を適切に評価する一例を示した「原子力発電所の火山影響評価ガイド」（以下「火山ガイド」という。）が作成されているが、その記載として、「現在の活動状況は巨大噴火が差し迫った状態ではないと評価」することが挙げられている¹。

近代において国内外での大規模噴火の観測事例がなく、噴火のメカニズムや前駆活動の有無、マグマプロセス等の知見が少ないこと、水没したカルデラ下の地下構造探査に関する知見が少ないこと等の状況から、具体的な判断指標を示すまでに至っていない。

さらに、噴火による施設への影響評価の一つの項目として火山灰の影響があるが、観測事例が少ないため、気中降下火砕物濃度は過去の噴火で堆積した火山灰を基に一定の仮定を与えて推定されている¹。加えて、降灰現象は定性的に火山灰量や粒径により凝集や再浮遊が起こればと考えられているが、定量的なデータが得られた報告はない。

前安全研究プロジェクトである「火山影響評価に係る科学的知見の整備」において、これまでに、過去に長期の休止期間があり大規模噴火を起こした火山の活動評価手法を整備するための知見、国内外の巨大噴火を起こした火山の噴火直前のマグマ溜まりの深度、巨大噴火を引き起こす源である巨大なマグマ溜まりの生成プロセスやマグマの蓄積に要する時間スケールについての知見及びマグマの蓄積深度の構造を探査する手法についての知見が蓄積されてきた。

過去に大規模な噴火を起こした火山の多くは長期間の休止状態にあり、火山活動に起因する地震活動や地表で発現する地殻変動等の諸現象が観測されている火山は限られているが、長期間の休止状態にある火山においても、過去の大規模噴火に至るマグマ活動と現在の火山の地下構造を詳細に把握することにより、過去から現在までの火山活動の長期的な評価を行うための知見が得られ、評価指標の策定に資する知見の蓄積が期待できる。

原子力規制委員会で求めている火山モニタリングは、「評価時からの状態の変化の検知により評価の根拠が維持されていることを確認することを目的」としており¹、原子炉安全専門審査会原子炉火山部会（以下「火山部会」という。）において報告書「火山モニタリングにおける『観測データに有意な変化があったと判断する目安』について」がとりまとめられたが、「『観測データに有意な変化があったと判断する目安』に該当するかどうか判断するための個々の監視項目及び確認事項のチェックリストについては、科学的知見の蓄積に伴い、今後見直すこともあること」が付記されている²。したがって、これまでに

得られた研究成果を踏まえつつ、低頻度の自然現象である巨大噴火のプロセスに関する知見の拡充を図ることが重要である。

1.2 目的

本安全研究プロジェクトでは、巨大噴火を起こした火山を対象に、過去の巨大噴火に至るまでの準備・開始プロセスについての知見を蓄積し、過去のカルデラ火山の長期的な活動を評価することに加え、マグマ・火山活動に関するデータを蓄積し、火山活動を捉える観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方を整理することを目的とする。

(1) 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究

地質調査やボーリング調査から過去の火山活動に関する噴火履歴を詳細に解析し、噴火進展プロセス等の火山の特性に関する知見を蓄積する。また、降灰時の火山灰の空間密度、凝集効果及び粒径に関する特性を地質調査や観測から詳細に解析し、降灰時のプロセス等に関する知見を蓄積する。

(2) 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究

過去に大規模な噴火（カルデラ形成噴火）をした火山が噴火に至るまでのマグマプロセスを解明するための岩石学的な調査として、マグマの温度・圧力条件や組成の変化からマグマの時空間変化を詳細に解析し、噴火の準備段階におけるマグマ状態の変化（深さ及び滞留時間）に関する知見を蓄積する。

(3) 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究

地震波トモグラフィ、ネットワーク MT 等の地球物理学的手法による地下構造調査及び深部流体の同位体分析等の地球化学的手法によるマグマの種別推定に関する調査・研究を実施し、カルデラ火山の観測に有効な探査手法に関する知見を蓄積する。また、それに資する水域を含むカルデラの地下構造及び地殻変動を観測する手法を確立する。さらには、地表で観測される地殻変動からマグマの状態変化を評価するためのシミュレーションモデルを構築する。

(4) 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討

上記の(1)～(3)の知見に基づいて、過去のカルデラ火山の長期的な活動を評価するとともに、観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方を検討する。

1.3 全体行程

本研究は平成 31 年度から令和 5 年度にかけて、大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究において、上記(1)～(4)を実施したものであり、得られた成果を本報告書にまとめ

る。

全体行程を図 1.1 に示す。なお(1)及び(2)のなかで洞爺カルデラ、十和田カルデラの一部、始良カルデラ、阿蘇カルデラ及び鬼界カルデラの調査研究に関しては国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託、十和田カルデラの一部の調査研究については国立大学法人東北大学との共同研究、阿寒カルデラの調査研究については国立大学法人茨城大学との共同研究、U/Th 法による年代測定は国立大学法人東京大学との共同研究、気中火山灰濃度観測の一部については国立大学法人京都大学及び国立研究開発法人産業技術総合研究所との共同研究で実施したものである。また、(3)については国立大学法人京都大学及び国立研究開発法人産業技術総合研究所に委託し、実施したものである。

実施内容	R1	R2	R3	R4	R5
(1)地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究					
a. 大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究					
b. 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測					
(2)岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究					
(3)地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究					
a. カルデラ火山の地下構造調査					
b. カルデラ火山の地球化学的調査					
c. 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査					
(4)観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討					

内作：
 共同研究：
 委託研究：

図 1.1 全体行程

Figure 1.1 Overall process.

2. 本論

2.1 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究

本節では、地質学的な調査・研究により過去に巨大噴火を起こした火山のカルデラ活動サイクルを含む長期的な活動履歴や巨大噴火の発生直前のプレカルデラ活動、噴火シーケンスについて調査・研究した結果を述べる。また、降灰量の推定のため降灰シミュレーションの入力パラメータ決定方法の提案、実際の噴火による降灰時の気中火山灰濃度の観測結果について述べる。

2.1.1 大規模噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究

(1) 噴火履歴に基づく巨大噴火準備過程に関する調査・研究

本項目のうち、U/Th 年代測定については令和 3 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立大学法人東京大学との共同研究による成果の一部、それ以外は平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託による成果をまとめたものである。

国内には過去に巨大噴火を起こした火山が、北海道、東北地方北部及び九州に点在している。本調査・研究では、前安全研究プロジェクトに引き続き、始良カルデラ、阿蘇カルデラ及び鬼界カルデラを対象とするとともに、新たに洞爺カルデラを対象とし、短期的なプレカルデラ活動（カルデラ形成噴火以前の活動）と長期的なカルデラサイクルについて述べる。

始良カルデラでは、約 30 ka のカルデラ形成噴火（始良入戸噴火：大隅降下軽石、妻屋火砕流、入戸イグニブライト）の約 3 万年前（つまり、約 6 万年前）から珪長質マグマを 6 回噴出している^{3,4}。具体的には、60 ka の岩戸噴火（降下軽石、イグニブライト）、36 ka の清水噴火（溶岩）、33 ka の牛根噴火（溶岩）と大塚噴火（降下軽石）、31-32 ka の深港噴火（火砕流、降下軽石）、31 ka の毛無野噴火（降下軽石）となっている。このうち、岩戸噴火（イグニブライト）、清水噴火（溶岩）及び入戸噴火（イグニブライト）について、U/Th 法による結晶生成年代測定を行った。その結果を表 2.1 にまとめて示す。岩戸噴火については、層序関係から推定された年代と整合する値（ $57.7 \pm 4.4 \mid 8.6 \text{ ka} (1\sigma \mid 2\sigma)$ ）が得られた⁸。入戸噴火については、噴火年代より古い値（ $36.2 \pm 2.6 \mid 5.0 \text{ ka} (1\sigma \mid 2\sigma)$ ）となった⁸。

阿蘇カルデラについては、Aso-1~Aso-4 まで 4 回のカルデラ形成噴火が確認されており、Aso-3 火砕流堆積物と Aso-4 火砕流堆積物の間に 37 層以上の降下テフラ堆積物が確認された^{9,10}。これらの噴出物は、スコリアか軽石の違い、また噴火の頻度や規模の特徴から Stage1-5 に区分され、Stage1-3（約 3 万年間）は 27 回の小規模な噴火活動を頻繁に繰り返し、Stage4（約 8 千年間）では比較的規模の大きな噴火（噴出量が最大 3 km³ DRE）を 14 回発生した。最後の Stage5（約 1 万年間）では、1 回の小規模な噴火が確認された。また、

これらの噴出物の岩質は、時間とともに苦鉄質から珪長質へと変化していることが確認された。したがって、Aso-4 噴火の準備過程としては、Aso-3 噴火の後、小規模な活動として苦鉄質マグマを噴出する期間から、頻度かつ規模も大きいデイサイトから流紋岩マグマを噴出する期間に移り、その後、静穏となる期間を経て、阿蘇カルデラの噴火史上、最大の Aso-4 カルデラ形成噴火を起こしたことが明らかになった。

鬼界カルデラでは、約 7300 年前に国内で最も新しいカルデラ形成噴火（鬼界アカホヤ噴火）が発生している。しかしながら、九州島南方の海域に位置し、カルデラの大半の領域が海没していることから、鬼界アカホヤ噴火以前の噴火史について十分な情報が得られていない。既往研究¹¹においては、鬼界アカホヤ噴火以前の火山活動として新しい順に、矢筈岳火山、7.3-8.3 ka (¹⁴C 年代)¹²の長浜溶岩流、140 ± 2 ka (K-Ar 年代)¹³の小アビ山火砕流、95 ka (石英斑晶の TL 年代、FT 年代及び他のテフラとの層位関係)¹³の長瀬火砕流（鬼界葛原噴火）、38 ± 14 万年前 (FT 年代)¹³もしくは 58 ± 8 万年前 (ITP-FT 年代)¹³の小瀬田火砕流が記載されている。本調査・研究においても年代測定を実施した結果、長浜溶岩からは 80 ± 50 ka (K-Ar 年代)、7.2 ± 4.6 ka (2σ) (U/Th 年代)、長瀬火砕流からは 94.2 ± 8.8 ka (2σ) (U/Th 年代) がそれぞれ得られ、概ね既往研究の年代値と整合している。

洞爺カルデラは 106 ka にカルデラ形成噴火が発生している。広域な地質調査、ボーリング調査等を行った結果、洞爺カルデラ噴火噴出物は Unit 1-6 に区分され、前半ステージ (Unit 1-3) の噴火後やや長い時間間隙を経て後半ステージ (Unit 4-6) の大規模火砕流噴火に至ったことが明らかになった。洞爺カルデラ噴火噴出物の総量は 170 km³ DRE と求められ、そのうち約 60% を大規模火砕流の Unit 5 が占める。また給源不明（現在の洞爺湖よりも南側）ではあるが先カルデラ活動として 120-125 ka (層序関係から推定)¹³の長流川火砕流が確認された。洞爺カルデラ形成噴火では、明瞭なプレカルデラ活動がなく、カルデラ形成噴火が発生したと考えられる。

(2) 巨大噴火進展過程に関する調査・研究

本項目のうち、洞爺及び始良カルデラについては平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託による成果、阿寒カルデラについては令和 3 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立大学法人茨城大学との共同研究による成果をまとめたものである。

前安全研究プロジェクトで調査した支笏カルデラ形成噴火において、古地磁気学的な調査手法から一連のカルデラ形成噴火の期間に明瞭な時間間隙を示唆する結果が得られた¹⁴。そこで、本調査・研究では、(1)で対象とした洞爺及び始良カルデラに加え、多数の噴火ユニットが認められている阿寒カルデラについて、カルデラ形成噴火時及びその前駆活動の噴出物について古地磁気学的な調査手法を用い、カルデラ形成噴火の進展過程に係る調査を行った。

多くの巨大噴火の例では、大規模なプリニー式噴火が開始し、その後火道の拡大に伴って大規模な火砕流を噴出している。始良カルデラの入戸噴火（約 30 ka）⁷では、大隅降下軽石（噴出量：27-31 km³ DRE）¹⁵、妻屋火砕流（噴出量：5.3 km³ DRE）¹⁶、入戸イグニブライト（噴出量：200-250 km³ DRE）^{4, 17}へと噴火現象が進展している。洞爺カルデラの洞爺噴火も同様の噴火現象の進展が認められる。古地磁気学的手法によりこれらの ChRM を求めた結果、始良入戸噴火では平均方位に顕著な差は認められなかった。洞爺噴火も同様の傾向であるが、こちらについては ChRM のばらつきが大きく、有意な差が認められる精度での結果は得られていない。他方、阿寒カルデラでは、150 ka から 1.7 Ma の間に大規模火砕流を伴う噴火が少なくとも 15 回発生していることが確認されており¹⁸、層序や岩石学的特徴により上位から Ak1～Ak17 に噴火ステージとして整理されている。この中の最も噴火規模の大きい Ak2 噴火（約 50 km³）¹⁹の降下火山灰と火砕流噴出物の ChRM を求めた結果、降下火山灰と火砕流噴出物の間に明瞭な時間間隙（数十～100 年以上）が認められた²⁰。

巨大噴火の進展過程は、従来、噴出物の産出状況から解釈されてきたような短期間（数時間～）であることが、本調査・研究でも追認されたが、古地磁気学的手法で識別可能な時間（数十～100 年以上）を要する事例が存在することが明らかとなった。

表 2.1 始良カルデラ形成噴火に至る火山活動年代

Table 2.1 Volcanic activity dating back to the Aira caldera-forming eruption.

噴火イベント名	既往年代値（手法）	U/Th 年代（イルメナイト）
岩戸	60 ka（層序関係から推定） ⁴⁵	57.7 ± 4.4 8.6 ka (1σ 2σ)* ⁸
清水	36 ka（K-Ar） ⁶	37.2 ± 3.3 6.5 ka (1σ 2σ)* ⁸
牛根	33 ka（K-Ar） ⁶	-
大塚	33 ka（ ¹⁴ C）* ^{3, 4}	-
深港	31-32 ka（ ¹⁴ C）* ^{3, 4}	-
毛無野	31 ka（ ¹⁴ C）* ^{3, 4}	-
始良入戸（イグニブ ライト）	30.009 ± 0.189 ka BP（ ¹⁴ C） ⁷	36.2 ± 2.6 5.0 ka (1σ 2σ)* ⁸

注) *は、本安全研究プロジェクトによって得られた値

2.1.2 降灰プロセス等に関する地質調査及び観測

火山ガイドでは、運用期間中に想定される火山影響として、サイトでの降下火砕物の堆積量と降灰時の気中火砕物濃度を推定・評価することを求めている¹。しかしながら、国内の原子力発電所は沿岸域に立地されており、浸食等により降下火砕物の堆積環境が保持されていないケースがある。このような場合、シミュレーションにより降下火砕物の堆積量が推定されている。シミュレーションでは、火山噴火の特性として噴出量、火山灰粒径、TGSD、噴煙柱高度等のパラメータを推定し入力するが、これらを推定する方法は十分には確立されていない。また、気中降下火砕物濃度については、噴火に伴う降灰現象を直接観測した事例が少なく、火山ガイドに記載されたサイトでの降灰時間を推定し想定される火山灰の堆積量を降灰時間で除することにより平均の気中降下火砕物濃度による評価を行っているのが現状である。

本章では、過去の降灰現象の推定のための地質調査手法と噴火における TGSD の推定手法の提案及び噴火時の気中降下火砕物濃度の観測結果について述べる。

(1) 過去の降灰現象の推定のための地質調査

本調査では、前安全研究プロジェクトに引き続き、古川・中川²¹を基に、北海道の樽前火山起源の降下火砕物である AD1739 年に噴出した Ta-a、AD1667 年に噴出した Ta-b を対象に地質調査を実施した。

火口から約 300 km までの範囲における地質調査の結果、山岳地域では降下火砕物の保存状態が極めて悪く、河岸段丘面、緩やかな丘陵地、後背湿地では残存していることが多かった。そして、既存の等層厚線図において層厚が 10 cm 程度とされている範囲であれば、多くの場所で認識することができた。一方、層厚が 5 cm 程度以下では、植生の影響等で土壌のコンタミネーションが多くなる傾向にあった。また、Ta-a については、近傍域を除くと、北海道駒ヶ岳起源の Ko-c2 (AD1694 年) の分布域と重なっており²²、かつ噴出時期が近しいため、特に遠方域では、両者の区別が難しい状況であった (図 2.1)。

次に、降下火砕物の特徴として、粒度分析の結果を図 2.2 に示す。Ta-a 及び Ta-b とともに一般的に考えられるように、火口から離れるにつれて中央粒径が小さくなるという傾向が大局的には認められる。しかしながら、詳細にみると、Ta-a では、火口から 200 km 付近で遠方より中央粒径が小さくなる結果を得た。この要因については、化学分析結果等も踏まえると、細粒子 (Ta-a 以外の噴出物若しくは土壌) のコンタミネーションが寄与していると解釈できるケースがいくつか認められた。また、火山灰サイズの粒子の凝集の可能性があると解釈できるケースも認められた。

以上のことから、過去の降灰層厚を推定するうえで、第一に調査地点がどのような堆積環境であったかを検討し解釈することが重要である。火山ガイドでは、「原子力発電所の敷地及びその周辺調査から求められる単位面積当たりの質量と同等の降下火砕物が降下する

ものとする。」と記載されていることから、試料採取、層厚の記載においては、産出状況を詳細に確認、記載することが不可欠である。

(2) 過去の噴火における TGSD 推定手法の提案

本研究では、TGSD の推定に資する等層厚線図を利用した 2 つの推定手法 (Method Ip、Method DIp) を考案し、その可用性について検証を行った。

Method Ip は等層厚線のコンターで区画した領域内の粒度分布を基に TGSD を求める方法、Method DIp はさらに火口からの距離も考慮した方法で、どちらも基本的には、Murrow et al.²⁴ や Parfitt²⁵ の手法と同様の考え方で TGSD を求めるものである。提案した 2 手法は、既存の等層厚線を用いるので、偏りのある調査点数でも意味のある領域を設定することができる点で従来法よりも優れていると考えられる。そこで、提案した両手法と既存のポロノイ法 (等層厚線を用いない推定手法) による比較をするため、降灰シミュレーションを用いて作成した仮想フィールドでこれらの手法の検証を実施した。その結果、抽出条件として、計算に用いるデータ数を厳しく (少なく) 設定した場合でも、いずれの推定手法でも、初期値 (中央粒径 0ϕ 、標準偏差 3ϕ) に対して、標準偏差は小さくなる (淘汰が良くなる) 傾向にあるが、中央粒径の中央値は 0ϕ 付近にあり、計算結果のばらつきもポロノイ法と比べて小さいことがわかった (図 2.3)。

さらに、提案した手法の実用性について確認するため、等層厚線図作成時のコンター形状及びコンター値の間隔 (コンターの取り方) で求めた TGSD 値 (基準 TGSD 値。図 2.4 の白丸) に対するばらつきを求めた。その結果、コンターの形状の変化に対して得られた TGSD 値は、概ね基準 TGSD 値のばらつきの範囲 (中央粒径 $-0.2-0.2\phi$ 、標準偏差 $1.8-2.3\phi$) に収まった一方、コンター値の間隔に対しては、層厚の小さい側のコンターが乏しいパターン (図 2.4 の Pc3 及び Pc4 に相当) において基準 TGSD 値のばらつきの範囲を逸脱した結果が得られた (図 2.4)。

以上の結果から、提案する両推定手法を使い分ける必要性はないが、層厚が小さいことを示すコンターが密に描かれている等層厚線図がある場合には、提案する両推定手法は従来のポロノイ法よりも有効な手法であることを示した。

(3) 降灰時の気中降下火砕物濃度と降灰現象の観測

本項目は令和元年度から令和 3 年度にかけて実施した国立大学法人京都大学及び国立研究開発法人産業技術総合研究所との共同研究による成果をまとめたものである。

本研究では前安全研究プロジェクトに引き続き、高頻度で噴火する桜島火山と諏訪之瀬島火山の火口近傍において、火山噴火による降灰時の降灰現象に関するデータ及び気中降下火砕物濃度を取得することを目的に、降灰開始から終了までに地表に堆積した火山灰の重量及び粒径分布並びに降灰時の粒径分布、粒子の落下速度及び降灰時に地表付近に浮遊する火山灰の濃度を観測した。

降灰時の粒径分布と落下速度は、光学式ディストロメーターParsivel2（以下「PS2」という。）を、地表付近（高さ約1 m）に浮遊する火山灰の濃度は、空気を一定流量で吸引する吸入型粉塵採取装置ACD-200 Bobcat（以下「Bobcat」という。）を用いた。地表に堆積した火山灰の重量及び粒径分布は、落下した火山灰を採取する容器（以下「Pail」という。）で回収し、粒径分布の測定は、Morphologi G3/G3Sを用いた粒子画像イメージング法により行った。Bobcatで回収された火山灰についてもMorphologi G3/G3Sにより測定した。

前安全研究プロジェクトでの観測結果と合わせて、23ケースの噴火時の降灰観測データが得られた。単位面積当たりの降灰量（ g/m^2 ）と気中降下火砕物濃度（ g/m^3 ）を、降灰時間とPS2で計測された平均の落下速度を合わせて表 2.2に示す。気中降下火砕物濃度は、Pailの降灰量から求めた単位表面積当たりの火山灰重量を降灰時間で除し、さらにPS2の観測データから得られた平均落下速度で除することで求めた。また、比較のため、Bobcatの観測データから得られた浮遊する火山灰の濃度を示した。

小規模な噴火であるため、気中火砕物濃度は 0.1 g/m^3 以下のケースが多かったが、降灰量が約 900 g/m^2 のケース（Case No. 22）で気中火砕物濃度が約 0.1 g/m^3 、降灰量が約 $8,000 \text{ g/m}^2$ のケース（Case No. 23）で気中火砕物濃度が約 1 g/m^3 となるデータが得られた。降灰し堆積した火山灰の中央粒径に比べて、PS2で観測された降灰時の火山灰の中央粒径が、全てのケースで大きくなった。降灰時の平均の落下速度は、噴火毎に異なっており、多くの場合1-2 m/sであるが、降灰時の中央粒径が大きいケースでは平均の落下速度も速くなることがわかった。

降灰時に観測されたデータから求められる粒径と堆積後の火山灰から得られる粒径の間に生じる差異（降灰時>堆積後）や降灰時の平均落下速度が2 m/s以上である観測事実は、細粒な火山灰が凝集して落下していることを示唆している。既往研究で実験的に求められた火山灰の落下速度は、0.1-1 mmの火山灰粒子で1-2 m/s、0.1 mm以下の火山灰粒子で0.1-0.5 m/sであることが報告されている²⁶。現行の火山ガイドに記載されている気中降下火砕物濃度の推定手法は、このような細粒な火山灰粒子の凝集を考慮せずに、堆積後の火山灰粒子から求められる粒径の火山灰粒子が同時に落下してくることを想定しているが、実際の降灰では、落下速度の遅い細粒な火山灰粒子も凝集し粒径の大きな粒子として振る舞うことで平均落下速度が速くなるため、気中降下火砕物濃度は低くなる。これらの結果は、火山ガイドの推定手法が保守的な気中降下火砕物濃度となることを示している。また、浮遊する火山灰の濃度については、No. 5と6のケースを除いて気中降下火砕物濃度と同じか、それ以下となることがわかった。したがって、降灰時に地表付近で浮遊している火山灰（降灰時の落下速度の遅い火山灰を含む）は、Bobcatの吸引流量と開口部面積に依存するものの、降灰量と比較してごく少量（1%未満）であると考えられる。

(4) まとめ

火山ガイドの降下火砕物による原子力発電所への影響評価では、降下火砕物の降灰量、

堆積速度、堆積期間、火山灰等の特性等の設定をすすとしている。本調査・研究では、地質調査により過去の火山噴火による降灰量の最適調査手法、降灰シミュレーションによる推定において、設定するTGSD値を推定する有効な手法がとりまとめられた。また、噴火による降灰現象を直接観測し降灰時の気中降下火砕物濃度が得られ、多くのケースで火山灰粒子が凝集して降灰していること、降灰時に落下速度の遅い細粒火山灰が浮遊する割合はごく僅かであることを示すデータが得られた。

表 2.2 降灰觀測結果

Table 2.2 Ash fall observation results.

Case No.	降灰時間	降灰重量	平均落下速度	氣中火山灰濃度	浮遊火山灰濃度	中央粒径	
						降灰時	堆積後
	sec	g/m ²	m/sec	g/m ³		mm	
1	300	6.1	1.3	0.01	0.01	0.5	0.3
2	660	39.2	1.3	0.05	0.02	0.5	0.5
3	60	2.4	1.5	0.03	-	0.5	0.2
4	240	33.9	2.0	0.07	-	0.5	0.5
5	1380	22.4	1.1	0.01	0.02	0.5	0.3
6	1140	35.0	1.3	0.02	0.06	0.5	0.3
7	300	11.5	1.7	0.02	0.01	0.5	0.3
8	360	57.0	1.1	0.14	0.07	0.5	0.3
9	600	79.7	1.5	0.09	0.04	0.5	0.5
10	540	68.8	1.3	0.1	0.04	0.8	0.5
11	1020	166.9	1.1	0.15	0.07	0.5	0.5
12	600	91.5	3.0	0.15	0.05	0.8	0.5
13	1140	17.4	1.3	0.01	0.01	0.5	0.3
14	660	74.3	2.2	0.05	-	0.5	0.3
15	960	7.6	2.2	0.0036	0.0031	0.5	0.5
16	120	13.9	4.0	0.03	0.03	1.0	0.7
17	480	17.4	2.2	0.02	0.02	0.5	0.3
18	480	20.4	1.5	0.03	0.01	0.5	0.2
19	600	51.4	1.7	0.05	0.02	0.5	0.3
20	1740	32.0	1.1	0.02	0.01	0.5	0.3
21	960	87.0	2.5	0.04	0.004	0.5	0.3
22	2940	909.0	2.5	0.12	0.02	0.5	0.3
23	3780	8074	2.2	0.97	-	0.5	0.3



図 2.1 降下火砕物の産出状況の例 (Ta-a)

Figure 2.1 Example of fallout pyroclastic production (Ta-a).

注) 写真左上の数値は樽前火山からの距離を示す。

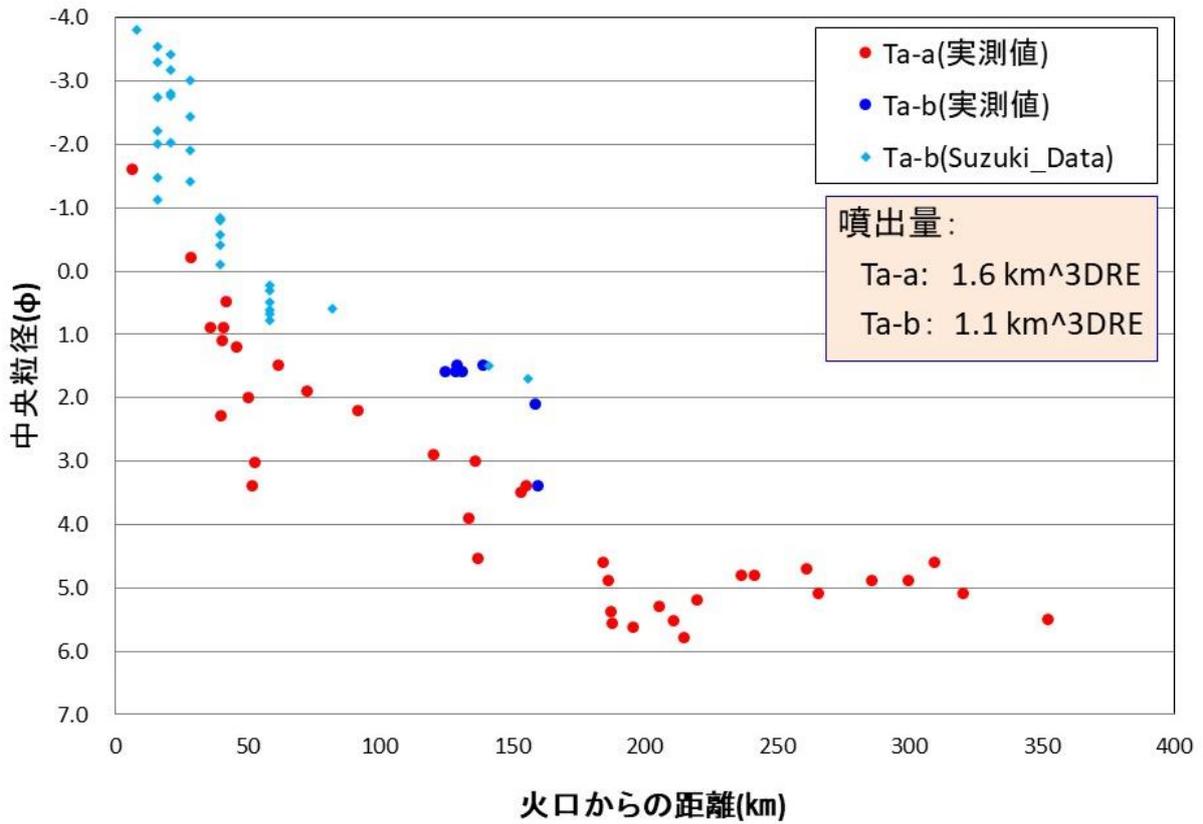


図 2.2 樽前火山噴出物の距離と中央粒径の関係図

Figure 2.2 Relationship between distance and median grain size of Tarumae volcanic ejecta.

注) 凡例中のSuzuki_Dataは鈴木ほか²³、噴出量は古川・中川²¹による。

ϕ は次の式で求められる。 $\phi = -\log_2(d)$ 、 d は粒子の直径 (mm)。

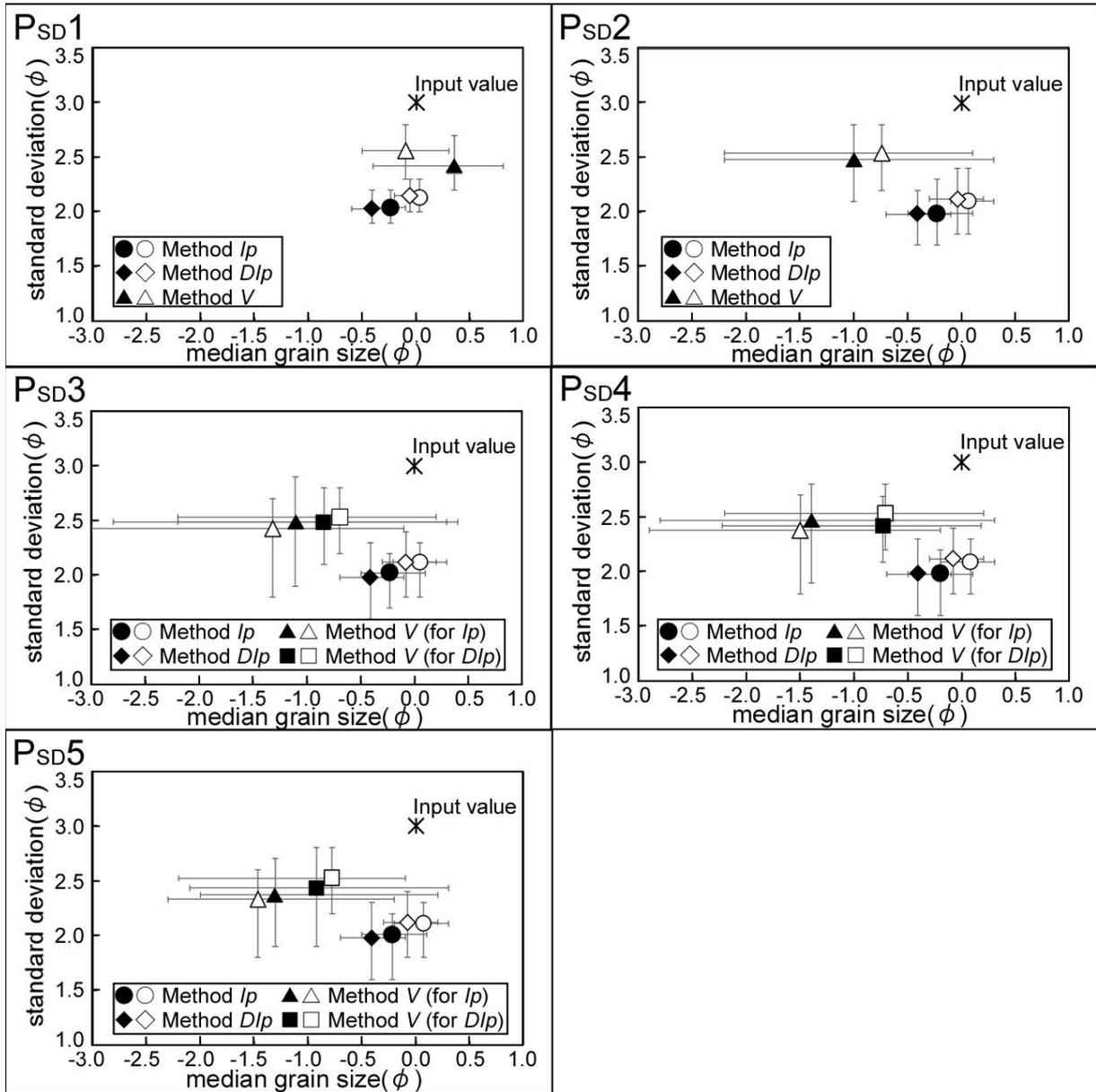


図 2.3 ボロノイ法 (Method V)、Method Ip及びMethod Dipを用いて計算した中央粒径と標準偏差

Figure 2.3 Median particle size and standard deviation calculated using Voronoi method (Method V), Method Ip and Method Dip.

注) ϕ は次の式で求められる。 $\phi = -\log_2(d)$ 、 d は粒子の直径 (mm)。Input value (初期値) は中央粒径0 ϕ 、標準偏差3 ϕ 。黒塗りシンボルは層厚10 cm以上の範囲内で計算、白抜きシンボルは層厚1 mm以上の範囲内で計算した結果。

PSD1 : 各エリア内を20 km²あたり1地点の密度となる地点数を抽出。

PSD2 : 各エリア内を100 km²あたり1地点の密度となる地点数を抽出。

PSD3 : 各エリア内で最大10地点を抽出。

PSD4 : 各エリア内で最大5地点を抽出。

PSD5 : 各エリア内で最大3地点を抽出。

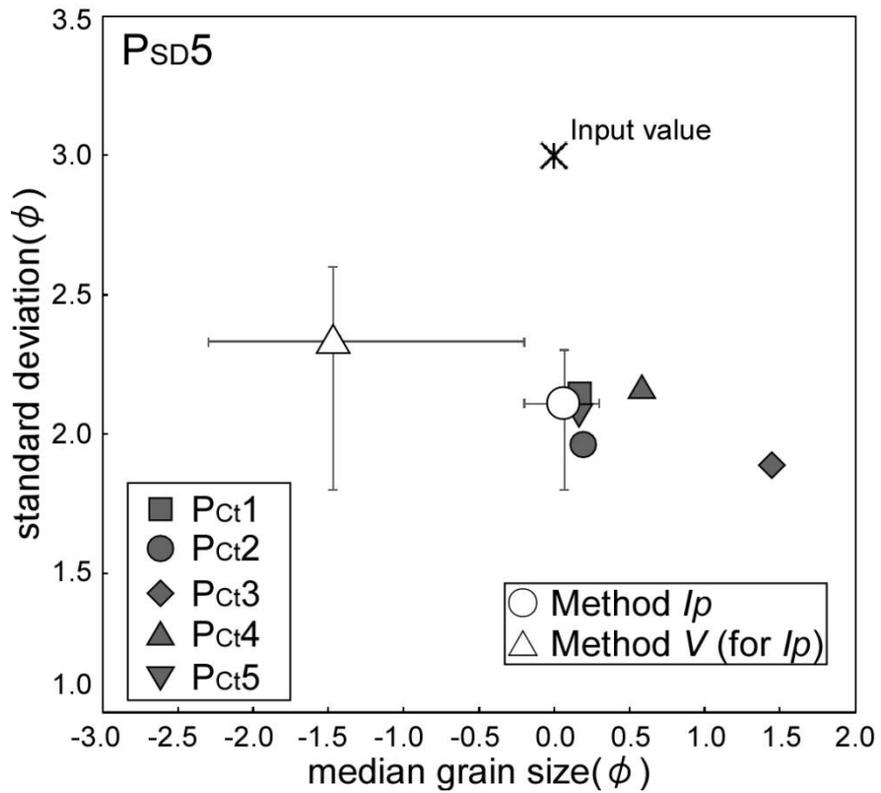


図 2.4 Method Ip を用いたコンターの選択に対する不確実性の検討

Figure 2.4 Uncertainty over contour selection using Method Ip.

注) Pct1、Pct2、Pct5では基準としたTGSD値のばらつきの範囲内に収まり、Pct3、Pct4ではボロノイ法 (Method V) と同様に基準としたTGSD値のばらつきの範囲外となる。 ϕ は次の式で求められる。 $\phi = -\log_2(d)$ 、 d は粒子の直径 (mm)。Input value (初期値) は中央粒径 0ϕ 、標準偏差 3ϕ 。抽出に用いたコンターの選択のパターンは次のとおり。Pct1 : 50 cm, 10 cm, 2 cm, 5 mm, 1 mm、Pct2 : 2 cm, 1 cm, 5 mm, 2 mm, 1 mm、Pct3 : 100 cm, 50 cm, 20cm, 10 cm, 1 mm、Pct4 : 20 cm, 10 cm, 5 cm, 2 cm, 1 mm、Pct5 : 10 cm, 2 cm, 1 cm, 5 mm, 1 mm。

2.2 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究

本章では、2.1.1 (1)の巨大噴火の長期的・短期的活動履歴の調査結果に基づく噴火推移の復元結果と合わせて、岩石学的手法を用いた噴出物の分析結果から過去の巨大噴火に至るマグマプロセスについて調査・研究を行い、マグマ供給系の時間・空間発達過程について述べる。

(1) 過去の巨大噴火におけるマグマ溜まりの物理化学条件

本項目については平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託による成果をまとめたものである。

過去に噴出したマグマ溜まりの温度、圧力条件については、一般に地質温度計及び地質圧力計を用いて推定を行う。本調査・研究では、これらの手法に加えて、マグマの物理化学条件を再現した高温・高圧実験を行うとともに、熱力学計算コード MELTS^{27,28,29,30} を用いて、マグマ溜まりの温度と圧力の取り得る範囲を推定した。

① 洞爺カルデラ

洞爺カルデラ噴出物は、噴出物の分析結果から、斑晶に乏しい主珪長質マグマ、斑晶に富む副珪長質マグマ及び苦鉄質マグマの 3 つに区分された。さらに、これらの噴出物の全岩 Sr, Nd, Pb 同位体比を求めた結果、主珪長質マグマと副珪長質マグマ・苦鉄質マグマの間では同位体比が異なっており、主珪長質マグマと副珪長質マグマを同じ苦鉄質マグマからの結晶分別作用で生成することは不可能であることから、主珪長質マグマは、地殻物質などの部分溶融によって生成されたと考えられる。これらのマグマ溜まりを形成する温度、圧力条件を推定した結果、主珪長質マグマの温度は 750 °C 程度、圧力は 1.5-2 kbar、副珪長質マグマの温度は 750-850 °C、圧力は 1-3 kb、苦鉄質マグマの温度は 800-1050 °C、圧力は 3-8 kbar であることが分かり、主体となった大規模な珪長質マグマ溜まりの深さは約 7-9 km と推定できた。

② 十和田カルデラ

既往研究³¹では、輝石温度計により噴火エピソード N (約 36 ka) 及び L (約 15.5 ka) のマグマの温度を、それぞれ 750-850 °C 及び約 900 °C と求めている。前安全研究プロジェクト (国立大学法人北海道大学との共同研究³²) では、噴火エピソード L の噴出物について輝石温度計及び鉄チタン鉱物温度計からマグマの温度条件を推定し、温度 830-850 °C の範囲であることを示した。また、熱力学計算コード MELTS を用い圧力条件を推定した結果、圧力 1.5-1.6 kbar (深度約 5 km) と推定されている³²。

本調査・研究では、高温高圧実験を行い、エピソード N のマグマ溜まりの温度、圧力条件が 840-875 °C、130-170 MPa、エピソード L では 825-850 °C、150-170 MPa であり (図 2.5)、いずれのマグマも深さ約 5-7 km に定置していたことを示した^{33,34}。

③ 阿蘇カルデラ

前安全研究プロジェクト（独立行政法人産業技術総合研究所及び国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託^{4, 35, 36, 37, 38}）では Aso-4 噴火の噴出物のメルト包有物中の水及び二酸化炭素の濃度の測定、熱力学計算コード MELTS を用いた分析の結果、マグマの圧力条件は<300 MPa（約 12 km 以深）^{38, 39}、鉍物温度計 ILMAT を用いた分析の結果、マグマの温度は 790-870 °Cと推定された³⁷。

本調査・研究では、Aso-4 噴火前後のマグマ供給系を含めてマグマの物理化学条件を推定した。その結果、阿蘇カルデラのマグマ供給系の鉛直方向の広がりには約 12 km 以上と推定され、前安全研究プロジェクトと同程度であるが、噴火直前のマグマは 4-8 km 未満（4 km/100 MPa の勾配を仮定）に存在したと考えられる^{40, 41}。

④ 始良カルデラ

前安全研究プロジェクト（独立行政法人産業技術総合研究所及び国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託^{4, 35, 36, 37, 38}）では、岩戸噴火～入戸噴火の SEM-EDS によるガラス組成分析により含水量を推定した結果、含水量はいずれも 4.5-7.5 wt.%となった。温度条件については、鉄チタン鉍物温度計から 735-800 °Cと推定された。さらに、得られた含水量、温度、斑晶量及び熱力学計算コード MELTS を用いて、マグマ溜まりの圧力条件を推定した結果、6 回の噴火ともマグマ溜まりの圧力条件は、75-100 MPa（深度 4-5 km）と推定された^{3, 4}。

本調査・研究では、入戸噴火前後の噴出物中の石英及び直方輝石中のメルト包有物の含水量を測定し、前安全研究プロジェクトの結果と合わせてカルデラ形成噴火前後のマグマ溜まりの温度、圧力条件を推定した。その結果、石英中のメルト包有物の含水量は、深港降下軽石：3.1-5.9 wt.%（プレカルデラ）、大隅降下軽石（カルデラ形成噴火）：3.8-6.6 wt.%、新島軽石（ポストカルデラ）：3.7-4.8 wt.%の含水量が得られた。入戸イグニブライトの流紋岩マグマ定置条件として全岩含水量 4.5 wt.%の場合 100-150 MPa（深度約 5-8 km に相当）の圧力条件が得られた。一方、プレカルデラ噴火の大塚降下軽石、深港降下軽石及び毛梨野降下軽石、カルデラ形成噴火の入戸イグニブライト、大隅降下軽石及び始良丹沢火山灰の直方輝石中のメルト包有物の含水量はいずれも 5.0-5.5 wt.%で、飽和含水量と仮定すると 136-163 MPa と求められた。Liu et al.⁴²の熱力学平衡条件による含水量-圧力コンパイルの近似曲線からマグマ貯留条件を復元すると岩戸噴火から入戸噴火までの流紋岩はいずれも 75-150 MPa（深度約 4-8 km に相当）の平衡圧力となり、含水量から推定した圧力とほぼ一致した。

⑤ 鬼界カルデラ

前安全研究プロジェクト（独立行政法人産業技術総合研究所及び国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託^{4, 35, 36, 37, 38}）では、鬼界カルデラの最新噴火である鬼界アカホヤ噴火のマグマ溜まりの温度・圧力条件を推定した。鬼界アカホヤ噴火では流紋岩マグマと安山岩マグマの 2 種類の異なるマグマを噴出しており、流紋岩マグマの温度は、輝石温度計

で 902 ± 15 °C、鉄チタン鉱物温度計で 874 ± 6 °C、圧力条件は 153 ± 50 MPa、安山岩マグマの温度は、輝石温度計で 975 ± 5 °C、圧力条件は 105 ± 25 MPa と推定された⁴。

本調査・研究では、約 630 ka の小瀬田火砕流及び約 95 ka の長瀬火砕流のマグマの温度・圧力条件を推定するとともに、鬼界アカホヤ噴火のマグマ溜まりの温度・圧力条件についても再度推定した。その結果、小瀬田火砕流の温度は 806 ± 22 °C（鉄チタン鉱物温度計）、圧力条件は 205 ± 62 MPa、長瀬火砕流の温度は 852 ± 24 °C、圧力条件は 153 ± 44 MPa と推定された。また、鬼界アカホヤ噴火については、流紋岩マグマの温度は 903 ± 15 °C（輝石温度計）及び 906 ± 5 °C（鉄チタン鉱物温度計）、圧力条件は 161 ± 46 MPa、安山岩マグマの温度は 975 ± 5 °C（輝石温度計）、圧力条件は 128 ± 42 MPa と推定され、主体となった大規模な流紋岩マグマ溜まりの深さは約 4-9 km と推定できた。

(2) マグマ蓄積時間スケール

本項目のうち、洞爺カルデラ、始良カルデラ及び鬼界カルデラについては平成31年度から令和5年度にかけて実施した国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託による成果、十和田カルデラについては令和元年度から令和3年度にかけて実施した国立大学法人東北大学との共同研究による成果、U/Th年代測定については令和3年度から令和5年度にかけて実施した国立大学法人東京大学との共同研究による成果をまとめたものである。

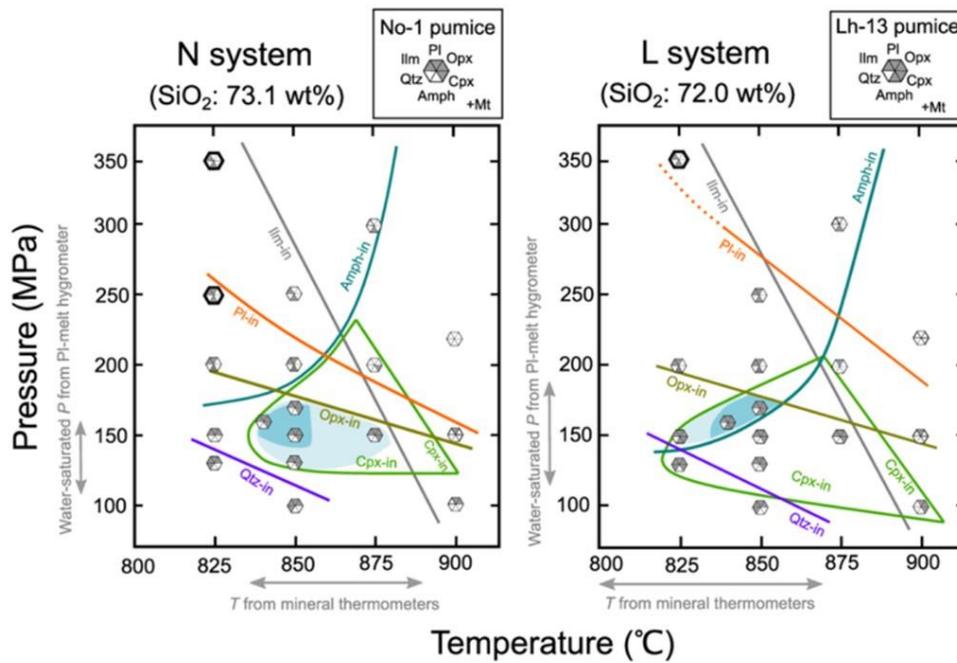
巨大噴火の噴火サイクルは長いもので数十万年（例えば、米国イエローストーンカルデラ）、短いものでは1万年程度（例えば、阿蘇カルデラのAso-2からAso-3の間）である。このような巨大噴火を起こすためには、数十～数百 km³の大量の珪長質マグマを2.2 (1)で示したような地殻の上部に新たに蓄積する必要がある。本項目では過去の巨大噴火のマグマの蓄積時間について、元素拡散法及び放射非平衡法により推定した。

洞爺カルデラ、始良カルデラ及び鬼界カルデラについては、直方輝石及び石英斑晶の累帯構造の元素拡散時間を利用した元素拡散法により分析を行った（図 2.6）。その結果、洞爺カルデラでは数十年～数百年程度、始良カルデラ及び鬼界カルデラでは千年スケールのマグマ蓄積時間が推定された。洞爺カルデラについては、噴出物に含まれる直方輝石及び石英の多くに累帯構造がなく、結晶生成時間内に累帯構造を形成するマグマ組成や温度の変化がなかった、あるいは、元素拡散が完了するに十分な時間スケールがあったと考えられる。さらに、洞爺カルデラ及び始良カルデラについては、放射非平衡法（U/Th法）による結晶生成年代を推定した。その結果、洞爺カルデラでは、噴出年代である 109 ± 3 ka⁴⁴に対して、ジルコン結晶の生成年代値 108.3 ± 1.6 ka (2 σ) が得られ⁸、噴出年代との差は、最大で 3.9 kyr となった。始良カルデラについては、噴出年代である約 30 ka に対して、イルメナイト結晶の生成年代値 36.2 ± 5.0 ka (2 σ) が得られ⁸、噴出年代との差は 1.2-11.2 kyr となった。

阿蘇カルデラについては、プレカルデラの活動履歴から、マグマ蓄積時間は 3.4-9.7 kyr の値が得られた。

十和田カルデラについては、前安全研究プロジェクト（国立研究開発法人日本原子力研

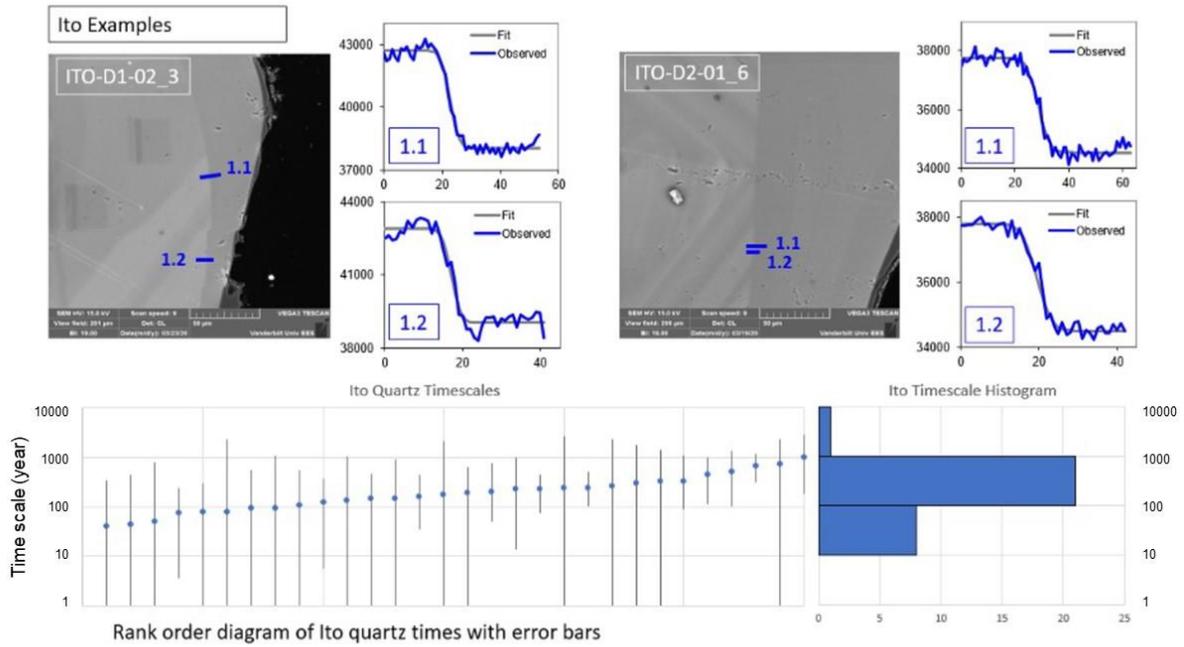
究開発機構及び国立大学法人北海道大学との共同研究)において石英斑晶を用いた元素拡散法により約50~100年という短い時間スケールが得られた³²。一方、カルデラ形成噴火であるエピソードL (15.5 ka)、その前兆噴火とされるエピソードM' (17.2 ka) 及びエピソードM (21.2 ka) 並びにカルデラ形成噴火であるエピソードN (36 ka) のマグマ組成を岩石学的に比較した結果、エピソードL及びM' 並びにエピソードM及びNがそれぞれ類似していることが明らかとなった⁴⁵。よってエピソードLのマグマはエピソードMの噴出後もしくはエピソードM' の噴火時には存在していたことになるので、そのマグマ蓄積時間スケールは1.7-5.7 kyrとなる。



出典) 国立研究開発法人産業技術総合研究所³³

図 2.5 相平衡実験で決定した十和田火山におけるカルデラ形成噴火噴出物の相関係
 Figure 2.5 Phase relations of caldera-forming eruptive ejecta at Towada Volcano determined by
 phase equilibrium experiments.

注) 左図はエピソードN、右図はエピソードLの相関係を示す。薄い青色の領域は鉱物
 組合せが概ね再現された温度圧力条件、濃い青色の領域は鉱物組合せに加え、鉱物組成や
 結晶量比が最もよく再現された条件を示す。



出典) 国立研究開発法人産業技術総合研究所⁴³

図 2.6 石英斑晶の累帯構造とその拡散プロファイル解析結果（始良カルデラ入戸火砕流堆積物の例）

Figure 2.6 Structure of the cumulative zone of quartz mottled crystals and results of diffusion profile analysis (example of the Aira Caldera Ito ignimbrite deposit).

注) 上段は観測されたプロファイル（青）とモデルによる最適フィットプロファイル（灰）の両方を示す拡散プロファイル。縦軸は信号強度、横軸は分析始点からの距離（ μm ）を示す。プロファイル図中の青数字はプロファイルの番号を示す。下段は得られたすべてのプロファイルから計算した拡散時間とその誤差範囲を示す。縦軸は対数目盛での年を示す。下右側のヒストグラムは、得られた拡散時間の頻度分布を示す。

2.3 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究

本章では、地球物理学的手法として、活動的なカルデラ火山の地下構造探査手法、地殻変動と地下構造及び火山活動との関係について述べるとともに、地球化学的手法として、カルデラ火山下に存在するマグマの種別を推定する手法の適用性について述べる。

2.3.1 カルデラ火山の地下構造調査

本調査では、始良カルデラ、阿蘇カルデラ及び十和田カルデラにおいて地下構造調査を行った。始良カルデラについては、自然地震を利用した地震波速度構造の探査を行うとともに、観測手法としての人工地震を利用した反射法探査の有効性を検討した。阿蘇カルデラ及び十和田カルデラについては、電磁場変動を利用した MT 法による比抵抗構造の探査を行った。

(1) 地震波速度構造の探査

本項目は、平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立大学法人京都大学への委託による成果をまとめたものである。

前安全研究プロジェクトに引き続き、本調査において始良カルデラ周辺に設置した臨時地震観測点での地震波観測を行った。そして、京都大学防災研究所火山活動研究センターが設置している定常地震観測点及び南九州一帯に設置されている防災科学技術研究所の Hi-net 観測点を加えた計 45 点で観測された地震波到達時を用いて、水平及び鉛直方向とも 5 km のグリッド間隔で、始良カルデラ下の深さ 15 km までを対象とした 3 次元地震波トモグラフィ解析を行った。インバージョン解析の結果、始良カルデラの中央部の深さ 15 km において、せん断波（以下「S 波」という。）速度が顕著に遅い領域 LS（S 波速度の設定閾値 2.45 km/s と比較して約 18-55%低下）が存在することが明らかになった（図 2.7）。S 波速度が 2.45 km/s 以下の領域 LS の体積を求めると約 255 km³ となり、S 波速度を 2.0 km/s とした場合でも領域 LS の体積は約 139 km³ となる。これらの低速度領域をマグマ溜まりとみなし、メルト量の推定を行った。圧縮波（以下「P 波」という。）及び S 波の速度低下率の組合せから、メルトの含有率は最大で約 7%と推定され、メルト量は領域 LS で約 10-18 km³（139-255 km³×7%）と見積もられた^{47,48}。

さらに、始良カルデラのより深部の S 波速度構造イメージを得るため、桜島島内の 15 観測点及び始良カルデラを取り囲む 25 観測点で記録された多数の遠地地震の P 波波形に対してレシーバ関数イメージングを行った。その結果、深さ 20-25 km に低速度層の上面（S 波速度不連続面）が存在することが示唆された。そのうえで、深度方向の速度値を詳細に求めるため、桜島島内の 7 観測点及び始良カルデラ周辺の 8 観測点におけるレシーバ関数インバージョンを行って到来方向ごとの 1 次元 S 波速度構造を推定し、それらをそれぞれの観測点でマッピングすることにより始良カルデラ周辺域の S 波速度の 3 次元分布を求めた。その結果、深さ 10 km から 35 km までの各深さの平均速度より 5 %程度低速度とな

る領域が始良カルデラ下を中心に広く分布していることがわかった。特に、始良カルデラ中央部の深さ 15 km を中心として当該深度での平均速度より 10 %程度低い顕著な低速度異常域が見られ、前述の領域 LS に相当すると考えられる。また、35 km 以深では低速度層は確認されなかった。

(2) 比抵抗構造の探査

本項目は、平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託による成果をまとめたものである。

本調査では、阿蘇カルデラにおいて、10 km 以深の地下構造を把握するため、長周期の電磁場信号を安定して観測できるネットワーク MT 法による探査及び 3 次元比抵抗構造解析を行った。また、十和田カルデラにおいて地下構造を把握するため、広帯域 MT 法による探査及び 3 次元比抵抗構造解析を行った。

阿蘇カルデラでは、前安全研究プロジェクトにおいて広帯域 MT 法探査により、概ね地下 15 km 付近までの高解像度での 3 次元比抵抗構造が得られ、地殻上部におけるマグマ供給系の経路を明らかにした^{4,49}。しかしながら、更に深部の地殻下部に至るまでの比抵抗構造を高い解像度で得るためには、より長周期の電磁場信号を適正な測点配置で取得する必要がある。そこで、阿蘇カルデラを覆う領域において、長周期の電磁場信号のデータの取得に有利な 25 エリアからなるネットワーク MT 法による観測網を構築して観測を実施した。その結果、地殻下部に至る高解像度の 3 次元比抵抗構造が得られ、阿蘇カルデラの下部地殻（約 15 km 以深）に顕著でかつ巨大なマグマ供給系の存在を示唆する地下構造は確認できなかった。

十和田カルデラでは、広帯域 MT 法を用いて地下構造探査を行った。本調査では、十和田湖周辺の陸上の 64 地点と十和田湖内の岩礁（御門石）の計 65 地点で広帯域 MT 法観測を実施した。その結果、求められた 3 次元比抵抗構造から、カルデラ中央やや西寄りに位置する円柱状の低比抵抗域と、カルデラ東縁から南方に延びる高比抵抗域が検出された。カルデラ内の低比抵抗域は、御倉半島と中山半島の間にある中湖を中心として広がっており、1 から数 $10 \Omega \cdot m$ 程度の低い比抵抗値を示す領域が、海拔下 0-5 km 程度の範囲にあることが明らかになった。これらの低比抵抗域は、周辺地域の土壌特性と低い比抵抗値から酸性熱水による影響、あるいはスメクタイト類の粘土鉱物を含むためと解釈される。以上の結果から、マグマ溜まりを示すような明確な構造は得られなかった。十和田カルデラはカルデラ地形の大部分を湖水で覆われているため、水中での MT 法探査が困難であることから陸域のみの探査であったが、地下構造を得ることが可能であることが示された。

(3) 観測手法としての人工地震を利用した反射法探査の有効性検討

本項目は、平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立大学法人京都大学への委託による成果をまとめたものである。

前安全研究プロジェクトにおいて、始良カルデラの地下 12 km 付近に S 波低速度異常領域 LS の存在が明らかになった。始良カルデラの周辺で観測されている広域な地殻変動はマグマ供給によるものと解釈されていることから、カルデラ下のマグマ活動の状態変化を捉える観測手法として人工地震を利用した反射法探査の有効性を検討するための基礎実験を行った^{48,50}。

基礎実験は、始良カルデラを挟んで配置したエアガン発振源及び孔中地震計を設置した観測アレイを用いて、5 年間で 2 回の発振を行い、孔中地震計で観測された同一発振源による人工地震波の観測波形についてデコンボリューションの処理を行った。その結果、2 回の発振において、同等の観測波形が得られ、従前の始良カルデラの地下構造調査で認識された低速度領域からの反射波についても再現良く検出されることを確認した。

(4) 始良カルデラで発生した地震の震源とメカニズムの推定

本項目は、平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立大学法人京都大学への委託による成果をまとめたものである。

2010 年以降に始良カルデラで発生したマグニチュード 1.0 以上の地震 302 イベント（北東部 105、南西部 116、南東部 77、他に国分周辺 4）について震源決定を行い、震源メカニズムを推定した。

地震は主に始良カルデラ北東部の深さ 1-5 km 付近、南西部の深さ 6-11 km 付近、南東部の深さ 4-7 km 付近の 3 カ所で発生していた。震源メカニズムは、北東部の地震では東西圧縮の横ずれ型、南西部の地震では東西引張の正断層型であり、Hidayati et al.⁵¹ が 1998-2005 年に発生した地震について報告した発生機構と同様であると考えられる。また、北東部の地震は、地震波トモグラフィ解析で見出されている始良カルデラ下の S 波低速度領域に隣接するが、この地域には若尊火山が存在しており、震源が浅い領域にあり東西圧縮型の震源メカニズムであることから、始良カルデラ地下でのマグマ蓄積にともなう体積増加に直接起因した地震活動ではないと考えられる。

2.3.2 カルデラ火山の地球化学的調査

本項目は、平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立研究開発法人産業技術総合研究所への委託による成果をまとめたものである。

本項では、国内のカルデラ火山周辺の地下水に含まれるマグマ揮発成分（C、Cl 及び H₂O）濃度を推定し、これらの元素比（C/Cl 及び Cl/H₂O）を求めるとともに、地下水中の希土類元素組成分析を行うことによりマグマ種別を推定する手法について述べる。

(1) C/Cl 比及び Cl/H₂O 比によるマグマ種別の推定

前安全研究プロジェクトにおいて、陸域のカルデラである阿蘇カルデラ周辺の地下水に含まれるマグマ揮発成分の C/Cl 比を指標としたマグマ種別の判別可能性が示唆された。

本調査では、 Cl/H_2O 比を指標に加えた、 C/Cl 比及び Cl/H_2O 比によるマグマ種別の推定法 ($C/Cl-Cl/H_2O$ 法) を九重火山のほか、湖底カルデラ火山である十和田カルデラ及び海底カルデラ火山である始良カルデラに適用し、手法の有効性・適用性の評価を行った。本手法はマグマ進化の過程を、玄武岩質マグマの発泡、玄武岩の結晶分化・地殻同化 (AFC) 過程及び珪長質マグマの固化と仮定したモデルにおいて、これらの過程において深部流体へ移行するマグマ起源物質の化学組成の範囲が大きく異なることを利用している。 $C/Cl-Cl/H_2O$ 法の適用の結果、珪長質マグマ活動と苦鉄質マグマ活動の時空間分布が異なっていると推定されている九重火山では、地下水のマグマ起源成分の C/Cl 比と Cl/H_2O 比がマグマが進化する各段階に見られる範囲内にあった^{10,41} (図 2.8)。また、苦鉄質マグマ活動の地域では、地下水中のマグマ起源 C/Cl 比が高く、珪長質マグマ活動の地域では、 C/Cl 比が珪長質マグマの発泡により放出された熱水であることを示す範囲にあった^{10,41}。一方、古い山体の地域では、珪長質マグマの固化により放出される熱水に特徴的な非常に低い C/Cl 比を示した^{10,41}。このように、地下水中のマグマ起源 C/Cl 比が過去の火山活動から推定されるマグマ種別とよく一致し、 $C/Cl-Cl/H_2O$ 法の有効性が示唆された。また、十和田カルデラでは、十和田湖周辺 7 地点で湖水の採水を行い、混入する熱水成分の推定値の C/Cl 比から、珪長質マグマの発泡に伴う熱水の存在が示唆されるとともに、カルデラ南西部には、苦鉄質マグマの脱ガスによる熱水が上昇していることが示唆された。さらに、始良カルデラでは、桜島及び若尊火山で苦鉄質マグマ活動による熱水成分が検出され、その他のカルデラ周辺においては、珪長質マグマ活動を示す C/Cl 比及び Cl/H_2O 比が得られた。

九重火山、十和田及び始良カルデラ (若尊火山) では、深部低周波地震 (20-30 km) を生じている地域があり深部流体の存在が示唆されること、同地域では遊離 CO_2 を含む地下水が存在すること及びこの地下水に $C/Cl-Cl/H_2O$ 法を適用した結果、苦鉄質マグマの発泡により放出された熱水が混入していることが示された。同地域の深部流体を苦鉄質マグマの上昇と仮定すると、本手法で推定された地下のマグマ種別と整合していると考えられる。

(2) 希土類元素組成によるマグマ種別の推定

前述の C/Cl 比及び Cl/H_2O 比のみでのマグマ種別の推定では、同一カルデラ内において、珪長質マグマと苦鉄質マグマの両方の存在を示唆する場合がある。そこで、本調査・研究では、地下水中の希土類元素組成パターンを組み合わせることでマグマ種別を推定する方法の適用性を調べた。

これまでに阿蘇カルデラ内で採取された試料を用いて、地下水中の希土類元素組成の分析を行い、定量値を得た。また、主溶存元素の多変量解析に基づいた分類からは、これら試料が地下水の異なる形成過程を反映していることが示された。これらを踏まえ、高次元データ AI 統計解析では、地下水の起源と循環に関わる独立なソース・プロセスとして、火山性成分の検出・識別に有効である可能性を示した^{33,52}。

既往研究において、花崗岩質マグマ (珪長質マグマ) と平衡にあるマグマ性流体の希土

類元素組成は、枯渇したマントル組成で規格化した際に Eu が他の希土類元素と比べて異常に低い値を示す（以下「Eu 負異常」という。）こと⁵³が報告されている。また、花崗岩類を起源とする堆積岩には Eu 負異常があるため、珪長質な物質との熱水反応（＝変質）を経た地下水には、Eu 負異常が現れる可能性が高いこと⁵⁴が報告されている。阿蘇カルデラにおいて、高次元データ AI 統計解析によって抽出された火山性流体の希土類元素組成パターン中に Eu 負異常が見られないことは、起源とするマグマが珪長質でないことを示唆している（図 2.9）。一方、本手法を始良カルデラに適用した結果、2 点の観測点で Eu 負異常が検出され、起源とするマグマが珪長質である可能性が示唆された。

2.3.3 火山性地殻変動とマグマ活動に関する調査

本項目は、平成 31 年度から令和 5 年度にかけて実施した国立大学法人京都大学への委託による成果をまとめたものである。

本項では、広域な地殻変動が観測されている始良カルデラにおける陸域及び海域の地殻変動観測データの取得と始良カルデラ周辺の長期的及び短期的な地殻変動の圧力源について述べる。

(1) シミュレーションモデルによる検討

始良カルデラ周辺の長期的な地殻変動を粘弾性地殻変動モデルにより解析し、地殻変動の観測値から地殻内のどの深さにどの程度のマグマが存在しているかを推定するとともに、変動源となる回転楕円体変動源の体積変化を推定した。

始良カルデラでの 1914 年噴火（桜島大正噴火）以降の地殻変動の観測データに対して、粘弾性地殻変動モデルを適用した結果、以下のことがわかった（図 2.10）。

- ① 回転楕円体変動源の深さは 11 km でその赤道半径は約 2 km
- ② 変動源へのマグマ供給が 1914 年噴火の約 50 年前から約 $0.009 \text{ km}^3/\text{年}$
- ③ 地殻の有効粘性が約 $5 \times 10^{18} \text{ Pa s}$
- ④ 1914 年噴火時に変動源が約 0.4 km^3 （噴出体積の約 1/4 倍）収縮

一方で、1975 年以降の測地データをより詳細に説明するためには、変動源の膨張率の時間変化を考える必要があることが示された^{55, 56}。そこで、回転楕円体変動源の深さと形状を 11 km、赤道半径 2 km として、1914 年噴火以降の始良カルデラ下の変動源へのマグマ供給率の時間変化を推定した。その結果、深さ 11 km の回転楕円体変動源が 6 つの異なる期間において以下の速度で膨張することがわかった。

- a 約 $6.9\text{-}9.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ （1914-1934 年）
- b 約 $9.1\text{-}16.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ （1934-1960 年）
- c 約 $1.6\text{-}3.8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ （1960-1968 年）
- d 約 $8.1\text{-}11.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ （1968-1976 年）
- e 約 $1.0\text{-}2.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ （1976-1997 年）

f 約 $5.8\text{-}9.4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{年}$ (1997-2007 年)

地殻の粘性率は約 $5 \times 10^{18} \text{ Pa s}$ 以上の範囲と推定されたが、最も低い地殻の粘性と最も高い地殻の粘性は、それぞれ期間 a と期間 e となった。また、期間 e に観測される地表沈降は、地殻の粘性率が約 10^{19} Pa s より小さいか大きいかによって、変動源の膨張か収縮のどちらかで説明できることがわかり、マグマ供給量と噴火活動の観測結果と関係づけて噴火ダイナミクスを理解できる可能性が示された^{48,57}。

次に、地震波による地下構造探査で確認された LVZ を三次元粘弾性有限要素モデルに導入して、LVZ モデルの挙動を UNV モデルの挙動と比較した結果、ある LVZ 構造に対して、変動源の瞬間的な収縮に応答する LVZ モデルの変位を最もよく再現する見かけの UNV モデルは、変動源の緩やかな膨張に対する LVZ モデルの変位を最もよく再現する見かけの UNV モデルより、低い粘性率を持つことがわかった。このような LVZ モデルの挙動により、始良カルデラでの測地観測も適切に説明されることが示唆されるが、実際、地球物理学的にイメージングされた低速度異常と同程度の空間的広がりを持つ LVZ がある場合、1914 年の噴火後のどの段階においても、測地データを非常に良く説明できることを確認した^{46,58}。

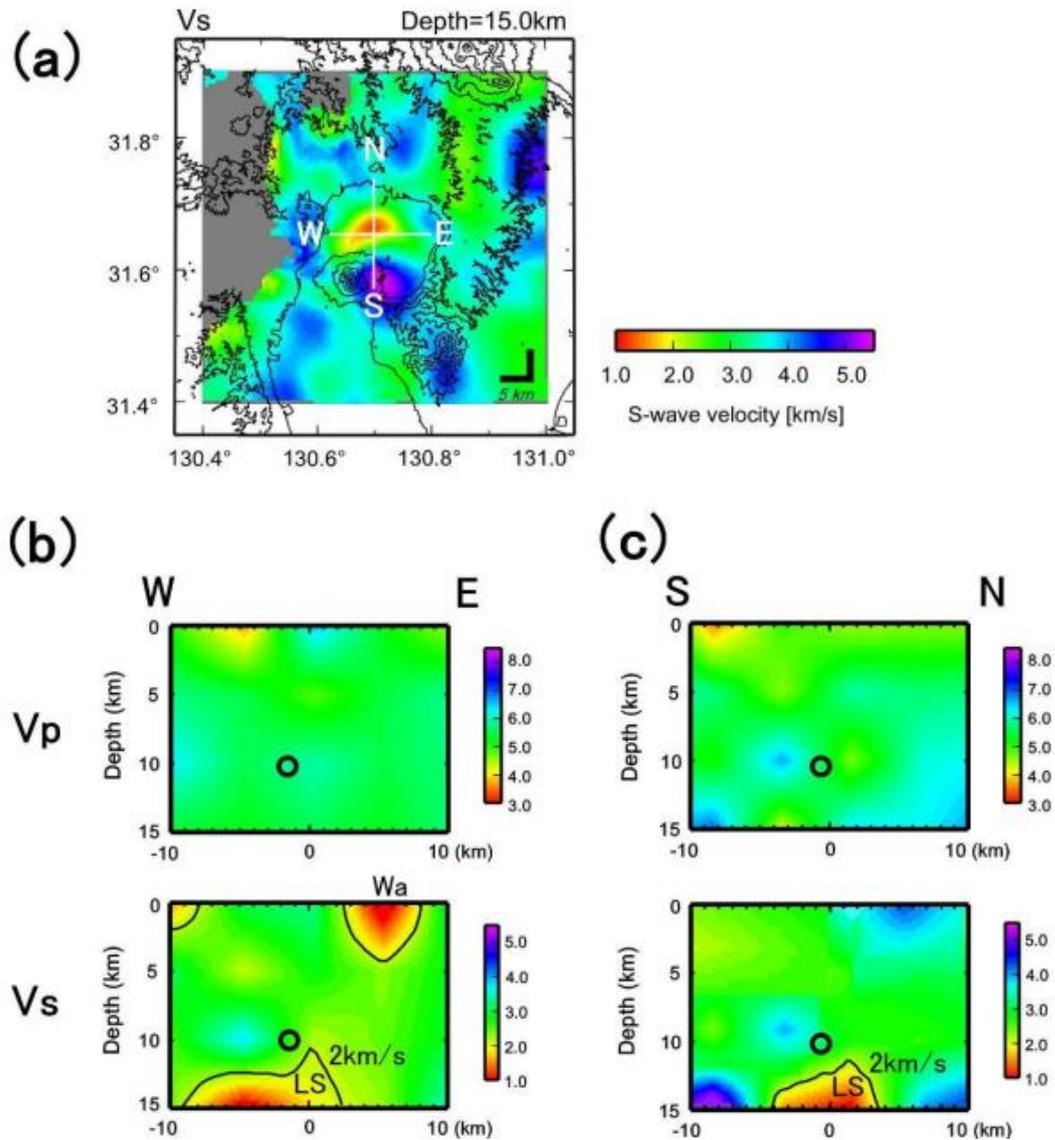
(2) 地殻変動観測

前安全研究プロジェクトで始良カルデラ周辺に設置した 10 点の GNSS 観測点及び本調査で新たに設置した 7 点に加え、南九州地域に配置されている京都大学及び国土地理院の観測点を含めた計 90 地点の GNSS 観測データ、水準測量による上下変位の観測値を用いて各地点の水平変位を求め、広域変動の補正を行ったうえで、始良カルデラ周辺の火山性地殻変動を抽出した。そして、得られた観測値を基に、地殻変動の圧力源解析を行った。

圧力源解析は、茂木モデルを用い、桜島火山下に小規模なマグマ溜まりが存在することが推定されていることから桜島南岳直下と始良カルデラ下の 2 か所に圧力源を置いて行った。その結果、始良カルデラ下の圧力源については、カルデラ中央部の深さ約 11 km に推定され、体積変化量として、2017 年からの 3 年間に $15.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、その後の 3 年間に $15.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ という値が得られた。

また、始良カルデラ中央部の地下には S 波反射面の存在（深さ 13.6 km）が指摘されていることから^{48,50}、この 13.6 km を上面の深さと固定し、形状の異なる回転楕円体を置いたときの観測された地表変位と整合する体積変化量を有限要素法により解析した。その結果、中心の深さを 15 km 付近にある圧力源を設けた水平方向に扁平な回転楕円体を置いた場合に観測された地表変位との RSS が最小となり、その体積変化量は $4.1\text{-}4.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ となり、茂木モデルで推定した体積変化量 ($5.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$) と同等であることがわかった。さらに、上記 2.3.1 (1)において見出された S 波低速度領域 LS の形状を模した多面体を始良カルデラ下の圧力源としたモデル（以下「LS モデル」という。）を用いて体積変化量を解析した。その結果、観測された地表変位を説明可能な体積変化量は $6.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ とな

り、茂木モデルで得られた体積変化量と比較すると、LS モデルから推定される圧力源の体積変化量は約 20%大きい結果となった。



出典) 京都大学防災研究所⁴⁶

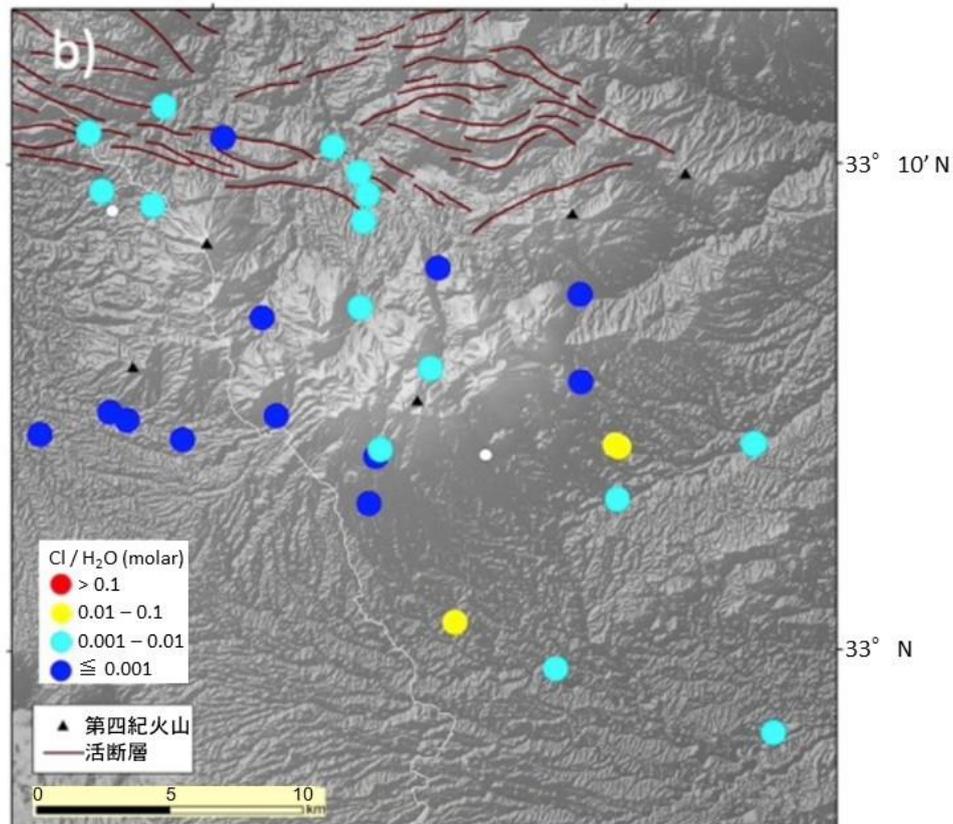
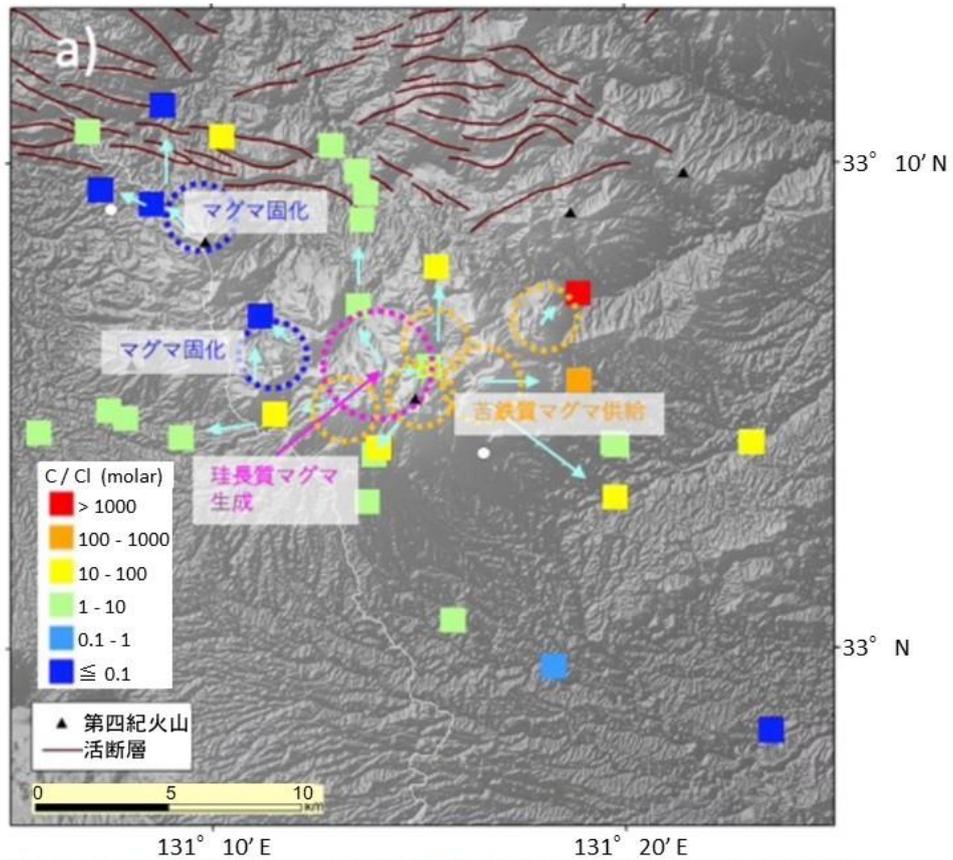
図 2.7 始良カルデラ中心付近を通る P 波速度及び S 波速度

Figure 2.7 P-wave velocity and S-wave velocity through the center of Aira caldera.

注) (a) 深さ 15 km での S 波速度イメージ。

(b) (a) の東西断面。

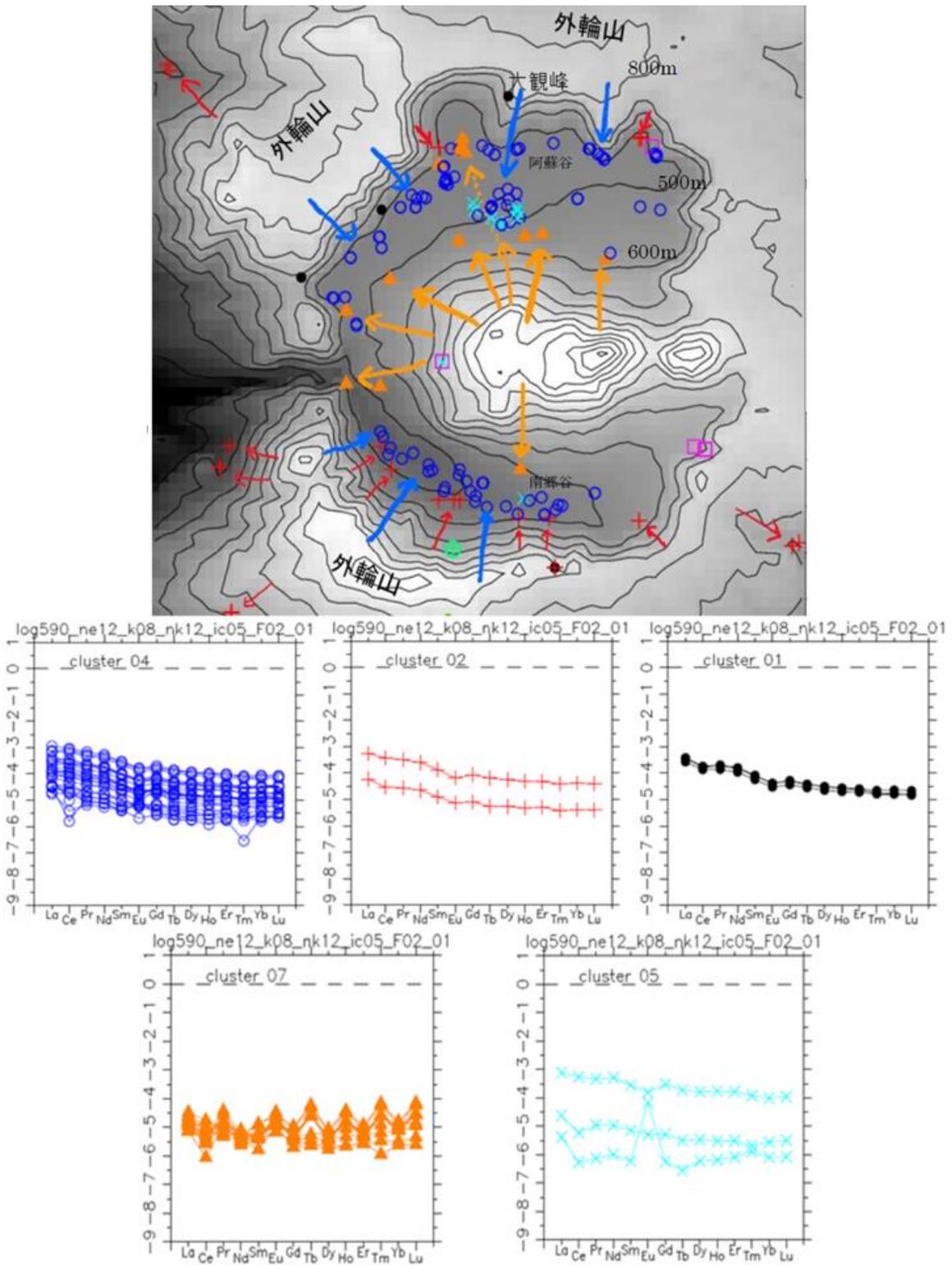
(c) (a) の南北断面。



出典) 国立研究開発法人産業技術総合研究所¹⁰

図 2.8 九重火山周辺の地下水の a) C/Cl 比及び b) Cl/H₂O の分布

Figure 2.8 Distribution of a) C/Cl ratio and b) Cl/H₂O in groundwater around Kuju volcano.



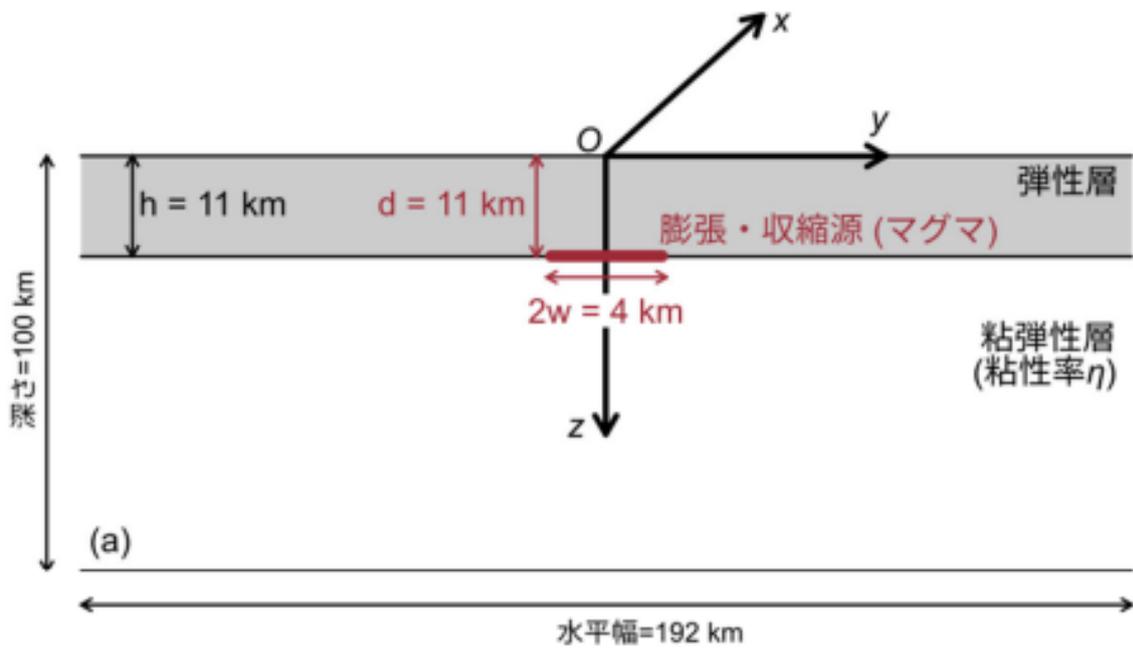
出典) 国立研究開発法人産業技術総合研究所³³

図 2.9 阿蘇カルデラ周辺における地下水試料のクラスタ毎の希土類元素組成

Figure 2.9 Cluster-specific rare earth element compositions of groundwater samples from the Aso Caldera area.

注) 上段のグラフは、天水系として抽出されたクラスタ毎の希土類元素組成を示す。

下段のグラフは、火山性として抽出されたクラスタ毎の希土類元素組成を示す。



出典) 京都大学防災研究所⁴⁸

図 2.10 粘弾性地殻変動モデルの概略図

Figure 2.10 Schematic of viscoelastic crustal deformation model.

2.4 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討

本節では、2.1～2.3 で述べた知見を基に、カルデラ火山の噴火の準備段階から噴火に至るまでの準備過程としてマグマプロセスのモデル・シナリオについて述べる。また、カルデラの火山性地殻変動と地下構造の関係を基礎とする地殻変動モデルに基づき、カルデラ火山の静穏な状態からの変化の有無を判断するための観測項目、噴火に至るシナリオと観測項目と合わせて現状評価の考え方を提案する。

(1) カルデラ噴火の準備過程とマグマプロセスのモデル・シナリオ

過去のカルデラ形成噴火を起こした国内の6火山のプレカルデラ～カルデラ形成噴火に至るまでの、噴火履歴や噴出物の組成変化についてまとめると以下のようになる。

- ・北海道及び東北地方北部に位置する、支笏カルデラ、洞爺カルデラ及び十和田カルデラはプレカルデラの活動度は低い（3回以下の噴火）ことを示した^{4, 36, 37, 38, 59, 60, 61}。
- ・九州に位置する、阿蘇カルデラ及び始良カルデラはプレカルデラの活動度が高く（4回以上の噴火を繰り返す）、阿蘇カルデラでは、カルデラ形成噴火に至る過程において苦鉄質から珪長質マグマへ変化するパターンを示した^{9, 10}。始良カルデラでは、珪長質マグマを噴出し続けるパターンを示した^{3, 4}。
- ・鬼界カルデラについては、鬼界アカホヤ噴火の直前に珪長質の溶岩を噴出している⁴³。

このように、巨大噴火を起こしたカルデラ火山でのマグマの化学組成や噴火推移は、カルデラ火山毎に特徴があり、これらの結果を説明し得る共通のメカニズムは明らかになっていない。しかしながら、活動度の高低が地理的な領域で異なる特徴を示唆していることは、マグマの蓄積過程において噴出に至る過剰圧力と地殻応力の関係が要因の一つとして影響していると考えられる^{59, 62}。

次に、過去にカルデラ形成噴火を起こしたマグマの蓄積深度と蓄積時間についてまとめると以下のようになる。

- ・カルデラ形成噴火を起こしたマグマ溜まりの上面深さ（推定されたマグマ蓄積深度の値で、最も浅い値を示した深さ）は約4-7kmであり、地殻浅部に蓄積していたことが明らかとなった。始良カルデラでは、プレカルデラ噴火のマグマもカルデラ形成噴火のマグマ蓄積深度と同程度であった。
- ・支笏カルデラ、洞爺カルデラ、十和田カルデラ、阿蘇カルデラ（Aso-4）、始良カルデラの形成噴火前の火山活動ではいずれの火山も、カルデラ噴火前に千年以上の休止期間がある。
- ・マグマの蓄積時間（大規模なマグマ溜まりを形成してから噴火に至るまでの最短時間）は百年～数千年程度となった。また、百年以下の短い時間を示したケースでは、得られた時間はマグマの蓄積時間ではなく、噴火直前のマグマの貫入等の状態変化が起こった時間であることを示唆している。

本報告書で定義している巨大噴火は、噴火に伴い大規模な陥没地形を形成している。このような陥没地形が形成されるメカニズムとして、巨大噴火をもたらすマグマ溜まりの急速な減圧^{10, 33, 41, 63, 64}や噴火の進展によるリング状の火道拡大^{65, 66}、カルデラ崩壊を起こすマグマ溜まりの減圧とマグマ溜まりの定置深度⁶⁷の関係等が指摘されている。これらは、噴火後のカルデラ地形の形成過程から巨大噴火をもたらすマグマ溜まりが地殻浅部に存在していたことを示唆している。本調査・研究で得られた、支笏カルデラ、洞爺カルデラ、十和田カルデラ（エピソードN、L）、阿蘇カルデラ（Aso-4）、始良カルデラ及び鬼界カルデラ（鬼界アカホヤ噴火）の火山噴出物の物質科学的な証拠もこのことを支持している。

カルデラ火山のマグマ蓄積プロセスについて、既往研究では、大量のマグマを蓄積するマグマ溜まりを形成するためには母岩を変形させて大量のマグマを蓄積するスペースを確保する必要があり、延性的な地殻構造や有効粘性の低い地殻の存在が必要であるとしている^{68, 69, 70}。また、マグマ溜まり成長速度の数値モデリング⁷¹では、マグマ溜まりが 10^4 - 10^2 km³/年の速度で非線形的に成長し、小規模であるが頻繁に噴出する時期から大規模で頻度の低い噴出へと発展することを示している。このことは、本調査・研究において得られたカルデラ噴火前に千年以上の休止期間があることや、物質科学的な調査から得られたマグマ蓄積（滞留）時間のスケールとも整合する。

本調査・研究の成果として巨大噴火のマグマプロセスのモデル・シナリオとして以下のようなことが提案できる。

- ・カルデラ噴火を経て次のカルデラ噴火へ向かうような輪廻カルデラに共通するマグマプロセスのモデルは、地殻浅部に大規模なマグマ溜まり（上面深さ約4-7 km）を形成する。このようなマグマ溜まりの形成には、最短でも数百～千年程度の時間スケールが必要となり、この間には噴火活動が低下する。しかし、この間に珪長質マグマを噴出する噴火を起こしても、カルデラ噴火の前兆であるか否かの判断は難しい。

(2) カルデラ火山モニタリング

令和2年3月6日の火山部会において、カルデラ火山のモニタリング項目が整理され、報告書「火山モニタリングにおける『観測データに有意な変化があったと判断する目安』について」が取りまとめられた。記載された平常時のモニタリング項目は、「①主な監視項目：状態変化を把握できるように連続的にデータ取得を行う項目」として、地球物理学及び地球化学的な観測である地震活動、地殻変動・地盤変動、火山ガス・熱活動が挙げられている²。また、「②その他の監視項目：状況に応じて情報収集やデータ取得を行う項目」として、噴出場所及び噴出物、噴火様式、地下構造が挙げられている²。

現在の始良カルデラにおいて、事業者が実施しているモニタリングは、地震活動と地殻変動を中心とした内容であり、地殻変動のデータから圧力源の体積変化量を観測時間で除した値をマグマ供給率とし、監視レベルの判断基準としている。

始良カルデラは、2.3.1 (1)、2.3.3 (1)～(2)で述べたようにカルデラの中心付近、深さ13.6

km を上面とする $139\text{-}255\text{ km}^3$ の地震波低速度領域が存在し、かつ 1914 年の桜島大正噴火以降、現在でもカルデラ周辺で広域な地殻変動が観測されている活動的なカルデラ火山である。始良カルデラ周辺で観測されている地殻変動から圧力源の深さと体積変化量を推定する茂木モデルと低速度領域の深さを固定して体積変化量を推定する圧力源を低速度領域とした LS モデルで得られた推定値を比較すると、茂木モデルは圧力源深さと体積変化量がともに約 20% 小さくなった。茂木モデルでは、山川⁷²を踏まえ $\alpha/D=0.1$ 以下（圧力源の半径 α 、圧力源の深さ D ）で良い近似値を与えるとしている。始良カルデラの低速度領域を圧力源とする場合、得られる解の精度が低くなることから、茂木モデルによる推定値と 20% 程度の差異が生じた可能性がある。一方、地震波低速度領域を圧力源ではなく低粘性領域とし、低粘性領域より浅い深さに圧力源（小規模なマグマ溜まりや地殻マグマ貫入）を置いた LVZ モデルでは長期的な地殻変動も含めて説明することができる(2.3.3(1)参照)。このように、静的な構造として捕らえられた低速度領域の存在が明らかになり単純な圧力源モデルからより複雑なモデルを考慮できるが、変動源の位置や体積変化等の動的な変化を地殻変動のみで解釈し続けることは難しい。2.3.1(3)で述べた人工地震を用いた反射法探査は、地下の地震波低速度領域の上面の地震波を捉えるとともに低速度領域内の物性変化を検知できる可能性がある。

本調査・研究の成果として、反射法探査は新たな観測項目となり得ると考えられる。一方、2.3.2 で述べたカルデラ周辺の地下水の化学組成を分析する手法についても、地下のマグマの状態変化（脱ガス）を検知する可能性がある。しかしながら、マグマ起源元素（C, Cl, H, O, REE）の識別や地下でのマグマ起源元素の獲得から地表へ到達するまでの複雑なプロセス、到達時間（滞留時間）の推定に不確実性が大きく、現時点では新たな観測項目としての適用は難しい。

(3) 現状評価の考え方

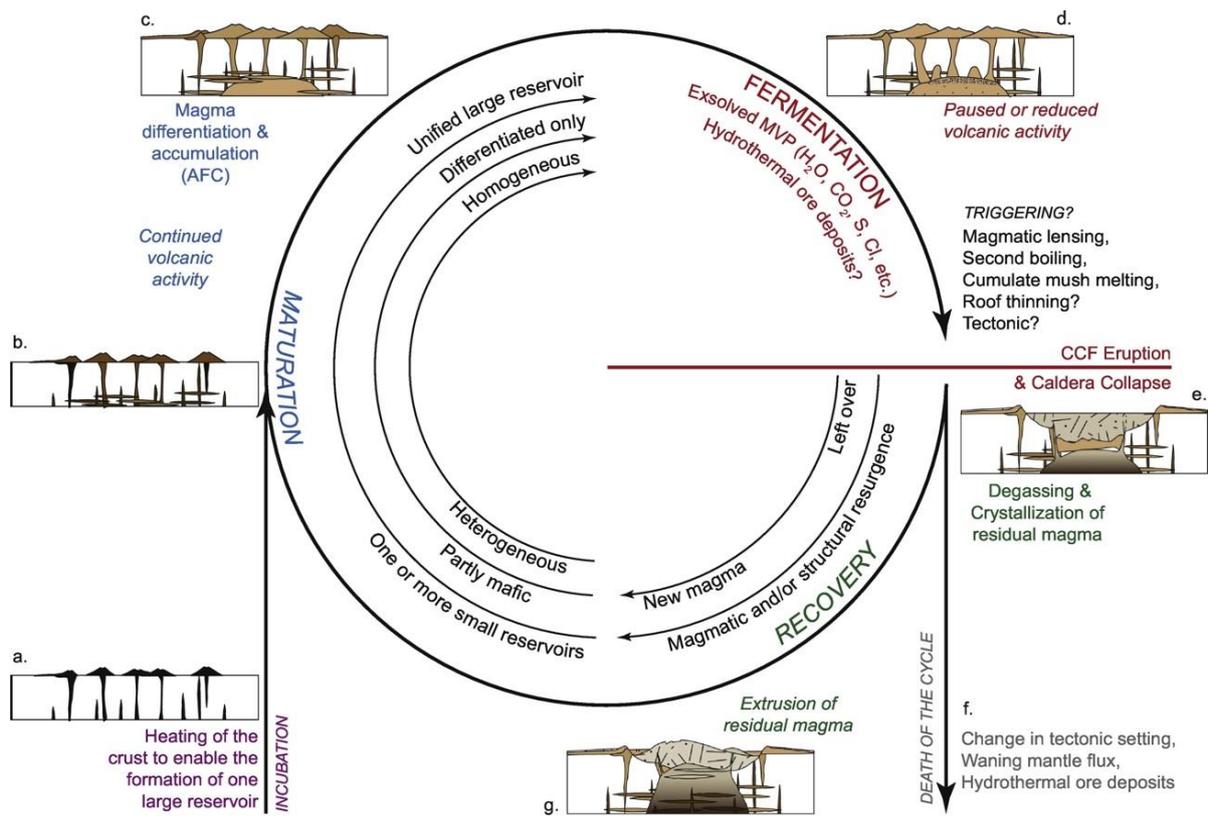
既往研究^{73,74}では、単輪廻カルデラと多輪廻カルデラに共通する大規模噴火に至るまでの一連のプロセス（以下、「カルデラサイクル」という。）をカルデラ陥没前の活動期の潜伏期（Incubation）と成熟期（Maturation）、カルデラ形成噴火の発酵期（Fermentation）、カルデラ陥没後の回復あるいは輪廻の停止の再生期（Recovery）とカルデラサイクルの終焉（Death of the cycle）に分けて、カルデラ下のマグマ系進化について述べている（図 2.11）。前安全研究プロジェクトと本調査・研究の対象としたカルデラ火山は、いずれもカルデラ内もしくはカルデラ縁においてポストカルデラ火山活動が継続している。これらの多くは最後のカルデラ噴火から 1 万年以上が経過しており、噴火後もマグマ供給系が継続していれば Bouvet et al.⁷⁴が定義する成熟期（Maturation）まで到達している可能性はあるが、ポストカルデラ火山の噴出物の化学組成や同位体比が異なることが示されており、マグマ供給系がカルデラ噴火の前後で異なっていることが示唆される（始良、阿蘇、十和田、洞爺、支笏）。従って、既往研究^{73,74}に基づけば、阿蘇カルデラ、十和田カルデラ、洞爺カルデラ

及び支笏カルデラについては、再生期 (Recovery) 又は潜伏期 (Incubation)、始良カルデラについては、既にカルデラ内にマグマの蓄積を示唆する領域や広域な地殻変動が観測されていることから、潜伏期 (Incubation) ~成熟期 (Maturation) と考えることができる。Keller et al.⁷⁵では、このモデルを Aso-3/4 間の噴出物で検証を試みて、現在の阿蘇カルデラの活動は、再生期 (Recovery) にあるとしている。さらに、Aspinall et al.⁷⁶は、本調査・研究の成果として公表された論文に記載された阿蘇のマグマ供給系や噴出物分布のデータを基に、阿蘇カルデラの最大規模の噴火である Aso-4 噴火と同規模の噴火が今後 100 年以内に発生する確率論的評価を Aso-4 噴火におけるマグマ噴出量と溜まりへのマグマ供給量を構造火山専門家による確率論的判断により試みている。

本調査・研究では、始良カルデラ、阿蘇カルデラ及び十和田カルデラの地下構造が得られ、いずれのカルデラ火山でもマグマの存在を示唆する領域があることがわかったが、2.4 (1)で述べたようにカルデラ噴火の準備過程を示すマグマのモデル・シナリオに該当する状態ではないと評価できる。また、阿蘇カルデラ及び十和田カルデラについては、カルデラ周辺領域にまで及ぶ広域な地殻変動が観測されておらず、静穏な状態であると判断される。一方、始良カルデラでは、広域な地殻変動が継続的に観測されており、この地殻変動は観測されている期間でも 100 年以上、更新世と完新世の海水準と噴火の記録等の地質学的な調査からは 1000 年以上継続していることが示唆されている^{77, 78, 79}。

本調査・研究の成果として、十和田カルデラのようなカルデラの大部分が水没したカルデラ火山であっても、陸上での広帯域 MT 法探査によって地震波による探査と比べて短期間で深さ 4-10 km 程度の地下構造が推定できた。カルデラ火山にはポストカルデラの火山活動によるマグマ供給系が存在することを考慮する必要があるが、始良カルデラで観測された体積の低比抵抗領域であれば検知できると考えられることから、地下構造の情報を取得することは可能である。

カルデラ火山の現状評価においては、地震活動や広域な地殻変動がない静穏な状態にあるカルデラ火山でこれらの変化が観測された場合は、第一に、カルデラの地下構造を得ることが必要と考えられることから、カルデラ火山の現状評価及びモニタリング評価の基礎となる情報として地下構造の調査を行うことが望ましい。



出典) Bouvet de Maisonneuve et al.⁷⁴

図 2.11 カルデラサイクルの概念図

Figure 2.11 Conceptual diagram of the caldera cycle.

3. 結論

3.1 成果の要点

本報告書は、平成 31 年度から令和 5 年度にかけて、大規模噴火プロセス等の知見の蓄積に係る研究において、2.1 地質学的手法による火山噴火準備及び進展過程に関する調査・研究、2.2 岩石学的手法によるマグマプロセスに関する調査・研究、2.3 地球物理及び地球化学的手法による観測手法に関する調査・研究、及び 2.1～2.3 の成果を基に 2.4 観測項目の検討及びそれらの関係についての考え方の検討を実施し、得られた成果を取りまとめた。なお、前述のとおり 2.1～2.3 の成果には国立研究開発法人産業技術総合研究所及び国立大学法人京都大学への委託、国立大学法人茨城大学、国立大学法人東北大学、国立大学法人東京大学、国立大学法人京都大学及び国立研究開発法人産業技術総合研究所との共同研究による成果が含まれる（詳細は各章を参照）。

本調査・研究の結論として、過去にカルデラ形成噴火を起こした国内の 6 火山の噴火に至る準備過程、過去のカルデラ火山活動の調査結果を基に作成した巨大噴火のマグマプロセスのモデル・シナリオ、カルデラ火山モニタリングの新たな観測項目となり得る手法及び現状評価の考え方を提案する。

(1) 国内の 6 火山の噴火に至る準備過程

- ・北海道及び東北地方北部に位置する支笏カルデラ、洞爺カルデラ及び十和田カルデラはプレカルデラの活動度は低い（3 回以下の噴火）ことを示した。
- ・九州に位置する、阿蘇カルデラ及び始良カルデラはプレカルデラの活動度が高く（4 回以上の噴火を繰り返す）、阿蘇カルデラでは、カルデラ形成噴火に至る過程において苦鉄質から珪長質マグマへ変化するパターンを示した。始良カルデラでは、珪長質マグマを噴出し続けるパターンを示した。
- ・鬼界カルデラについては、鬼界アカホヤ噴火の直前に珪長質の溶岩を噴出していることが明らかになった。
- ・カルデラ形成噴火を起こしたマグマ溜まりは上面深さが約 4-7 km であり、地殻浅部に蓄積していた。始良カルデラでは、プレカルデラ噴火のマグマもカルデラ形成噴火のマグマ蓄積深度と同程度であったことが明らかになった。
- ・支笏カルデラ、洞爺カルデラ、十和田カルデラ、阿蘇カルデラ（Aso-4）、始良カルデラの形成噴火前の火山活動ではいずれの火山も、カルデラ噴火前に千年以上の休止期間があることが明らかになった。
- ・マグマの蓄積時間（大規模なマグマ溜まりを形成してから噴火に至るまでの最短時間）は百年～数千年程度となった。また、百年以下の短い時間を示したケースでは、得られた時間はマグマの蓄積時間ではなく、噴火直前のマグマの貫入等の状態変化が起こった時間であることを示唆している。

(2) 巨大噴火のマグマプロセスのモデル・シナリオ

カルデラ噴火を経て次のカルデラ噴火へ向かうような輪廻カルデラに共通するマグマプロセスのモデルは、地殻浅部に大規模なマグマ溜まり（上面深さ約 4-7 km）を形成する。このようなマグマ溜まりの形成には、最短でも数百～千年程度の時間スケールが必要となり、この間には噴火活動が低下する。しかし、この間に珪長質マグマを噴出する噴火を起こしても、カルデラ噴火の前兆噴火であるか否かの判断は難しい。

(3) カルデラ火山モニタリングの新たな観測項目となり得る手法

カルデラ火山のモニタリングについては、事業者が実施しているモニタリングは、地震活動と地殻変動を中心とした内容であり、始良カルデラでは、地殻変動のデータから圧力源の体積変化量を観測時間で除した値をマグマ供給率とし、監視レベルの判断基準としている。始良カルデラでは、カルデラ下の地下構造が得られていることから、単純な圧力源モデルからより複雑モデルを考慮できるが、変動源の位置や体積変化等の動的な変化を地殻変動のみで解釈し続けることは難しい。人工地震を用いた反射法探査は、地下の地震波低速度領域の上面の地震波を捉えるとともに低速度領域内の物性変化を検知できる可能性があることから新たな観測項目となり得ると考えられる。

(4) カルデラ火山の現状評価の考え方

カルデラ火山の現状評価においては、地震活動や広域な地殻変動がない静穏な状態にあるカルデラ火山でこれらの変化が観測された場合は、第一に、カルデラの地下構造を得ることが必要と考えられる。この場合、広帯域 MT 法探査が有効であることを示した。カルデラ火山にはポストカルデラの火山活動によるマグマ供給系が存在することを考慮する必要があるが、阿蘇や始良カルデラで観測された体積の低比抵抗領域であれば検知できる。カルデラ火山の現状評価及びモニタリング評価の基礎となる情報として地下構造の調査を行うことが望ましい。

3.2 目的の達成状況

カルデラ火山の噴火に至るまでの準備過程として大規模噴火のマグマプロセスのモデル・シナリオ、カルデラ火山のモニタリングの新たな観測項目及びカルデラ火山の現状評価についてとりまとめられたことから、研究当初の目的が達成された。しかし、過去のカルデラ噴火のマグマプロセスとして得られたマグマ溜まりの定置深度や時間スケールについては、不確実性が大きく得られた値に一定程度の幅がある。また、反射法探査についても地震波の特徴に変化を示唆するデータが得られ、新たなモニタリング手法としての可能性が示されたが、より多くの観測データを取得する必要がある。現状評価については、カルデラ火山の状態をモデル・シナリオに当てはめることで、科学的なエビデンスに基づく評価が可能になった。モデル・シナリオにおけるマグマ溜まりの定置深度や時間スケール

を更新する研究成果を得ることにより、現状評価における不確実性をより低減できると期待される。

3.3 成果の公表等

3.3.1 原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

(1) その他

- 1 広井良美、安池由幸、「十和田火山八戸噴火のマグマ溜まりの温度圧力条件の推定」、日本火山学会 2019 年秋季大会講演予稿集、P042、令和元年
- 2 西来邦章、永田直己、広井良美、「等層厚線図を利用したテフラの初生粒径分布の推定手法の検討」、日本火山学会 2019 年秋季大会講演予稿集、P120、令和元年
- 3 佐藤勇揮、広井良美、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その 1 カルデラ形成期の岩石学的検討」、日本火山学会 2020 年秋季大会講演予稿集、O3-03、令和 2 年
- 4 広井良美、佐藤勇揮、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その 2 カルデラ形成期中規模噴火」、日本火山学会 2020 年秋季大会講演予稿集、O3-04、令和 2 年
- 5 佐藤勇揮、広井良美、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その 3 カルデラ形成期におけるマグマ溜まりの発達」、日本火山学会 2021 年秋季大会講演予稿集、B3-07、令和 3 年
- 6 広井良美、佐藤勇揮、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その 4 カルデラ形成噴火と先駆的小規模噴火」、日本火山学会 2021 年秋季大会講演予稿集、B3-08、令和 3 年
- 7 Nishiki, K., Sato, Y., Osaka, I., Hasegawa, T., Okada, M., "Investigation of volcano-stratigraphy of core samples from oriented drilling at the southeastern part of Akan caldera, eastern Hokkaido, Japan", Japan Geoscience Union Meeting 2022, SVC29-P01, 2022.
- 8 Yasuike, Y., Iguchi, M., Yamamoto, T., Furukawa, R., "In situ observation of volcanic ash concentrations at the Sakurajima volcano", Cities on Volcanoes 11, 2022.
- 9 広井良美、佐藤勇揮、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その 5 ポストカルデラ期噴出物の特徴」、日本火山学会 2022 年秋季大会講演予稿集、A2-14、令和 4 年
- 10 田中聡、羽生毅、藤江剛、山本揚二郎、小平秀一、宮崎隆、臼井洋一、上木賢太、Tejada, M.L.G.、宮町宏樹、佐藤勇輝、島伸和、鈴木桂子、金子克哉、松野哲男、清杉孝司、中岡礼奈、大塚宏徳、清水賢、荒木将允、長屋暁大、小畑拓実、ならびに課題提案者一同、「鬼界海底カルデラの総合調査」、海と地球のシンポジウム 2022、6-1、令和 4 年
- 11 原子力規制委員会原子力規制庁、国立大学法人東北大学大学院理学研究科、国立大学法人東北大学東北アジア研究センター、「共同研究成果報告書 カルデラ噴火及び非カルデラ噴火の比較研究」、p. 5、令和 5 年
- 12 長谷川健、楠稚枝、岡田誠、平塚葵、西来邦章、佐藤勇輝、「北海道東部、阿寒カルデラ噴出物ボーリングコア中に認められた Matuyama-Brunhes 逆転境界」、日本地球惑星

科学連合 2023 年大会、SGL22-P12、令和 5 年

- 13 Yasuike, Y., "Considerations on volcanic hazard assessment for safety evaluation of nuclear facilities in Japan", International conference "Continental Collision Zone Volcanism and Associated Hazards", 2023.
- 14 広井良美、佐藤勇揮、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その 6 噴火エピソード E 噴出物の特徴と噴火様式」、日本火山学会 2023 年秋季大会講演予稿集、A3-23、令和 5 年
- 15 佐藤勇揮、広井良美、宮本毅、「十和田火山におけるマグマ活動史：その 7 ポストカルデラ期の Sr 同位体比」、日本火山学会 2023 年秋季大会講演予稿集、P42、令和 5 年
- 16 羽生毅、宮崎隆、Tejada, M.L.G.、島伸和、金子克哉、中岡礼奈、清杉孝司、鈴木桂子、西来邦章、佐藤勇輝、「鬼界カルデラの海底カルデラ壁における掘削」、日本火山学会 2023 年秋季大会講演予稿集、B1-16、令和 5 年

3.3.2 委託先による公表

(1) 論文（査読付）

- 1 Matsushima, N., Utsugi, M., Takakura, S., Yamasaki, T., Hata, M., Hashimoto, T., Uyeshima, M., "Magmatic-hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, from electrical resistivity structures", *Earth Planets Space*, Vol. 72, No. 57, 2020. doi: 10.1186/s40623-020-01180-8
- 2 Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., "Viscoelastic crustal response to magma supply and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 531, 115981, 2020. doi: 10.1016/j.epsl.2019.115981
- 3 筒井智樹、為栗健、井口正人、「人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内 S 波地震反射面の推定」、*火山*、66 巻、2 号、pp. 71-81、令和 3 年
- 4 奥野充、井口正人、三好雅也、三浦大助、小林淳、橋本武志、大場武、佐藤鋭一、宝田晋治、「特集「噴火史研究と火山観測を統合した新たな火山像の確立」について」、*火山*、66 巻、2 号、pp. 65-70、令和 3 年
- 5 Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi M., "Variable inflation rate of a magmatic deformation source beneath Aira caldera after the 1914 eruption of Sakurajima volcano: Inferences from a linear Maxwell viscoelastic model constrained by geodetic data", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 421, 107446, 2022. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2021.107446
- 6 為栗健、八木原寛、筒井智樹、井口正人、「高分解能な 3 次元地震波速度構造解析による始良カルデラ下のイメージング」、*火山*、67 巻、1 号、pp. 69-76、令和 4 年
- 7 星住英夫、宮縁育夫、宮城磯治、下司信夫、宝田晋治、「阿蘇火山、阿蘇 4/3 降下テフラ群の層序と噴火活動史－阿蘇 4 火砕流噴火への準備過程－」、*火山*、67 巻、1 号、pp. 91-112、令和 4 年

- 8 Nakatani, T., Kudo, T., Suzuki T., "Experimental Constraints on Magma Storage Conditions of Two Caldera-Forming Eruptions at Towada Volcano, Japan", *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, Vol. 127, No. 5, e2021JB023665, 2022. doi: 10.1029/2021JB023665
- 9 大沢信二、網田和宏、三島壮智、齋藤圭、政本風人、高橋浩、森川徳敏、「火山性流体の沿岸海底流出検出のための地球化学曳航観測システムの試作と火山性 CO₂ 湧昇域における性能評価」、*日本水文科学会誌*、52 巻、3 号、pp. 107-121、令和 4 年
- 10 Miyagi, I., Hoshizumi, H., Suda, T., Saito, G., Miyabuchi, Y., Geshi, N., "Importance of long-term shallow degassing on the genesis of massive felsic magma: A case study of Aso caldera, Kyushu, Japan", *Journal of Petrology*, Vol. 64, No. 3, egad009, 2023. doi: 10.1093/petrology/egad009
- 11 Iwamori, H., Nakamura, H., Morikawa, N., Takahashi, M., Inamura, A., Haraguchi, S., Nishizawa, T., Sakata, S., "Groundwaters and deep-seated fluid circulation around Aso Volcano, Southwest Japan, revealed by multivariate statistical analysis of the geochemical data", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 433, 107739, 2023. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2022.107739
- 12 Hasegawa, T., Greve, A., Gravley, D. M., Kusu, C., Kaneda, Y., Shibata, S., Okada, M., Kó sik, S., Mochizuki, N., Turner G., "Paleomagnetic constraint of the age and duration of the Taupō Eruption, New Zealand", *Earth Planets Space*, Vol. 75, No. 23, 2023. doi: 10.1186/s40623-023-01779-7
- 13 Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Tameguri, T., Iguchi, M., "Influence of a low viscosity zone on the evolution of post-eruption deformation: A case study of the crustal deformation of Aira Caldera after the 1914 eruption of Sakurajima Volcano", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 441, 107871, 2023. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107871
- 14 Geshi, N., Miyagi, I., Saito, G., Conway, C. E., "Caldera collapse thresholds correlate with magma chamber dimensions", *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 7463, 2023. doi: 10.1038/s41598-023-34411-5

(2) その他

- 1 筒井智樹、「始良カルデラ直下で発生する地震波反射とその火山活動モニタリングへの応用について」、*国際火山噴火史情報研究集会*、令和 2 年
- 2 為栗健、「3 次元地震波速度構造から見た始良カルデラの構造」、*国際火山噴火史情報研究集会*、令和 2 年
- 3 Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., "Viscoelastic crustal deformation in the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano", 22nd EGU General Assembly, 2236, 2020.
- 4 為栗健、「人工地震・近地地震データを用いた始良カルデラの 3 次元地震波速度構造解

- 析」、京大防災研究所研究発表講演会、B07、令和2年
- 5 筒井智樹、「始良カルデラ沿岸で観測される人工地震記録の後続相について」、京大防災研究所研究発表講演会、B08、令和2年
 - 6 為栗健、「人工地震・近地地震データを用いた始良カルデラの3次元地震波速度構造」、日本地球惑星科学連合2020年大会、SVC45-12、令和2年
 - 7 長谷川健、望月伸竜、Darren, G.、楠稚枝、岡田誠、下司信夫、Szabolcs, K.、柴田翔平、金田泰明、「古地磁気方位と永年変化を利用した大規模カルデラ噴火の継続時間の推定：始良カルデラと Mamaku/Ohakuri ignimbrites の例」、日本地球惑星科学連合2020年大会、SVC47-12、令和2年
 - 8 中谷貴之、鈴木敏弘、工藤崇、潮田雅司、東宮昭彦、田中明子、「十和田火山カルデラ形成期のマグマだまりの物理化学条件に対する実験岩石学的制約:予備的結果の報告」、日本地球惑星科学連合2020年大会、SVC47-P06、令和2年
 - 9 畑真紀、上嶋誠、田中良和、橋本武志、吉村令慧、大志万直人、「メッシュ状に配置した Network-MT データによる阿蘇カルデラと雲仙火山の地下の3次元比抵抗分布(2)」、日本地球惑星科学連合2020年大会、SEM21-P01、令和2年
 - 10 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「GNSS 観測および水準測量による地盤変動からみた始良カルデラ下の圧力源の統合解析」、日本火山学会2020年度秋季大会、O1-02、令和2年
 - 11 松島喜雄、宇津木充、高倉伸一、山崎雅、畑真紀、橋本武志、上嶋誠、「阿蘇火山の3次元比抵抗構造の異なる手法による再解析」、日本火山学会2020年度秋季大会、O1-12、令和2年
 - 12 宮坂瑞穂、中川光弘、「大規模火砕流噴火における近傍相と遠方相との対比-洞爺カルデラ形成噴火の例-」、日本火山学会2020年度秋季大会、P04、令和2年
 - 13 松本恵子、山田伊久子、下司信夫、斎藤元治、「ラマン分光法による流紋岩質ガラスの含水量測定手法の開発」、日本火山学会2020年度秋季大会、P59、令和2年
 - 14 筒井智樹、為栗健、井口正人、「始良カルデラにおける地震波反射面の検出」、京都大学防災研究所年報. B、63巻、B号、pp. 118-135、令和2年
 - 15 筒井智樹、為栗健、味喜大介、井口正人、「始良カルデラにおける長期連続反射法基礎実験(序報)」、京都大学防災研究所研究発表講演会、P112、令和3年
 - 16 為栗健、八木原寛、井口正人、「始良カルデラの3次元地震波速度構造と震源再決定」、京都大学防災研究所研究発表講演会、A209、令和3年
 - 17 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「GNSS による始良カルデラ周辺の地盤変動観測」、京都大学防災研究所研究発表講演会、A210、令和3年
 - 18 筒井智樹、為栗健、味喜大介、井口正人、篠原雅尚、「始良カルデラにおける長期連続反射法基礎実験(序報)」、日本地球惑星科学連合2021年大会、SVC28-14、令和3年
 - 19 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「地盤変動観測と噴出物量推定に基づく最近10年間の

- 始良カルデラ下へのマグマ供給量推定」、日本地球惑星科学連合 2021 年大会、SVC28-P20、令和 3 年
- 20 中村仁美、森川徳敏、岩森光、坂田周平、常青、「阿蘇火山周辺における地下水の希土類元素組成が示す多様性」、日本地球惑星科学連合 2021 年大会、SVC29-01、令和 3 年
- 21 岩森光、中村仁美、森川徳敏、高橋正明、稲村明彦、原口悟、西澤達治、坂田周平、「阿蘇カルデラ周辺の地下水組成：多変量統計解析による独立変量と空間変化の検出」、日本地球惑星科学連合 2021 年大会、SVC29-P01、令和 3 年
- 22 畑真紀、上嶋誠、宇津木充、松島喜雄、田中良和、橋本武志、吉村令慧、大志万直人、「メッシュ状に配置した新旧 Network-MT ダイポールデータによる阿蘇カルデラ地下の 3 次元比抵抗分布」、日本地球惑星科学連合 2021 年大会、SEM14-03、令和 3 年
- 23 筒井智樹、為栗健、味喜大介、井口正人、「エアガン実験で見た始良カルデラ西部の地殻内地震反射面」、国際火山噴火史情報研究集会 2020-2、令和 3 年
- 24 筒井智樹、為栗健、味喜大介、井口正人、「始良カルデラ長期連続反射法探査基礎実験—陸上におけるエアガン震源運用の試み—」物理探査学会第 144 回学術講演会、19)、令和 3 年
- 25 畑真紀、上嶋誠、宇津木充、松島喜雄、田中良和、橋本武志、吉村令慧、大志万直人、「メッシュ状に配置した新旧 Network-MT ダイポールデータによる阿蘇カルデラ地下の 3 次元比抵抗分布(2)」、日本火山学会 2021 年度秋季大会、A3-19、令和 3 年
- 26 斎藤元治、宮城磯治、「鬼界葛原噴火マグマ溜りの温度・圧力条件：長瀬火砕流堆積物内軽石を用いた推定」、日本火山学会 2021 年度秋季大会、P2-40、令和 3 年
- 27 筒井智樹、為栗健、味喜大介、井口正人、篠原雅尚、「始良カルデラにおける長期連続反射法基礎実験」、京都大学防災研究所年報. B、64 巻、B 号、pp. 86-100、令和 3 年
- 28 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「GNSS 観測による始良カルデラ下へのマグマ供給率の推定」、京都大学防災研究所年報. B、64 巻、B 号、pp. 101-107、令和 3 年
- 29 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「始良カルデラ周辺の地盤変動に関する有限要素法モデルを用いた圧力源形状の検討」、京都大学防災研究所研究発表講演会、B104、令和 4 年
- 30 為栗健、筒井智樹、八木原寛、井口正人、「始良カルデラ下の S 波低速度異常」、京都大学防災研究所研究発表講演会、B106、令和 4 年
- 31 筒井智樹、味喜大介、井口正人、「海底地盤変動観測装置に関する測位実験」、京都大学防災研究所研究発表講演会、P31、令和 4 年
- 32 Nakatani, T., Kudo, T., Suzuki, T., "Experimental Constraints on Pre-eruption Magma Storage Conditions of Two Caldera-Forming Eruptions at Towada Volcano, Japan", Japan Geoscience Union Meeting 2022, SVC28-11, 2022.
- 33 Iwamori, H., Nakamura, H., Morikawa, N., Takahashi, M., Inamura, A., Haraguchi, S., Nishizawa, T., "Circulation of geofluids beneath the Aso caldera: constraints from multivariate

- statistical analysis of geochemical data of groundwaters", Japan Geoscience Union Meeting 2022, SVC33-05, 2022.
- 34 中村仁美、森川徳敏、岩森光、坂田周平、常青、「阿蘇カルデラにおける地下水の希土類元素組成」、日本地球惑星科学連合 2022 年大会、SVC33-08、令和 4 年
 - 35 筒井智樹、味喜大介、井口正人、「ピラー結合型海底地盤変動観測装置に関する測位実験」、日本地球惑星科学連合 2022 年大会、SVC34-P05、令和 4 年
 - 36 畑真紀、上嶋誠、宇津木充、松島喜雄、「メッシュ状に配置した Network-MT ダイポールデータによる阿蘇カルデラ地下の 3 次元比抵抗分布 (2)」、日本火山学会 2022 年度秋季大会、A1-11、令和 4 年
 - 37 為栗健、八木原寛、筒井智樹、井口正人、「始良カルデラ下の地震波速度構造のイメージング」、日本火山学会 2022 年度秋季大会、B2-0、令和 4 年
 - 38 筒井智樹、味喜大介、為栗健、井口正人、「繰り返し反射法探査の実装研究—エアガン近傍の振動記録を用いた反射波記録補正—」、日本火山学会 2022 年度秋季大会、B2-10、令和 4 年
 - 39 宮城磯治、宝田晋治、隅田まり、斉藤元治、「屈斜路 KP1 の噴火開始プロセス」、日本火山学会 2022 年度秋季大会、B3-08、令和 4 年
 - 40 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「有限要素法モデルを用いた始良カルデラ下の地盤変動圧力源形状の検討」、日本火山学会 2022 年度秋季大会、B3-11、令和 4 年
 - 41 為栗健、八木原寛、筒井智樹、井口正人、「始良カルデラ下の地震波速度構造のイメージング」、京都大学防災研究所年報. B、65 巻、B 号、pp. 35-41、令和 4 年
 - 42 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「始良カルデラ周辺の地盤変動に関する有限要素法モデルを用いた圧力源形状の検討」、京都大学防災研究所年報. B、65 巻、B 号、pp. 42-47、令和 4 年
 - 43 筒井智樹、味喜大介、井口正人、「ピラー直結型海底地盤変動観測装置に関する測位実験」、京都大学防災研究所年報. B、65 巻、B 号、pp. 48-66、令和 4 年
 - 44 高橋正明、稲村明彦、高橋浩、森川徳敏、東郷洋子、風早康平、佐藤努、半田宙子、仲間純子、中村有理、大和田道子、宮越昭暢、戸崎裕貴、富島康夫、大丸 純、清水日奈子、大沢信二、網田和宏、堀口桂香、柴田智郎、小泉尚嗣、川端訓代、安原正也、「熊本、阿蘇およびくじゅう地域の地下水および河川水の化学・同位体組成」、地質調査総合センター研究資料集、no. 739、令和 4 年
 - 45 畑真紀、上嶋誠、宇津木充、松島喜雄、「阿蘇カルデラ地下のマグマシステム -MT 法データおよび Network-MT 法データによる 3 次元比抵抗分布-」、2022 年度 Conductivity Anomaly 研究会、令和 4 年
 - 46 Hata, M., Uyeshima, M., Utsugi, M., Matsushima, N., "Magma Supply System beneath Aso Caldera, in the Southwest Japan Arc, based on 3-D Electrical Resistivity Models by Network-MT Data", IAVCEI 2023 Scientific Assembly, 2023.

- 47 Tsutsui, T., Miki, D., Iguchi, M., "Assessments of fundamental architecture of a pillar type seabed GNSS platform in Aira Caldera", IAVCEI 2023 Scientific Assembly, 2023.
- 48 筒井智樹、味喜大介、為栗健、井口正人、「繰り返しエアガン発振観測における振源波形変化とその除去の検証」、京都大学防災研究所研究発表講演会、A212、令和5年
- 49 畑真紀、上嶋誠、宇津木充、松島喜雄、「阿蘇カルデラのマグマシステム -MT法データによる3次元比抵抗モデル-」、京都大学防災研究所研究発表講演会、A215、令和5年
- 50 味喜大介、井口正人、筒井智樹、「始良カルデラ周辺の地盤変動に関する有限要素法モデルを用いた圧力源形状の検討(続報)」、京都大学防災研究所研究発表講演会、A216、令和5年
- 51 為栗健、八木原寛、筒井智樹、井口正人、「始良カルデラ下の地震波速度構造のイメージング」、日本地球惑星科学連合2023年大会、SVC31-07、令和5年
- 52 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「有限要素法を用いた始良カルデラ下の低S波速度領域の形状を模した圧力源による地盤変動の検討」、日本地球惑星科学連合2023年大会、SVC31-09、令和5年
- 53 筒井智樹、味喜大介、為栗健、井口正人、「繰り返しエアガン発振観測における振源波形変化とその除去の検証」、日本地球惑星科学連合2023年大会、SVC33-P09、令和5年
- 54 山崎雅、Sigmundsson, F., 為栗健、井口正人、「地球物理学的に推定された低粘性領域が支配する始良カルデラの粘弾性地殻変動」、日本地球惑星科学連合2023年大会、SGD02-03、令和5年
- 55 畑真紀、上嶋誠、宇津木充、松島喜雄、「阿蘇カルデラ地下のマグマシステム-MT法データおよびNetwork-MT法データによる3次元比抵抗分布(2)-」、日本地球惑星科学連合2023年大会、SEM14-12、令和5年
- 56 下司信夫、「大規模火砕噴火の準備・トリガー・推移とそのメカニズム」、日本地球惑星科学連合2023年大会、SCG57-01、令和5年
- 57 Geshi, N., Takarada, S., "Distribution maps of large-volume ignimbrites in Japan: visualization of scale and impact of catastrophic caldera-forming eruptions", The 28th IUGG General Assembly, 2023.
- 58 Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Tameguri, T., Iguchi, M., "The influence of geophysically inferred low viscosity zone on post-eruption viscoelastic deformation of Aira caldera", The 28th IUGG General Assembly, 2023.
- 59 Nakatani, T., Kudo, T., Suzuki, T., "Experimental Constraints on Magma Storage Conditions of Two Caldera-Forming Eruptions at Towada Volcano, Japan", Goldschmidt 2023, 2023.
- 60 Nakatani, T., "Experimental petrology constraints on magma storage conditions", Workshop on Caldera Volcanism in Japan and New Zealand, 2023.
- 61 Miyagi, I., "Basaltic magma degassing at Aso Volcano", Workshop on Caldera Volcanism in Japan and New Zealand, 2023.

- 62 中村仁美、森川徳敏、岩森光、坂田周平、「始良カルデラにおける地下水の希土類元素組成」、日本火山学会 2023 年度秋季大会、A1-12、令和 5 年
- 63 筒井智樹、味喜大介、井口正人、「始良カルデラにおける海底地盤変動観測装置」、日本火山学会 2023 年度秋季大会、A1-17、令和 5 年
- 64 宮城磯治、「カルデラ火山における火道内マグマ対流脱ガスの重要性」日本火山学会 2023 年度秋季大会、A3-17、令和 5 年
- 65 岩森光、中村仁美、森川徳敏、高橋正明、高橋浩、坂田周平、原口悟、「九州南部における地下水の組成統計解析と流体循環」、日本火山学会 2023 年度秋季大会、B1-09、令和 5 年
- 66 味喜大介、筒井智樹、井口正人、「始良カルデラ下の低 S 波速度領域の形状を模した圧力源による地盤変動モデルの検討」、日本火山学会 2023 年度秋季大会、B3-14、令和 5 年
- 67 中谷貴之、下司信夫、「始良カルデラで巨大噴火を起こした高シリカ流紋岩の相平衡実験」、日本火山学会 2023 年度秋季大会、P18、令和 5 年
- 68 宮城磯治、「斑晶ガラス包有物の水・CO₂ 分析に最適な試料は何か?」、日本火山学会 2023 年度秋季大会、P111、令和 5 年

3.4 成果の活用等

火山影響を適切に評価する一例を示した火山ガイドでは、設計対応不可能な火山事象を伴う火山活動の評価にあたって、過去に巨大噴火が発生した火山について、運用期間中における巨大噴火の可能性は十分に小さいと判断できる際の考え方の一つとして「現在の活動状況は巨大噴火が差し迫った状態ではない」ことを判断することが記載されている。近代において国内外での巨大噴火の観測事例がなく、噴火のメカニズムや前駆活動の有無、マグマプロセス等の知見が少ないこと、水没したカルデラ下の地下構造探査に関する知見が少ないこと等の状況から、具体的な判断指標は記載されていない。本調査・研究の結果、カルデラ火山の噴火に至るまでの準備過程としてのモデル・シナリオとカルデラ火山の地下構造を組み合わせた現状評価の考え方を提案できたことから、これらのモデル、シナリオ、考え方を火山ガイドにおける巨大噴火の評価指標に関する記載の更新に加え、モニタリング評価や火山活動の監視項目に関する記載の更新に資する。

また、火山ガイドの降下火砕物による原子力発電所への影響評価では、降下火砕物の降灰量、堆積速度、堆積期間及び火山灰等の特性などの設定をすすとしている。本調査・研究の結果を踏まえ、地質調査による降灰量の最適調査手法、降灰シミュレーションの入力パラメータである TGSD 値を推定する最適手法及び降灰時の気中降下火砕物濃度と降灰時の火山灰粒子の凝集や浮遊現象についてそれぞれ論文等にとりまとめる。また、降下火砕物の特性、各種パラメータの設定、降灰時の挙動に関する情報について、火山ガイドにおける気中降下火砕物濃度の推定手法に関する記載の更新に資する。

3.5 今後の課題等

本調査・研究において、カルデラ火山の噴火準備過程のモデル・シナリオ、火山活動を捉える新たな観測項目及びそれらの関係についての考え方を提案した。モデル・シナリオの作成において用いた、カルデラ噴火を起こすマグマ溜まりの定置深度や時間スケールには、鉱物の化学分析の過程で生じる誤差や鉱物毎にばらつきが存在する。このような誤差やばらつきについては、分析手法や分析する試料数を増やすことにより、低減することができる。また、新たな観測項目として挙げられた反射法探査についても、継続的な探査を行い、動的な変化の検出を確認することが重要である。本報告書のとりまとめに際して引用した文献では、カルデラ火山の噴火に至るメカニズムやカルデラサイクルのモデル、確率論的な評価の試み等が示され、本調査・研究開始当初と比較して国内外の研究成果が多く公表されてきている。一方で、これらの論文では、本調査・研究の成果が多く引用されていることも事実である。

前安全研究プロジェクトと合わせて過去に活動したカルデラ火山の研究としては、一定の成果が得られたことから、今後は、カルデラ火山モニタリングの課題へ取り組むとともに、これまで以上に他の研究機関との連携・協力を考慮した次期研究計画を考える必要がある。

参考文献一覧

- 1 原子力規制委員会、「原子力発電所の火山影響評価ガイド」、原規技発第13061910号原子力規制委員会決定、平成25年
- 2 原子炉安全専門審査会、原子炉火山部会、「火山モニタリングにおける「観測データに有意な変化があったと判断する目安」について報告書」、令和2年
- 3 Geshi, N., Yamada, I., Matsumoto, K., Nishihara, A., Miyagi, I., "Accumulation of rhyolite magma and triggers for a caldera-forming eruption of the Aira Caldera, Japan", *Bulletin of Volcanology*, Vol. 82, No. 44, 2020. doi: 10.1007/s00445-020-01384-6
- 4 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「平成30年度原子力規制庁委託成果報告書 火山影響評価に係る技術知見の整備」、p. 486、平成31年
- 5 長岡信治、奥野充、新井房夫、「10万～3万年前の始良カルデラ火山のテフラ層序と噴火史」、地質学雑誌、107巻、pp. 432-450、平成13年
- 6 周藤正史、石原和弘、巽好幸、「始良カルデラ地域の先カルデラ火山活動史：カルデラ北縁部加治木、国分地域及び南縁部牛根地域の溶岩流試料のK-Ar年代測定」、火山、45巻、1号、pp. 1-12、平成12年
- 7 Smith, V. C., Staff, R. A., Blockley, S. P. E., Ramsey, C. B., Nakagawa, T., Mark, D. F., Takemura, K., Danhara, T., "Identification and correlation of visible tephras in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan: chronostratigraphic markers for synchronising of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka", *Quaternary Science Reviews*, Vol. 67, pp. 121-137, 2013.
- 8 原子力規制委員会原子力規制庁、国立大学法人東京大学、「共同研究成果報告書 鉱物中の微小領域同位体比測定によるマグマプロセスの研究」、令和6年公表予定
- 9 星住英夫、宮縁育夫、宮城磯治、下司信夫、宝田晋治、「阿蘇火山、阿蘇 4/3降下テフラ群の層序と噴火活動史－阿蘇 4火砕流噴火への準備過程－」、火山、67巻、1号、pp. 91-112、令和4年
- 10 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「令和2年度原子力規制庁委託成果報告書 巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究」、p. 307、令和3年
- 11 小野晃司、曾屋龍典、細野武男、「薩摩硫黄島地域の地質」、地域地質研究報告（5万分の1図幅）、地質調査所、昭和57年
- 12 前野深、中川光弘、松本亜希子、「鬼界カルデラ長浜溶岩の掘削と噴火年代推定」、日本火山学会2019年秋季大会講演予稿集、A3-18、令和元年
- 13 町田洋、新井房夫、「新編火山灰アトラス－日本列島とその周辺」、東京大学出版会、平成15年
- 14 国立大学法人熊本大学、「平成28年度原子力規制庁委託成果報告書 大規模噴火の相対的時間推移に関する古地磁気学的研究」、p. 22、平成29年
- 15 Geshi, N., Miyabuchi, Y., "Conduit enlargement during the precursory Plinian eruption of

- Aira Caldera, Japan", *Bulletin of Volcanology*, Vol. 78, No. 63, 2016. doi: 10.1007/s00445-016-1057-9
- 16 上野龍之、「入戸火砕流堆積物に認められる石質岩片濃集部の特徴と形成機構」、*日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要*、42巻、pp. 129-147、平成19年
 - 17 宝田晋治、西原歩、星住英夫、山崎雅、金田泰明、下司信夫、「始良カルデラ入戸火砕流堆積物分布図」、*大規模火砕流分布図*, No. 1、産総研地質調査総合センター、令和4年
 - 18 長谷川健、中川光弘、「北海道東部、阿寒カルデラ周辺の前—中期更新世火砕堆積物の層序」、*地質学雑誌*、113巻、2号、pp. 53-72、平成19年
 - 19 Hasegawa, T., Nakagawa, M., "Large scale explosive eruptions of Akan volcano, eastern Hokkaido, Japan: A geological and petrological case study for establishing tephrostratigraphy and -chronology around a caldera cluster", *Quaternary International*, Vol. 397, pp. 39-51, 2016.
 - 20 原子力規制委員会原子力規制庁、国立大学法人茨城大学、国立研究開発法人海洋研究開発機構、「共同研究成果報告書 大規模噴火現象の時間進展プロセスに関する研究」、令和6年公表予定
 - 21 古川竜太、中川光弘、「樽前火山地質図」、*火山地質図15*、地質調査総合センター、平成22年
 - 22 古川竜太、吉本充宏、山縣耕太郎、和田恵治、宇井忠英、「北海道駒ヶ岳火山は1694年に噴火したか?: 北海道における17~18世紀の噴火年代の再検討」、*火山*、42巻、4号、pp. 269-279、平成9年
 - 23 鈴木建夫、勝井義雄、中村忠寿、「樽前降下軽石堆積物Ta-b層の粒度組成」、*火山*、18巻、2号、pp. 47-63、昭和48年
 - 24 Murrow, P. J., Rose, W. I., Self, S., "Determination of the total grain size distribution in a Vulcanian eruption column, and its implications to stratospheric aerosol perturbation", *Geophysical Research Letter*, Vol. 7, pp. 893–896, 1980.
 - 25 Parfitt, E. A., "A study of clast size distribution, ash deposition and fragmentation in a Hawaiian-style volcanic eruption", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 84, pp. 197-208, 1998.
 - 26 Suzuki, T., "A theoretical model for dispersion of tephra", *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, pp. 95–116, 1983.
 - 27 Asimow, P. D., Ghiorso, M. S., "Algorithmic modifications extending MELTS to calculate subsolidus phase relations", *American Mineralogist*, Vol. 83, No. 9, pp.1127-1132, 1998.
 - 28 Ghiorso, M. S., Sack, R. O., "Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures",

- Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 119, pp.197–212, 1995.
- 29 Ghiorso, M. S., Gualda, G. A. R., "An H₂O-CO₂ mixed fluid saturation model compatible with rhyolite-MELTS", Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 169, No. 6, 2015
- 30 Gualda, G. A. R., Ghiorso, M. S., Lemons, R. V., Carley, T. L., "Rhyolite- MELTS: a Modified Calibration of MELTS Optimized for Silica-rich, Fluid-bearing Magmatic Systems", Journal of Petrology, Vol. 53, No. 5, pp.875–890, 2012.
- 31 Hunter, A. G., Blake, S., "Petrogenetic evolution of a transitional tholeiitic—Calc-alkaline series: Towada volcano, Japan", Journal of Petrology, Vol. 36, No. 6, pp. 1579–1605, 1995.
- 32 原子力規制委員会原子力規制庁、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人北海道大学、「共同研究成果報告書 火山活動評価のためのマグマ滞留時間の推定手法に関する研究」、P6、令和6年公表予定。
- 33 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「令和3年度原子力規制庁委託成果報告書 巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究」、p. 416、令和4年
- 34 Nakatani, T., Kudo, T., Suzuki T., "Experimental Constraints on Magma Storage Conditions of Two Caldera-Forming Eruptions at Towada Volcano, Japan", Journal of Geophysical Research Solid Earth, Vol. 127, No. 5, e2021JB023665, 2022.
- 35 独立行政法人産業技術総合研究所、「平成26年度火山影響評価に係る知見の整備」、p. 177、平成27年
- 36 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「平成27年度原子力施設等防災対策等委託費（火山影響評価に係る技術的知見の整備）成果報告書」、p. 441、平成28年
- 37 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「平成28年度原子力施設等防災対策等委託費（火山影響評価に係る技術的知見の整備）成果報告書」、p. 565、平成29年
- 38 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「平成29年度原子力規制庁委託成果報告書 火山影響評価に係る技術知見の整備」、p. 560、平成30年
- 39 Ushioda, M., Miyagi, I., Suzuki, T., Takahashi, E., Hoshizumi, H., "Pre-eruptive P-T Conditions and H₂O Concentration of the Aso-4 Silicic End-Member Magma Based on High-Pressure Experiments", Journal of Geophysical Research Solid Earth, Vol. 125, No. 3, e2019JB018481, 2020.
- 40 Miyagi, I., Hoshizumi, H., Suda, T., Saito, G., Miyabuchi, Y., Geshi, N., "Importance of long-term shallow degassing on the genesis of massive felsic magma: A case study of Aso caldera, Kyushu, Japan", Journal of Petrology, Vol. 64, No. 3, egad009, 2023.
- 41 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「平成31年度原子力規制庁委託成果報告書 巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究」、p. 289、令和2年
- 42 Liu, Y., Zhang, Y., Behrens, H., "Solubility of H₂O in rhyolitic melts at low pressures and a new empirical model for mixed H₂O–CO₂ solubility in rhyolitic melts", Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 143, pp. 219-235, 2005.

- 43 国立研究開発法人産業技術総合研究所、「令和4年度原子力規制庁委託成果報告書
巨大噴火プロセス等の知見整備に係る研究」、p. 248、令和5年
- 44 東宮昭彦、宮城磯治、「洞爺噴火の年代値」、火山、65巻、1号、pp. 13-18、令和2年
- 45 原子力規制委員会原子力規制庁、国立大学法人東北大学大学院理学研究科、国立
大学法人東北大学東北アジア研究センター、「共同研究成果報告書 カルデラ噴火
及び非カルデラ噴火の比較研究」、p. 5、令和5年
- 46 京都大学防災研究所、「令和3年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等
防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）事
業」、p. 189、令和4年
- 47 為栗健、八木原寛、筒井智樹、井口正人、「高分解能な3次元地震波速度構造解析に
よる始良カルデラ下のイメージング」、火山、67巻、1号、pp. 69-76、令和3年
- 48 京都大学防災研究所、「令和2年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等
防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）事
業」、p. 417、令和3年
- 49 Hata, M., Matsushima, N., Takakura, S., Utsugi, M., Hashimoto, T., Uyeshima, M., “Three
–Dimensional Electrical Resistivity Modeling to Elucidate the Crustal Magma Supply
System Beneath Aso Caldera Japan”, *Journal of Geophysical Research – Solid Earth*, Vol.
123, pp.6334-6346, 2018.
- 50 筒井智樹、為栗健、井口正人、「人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内S
波地震反射面の推定」、火山、66巻、2号、pp. 71-81、令和3年
- 51 Hidayati, S., Ishihara, K., Iguchi, M., "Volcano-tectonic Earthquakes during the Stage of
Magma Accumulation at the Aira Caldera, Southern Kyushu, Japan", *Bulletin of the
Volcanological Society of Japan*, Vol. 52, No. 6, pp. 289-309, 2007.
- 52 Iwamori, H., Nakamura, H., Morikawa, N., Takahashi, M., Inamura, A., Haraguchi, S.,
Nishizawa, T., Sakata, S., "Groundwaters and deep-seated fluid circulation around Aso
Volcano, Southwest Japan, revealed by multivariate statistical analysis of the geochemical
data", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 433, 107739, 2022.
- 53 Yang, X.-M., "Using Rare Earth Elements (REE) to Decipher the Origin of Ore Fluids 196
Associated with Granite Intrusions", *Minerals*, Vol. 9, No. 426, 2019.
doi:10.3390/min9070426
- 54 Gao, S., Wedepohl, K. H., "The negative Eu anomaly in Archean sedimentary rocks:
Implications for decomposition, age and importance of their granitic sources", *Earth and
Planetary Science Letters*, Vol. 133, No. 1–2, pp. 81-94, 1995.
- 55 Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., "Viscoelastic crustal response to magma supply
and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and
after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano", *Earth and Planetary Science Letters*,

- Vol. 531, 115981, 2020.
- 56 京都大学防災研究所、「平成 31 年度原子力規制庁委託研究成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費（火山性地殻変動と地下構造及びマグマ活動に関する研究）事業」、p. 329、令和2年
- 57 Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Iguchi, M., "Variable inflation rate of a magmatic deformation source beneath Aira caldera after the 1914 eruption of Sakurajima volcano: Inferences from a linear Maxwell viscoelastic model constrained by geodetic data", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 421, 107446, 2022.
- 58 Yamasaki, T., Sigmundsson, F., Tameguri, T., Iguchi, M., "Influence of a low viscosity zone on the evolution of post-eruption deformation: A case study of the crustal deformation of Aira Caldera after the 1914 eruption of Sakurajima Volcano", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 441, 107871, 2023.
- 59 宮坂瑞穂、中川光弘、三浦大助、上澤真平、古川竜太、松本亜希子、「支笏-洞爺火山地域・後期更新世のテフラ層序の再検討」、日本地球惑星科学連合2017年大会、SVC50-P14、平成29年
- 60 Amma-Miyasaka, M., Miura, D., Nakagawa, M., Uesawa, "Stratigraphy and chronology of silicic tephra in the Shikotsu-Toya volcanic field, Japan: Evidence of a Late Pleistocene ignimbrite flare-up in southwestern Hokkaido", *Quaternary International*, Vol. 562, No. 10, pp. 58-75, 2020.
- 61 工藤崇、「十和田湖周辺地域における前期～中期更新世火山活動史」、地質調査研究報告、69巻、3号、pp. 165-200、平成30年
- 62 高橋正樹、「火山活動と地殻応力場」、地学雑誌、103巻、5号、pp. 447-463、平成6年
- 63 Geshi, N., Miyagi, I., Saito G., Conway, C. E., "Caldera collapse thresholds correlate with magma chamber dimensions", *Scientific Reports*, Vol. 13, 7463, 2023.
- 64 Martí, J., Folch, A., Neri, A., Macedonio, G., "Pressure evolution during explosive caldera-forming eruptions", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 175, pp. 275-287, 2000.
- 65 Geyer, A. Martí, J. "A short review of our current understanding of the development of ring faults during collapse caldera formation", *Frontiers in Earth Science*, Vol. 2, No. 22, 2014. doi: 10.3389/feart.2014.00022
- 66 Segall, P., Anderson, K., "Repeating caldera collapse events constrain fault friction at the kilometer scale", *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*, Vol. 118, No. 30, e2101469118, 2021.
- 67 Geshi, N., Ruch, J., Acocella, V., "Evaluating volumes for magma chambers and magma withdrawn for caldera collapse", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 398, pp. 107-115, 2014.

- 68 Gregg, P. M., de Silva, S. L., Grosfils, E. B., Parmigiani, J. P., "Catastrophic caldera-forming eruptions: Thermo mechanics and implications for eruption triggering and maximum caldera dimensions on Earth", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 241-242, pp. 1-12, 2012.
- 69 de Silva, S. L., Gregg, P. M., "Thermomechanical feedbacks in magmatic systems: Implications for growth, longevity, and evolution of large caldera-forming magma reservoirs and their supereruptions", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 282, pp. 77-91, 2014.
- 70 Degruyter, W., Huber, C., "A model for eruption frequency of upper crustal silicic magma chambers", *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 403, pp. 117-130, 2014.
- 71 Townsend, M., Huber, C., Degruyter, W., Bachmann, O., "Magma chamber growth during intercaldera periods: insights from thermo-mechanical modeling with applications to Laguna del Maule, Campi Flegrei, Santorini, and Aso", *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 20, pp. 1574-1591, 2019.
- 72 山川宣男、「内部圧力源による半無限弾性体の変形について」、*地震*、8巻、pp. 84-98、昭和30年
- 73 Forni, F., Degruyter, W., Bachmann, O., Astis, G. D., Mollo, S., "Long-term magmatic evolution reveals the beginning of a new caldera cycle at Campi Flegrei", *Science Advance*, Vol. 4, No. 11, 2018. doi: 10.1126/sciadv.aat9401
- 74 Bouvet de Maisonneuve, C., Forni, F., Bachmann, O., "Magma reservoir evolution during the build up to and recovery from caldera-forming eruptions – A generalizable model?", *Earth-Science Reviews*, Vol. 218, 103684, 2021.
- 75 Keller, F., Guillong, M., Geshi, N., Miyakawa, A., Bachmann, O., "Tracking caldera cycles in the Aso magmatic system – Applications of magnetite composition as a proxy for differentiation", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Vol. 436, 107789, 2023.
- 76 Aspinall, W., Sparks, S., Hill, B., Costa, A., Connor, C., Inakura, H., Hasenaka, T., Miyoshi, M., Kiyosugi, K., Tsuji, T., Ushioda, M., "Aso volcano, Japan: assessing the 100-year probability of a new caldera-forming eruption based on expert judgements with Bayes Net and Importance Sampling uncertainty analysis", *Journal of Applied Volcanology*, Vol. 12, No. 5, 2023. doi: 10.1186/s13617-023-00131-8
- 77 森脇広、松島義章、町田洋、岩井雅夫、新井房夫、藤原治、「鹿児島湾北西岸平野における縄文海進最盛期以降の地形発達」、*第四紀研究*、41巻、4号、pp. 253-268、平成14年
- 78 森脇広、永迫俊郎、奥野充、「始良カルデラの第四紀後期の地殻変動と火山活動」、*火山*、67巻、1号、pp. 31-44、令和4年
- 79 鹿野和彦、柳沢幸夫、奥野充、中川光弘、内村公大、味喜大介、井口正人、「鹿児

島湾奥，始良カルデラにおける後カルデラ火山活動と環境の変遷」、地質学雑誌、
128巻、1号、pp. 43-62、令和4年

執筆者一覧

原子力規制庁 長官官房 技術基盤グループ 地震・津波研究部門
安池 由幸 専門職
西来 邦章 主任技術研究調査官
廣井 良美 技術研究調査官
佐藤 勇輝 技術研究調査官
大野 鷹士 技術研究調査官