

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

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

令和3年3月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

## 目次

はじめに.....	1
1 巨大噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究.....	7
1.1 始良カルデラの事例調査	7
1.2 阿蘇カルデラの事例調査	11
1.3 洞爺カルデラの事例調査	21
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.....	43
2.1 鬼界カルデラ噴出物の岩石学的検討	43
2.2 始良カルデラ噴出物の岩石学的検討	61
2.3 阿蘇カルデラ噴出物の岩石学的検討	73
2.4 洞爺カルデラ噴出物の岩石学的検討	113
2.5 屈斜路・摩周カルデラ噴出物の岩石学的検討	131
2.6 カルデラ形成噴火マグマの実験岩石学的検討	155
3 活動的カルデラ火山の地下構造調査.....	165
3.1 ネットワーク MT 法観測による阿蘇カルデラの比抵抗構造調査	165
3.2 MT 定点観測による火山活動観測手法の検討	205
3.3 十和田カルデラにおける比抵抗構造探査の予備的検討	225
4 活動的カルデラ火山の地球化学的調査.....	231
4.1 希土類元素組成および重元素同位体組成によるマグマ種別判定、マグマ起源熱水流体の上昇過程推定法の検討	231
4.2 マグマ起源成分および放射性塩素を用いたマグマの状態・種別判別法の妥当性、適用限界の検討	245
4.3 ラドン曳航観測による海底カルデラ火山等におけるマグマ起源流体の観測及びフラックス推定法の新規開発	267
4.4 地下水による火山活動観測手法の検討	289
付録：検討委員会報告.....	301

## はじめに

本業務は、火山活動とその休止期間の関係を火山の特性、岩石学的特徴、地下構造探査等の地球物理学的手法及び地下水等の地球化学的調査手法等の最新知見に基づく火山活動に起因する事象調査から、原子力施設に影響を与える火山活動の可能性をより定量的に評価するための評価基準、火山活動モニタリング基準を作成することを目的としている。その達成のため、以下の4項目の調査研究を実施した。

### (1) 巨大噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究

本調査・研究では、これまでの調査結果を踏まえて、始良カルデラ火山等について、巨大噴火の長期的・短期的推移の具体的な時間スケールを制約するため、巨大噴火及びその前後の主要な噴火について、複数の年代測定手法を組み合わせる噴火年代を与える。また、カルデラ近傍でのボーリング調査、巨大噴火及びその前後の噴出物の分布や層序関係、斑晶や組成の特性等の地質学的手法を用いて調査し、噴出物の時間的及び空間的な分布と噴火史に基づく噴火の準備・進展過程を検討する。今年度は、始良・阿蘇・洞爺カルデラを対象とした調査を実施した。

- 1) 始良カルデラにおいては、約3万年前の入戸火砕流噴火に先行して発生している複数の噴火について、既存の研究結果に基づいた地質学的調査を行い、直下の土壌や噴出物に含まれる有機物を用いた炭素14年代測定およびそのほかの適切な年代測定により層序および分布を確立させ、大規模噴火前後の噴火履歴を復元する。今年度は、約3万年前の入戸火砕流噴火の直前に発生している複数の火砕噴火を対象とした野外調査を実施し、炭素14年代測定およびそのほかの適切な年代測定により層序および分布を確立させた。その結果、毛梨野軽石の噴火は入戸火砕流噴火の約1100年前かそれ以内に発生したことが明らかになった。
- 2) 阿蘇カルデラでは、4回の大規模火砕流噴火が起きている。大規模火砕流噴火の間には、より小規模な降下テフラや溶岩が知られている。今年度は、阿蘇4火砕流に至る噴火推移についてとりまとめた。その結果、阿蘇4火砕流堆積物と阿蘇3火砕流堆積物の間（阿蘇4/3）には、少なくとも37層の降下テフラがあり、玄武岩質スコリアから輝石デイサイトをへて、阿蘇4の前には黒雲母デイサイトへとマグマの性質が変化したこと、散發的な小規模な噴火していた状態から大規模な噴火が頻発する状態へと変化したのち、阿蘇4直前には噴火頻度と噴火規模が低下したことなどが明らかとなった。
- 3) 支笏-洞爺火山地域における最初のカルデラ形成噴火である洞爺火山に注目し、約13万年前の先行噴火および、約11万年前の洞爺カルデラ形成噴火について、大規模噴火の準備期から破局噴火へと至るマグマ過程を地質学的に検討した。今年度は、洞爺後カルデラ火山である中島火山を対象にK-Ar年代測定を行った結果、中島火山は約11万年前の洞爺カルデラ形成噴火直後から活動を始めていた可能性があることが明らかになった。また、洞爺カルデラ形成噴火は、層相・時間間隙の有無・本質物質の構成比およびガラス組成から6つの噴火ユニット、2つの噴火ステージに区分された。その結果、Stage 2のUnit 5が最大規模で総噴出量約170km<sup>3</sup>DREのうち約60%を占めることやCPタイプが本質物質全体の90%程度を占めることが明らかになった。また、Unit5に岩片濃集層を伴うことから、この時期に火道を形成・拡大して大規模噴火を起こし、その後、陥没カルデラを形成した可能性が考えられる。

## (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

本調査・研究では、(1)の地質学的調査に基づく大規模噴火の長期的・短期的推移の復元結果と合わせて、噴出物の岩石学的検討による巨大噴火に至る過程のマグマ供給系の時間・空間発達過程の検討を行う。具体的には(1)で復元された噴火活動の推移に沿って、噴出物の岩石学的解析を行い、大規模噴火を引き起こすマグマ溜まりの温度・圧力・マグマ組成等の時間変化を追跡する。今年度は、鬼界・始良・阿蘇・支笏・屈斜路カルデラ形成噴出物を対象とした以下の検討を実施した。

- 1) 鬼界カルデラでは、大規模噴火である鬼界葛原噴火(9.5万年前)、小瀬田火砕流(58万年前)および小アビ山火砕流(14万年前)の堆積物について岩石学的解析とメルト包有物化学分析を電子線マイクロアナライザー(EPMA)および二次イオン質量分析計(SIMS)等で行い、マグマの化学的特徴、温度・圧力条件を明らかにする。今年度は、鬼界葛原噴火による長瀬火砕流堆積物の岩石学的解析とメルト包有物化学分析を進め、鬼界葛原噴火マグマの温度が815-890°Cであること、メルト包有物のH<sub>2</sub>OおよびCO<sub>2</sub>濃度が3.1-5.9wt%、0.002-0.034wt%であることを明らかにした。これらの値からマグマのガス飽和圧力を見積もると鬼界葛原噴火の流紋岩マグマは、マグマ温度890°Cを仮定した場合151±37MPa(81-223MPa)、マグマ温度815°Cを仮定した場合138±35MPa(73-210MPa)の圧力下にあったと推定された。従って、地殻密度を2500kg/m<sup>3</sup>と仮定すると、鬼界葛原噴火マグマ溜まりの主体は深さ6±2kmにあったと推定できる。さらに、小瀬田火砕流堆積物軽石の岩石学的解析とメルト包有物化学分析を実施した結果、噴火マグマの温度が824-900°Cであること、メルト包有物のH<sub>2</sub>OおよびCO<sub>2</sub>濃度が4.1-5.5wt%、0.005-0.022wt%であることを明らかにした。これらの値からマグマのガス飽和圧力を見積もると小瀬田火砕流マグマは、マグマ温度900°Cを仮定した場合171±32MPa(129-211MPa)、マグマ温度824°Cを仮定した場合157±32MPa(118-195MPa)の圧力下にあったと推定された。地殻密度を2500kg/m<sup>3</sup>と仮定すると、鬼界葛原噴火マグマ溜まりの主体は深さ7±1km程度にあったと推定できた。
- 2) 始良カルデラでは、約3万年前のカルデラ形成噴火である入戸火砕流噴火に先立つ約3万年間の噴出物、特に流紋岩マグマに含まれる斑晶鉱物およびそれに含まれるガラス包有物の組成を用いて、熱力学的平衡条件の検討を行い、始良カルデラの流紋岩マグマ溜まりの温度・圧力・マグマ組成等およびその活動推移に沿った時間変化を解析する。今年度は始良カルデラの珪長質マグマ溜まりの深さ条件の推定のため、始良カルデラの入戸火砕流噴火の噴出物に含まれる斑晶鉱物のガラス包有物の含水量を顕微ラマン分光装置により定量した。その結果、始良カルデラ噴出物の含水量として入戸火砕流噴火および先入戸火砕流噴火の噴出物のガラス包有物はいずれも5.0~5.5wt%の含水量をもつことが判明した。これらの含水量を飽和含水量と仮定すると136~163MPaである。入戸火砕流噴火噴出物および先入戸噴火の噴出物に対して熱力学的平衡条件を検討しそのマグマ貯留条件を復元した結果、岩戸降下軽石から入戸火砕流の流紋岩噴出物はいずれも75~150MPaの平衡圧力を持つことが判明した。この値は、含水量から推測された圧力とほぼ一致している。また、降下軽石中の石英斑晶にみられる拡散組織を用いて、石英結晶のマグマ中での滞留時間の見積もりを試みた。大隅降下軽石・

入戸火砕流軽石中の石英斑晶の最外縁リムの成長時間は大半が 10 年未満であった。

- 3) 阿蘇カルデラでは、12 万年前の阿蘇 3 火砕流噴火および約 9 万年前の阿蘇 4 火砕流噴火に至った噴火準備過程について、阿蘇 3 と阿蘇 4 の間の噴出物(阿蘇 3-4 間テフラ)等を対象に斑晶鉱物およびそれらに含まれるガラス包有物の組成を用いて、熱力学的平衡条件の検討を行い、阿蘇のマグマ溜まりの温度・圧力・マグマ組成等およびその活動推移に沿った時間変化を解析する。今年度は(1)阿蘇カルデラの大規模火砕流噴火に至る準備過程に関するこれまでの研究成果のとりまとめ、(2)阿蘇の噴出物の中で最新の珪長質噴火 ACP1 の追加分析、(3)NanoSIMS 分析条件の改良を行なった。(1)では、現在の阿蘇中岳火山で観察されるような脱ガス活動によって生じた「脱ガス玄武岩」の生産メカニズムと、これが過去に阿蘇カルデラの大規模火砕流噴火をひきおこした「珪長質マグマ」の原材料になった可能性について論点の整理ができた。(2)の結果、最新の珪長質噴火 ACP1 においても、この珪長質メルトの原材料は脱ガス玄武岩である可能性が示された。(3)の結果、局所分析の空間解像度が向上し分析時間も短縮された。
- 4) 約 11 万年前の洞爺カルデラ形成噴火とその先行噴火の噴出物について岩石学的検討を行い、本地域での珪長質マグマの生成メカニズムや集積・噴火過程から、破局噴火へと至るマグマ過程を明らかにする。今年度は、洞爺カルデラ形成噴火噴出物の全岩主成分・微量成分分析に合わせて、希土類元素組成や同位体比分析も行い、洞爺カルデラ形成噴火のマグマが斑晶組み合わせや全岩化学組成の異なる複数の端成分マグマからなることを明らかにした。さらに、洞爺カルデラ形成噴火噴出物と後カルデラ火山である有珠火山噴出物の予察的な U-Th 放射非平衡分析を行った。また、比較対象とする支笏カルデラ形成噴火について、メルトインクルージョンの揮発性成分分析から噴火直前のマグマ供給系の物理化学条件を検討し、それぞれのマグマ溜まりの圧力(ガス飽和を仮定)と平衡共存するガス組成(CO<sub>2</sub>の割合)を見積もった。
- 5) 屈斜路カルデラは北海道東部にある大型のカルデラ火山で、約 40 万年前から梅溶結凝灰岩・屈斜路軽石流 VIII~I(KpP8~1)の大規模火砕流を噴出し、現在のカルデラ地形を形成した。このうち、最大規模の噴火は 11.5~12 万年前の Kp4 噴火(>175 km<sup>3</sup>)で、最後のカルデラ形成噴火は 3.9 万年前の Kp1 噴火(125 km<sup>3</sup>)である。また、摩周カルデラは屈斜路カルデラに隣接する小型のカルデラ火山で Kp1 以降に活発に活動した。本年度は、Kp4 火砕流噴火から Kp1 火砕流噴火までの降下テフラ群の火山活動噴出物の記載と、中長期的な前駆活動の岩石学的な検討を進めるための試料採取を実施した。また昨年度採取した、Kp1 火砕流噴火の直前に噴出した降下火砕堆積物の組織観察・化学分析を行なった。その結果、Kp1 の最初期ステージには、少量の苦鉄質マグマが含まれることを再確認できた。この苦鉄質マグマに含まれる斑晶は外周部が正累帯構造を示すことから、高温の苦鉄質マグマが低温の珪長質マグマに注入後に噴火したことを示している。
- 6) カルデラ形成噴火においては、岩石学的特徴から珪長質マグマと苦鉄質マグマの混合が発生していることが示唆されている。噴出物の岩石学的解析から推測される珪長質端成分マグマ組成を用いて、熱力学的平衡計算および高温高压実験による相平衡関係の検討を行い、カルデラ直下のマグマ溜まりの温度圧力条件を推測する。今年度は、十和田火山のカルデラ形成

期噴火のうち、特に噴出量の大きな噴火エピソード N および L 噴火を対象に、温度圧力条件を広げて相平衡実験を行い、水飽和条件下の相平衡図を完成させた。そして、温度圧力による鉱物組成や鉱物量比の変化を調べ、実験に使用した軽石と比較した。その結果、噴火エピソード N の軽石中の鉱物組み合わせ、鉱物組成および鉱物量比が、磁鉄鉱の晶出と石基ガラスの組成を除き、850°C、1.5–1.7 kb でよく再現されることが分かった。このことから、噴火エピソード N のマグマの噴火直前の定置条件が、850°C、1.5–1.7 kb であったことが示唆された。この圧力は深さにして約 6–7 km に相当し、アンビエントノイズトモグラフィにより明らかにされた十和田火山下の低 S 波速度領域の深さにおおよそ一致する。一方、エピソード L のマグマについては、鉱物組み合わせは再現できたものの、鉱物組成や鉱物量比が十分に再現できておらず、今後、水に不飽和な条件での高温高压実験を行う必要があると考えられる。

### (3) 活動的カルデラ火山の地下構造調査

本調査は、10km 以深の地下構造を把握するため長周期のシグナルを安定して長期間観測できるネットワーク MT 法による観測を行う。さらに、次項の地球化学的調査結果と合わせて MT 法による浅部低比抵抗領域の連続観測によるモニタリング手法への応用を検討する。

- 1) 阿蘇カルデラでは、これまでの広帯域 MT 法探査により概ね地下 15km 付近までの高解像度 3 次元比抵抗構造を把握するとともに、地殻上部におけるマグマ供給系の経路を明らかにすることができた。一方、更に深部の地殻下部に至る比抵抗構造を高い解像度で得るためには、より長周期のデータを適正な測点配置で取得する必要があることも明らかになっている。そこで、本調査では、阿蘇カルデラを覆う領域において、長周期データの取得に有利なネットワーク MT 法の適正な測点配置による観測を実施し、地殻下部に至る高解像度の 3 次元比抵抗構造を求め、より深部におけるマグマ供給系の存在を検討する。今年度は、カルデラ外の 17 エリアの事前調査・整備を行うとともに、カルデラ内の 5 エリアにおいて電位差の測定を行った。併せて、カルデラ南外輪（カルデラ南部）と東外輪（カルデラ北東部）に設置した磁力計による磁場データの取得作業を継続実施した。また、取得した電磁場データについては、3 次元比抵抗構造解析に使用するためのデータ解析を実施した。さらに、阿蘇カルデラの地殻下部までの 3 次元比抵抗構造を高い解像度で得るためにネットワーク MT 法の既存データを使用して求めた 3 次元比抵抗構造モデルを用いて、下部地殻の異常域への感度検定を実施した。その結果、下部地殻に顕著な低比抵抗異常（25Ωm 以下）が存在する場合には、3 次元比抵抗モデルに異常として解像出来る可能性が高いと結論付けられた。
- 2) MT 法による火山活動モニタリングへの応用可能性を検討するため、3 次元比抵抗構造が既に明らかになった阿蘇カルデラにおいて、中岳第一火口の近傍に観測定点を設け、火山活動に伴う電磁場応答経時変化の検出可能性の検討を新たに実施する。今年度は、広帯域 MT 法電磁探査によって求められた比抵抗構造のうち、中岳第一火口直下から北東方向の深部へ延びる極めて低い比抵抗体の実体を把握するため、第一火口に近い 2 ヶ所の測点において繰り返し定点観測を実施し、噴火活動の盛衰に伴う低比抵抗体の変化の有無を調査した。また、自然電位を制約条件とした熱水系の数値シミュレーションによるマグマ性流体流動の解析システムの開発も行った。

- 3) 十和田火山を対象とした MT 法による地下構造調査の準備のため、文献調査を行い、調査計画を検討した。特に、陸上観測点の 2 次元配置で、中湖下の浅部およびカルデラ下の深部に 3 次元的な比抵抗異常がある場合に検知できるかを検討した結果、今回設定した比抵抗コントラストでは 2 次元の解析から検知することはできないという結論になった。

#### (4) 活動的カルデラ火山の地球化学的調査

本調査は、国内のカルデラ火山について深部流体起源の成分が溶け込んだ地下水の希土類元素組成及び重元素同位体組成の分析を行い、マグマの種類及び熱水上昇過程の推定を試みる。また、カルデラ火山での長期的な地下水の採取等、火山活動の変化を捕えるモニタリング項目としての適応性についても検討を行う。今年度は、以下の 4 項目を実施した。

- 1) 希土類元素は、他の化学成分に比べて深部から上昇するマグマ起源熱水流体の履歴を保持する可能性がある。カルデラ火山体内部だけでなく、その周辺も含めて地下水の希土類元素組成を比較することで、地下水に含まれるマグマ起源熱水流体を海水や天水から識別すると同時に、母岩との反応と帯水層分布・深度を推定する。これにより、マグマ成分の影響の広がりや移動経路等について流体循環に関する情報を得ることができる。今年度は、カルデラ内で採取された試料について、希土類元素を測定し、69 試料の定量値を得た。カルデラの狭い領域で多様な組成パターンが検出されたが、火山性流体に近いと考えられるパターンをもつ流体を抽出することができた。主要溶存元素の多変量解析に基づいた分類では、希土類元素パターンは単一ではなく、阿蘇カルデラの試料は、水の異なる形成過程を反映していることが分かった。以上のクラスタの分布および組成上の特徴は、クラスタ分析/独立成分分析解析が、地下水の起源と循環に関わる独立なソース・プロセス、特に火山性成分の検出・識別に有効であることを示唆している。
- 2) 阿蘇カルデラ火山深部に存在する流体がマグマであるか否か、マグマの種別、マグマ起源熱水の上昇過程を推定するために開発した放射性塩素同位体法および  $C/Cl$  比を用いたマグマの活動状態の推定手法の妥当性を検討するため、日本の他のカルデラ火山においても同手法を用いた地下のマグマの状態の推定が可能かどうかを試み、同手法の適用性を評価する。今年度は、海底カルデラ地域における  $C/Cl$  比や放射性塩素同位体を用いた手法について適用性評価を引き続き行った。前者の評価手法では、マグマ溜まり進化モデルを 2 kb 以下の領域に限定したモデルを用いて、マグマ溜まりの状態に対応して放出される熱水流体の  $C/Cl$  比と  $Cl/H_2O$  比について再計算した。その結果、溶融マグマが発泡し熱水流体が放出された場合は、低い  $Cl$  濃度と高い  $C/Cl$  比を持ち、地下でマグマ固化にともない放出された場合では、高い  $Cl$  濃度と低い  $C/Cl$  比を持つ。 $C/Cl$  比=1 を境界にしてマグマの供給、生成は  $C/Cl > 1$  を示し、 $C/Cl < 1$  ではマグマ固化を示す。さらに、珪長質マグマの生成により放出される熱水流体は、 $Cl/H_2O$  比が 1-2 kb の範囲で大きな圧力依存性を示し、高圧側では、低圧時の数倍～数 10 倍高くなることが示唆される。従って、地下水に混入するマグマ起源熱水の  $Cl$  濃度がある程度正確に推定できれば、 $C/Cl$ - $Cl/H_2O$  法として、熱水放出源のマグマの種別や圧力を区別できる可能性がある。また、後者の放射性塩素同位体を用いた手法の海底カルデラへの適用性検討のため、始良カルデラ周辺の深層地下水の  $^{36}Cl/Cl$  比の特徴を把握した。 $^{36}Cl/Cl$



比,  $^3\text{He}/^4\text{He}$  比,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , および溶存化学組成より, 始良カルデラ周辺においては, 地下水およびその溶存成分の滞留時間が地域によって異なることが明らかになりつつある. ただし, 約 3 万年前の始良カルデラ噴火は, 阿蘇カルデラの約 9 万年と比べると若く, マグマの種別の違いによる  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  比の進化の程度の違いは少ないと予測される. この点についても今後の検討が必要である.

- 3) これまでの予備的な調査によって, 沿岸域の海底地下水湧出の検出に実績のあるラドン曳航観測と同様に, 海底での温泉湧出の検知を示唆する結果が得られている pH—ORP 曳航観測を, 別府湾沿岸域 (大分県) において実施し, それにより検知される低 pH・低 ORP エリアと先行のラドン曳航観測の結果との対比により, 両測定の間用の有効性を検証し, Eh によって海水への温泉水や地下水の混入の影響評価を行うことが大いに期待できることが示された. また, pH—ORP 観測と同様なセンサーを内蔵するフローセルに海水を流して測定する方式の溶存水素濃度計を新たに曳航観測に組み込むことを目的として, その性能評価を実施した. さらに, 海底の温泉湧出や火山ガス流出が想定される地点において, それらの存在を直接確認し湧出・流出状況を記録するための有力な観測ツールとなりうる水中ドローンの探査能力や映像記録性能などを検証し, 実際の湧出状況を観察できることが確認された.
- 4) カルデラ火山の火山活動の変化を捉えるモニタリング手法としての地下水観測項目について検討するため, 始良カルデラで地下水調査を行い, 水質・同位体組成を把握し, 調査地点を設定する. 調査地点においては年数回程度の定期試料採取・分析を行い, 各成分の変動を考慮に入れ, 火山活動の変化を捉える観測項目としての適応性を検討する. 今年度は, 昨年度に引き続きカルデラ火山の火山活動の変化を捉える手法としての地下水観測項目について検討するため, 昨年度に選定した観測地点の地下水試料の繰り返し調査をひき続き行った. 観測地点においては 1~2 か月ごとの定期試料採取・分析を行い, 各成分の変動を考慮に入れ, 火山活動の変化を捉える観測項目としての適応性を検討している. その結果, いくつかの地点では, 海水の混合やマグマ水の混合などのトレンドが見られた. また特定地点でのデータの変動はマグマの供給・生成に関連する熱水の混合を示していると考えられた.

## 1 巨大噴火の噴火準備・進展過程に関する調査・研究

### 1.1 始良カルデラの事例調査

#### 【実施内容】

始良カルデラにおいては、約 3 万年前の入戸火砕流噴火の直前に発生している複数の噴火（毛梨野軽石、深港軽石、大塚軽石およびそのほかの噴出物）について、既存の研究結果（長岡ほか、2001 など）に基づいた地質学的調査を行い、直下の土壌や噴出物に含まれる有機物を用いた炭素 14 年代測定およびそのほかの適切な年代測定により層序および分布を確立させ、大規模噴火前後の噴火履歴を復元する。今年度は、約 3 万年前の入戸火砕流噴火の直前に発生している複数の火砕噴火を対象とした野外調査を実施し、炭素 14 年代測定およびそのほかの適切な年代測定により層序および分布を確立させた。その結果、毛梨野軽石の噴火は入戸火砕流噴火の約 1100 年前かそれ以内に発生したことが明らかになった。

#### 【調査・研究成果】

##### (1) 概要

始良カルデラにおいて、約 3 万年前の入戸火砕流噴火の直前に発生している複数の噴火（毛梨野軽石、深港軽石、大塚軽石およびそのほかの噴出物）について、始良カルデラ南東部および北東部において分布及び層序の調査を継続した。また、これらの複数噴火のうち、霧島市国分地区において毛梨野軽石直下の土壌の炭素 14 年代測定を実施しこれらの噴火年代を確定させ、入戸火砕流噴火の直前に発生した 3 回の流紋岩マグマの火砕噴火の層序と噴火年代を確定させた（図 1.1-1）。

##### (2) 始良カルデラ先入戸火砕流噴火噴出物の層序および炭素 14 年代

始良カルデラ北東部の霧島市国分郡田地区において、入戸噴火噴出物（大隅降下軽石、妻屋火砕流堆積物及び入戸火砕流堆積物）の下位に分布する毛梨野軽石の層序関係を確認した。本地点では、毛梨野軽石層は基底部の降下軽石層とそれを覆う軽石質の細粒火山灰層からなる。本軽石層の直下には厚さ約 15cm の腐植に富む砂層が発達し、さらにその下位に約 2m の厚さの円礫層が発達する。円礫層には、深港軽石に相当すると考えられる軽石層が断続的に挟在する。このことから、本地点の毛梨野軽石層直下の腐植土壌からは、従来得られた直下土壌年代値より噴火年代に近い炭素 14 年代が得られると期待された。測定の結果、毛梨野軽石層の直下の腐植に富む土壌試料からは  $25,080 \pm 90$  yrBP の炭素 14 年代を得た（表 1.1-1）。これらから暦年校正した年代は、 $29,736$ - $29,106$  calyrBP（それぞれ  $2\sigma$ ）である。得られた年代値は、昨年度に霧島市国分重久地区で毛梨野軽石直下の土壌試料から得られた暦年構成年代  $30,921$ - $31,298$  calyrBP や、水月湖の年縞堆積物の解析から得られた入戸火砕流噴火の年代 ( $30.009 \pm 0.189$  ka BP ; Smith et al., 2013) よりわずかに若い。土壌試料のため、より新しい時代の炭素が微量に混入した可能性がある。

これらの年代から、毛梨野軽石の噴火は入戸火砕流噴火の約 1100 年前かそれ以内に発

生したことが復元された。毛梨野軽石層と入戸火砕流噴火の最初の噴出物である大隅降下軽石層との間には火山噴出物は認められない。

### (3) 入戸火砕流噴火の噴出物層序

種子島・屋久島地域において、入戸火砕流噴火の初期に噴出した大隅降下軽石の縁辺部堆積物およびそれを覆う入戸火砕流の co-ignimbrite ash である AT 降下火山灰層の層序を確認した。種子島地域は入戸火砕流の到達範囲外にあり、入戸火砕流からもたらされた co-ignimbrite ash である AT 降下火山灰層が約 20cm の層厚で分布している。AT 降下火山灰層は、その基底部では極粗粒砂サイズの結晶片および軽石片にとみ、上部に向かって細粒化する正級化構造を呈する。このことから、AT 降下火山灰層はごく短時間に一回の堆積イベントで堆積したものと推測される。

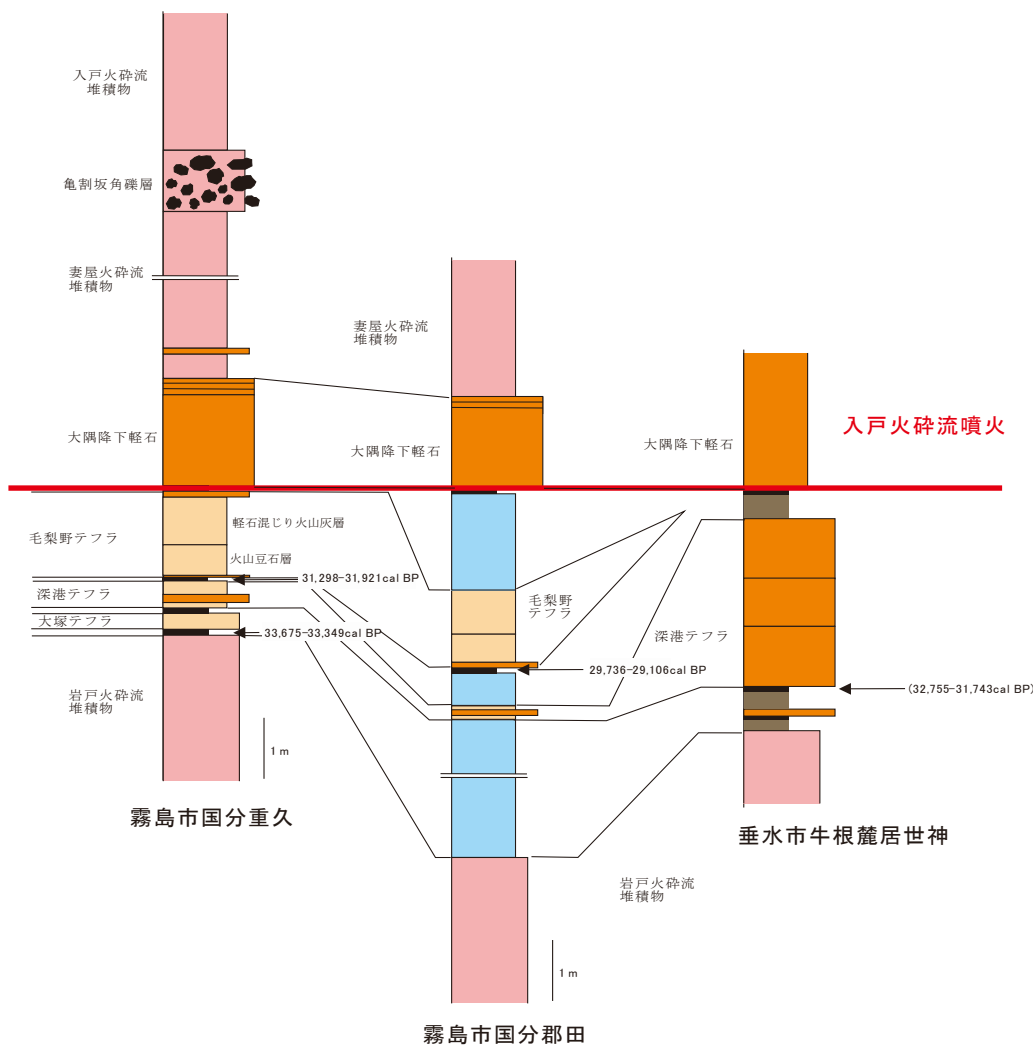


図 1.1-1 始良カルデラ北部～東部における入戸火砕流噴火直前の始良カルデラ噴出物の層序と年代。

表 1.1-1 霧島市国分郡田地区で採取した毛梨野軽石層直下の土壌年代測定結果.

表 1 放射性炭素年代測定結果 ( $\delta^{13}\text{C}$  補正值)

測定番号	試料名	採取場所	試料 形態	処理 方法	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) (AMS)	$\delta^{13}\text{C}$ 補正あり	
						Libby Age (yrBP)	pMC (%)
IAAA-201088	201117B-C01	鹿児島県霧島市国分郡田 郡田林道	土壌	HCl	-20.85 ± 0.18	25,080 ± 90	4.41 ± 0.05

[IAA 登録番号 : #A382]

表 2 放射性炭素年代測定結果 ( $\delta^{13}\text{C}$  未補正值、暦年較正用  $^{14}\text{C}$  年代、較正年代)

測定番号	$\delta^{13}\text{C}$ 補正なし		暦年較正用(yrBP)	1 $\sigma$ 暦年代範囲	2 $\sigma$ 暦年代範囲
	Age (yrBP)	pMC (%)			
IAAA-201088	25,010 ± 90	4.45 ± 0.05	25,076 ± 94	29492calBP - 29382calBP (14.9%) 29341calBP - 29142calBP (53.4%)	29736calBP - 29106calBP (95.4%)

[参考値]

参考) 先始良カルデラ噴出物 (深港テフラ直下の地層) 関連の年代測定結果. 平成 30 年度・31 年度報告書記載済.

測定番号	試料名	採取場所	試料 形態	処理 方法	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) (AMS)	$\delta^{13}\text{C}$ 補正あり	
						Libby Age (yrBP)	pMC (%)
IAAA-190818	191211E-C01	鹿児島県霧島市国分重久	土壌	HCl	-19.55 ± 0.21	27,120 ± 110	3.42 ± 0.05
IAAA-190819	191211E-C02	鹿児島県霧島市国分重久	土壌	HCl	-20.84 ± 0.20	29,240 ± 130	2.62 ± 0.04

測定番号	$\delta^{13}\text{C}$ 補正なし		暦年較正用(yrBP)	1 $\sigma$ 暦年代範囲	2 $\sigma$ 暦年代範囲
	Age (yrBP)	pMC (%)			
IAAA-190818	27,030 ± 110	3.45 ± 0.05	27,123 ± 113	31207calBP - 31023calBP (68.2%)	31298calBP - 30921calBP (95.4%)
IAAA-190819	29,170 ± 130	2.65 ± 0.04	29,242 ± 128	33675calBP - 33349calBP (68.2%)	33795calBP - 33104calBP (95.4%)

先始良カルデラ噴出物 (毛梨野テフラ直下) 関連の年代測定結果. 試料 IAAA-190818 は毛梨野テフラ直下の土壌. 試料 IAAA-190819 は大塚テフラ直下の土壌. 鹿児島県霧島市国分重久にて採取.

表1 放射性炭素年代測定結果 ( $\delta^{13}\text{C}$  補正值)

測定番号	試料名	採取場所	試料 形態	処理 方法	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) (AMS)	$\delta^{13}\text{C}$ 補正あり	
						Libby Age (yrBP)	pMC (%)
IAAA-181190	181027B01C	鹿児島県垂水市牛根麓 居世神林道	土壌	HCl	-20.33 ± 0.24	28,360 ± 110	2.93 ± 0.04

[IAA 登録番号 : #9260]

表2 放射性炭素年代測定結果 ( $\delta^{13}\text{C}$  未補正值、暦年較正用  $^{14}\text{C}$  年代、較正年代)

測定番号	$\delta^{13}\text{C}$ 補正なし		暦年較正用(yrBP)	1 $\sigma$ 暦年代範囲	2 $\sigma$ 暦年代範囲
	Age (yrBP)	pMC (%)			
IAAA-181190	28,280 ± 110	2.96 ± 0.04	28,359 ± 107	32537calBP - 31974calBP (68.2%)	32755calBP - 31743calBP (95.4%)

[参考値]

深港降下軽石直下の土壌年代。(垂水市牛根麓居世神)

#### 参考文献

長岡信治・奥野 充・新井房夫 (2001) 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, 432-450.

Smith, V. C., Staff, R. A., Blockley, S. P. E., Bronk Ramsey, C., Nakagawa, T., Mark, D. F., . . . Danhara, T. (2013) 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*, 67, 121-137.

## 1.2 阿蘇カルデラの事例調査

### 【実施内容】

阿蘇カルデラでは、4回の大規模火砕流噴火が起きている。大規模火砕流噴火の間には、より小規模な降下テフラや溶岩が知られている。今年度は、阿蘇4火砕流に至る噴火推移についてとりまとめた。その結果、阿蘇4火砕流堆積物と阿蘇3火砕流堆積物の間（阿蘇4/3）には、少なくとも37層の降下テフラがあり、玄武岩質スコリアから輝石デイサイトをへて、阿蘇4の前には黒雲母デイサイトへとマグマの性質が変化したこと、散発的な小規模な噴火していた状態から大規模な噴火が頻発する状態へと変化したのち、阿蘇4直前には噴火頻度と噴火規模が低下したことなどが明らかとなった。また、阿蘇4/3テフラを含む阿蘇カルデラ噴出物の全岩化学組成をハーカー図上でHunter(1998)のデータと比較検討を行った。

### 【調査・研究成果】

阿蘇カルデラは、九州中央部に位置する南北約25 km、東西約18 kmの国内最大級の大きさの複成カルデラ火山である。阿蘇カルデラでは、約26万年前以来、4回の大規模火砕流噴火をくり返し、最後の約9万年前の阿蘇4火砕流噴火は、国内の第四紀火山では最大級の規模の噴火である。この4回の大規模火砕流の間には、より小規模な降下テフラや溶岩流の噴出が繰り返されている（小野・他，1977；小野・渡辺，1983）。このような火砕流間の降下テフラなどの存在は、現在の阿蘇カルデラに阿蘇4火砕流噴火以降に形成した中央火口丘群があり噴火を続けているように、阿蘇1, 2, 3火砕流噴火のあとにも火山体があり噴火活動を繰り返していたことを示唆する。阿蘇4火砕流噴火以前にもあったはずの山体は阿蘇4火砕流噴火によって完全に失われており、その復元はできない。しかしながら、カルデラ外に堆積した降下テフラを観察することにより、大規模火砕流間の火山活動史の変遷をうかがい知ることができる。阿蘇火砕流と阿蘇3火砕流の間のテフラ群（阿蘇4/3テフラ群）は、阿蘇4火砕流噴火への準備過程といえ、その噴火活動史を復元して噴火の様式やマグマの性質、噴出量の時間変化を知ることが重要である。

阿蘇4/3テフラ群全体を観察できる露頭は、竹田市荻町陽目にある(TK2751地点)。ここでは、阿蘇3火砕流堆積物と阿蘇4火砕流堆積物の間に厚さ約30 mのテフラ群と土壌からなる累層が連続的に観察できた(図1.2-1)。阿蘇4/3テフラ群には、土壌層によって区切られた37層のテフラがあり、それらのステージ区分、名称、年代、体積、全岩化学組成、斑晶組み合わせ、構成物などを取りまとめた(表1.2-1)。

阿蘇4/3テフラ群は、岩質や噴火の頻度・大きさなどを元に下位からStage 1から5に区分される。Stage 1は阿蘇3の後の間欠的なスコリア噴火のステージ、Stage 2は、頻繁なスコリア噴火のステージ、Stage 3は小規模な軽石噴火のステージ、Stage 4は大規模な火山灰や軽石の噴火のステージ、Stage 5は阿蘇4直前の静穏期と黒雲母デイサイト軽石噴火のステージである。

模式露頭での土壌層の堆積速度一定と仮定し、年代値が既知のテフラを固定し、年代値が不明のテフラの年代を推定した。その際、長橋・他(2007)による、長野県高野層ボーリングコアの層序と酸素同位体比との対応を用いた年代推定値、阿蘇3(133.0 ka)、Ata(98.9 ka)、ABCD(97.7 ka)、K-Tz(95.2 ka)、阿蘇4(88.0 ka)を用いた(図1.2-2)。その結果求められた各テフラの年代を表1.2-1に記した。

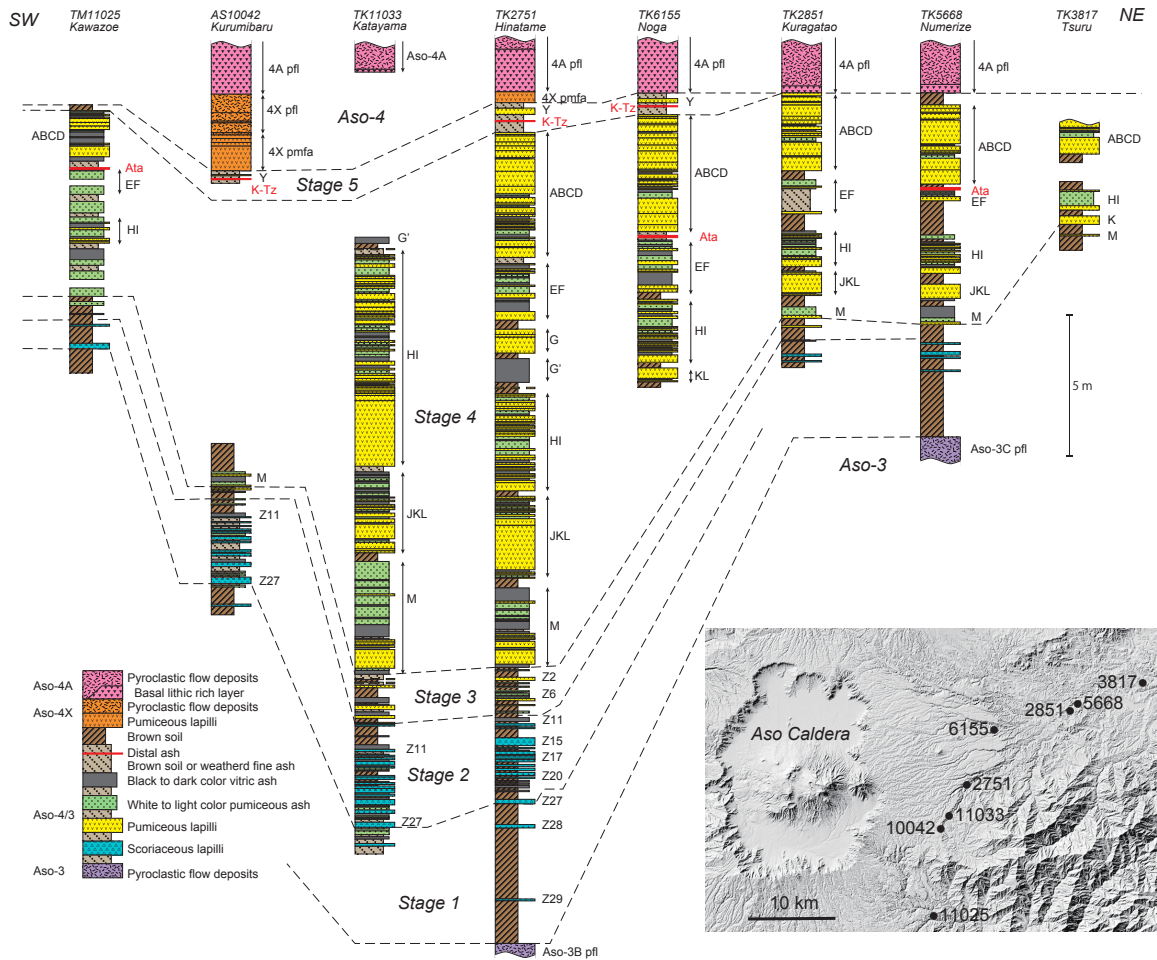


図 1.2-1 阿蘇 4/3 テフラ群の柱状図

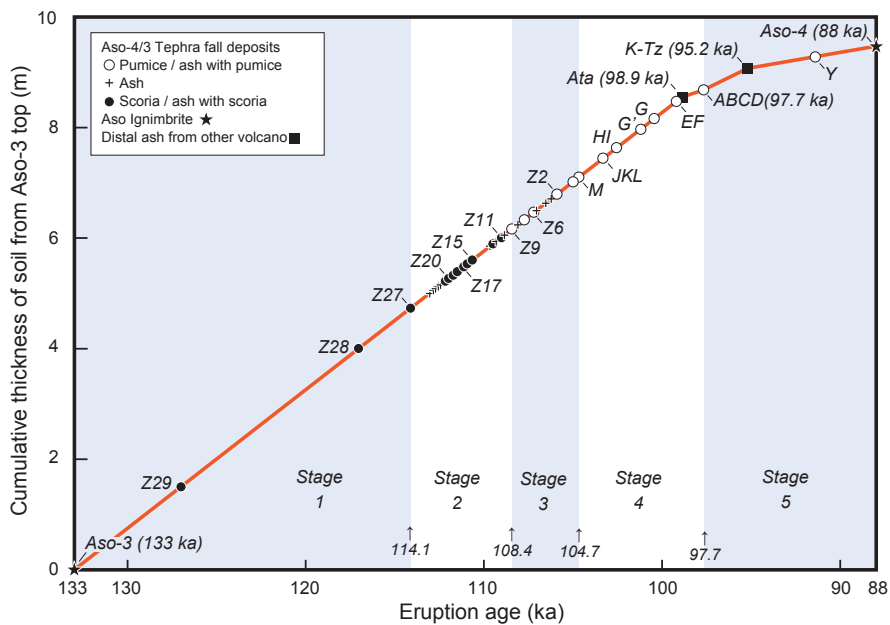


図 1.2-2 土壌層厚から推定した阿蘇 4/3 主要テフラの年代

各テフラの推定年代は、表 1.2-1 参照

表 1.2-1 阿蘇 4/3 テフラ群一覧

Stage	Tephra	Age (ka)	Bulk volume (km <sup>3</sup> )	VEI	Volume (DRE; km <sup>3</sup> )	Whole rock SiO <sub>2</sub> (wt.%)	Mafic mineral assemblage*	Materials**
Stage 5 (97.7-88 ka)	Y	91.4	0.13	4	0.05	68.2	bi>hb, cpx, opx	pm
	ABCD	97.7***	6.61	5	3.10	62.0~64.8	opx, cpx	pm>ash
	EF	99.2	2.02	5	0.85	64.0~71.1	bi, opx, cpx	ash>pm
Stage 4 (104.7-97.7 ka)	G	100.5	0.25	4	0.20	65.8	bi+hb+px	pm
	G'	101.2	0.92	4	0.72	-	opx, cpx	ash
	HI	102.6	4.37	5	2.38	65.06~66.3	opx, cpx	ash>pm
	JKL	103.3	1.98	5	1.00	64.1~66.5	opx, cpx	ash>pm
	M	104.7	2.15	5	1.16	65.9~66.2	opx, cpx	ash>>pm
	Z1	105.0				-	-	ash (fine pm)
	Z2	105.9				69.3	opx, cpx	pm
Stage 3 (108.4-104.7 ka)	Z3	106.2				-	-	ash
	Z4	106.6				-	-	ash
	Z5	107.1	0.52 (total)	4 (total)	0.22 (total)	-	-	ash
	Z6	107.2				64.7	opx, cpx	pm>ash
	Z7	107.8				-	-	pm
	Z8	108.1				-	-	ash
	Z9	108.4				-	-	ash>pm
	Z10	108.9				-	-	ash
	Z11	109.0				-	-	ash>>sc
	Z12	109.3				-	-	ash
Stage 2 (114.1-108.4 ka)	Z13	109.5				-	-	sc>ash
	Z14	109.7				-	-	ash
	Z15	110.7				50.9	opx, cpx	sc
	Z16	110.9				-	-	sc
	Z17	111.1				-	opx, cpx	sc>>ash
	Z18	111.5	1.04 (total)	5 (total)	0.57 (total)	-	-	sc>ash
	Z19	111.7				-	-	sc
	Z20	112.0				55.7	ol, opx, cpx	sc
	Z21	112.2				-	-	sc>ash
	Z22	112.5				-	-	ash
	Z23	112.6				-	-	ash
	Z24	112.7				-	-	ash
	Z25	112.9				-	-	ash
	Z26	113.1				-	-	ash
Stage 1 (133-114.1 ka)	Z27	114.1				55.8	ol, opx, cpx	sc
	Z28	117.0	0.32 (total)	4 (total)	0.19 (total)	50.9	ol, opx, cpx	sc
	Z29	127.0				53.3	ol, opx, cpx	sc

\* Mafic minerals: cpx: clinopyroxene, ol: olivine, opx: orthopyroxene

\*\*Materials: pm: pumice, sc: scoria

\*\*\* Nagahashi et al.(2004)



主要テフラの等層厚線図を図 1.2-3, 図 1.2-4 に示す. Stage 1~3 については, 類似の岩相を示すテフラも多く離れた地域間の対比が難しいため, Stage ごとの総計 (土壌層を除くテフラ層の層厚の合計) で等層厚線図を作成した. またこの等層厚線図をもとに Fierstein and Nathenson (1992) の手法をもとに噴出物量を計算した. DRE 換算に際しては, テフラの密度 ( $1.2\text{g/cm}^3$ ) とマグマの密度 ( $2.5\text{g/cm}^3$ ) を仮定した. こうして求められたマグマ噴出量と前述の推定年代と全岩化学組成 (H28 年度報告書) を元に, 積算マグマ噴出量階段図 (図 1.2-5) を作成した.

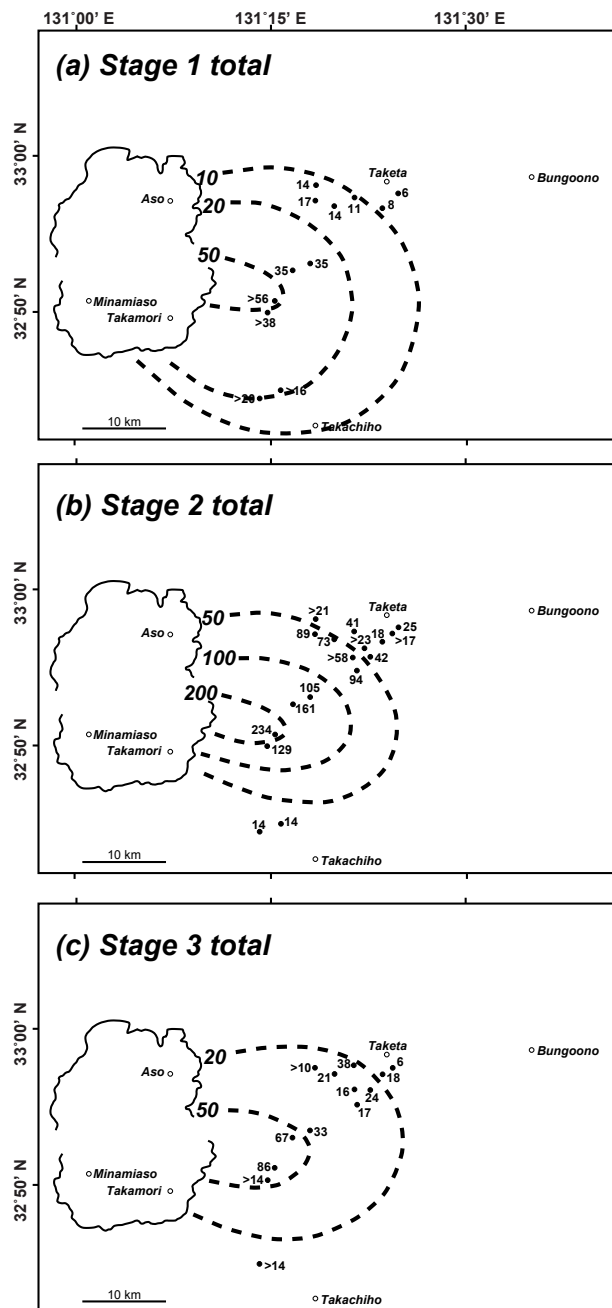


図 1.2-3 阿蘇 4/3 テフラ群, Stage 1, 2, 3 の等層厚線図

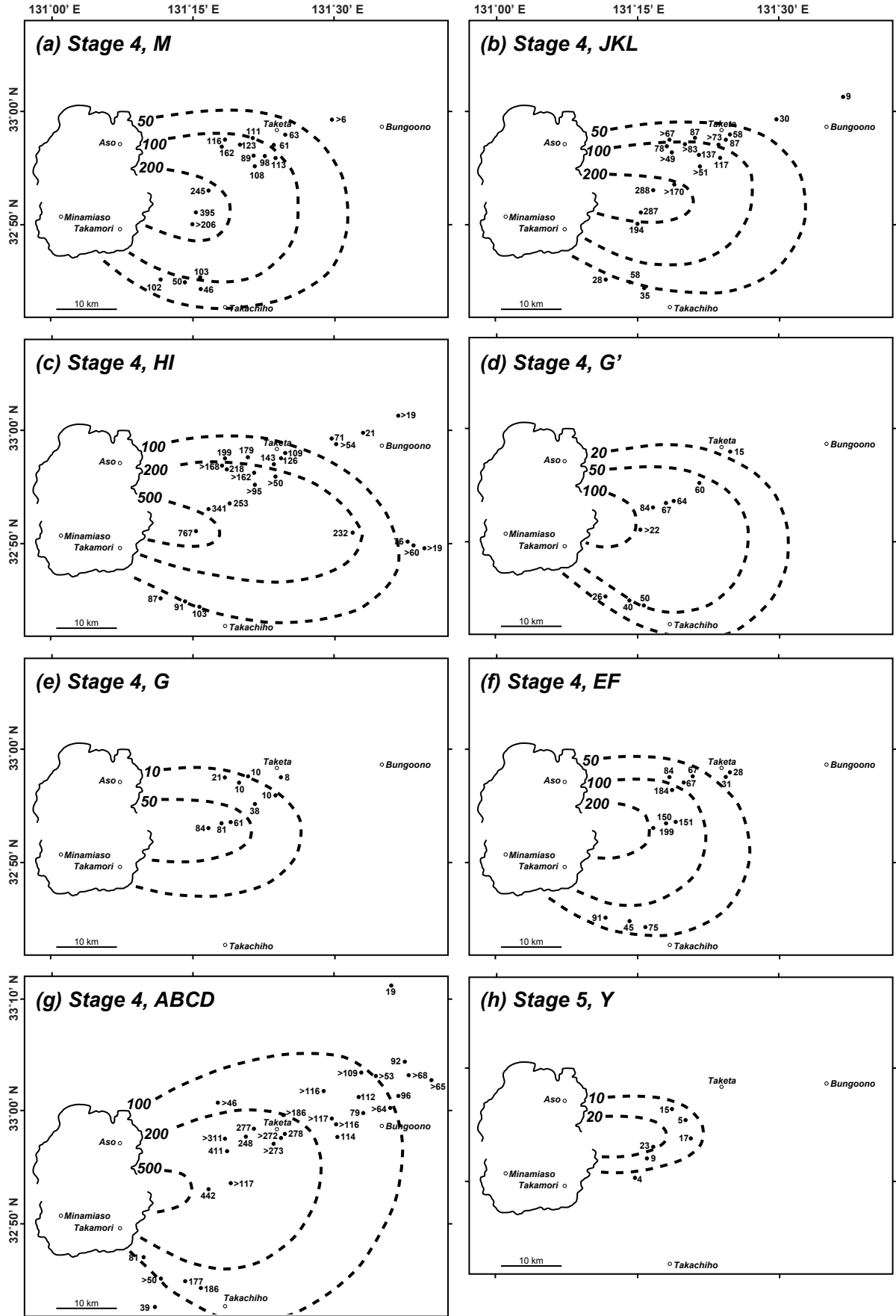


図 1.2-4 阿蘇 4/3 テフラ群, Stage 4, 5 の等層厚線図

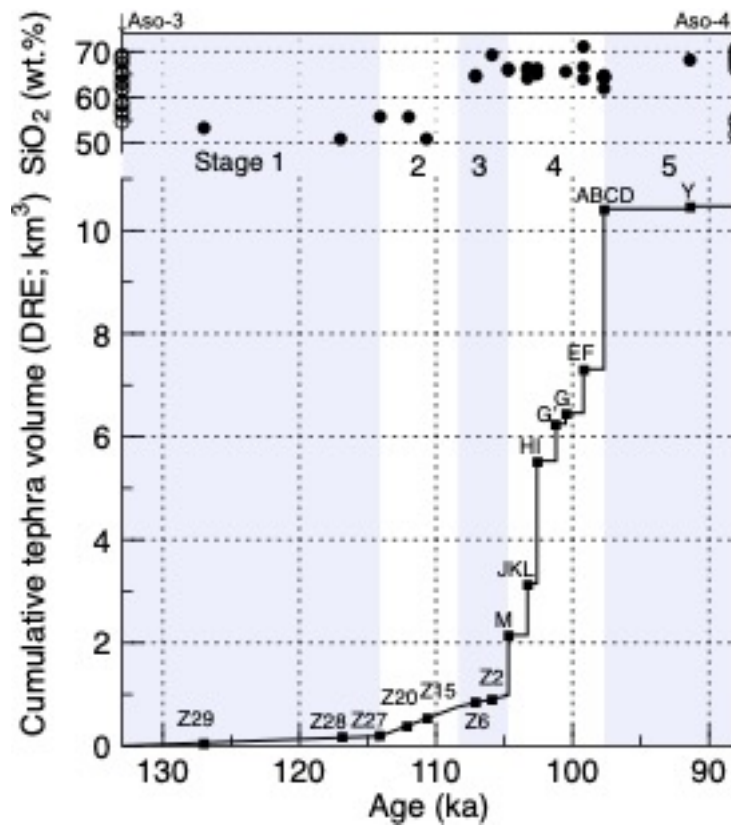


図 1.2-5 阿蘇 4/3 テフラ群の積算マグマ噴出量階段図と全岩化学組成

以下、Stage 1 から順に噴出物の特徴を述べる。Stage 1 には下位から 3 枚の降下スコリア Z29 テフラ、Z28 テフラ、Z27 テフラがある。それぞれの間の風化火山灰は、陽目では 1.5～2.5 m と厚く、噴火活動の時間間隔は長い。Z29 テフラは、4/3 間テフラ群の最下部のスコリア層である。阿蘇 3 火砕流との間に厚さ約 1.5 m の黄褐色風化火山灰土壌を挟む。スコリアは最大径 2 cm 程度で、赤褐色～黒色でよく発泡し、径 2 mm 以下の斜長石、かんらん石、直方輝石、直方輝石の斑晶を含む。径 5 mm 以下の石質岩片を少量含む。Z28 テフラは、Z29 の約 2.5m 上位に位置し、厚さ 12 cm の降下スコリアで最大粒径は約 2cm である。全体に黒色のスコリアが多いが上部では赤褐色のスコリアが卓越する。斑晶として 2 mm 以下の斜長石、かんらん石、直方輝石、3 mm 以下の直方輝石を含む。Z27 テフラは、陽目では Z28 の 75 cm 上位に位置する、厚さ 16 cm の降下スコリアである。黒色～暗灰色～暗褐色で、スコリアの最大粒径は 5 cm に達する。径 2 mm 以下の斜長石、かんらん石、直方輝石、直方輝石の斑晶を含む。スコリアには表面に垂直な冷却節理が入りやすく、しばしばサイコロ状にこわれて、よく角張った破片となるのが特徴的であり、他の地域と対比が付きやすい。

Stage 2 は、Z26 から Z10 の 17 枚の降下テフラから構成される。テフラ間の土壌は数 cm から 20 数 cm 程度であり、スコリア層や細粒火山灰から構成される。Z20 テフラは、陽目では Z27 の約 80cm 上位に位置する降下スコリアで、厚さ 11cm で最大径 2cm 程度の赤褐色スコリアからなる。スコリアは径 1mm 以下の斜長石、かんらん石、直方輝石、直方輝石を含む。Z17 テフラは、陽目では Z20 の約 40cm 上位に位置する降下スコリアで厚さ 5～11cm の 5 枚のスコリア層とそ

れを覆う厚さ 4cm の成層した暗灰色火山灰からなる。Z15 テフラは、陽目では Z17 の 16cm 上位に位置する降下スコリアで厚さ 4~10cm の 5 枚のスコリア層とそれを覆う厚さ 1cm の灰色火山灰からなる。5 枚のスコリア層の境界はぼんやりとしてはっきりしないこともある。スコリアは径 1mm 以下の斜長石、かんらん石、直方輝石、直方輝石を含む。Z11 テフラは、陽目では Z15 の約 60cm 上位に位置する厚さ 14cm の黒色~暗灰色の降下火山灰である。下部から中部に細粒な(径<2mm)スコリアからなる火山灰層を 3 枚挟むのが特徴的である。高森町片山(TK11033 地点)では、スコリアの径は 4mm 程度と粗くなる。スコリアは径 1mm 以下の斜長石、かんらん石、直方輝石、直方輝石を含む。その他、Z26, Z25, Z24, Z23, Z22, Z10 は細粒火山灰、Z21, Z19, Z18, Z16, Z13, Z12 は降下スコリアで、いずれも厚さ数 cm 以下と薄い。

Stage 3 は、Z9 から Z1 の 9 枚の降下テフラからなる。Z6 テフラは、厚さ 8cm の白色の降下軽石とそれを覆う成層した厚さ 19cm の黒色や青灰色火山灰や径 2mm 未満の細粒な軽石からなる。軽石は、径 1mm 以下の斜長石、直方輝石、直方輝石斑晶を含む。Z2 テフラは、厚さ 11cm の白色の降下軽石であり、径 1mm 以下の斜長石、直方輝石、直方輝石斑晶を含む。その他、Z9 は成層した灰色~白色の火山灰で径 1mm 程度の細粒軽石を伴う。Z8 Z5, Z4, Z3 は青灰色の薄い降下火山灰、Z7 は Z6 の 13cm 下にある薄い白色の降下軽石、Z1 は、Z2 の約 20cm 上位にある火山灰で径 2mm 未満の灰白色軽石からなる。

Stage 4 は、M, JKL, HI, G', G, EF, ABCD の 7 つのテフラから構成される。M テフラは、基底部に成層した黒色~灰色の火山灰があり、それを厚さ 50cm の白色降下軽石が覆う。それを軽石層や黒色~灰色の火山灰層の累層が覆う。中~上部の軽石層の直下は、若干土壌質の風化火山灰となっている。基底の軽石には径 1mm 以下の斜長石、直方輝石、単斜輝石斑晶を含む。JKL テフラは、基底部付近に厚さ約 1.6m の厚い白色の降下軽石(K)があり、それを成層した降下軽石と降下火山灰の互層(J)が覆う。降下軽石(K)の直下には、成層した軽石と火山灰の互層(L)を伴うのが特徴的である。K 軽石には径 1mm 以下の斜長石、直方輝石、単斜輝石斑晶を含む。竹田市街地など遠方では、しばしば J や L は不鮮明となり、厚い軽石の K だけが観察されることが多い。L は、成層した白色軽石層と灰白色火山灰の互層とそれを覆う黒色火山灰からなる。成層した白色軽石層は、淘汰があまり良くない特徴がある。HI テフラは、基底部に厚い白色降下軽石(I)があり、それを厚い成層した軽石と火山灰の互層が覆う。同一地点での H は下位層準の J に比べ、全体の層厚が大きく、単層の厚さも厚く、構成粒子の粒径も大きい傾向がある。基底部の I は、陽目では厚さ 29cm だが、高森町片山では厚さ 2.3m にも及ぶ。軽石には径 1mm 以下の斜長石、直方輝石、単斜輝石斑晶を含む。H は、軽石層や火山灰層が成層しているが、黒色の径 1-2mm 程度の岩片を多く含む場合がある。また、厚さ 2-4cm 程度の粘土質の風化火山灰を数層挟むのが特徴的である。G' テフラは G テフラの下位にある暗灰色の厚い降下火山灰層である。H との間には厚さ 30cm の火山灰土壌を挟む。G テフラは、G' テフラの 20cm 上位の降下軽石である。陽目では 3 枚の下位から厚さ 57cm, 9cm, 19cm の 3 枚の軽石層からなるが、遠方では 1 枚の軽石層のみからなる場合が多い。軽石には径 1mm 以下の斜長石、直方輝石、単斜輝石斑晶を含む。EF テフラは、基底部の白色の降下軽石(F)とそれを覆う数枚の薄い軽石層を含む成層した火山灰層(E)から構成される。E の成層した火山灰層はカルデラから離れると急速に成層構造がはっきりしなくなり見かけ上無構造に見える場合がある。F の白色軽石は、ほかにはあ

まりない、黒雲母や普通角閃石の斑晶を含むことが特徴的である。しかしながら上位の E の中の軽石層は、黒雲母や普通角閃石を含んでいない。EF と ABCD の間の土壌中には、南九州起源の Ata 火山灰が挟まれている。ABCD テフラは下位から軽石層(D), 成層した軽石・火山灰互層(C), 黒色火山灰層(B), 軽石層(A) から構成される。D は 3 層の白色軽石層から構成される。D 層の軽石は径 1mm 以下の斜長石, 直方輝石, 単斜輝石斑晶を含む。D 層の直下には厚さ数 mm の薄い黒色火山灰がある。この黒色火山灰はカルデラ南東方向では厚く, 高千穂町川添では, 15cm の成層した黒色火山灰が観察される。C 層は, 成層した軽石・火山灰互層で 20 枚近い白色軽石層を挟む。C 層の軽石も径 1mm 以下の斜長石, 直方輝石, 単斜輝石斑晶を含む。B 層は, 黒色の成層した火山灰層とそれを覆う青灰色の成層した火山灰層である。竹田市荻町野鹿では, 上部の青灰色火山灰層に薄い白色軽石層を挟んでいる。A 層は, 灰白色～淡橙色の降下軽石層で 10 枚程度の軽石層とその間の薄い黒色火山灰から構成される。A 層の軽石も径 1mm 以下の斜長石, 直方輝石, 単斜輝石斑晶を含む。

Stage 5 は, ABCD テフラと阿蘇 4 火砕流の間の土壌層とそれに挟まれる Y テフラを指す。Y テフラの ABCD の間には, 南九州由来の K-Tz (鬼界葛原) 火山灰が確認された。Y テフラは, 単一の降下ユニットからなる白色の降下軽石である。ABCD テフラと阿蘇 4 火砕流の間の土壌中の中央より阿蘇 4 に近い場所に位置する。斑晶として, 径 2mm 以下の斜長石, 黒雲母, 角閃石, 直方輝石を含むことが特徴的である。

陽目では, Y テフラの上位に厚さ約 20cm の火山灰土壌を挟んで厚さ 38cm の白色降下スコリアがあり, 阿蘇 4 火砕流に直接覆われる。陽目の他, 複数地点で土壌を挟まず阿蘇 4 火砕流堆積物と連続的に累重するため, これらは阿蘇 4 火砕流噴火最初期の堆積物であると判断される。阿蘇 4 火砕流噴火の最初期の噴出物であるので, これを阿蘇 4X 降下軽石と呼ぶ。この軽石は Y 軽石と同様に黒雲母斑晶などを含むことが特徴的である。高森町胡桃原では, この 4X 降下軽石が約 1.3m の厚さがあり, それを直接覆って同質の火砕流堆積物(阿蘇 4X 火砕流堆積物, が観察できる。4X 火砕流堆積物は, 阿蘇 4A 火砕流堆積物の異質角礫層に覆われている。

阿蘇 4/3 テフラを含む阿蘇カルデラ噴出物の全岩化学組成 (H28 報告書) と Hunter (1998) の分析データとの比較検討を行った。阿蘇の全岩マグマ組成は, 基本的には Hunter (1998) に沿って分布する (図 1.2-6)。しかしながら, Hunter (1988) と比較して, 以下に示す点において違いが認められる。

- (1) Aso-4/3 および Aso-4 の一部は, より高い SiO<sub>2</sub> 濃度を示す。
- (2) Aso-4/3, Aso-4, および Aso-CC (阿蘇中央火口丘群) の一部は, より低い SiO<sub>2</sub> 濃度を示す。
- (3) Aso-2 の一部は, より高い TiO<sub>2</sub> 濃度を示す。
- (4) Aso-3, Aso-4/3, Aso-4, および Aso-CC の一部は, より低い TiO<sub>2</sub> 濃度を示す。
- (5) Aso-2 と Aso-4/3 の一部は, より低い MgO 濃度を示す。
- (6) Aso-CC の一部は, より高い MgO 濃度を示す。
- (7) Aso-2, Aso-3, および Aso-4/3 の一部は, より低い K<sub>2</sub>O 濃度を示し, 特に Aso-4/3 の苦鉄質マグマで顕著である。
- (8) Aso-1, Aso-3 および Aso-4/3 の一部は, より高い K<sub>2</sub>O 濃度を示し, 特に Aso-4/3 の珪長質マグマで顕著である。

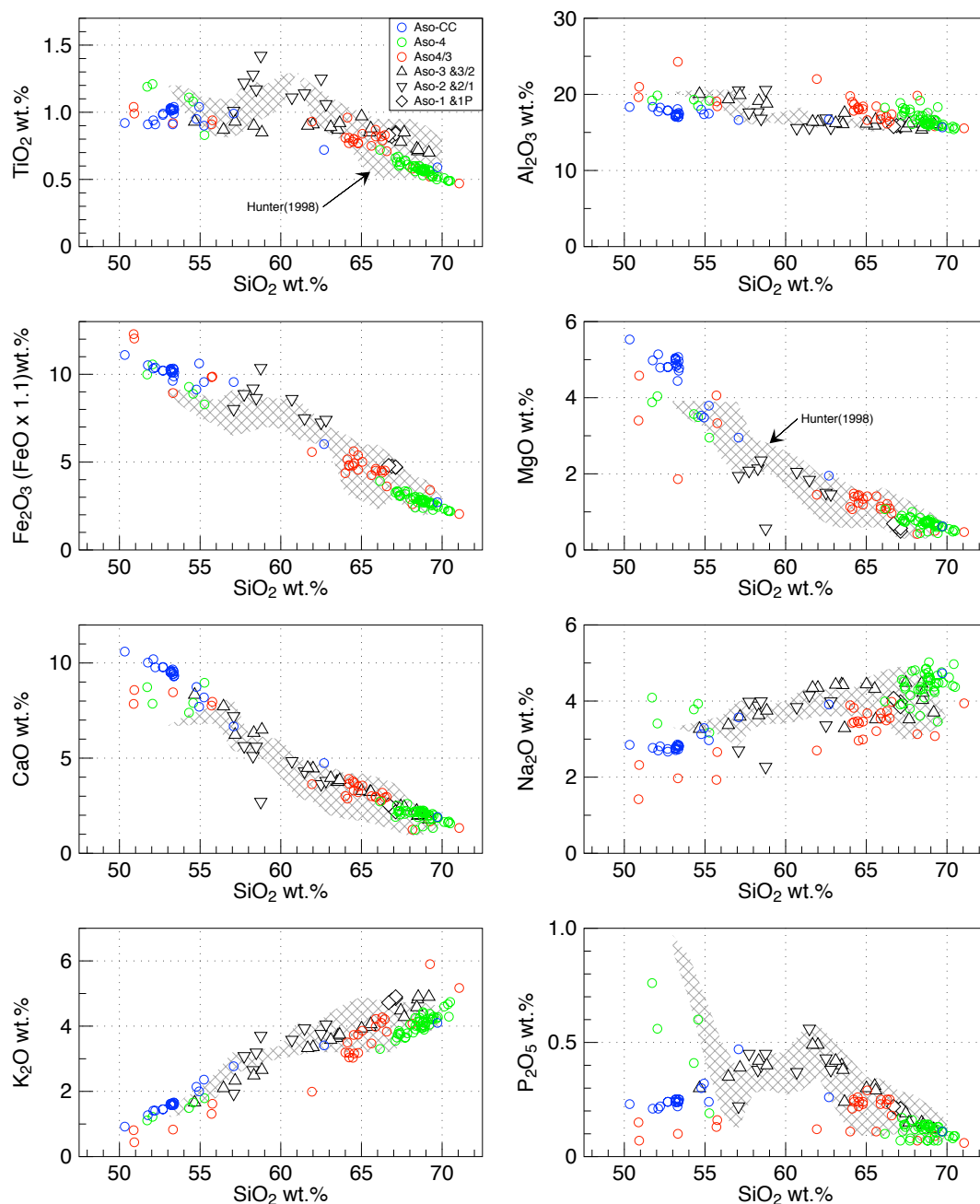


図 1.2-6 阿蘇火山噴出物の主成分全岩化学組成

(9)Aso-4/3, Aso-4, および, Aso-CC の一部は, より低い  $P_2O_5$  濃度を示し, 特に Aso-4/3 および Aso-CC の苦鉄質マグマで顕著である.

全岩化学組成でみられた  $TiO_2$  組成の変化傾向は, 斑晶メルト包有物でも認められており, 斑晶ガラス包有物ではさらに高い  $TiO_2$  濃度のものも存在する. 分化とともに  $TiO_2$  が高まる理由とマグマの性質は以下のとおりである. Rhyolite-MELTS を用いたマグマの熱力学計算によれば, 低含水量マグマでは斜長石が輝石よりも先に結晶化する. 斜長石は輝石に比べて  $TiO_2$  をほとんど含まないため, 斜長石が先に晶出すると残液の  $TiO_2$  濃度が高まる. 玄武岩から安山岩組成へとマグマが分化 (結晶化) するにつれ  $TiO_2$  濃度が高まる観測結果は, 水に乏しいマグマが分化

したためだと解釈できる。

$K_2O$  組成の変化傾向は、斑晶メルト包有物でも認められており、斑晶メルト包有物ではさらに  $K_2O$  と濃度がさらに高いものと低いものが認められる。 $K_2O$  の組成変化傾向が生じる理由とマグマの性質は以下のとおりである (Miyagi et al., 2012)。メルト中の  $K_2O$  は角閃石、黒雲母、正長石以外の造岩鉱物にはほとんど含まれない。また造岩鉱物の  $SiO_2$  濃度は、石英を除きメルトよりも低い。したがってマグマが結晶化すれば  $K_2O$  と  $SiO_2$  はメルトに濃集する。ただし石英が晶出する場合にはメルトの  $K_2O$  は増加し  $SiO_2$  は減少する。石英と  $K_2O$  に乏しい他の造岩鉱物が同時に晶出する場合には、メルトの  $K_2O$  は増加し  $SiO_2$  は鉱物の晶出割合に応じて増減する。これにより、 $SiO_2$  で規格化された  $K_2O$  濃度に多様性が生じる。石英の安定領域は、マグマの含水量が少ない条件で拡大する。したがって  $SiO_2$  で規格化された  $K_2O$  濃度の高いマグマは、水に乏しいことが示唆される。

また  $P_2O_5$  の変化傾向については以下のとおりである。Watson (1980)が行った高温高压実験によれば、アパタイトの溶解度は  $SiO_2$  濃度と負の相関であり、温度とは正の相関、圧力の効果は小さく玄武岩マグマには 3-4wt%もの  $P_2O_5$  を溶解する。このことから、阿蘇の苦鉄質マグマの  $P_2O_5$  濃度に観察された大きなばらつきは、温度の低下を示すと考えられる。

## 文 献

- Fierstein, J. and Nathenson, M. (1992) Another look at the calculation of fallout tephra volumes. *Bull. Volcanol.*, **54**, 156-167.
- Hunter, A. G. (1998) Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso volcano, SW Japan. *Jour. Petrol.*, **39**, 1255-1284.
- Miyagi, I., Itoh, J., Hoang, N. and Morishita, Y. (2012) Magma systems of the Kutcharo and Mashu volcanoes (NE Hokkaido, Japan): Petrogenesis of the medium-K trend and the excess volatile problem. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **231-232**, 50-60.
- 長橋良隆・佐藤孝子・竹下欣宏・田原敬治・公文富士夫 (2007) 長野県、高野層ボーリングコア (TKN-2004) に挟在する広域テフラ層の層序と編年. *第四紀研究* d, **46**, 305-325.
- Watson, E. B. (1980) Apatite and phosphorous in mantle source regions: An experimental study of apatite/melt equilibria at pressures to 25 kbar. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **51**, 322-335.

### 1.3 支笏カルデラの事例調査

#### 【実施内容】

本研究では、支笏-洞爺火山地域における最初のカルデラ形成噴火である洞爺火山に注目し、約13万年前の先行噴火および、約11万年前の洞爺カルデラ形成噴火について、大規模噴火の準備期から破局噴火へと至るマグマ過程を地質学的に検討する。その上で、支笏-洞爺火山地域における最新のカルデラ形成噴火である支笏カルデラ形成噴火や北海道東部の屈斜路カルデラ形成噴火など、後カルデラ火山群の活動を含めて比較検討することにより、大規模珪長質火山地域の一生を明らかにすることを試みる。今年度は、洞爺後カルデラ火山である中島火山を対象に K-Ar 年代測定を行った結果、中島火山は約11万年前の洞爺カルデラ形成噴火直後から活動を始めていた可能性があることが明らかになった。また、洞爺カルデラ形成噴火は、層相・時間間隙の有無・本質物質の構成比およびガラス組成から6つの噴火ユニット、2つの噴火ステージに区分された。その結果、Stage 2 の Unit 5 が最大規模で総噴出量約170km<sup>3</sup>DREのうち約60%を占めることや斑晶の乏しい CP タイプが本質物質全体の90%程度を占めることが明らかになった。また、Unit 5 に岩片濃集層を伴うことから、この時期に火道を形成・拡大して大規模噴火を起こし、その後には陥没カルデラを形成した可能性が考えられる。

#### 【調査・研究成果】

##### (1) 支笏-洞爺火山地域の活動史

Amma-Miyasaka et al. (2020) によると、支笏-洞爺火山地域では、堆積岩類に覆われた地域で中期中新世頃から安山岩質火山活動が始まり、これらの安山岩質活動は50万年前頃までに支笏-洞爺火山地域で収束したことで、その後約40万年間の休止期間において約13万年前から5つの火山が相次いで珪長質火山活動を開始しており、現在までに約700km<sup>3</sup>DREに及ぶマグマを噴出したことが明らかになっていた。昨年度の本研究では、洞爺湖周辺地域で1Ma前後以降に噴出したと考えられている火山噴出物について文献調査および地表調査を行い、このうち2試料についてジルコンの FT および U-Pb 年代測定、K-Ar 年代測定を実施した。その結果、1.35Ma、3.22Ma という年代値が得られ（図 1.3-1 の青字）、いずれも支笏-洞爺火山地域における約50万年前から約13万年前までの休止期間より明らかに古いことから、従来の噴火履歴とは矛盾しないことが確認された（図 1.3-2）。

そこで、今年度は洞爺後カルデラ火山である中島火山について、その活動開始年代を明らかにするため、地質調査と年代測定を行った。図 1.3-3 は、洞爺火山地域の活動史の概略を示したものである。洞爺火山地域では、カルデラ形成噴火の15000年ほど前に長流川火砕流堆積物を噴出する噴火があり、カルデラ形成後には洞爺湖内で中島火山、洞爺湖南縁で有珠火山が活動を開始したと考えられている。中島火山ではテフラ層序から48ka (Miyabuchi et al., 2014)、溶岩ドームから40-45ka (高島ほか, 1992) の TL 年代が得られているほか、有珠火山ではその活動開始時期について曾屋ほか(2007)では10-20ka、Goto et al. (2015) では18-19ka、Miyabuchi et al. (2014) では30ka など様々な年代値が報告されている。



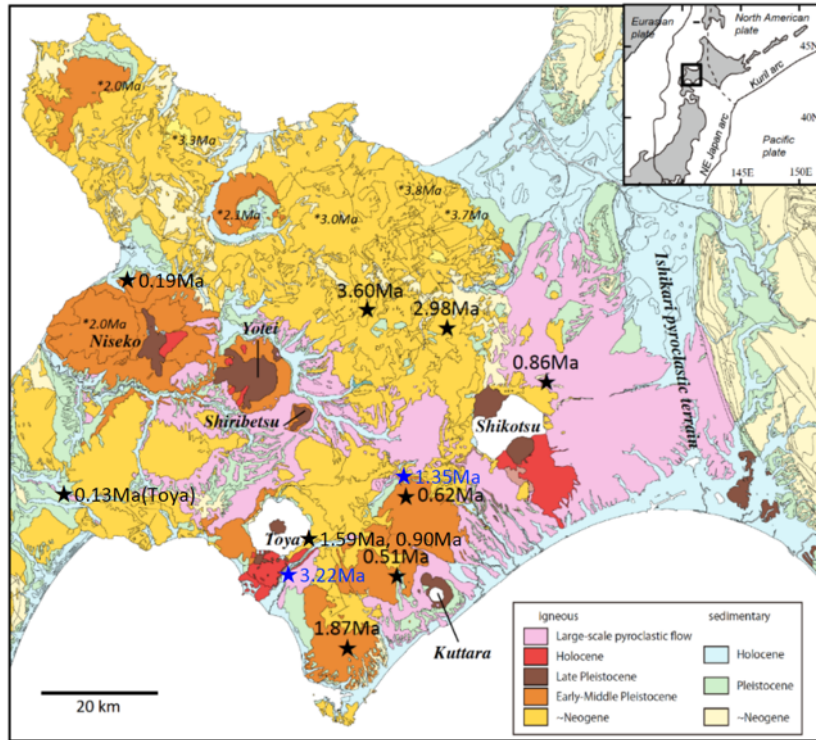


図 1.3-1. 支笏湖周辺地域火山噴出物の分布および噴出年代 (Amma・Miyasaka et al., 2020 に奥村ほか, 1984; 高島ほか, 1992; 北海道電力, 2016 の年代値を追加, 青字が令和元年度の年代測定値).

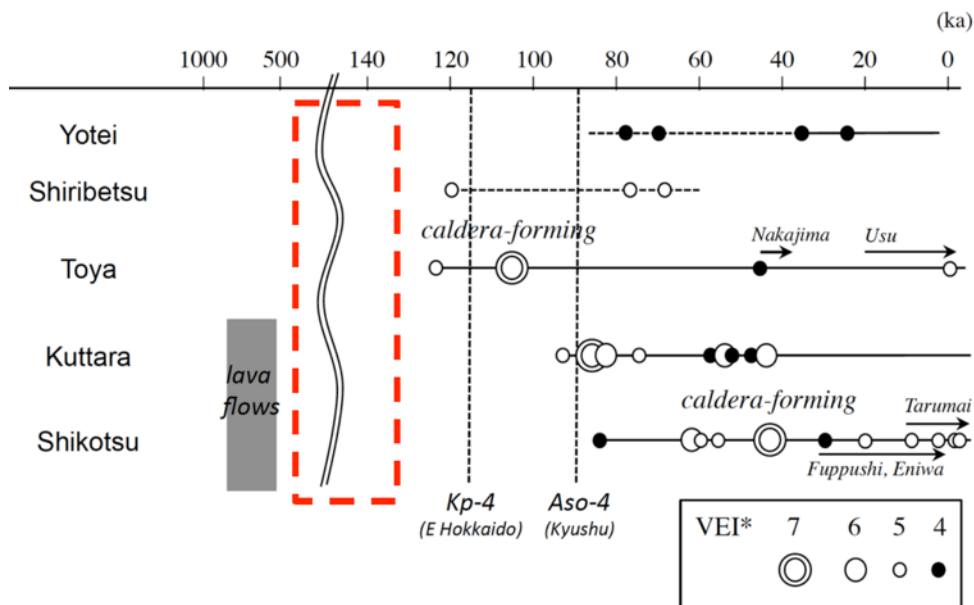


図 1.3-2. 支笏-洞爺火山地域の噴火履歴 (Amma・Miyasaka et al., 2020).

後カルデラ期	有珠火山	新期活動(1663AD～)	ドーム形成・テフラ噴出
		外輪山形成期	山体崩壊・外輪山形成
			側火山(スコリア丘)形成
	成層火山形成		
中島火山		ドーム形成 テフラ噴出	
カルデラ形成期	洞爺火山	洞爺火砕流堆積物(106ka)	
先カルデラ期		長流川火砕流堆積物(122.5ka)	
基盤			

図 1.3-3. 洞爺火山地域の活動史概略(曾屋ほか, 2007; Amma-Miyasaka et al., 2020 を改変).

これらの先行研究をふまえ、中島火山ではまず溶岩ドームの形成時期をおさえることを目的として年代測定を行った。中島火山は大島とその南側にある観音島、弁天島、饅頭島からなるが、大島は Goto et al. (2015) によって複数の溶岩ドームに区分されており、その地形の開析状況から北東岬ドームと南西ドームが比較的古く、東山ドーム、北山ドーム、北西ドーム、西山ドームはそれよりも新しいと考えられる (図 1.3-4)。そこで、本研究では中島火山全体で試料を採取するとともに (図 1.3-5)、図 2-1-4 の 1 で採取した東山ドームと 2.5 で採取した北東岬ドームの岩石について、K-Ar 年代分析を行った。これらは両者ともに斑晶量 30-40% 程度の斜方輝石角閃石デイサイトで、角閃石斑晶は周縁部でオパサイト化していた (図 1.3-6)。いずれの試料も石基部分のカリウム含有量が 1.045-1.139wt% 程度と低く大気アルゴン混入率が 92.5-98.8% と高いため誤差がやや大きい、K-Ar 年代値は、より新しいと考えられる東山ドームで  $0.05 \pm 0.05\text{Ma}$ 、より古いと考えられる北東岬ドームで  $0.10 \pm 0.03\text{Ma}$  となった (表 1.3-1)。これらは洞爺カルデラ形成噴火の噴火年代 (106ka) よりも若く、東山ドームの年代値はこれまでに得られているテフラ・ドームの噴火年代 (48~40ka) と同程度となっており、層序とも矛盾しない。この結果から、中島火山は洞爺カルデラ形成噴火の直後から活動を始めていた可能性があり、今後は島内で採取したテフラの年代測定等も行い中島火山の活動史を再検討する予定である。

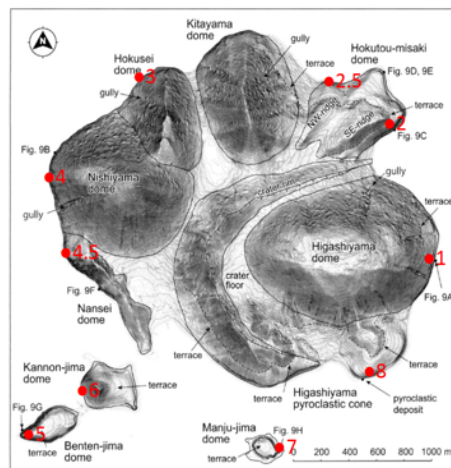


図 2-1-4. 中島火山の溶岩ドーム分布図と試料採取地点(Goto et al., 2015 に加筆).



図 1.3-5. 中島火山の露頭写真（番号は図 1.3-4 の露頭位置）.

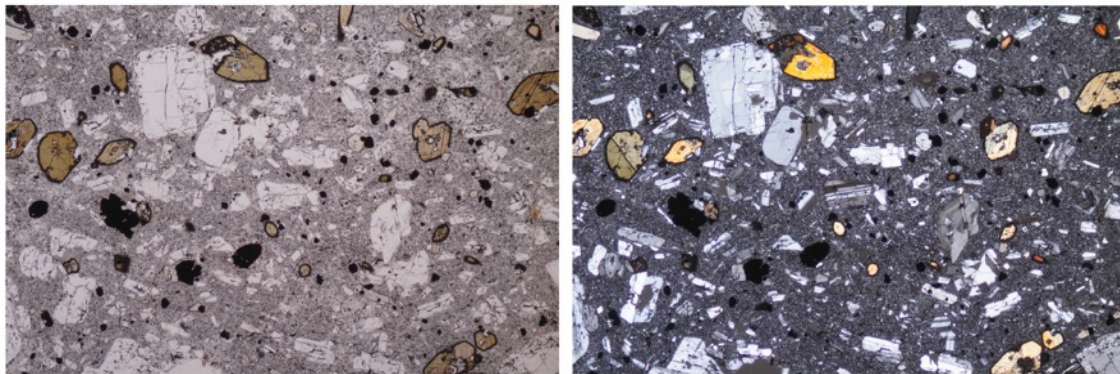


図 1.3-6. 年代測定試料（図 1.3-4 の 2.5）の薄片写真.

表 1.3-1. 中島火山噴出物の年代測定結果.

試料名	測定物 (粒径)	カリウム含有量 (wt.%)	放射性起源 <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-6</sup> cc STP/g)	K-Ar年代 (Ma)	非放射性起源 <sup>40</sup> Ar (%)
1	石基 (187-250 μm)	1.045 ± 0.021	0.22 ± 0.22	0.05 ± 0.05	98.5
2.5	石基 (187-250 μm)	1.139 ± 0.023	0.45 ± 0.12	0.10 ± 0.03	92.5

## (2) 洞爺カルデラ形成噴火の噴火推移

洞爺カルデラ形成噴火噴出物については、横山ほか (1973)、池田・勝井 (1986)、Lee (1996)、雁澤ほか (2007)、塩谷(2012MS)などによって層序の概略が明らかにされており、大きく下部の火砕流堆積物と上部の火砕流堆積物に分けられ、両者の間には降下火砕堆積物が存在することが指摘されていた。最近では Goto et al. (2018) が、洞爺カルデラ形成噴火噴出物を大きく6つの噴火ユニットに再区分し、これらは連続的に噴出したこと、Unit 2の火砕流堆積物が最も広く分布すること、上部の火砕流堆積物で本質物質が多様になることなどを明らかにしているが(図 1.3-7)、それまでの研究の多くは北海道の日本海側に分布する火砕流堆積物を上部ユニットに対比しており、ユニット対比については見解が分かれている。さらに、道東あるいは東北地方に分布するいわゆる洞爺火山灰(町田ほか, 1987)がいずれの火砕流噴火に伴う co-ignimbrite ash なのかについてはこれまでに検討されていなかった。また、多くの研究では洞爺カルデラ形成噴火は連続的に発生したと考えられてきたが、雁澤ほか (2007) は下部の火砕流堆積物 ( $132 \pm 15\text{ka}$ ) と上部の火砕流堆積物 ( $113 \pm 13 \sim 114 \pm 11\text{ka}$ ) でやや異なる値を報告しているほか、塩谷(2012MS)は下部火砕流堆積物の上位に二次堆積物があることを指摘しており、両者の間に時間間隙があったのかについても再検討する必要がある。

昨年度は、洞爺湖近傍地域の模式露頭において層序について Goto et al. (2018) のユニット区分を確認した上でマグマタイプの層序変化を明らかにし、洞爺湖からおおよそ 50km の範囲でユニット対比を行った。本年度はさらに範囲を広げて石狩低地帯や東北地方の洞爺カルデラ形成噴火噴出物についても対比を行ったところ(図 1.3-8)、やや長い時間間隙のあと噴火の後半に最大規模の火砕流噴火が発生したことが明らかになった。

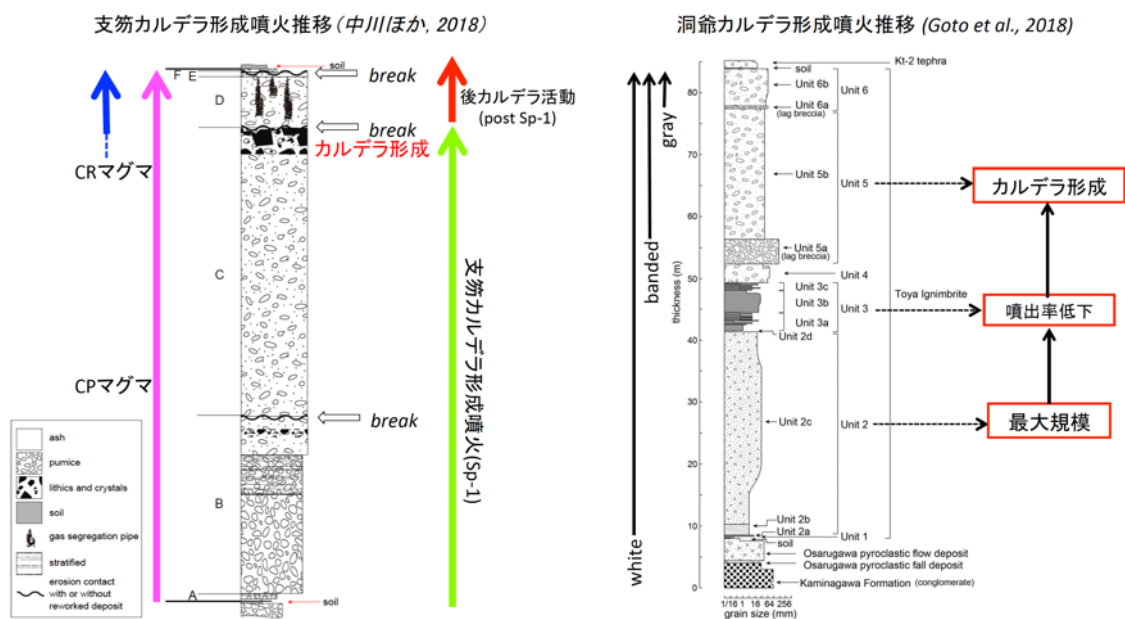


図 1.3-7. 支笏カルデラ形成噴火および洞爺カルデラ形成噴火の噴火推移。

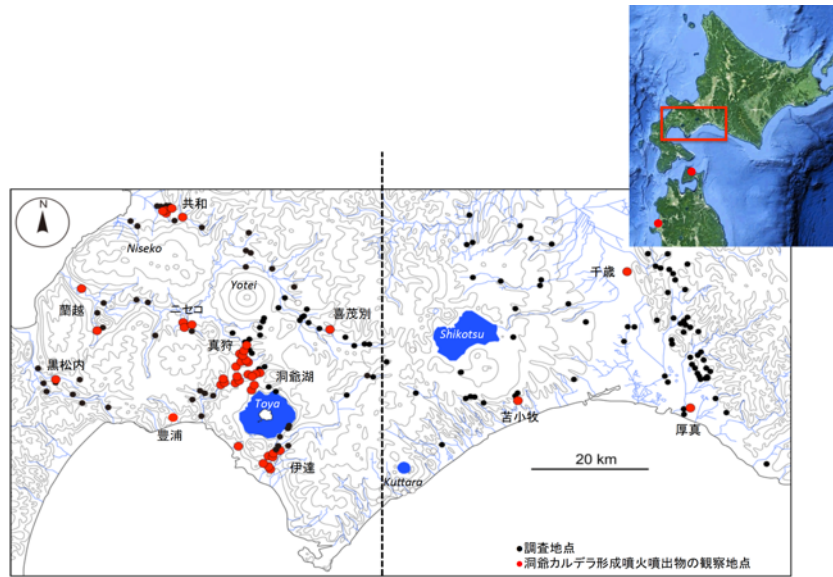


図 1.3-8. 洞爺カルデラ形成噴火噴出物の調査地点図.

### (3) 洞爺湖近傍地域における層序および時間間隙の検討

図 1.3-9 は昨年度からの本研究による、洞爺カルデラ形成噴火噴出物の模式柱状図と、洞爺湖近傍地域の代表的な露頭写真である。洞爺湖南方約 10km の伊達市および洞爺湖北方約 10km の洞爺湖町における洞爺カルデラ形成噴火噴出物は、Goto et al. (2018)と同様に、下位から薄い細粒降下火山灰堆積物 (Unit 1)、細粒物に富む非溶結な火砕流堆積物 (Unit 2)、細粒物に富み成層構造の発達したサージ堆積物と降下火山灰堆積物の互層 (Unit 3)、粗粒な軽石や岩片に富む淘汰の悪い火砕流堆積物 (Unit 4)、最下部に lag breccia を伴う粗粒な軽石や岩片に富む淘汰の悪い火砕流堆積物 (Unit 5 および Unit 6) に分類されることが確認された。Unit 3 下位の下部火砕流堆積物は、本質物質の最大粒径 2cm 以下と破碎度が高く豆石を多く含むほか、最下部ではクロスミナが発達しており、最上部ではガスパイプに富むという特徴がある。一方で、Unit 3 上位の上部火砕流堆積物は、粒径 5cm 以上の本質物質や岩片に富み、全体に塊状無層理で豆石やガスパイプは認められず、下部火砕流堆積物とは特徴が大きく異なる。また、Unit 3 の互層においても豆石が大量に認められることを考え合わせると、Goto et al. (2018)が指摘しているように、Unit 3 までは水の関与が大きい噴火であったことを示唆している。

そこで、上記のユニット区分をもとに各ユニット間の時間間隙に注目して野外調査を行ったところ、Unit 1-Unit 2 間、Unit 4-Unit 5-Unit 6 間には時間間隙があったことを示す産状は認められず、ほぼ連続的に堆積したと考えられるのに対して、Unit 2-Unit 3 および Unit 3-Unit 4 境界にはいくつかの時間間隙を示す証拠を発見した。図 1.3-10 下の写真は Unit 2-Unit 3 境界で、Unit 2 の最上部に薄い火砕流堆積物が複数枚累重しており、ガスパイプがそれぞれ上位の火砕流堆積物や Unit 3 堆積物を乱すような産状は観察できなかった。このことは、Unit 2 の最後に小規模な火砕流噴火が複数回発生しており、それぞれの間にガスが抜けるだけの時間があったことを示唆している。同様の産状は、洞爺湖町だけでなく伊達市においても観察された。一方で、Unit 3 と Unit 4 の境界は全体としては非常にシャープであるが、洞爺湖町において Unit 4

の最下部に直径 30cm ほどの Unit 3 堆積物のブロックが取り込まれているのを確認した (図 1.3-10 上). このことは, Unit 3 全体が硬く締まった状態になってから Unit 4 の火砕流堆積物が噴出したことを示唆しており, Unit 3 堆積後にやや長い時間間隙があったと考えられる.

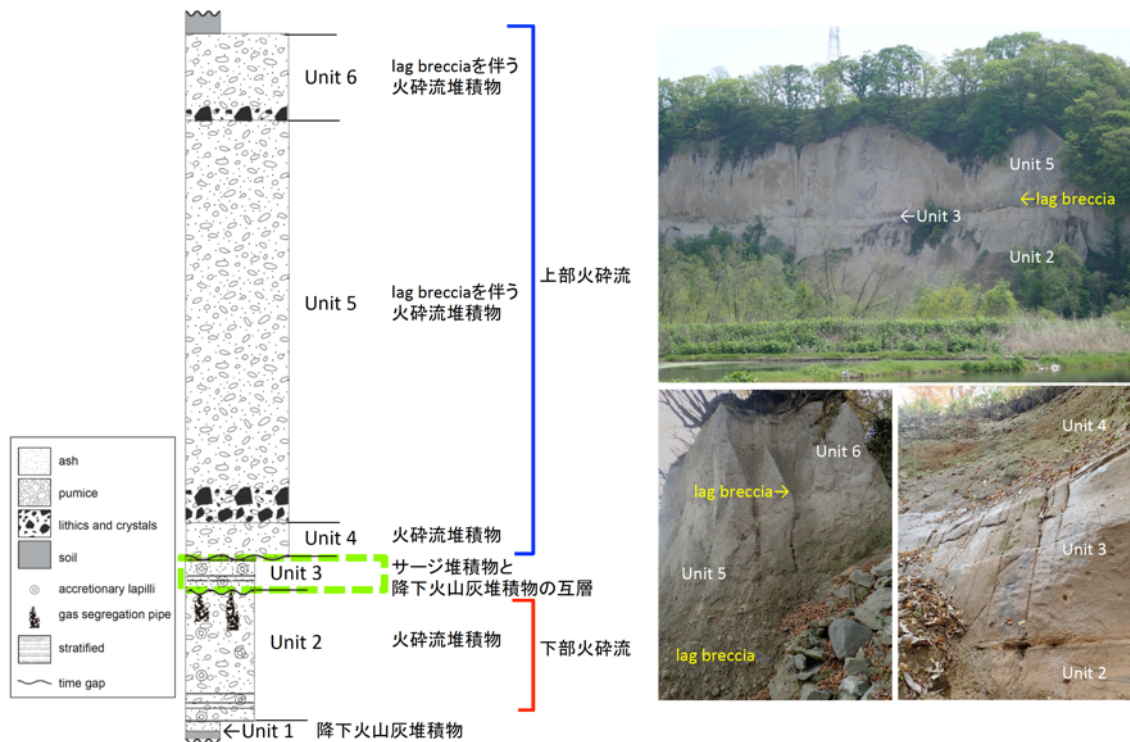


図 1.3-9. 洞爺カルデラ形成噴火噴出物の模式柱状図および代表的な露頭写真.

写真 (上) は洞爺湖南方約 10km の伊達市上館山町, 写真 (左下) は同じく伊達市上長和町, 写真 (右下) は洞爺湖北方約 10km の洞爺湖町大原.

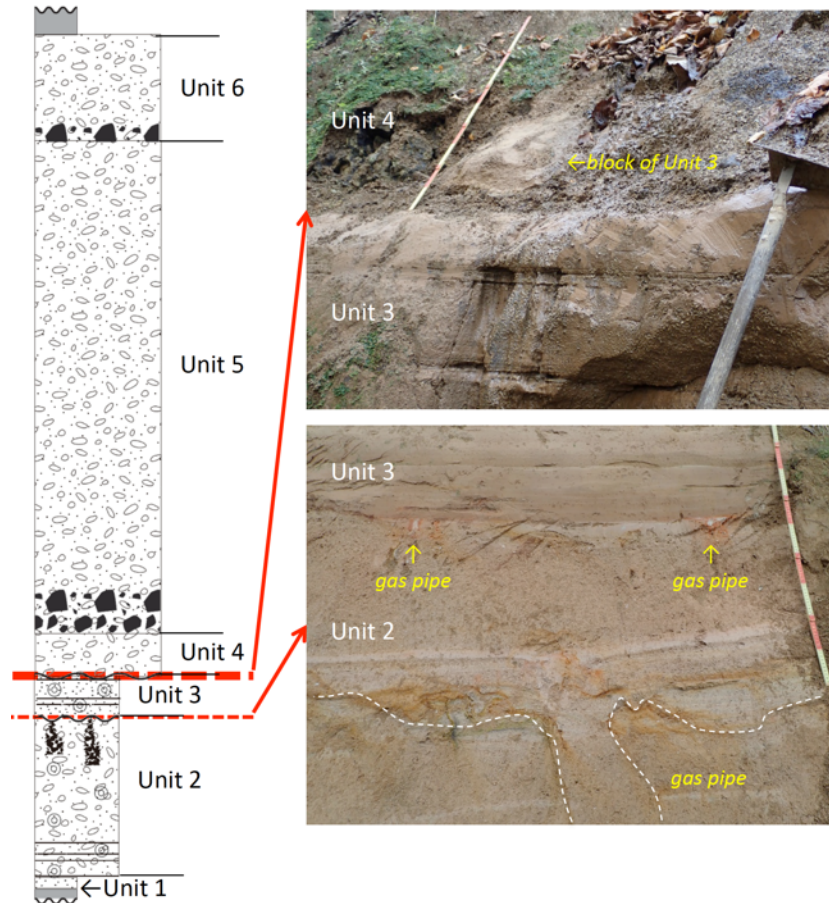


図 1.3-10. ユニット境界における産状 (いずれも洞爺湖町大原) .

#### (4) マグマタイプと層序変化

本研究では、洞爺カルデラ形成噴火噴出物の本質物質を、肉眼での色合いおよび斑晶量から、斑晶に乏しい白色軽石 (CP タイプ)、斑晶に富む白色軽石 (CR タイプ)、および縞状軽石・灰色軽石 (gray,band タイプ) の3つに区分し、その構成比の層序変化を検討した。

図 1.3-11 は各タイプの本質物質の写真と記載岩石学的特徴をまとめた図である。CP タイプ軽石は、斑晶量 3vol%以下の白色軽石で、気泡が繊維状の形態を示すものが多い。斜長石斑晶のほか、石英・斜方輝石・鉄チタン酸化物の斑晶を含むこともある。CR タイプ軽石は、斑晶量は 10-25vol%程度の白色軽石で、斑晶鉱物は、斜長石と石英が大部分を占めるが、斜方輝石、角閃石、鉄チタン酸化物もごく少量認められる。気泡はスポンジ状の形態を示すものが多く、角閃石としてカミングトナイトを含むことによって特徴づけられるが、普通角閃石を伴うこともある。一方で、gray,band タイプ軽石は、白色軽石と灰色軽石が多様な割合で混じっているもので、gray タイプも少量の白色の縞が入っていることが多い。気泡は繊維状のものとスポンジ状の形態を示すものがあり、斑晶量は 10-20vol%程度である。斑晶鉱物は斜長石が多いが、少量の石英、斜方輝石、角閃石、鉄チタン酸化物が認められるほか、ごくまれに単斜輝石やかんらん石を伴うものも存在する。CP タイプや CR タイプに比べて苦鉄質鉱物の割合がやや高く、角閃石はすべて普通角閃石である。



juvenile type	color	bubble type	bubble vol%	phenocryst vol%	plagioclase	quartz	orthopyroxene	clinopyroxene	amphibole	olivine	oxides
CP	white	fibrous	35~55	<3	○~△	△	±	-	-	-	+
CR	white	spongy	35~50	10~25	◎	◎~○	±	-	cummingtonite ± hornblende	-	+
gray, band	gray white+gray	spongy- fibrous	25~50	10~20	◎	○~△	△	±	± hornblende	±	+

◎:>5 vol%, ○: 2-5vol%, △:<2vol%

図 1.3-11. 洞爺カルデラ形成期噴出物の本質物質のタイプと記載岩石学的特徴.

そこで、Unit 2~Unit 6 が連続的に観察できる洞爺湖近傍の伊達市において粒径 4mm 以上の本質物質の構成比を検討したところ、その構成比から洞爺カルデラ形成噴火噴出物のユニット対比が可能であることが明らかになった (図 1.3-12). Unit 2 の火砕流堆積物と Unit 3 のサージ堆積物と降下火山灰堆積物の互層では、その本質物質は CP タイプのみからなり、2mm 以下の粒子においてごく少量の gray,band タイプが認められることが確認された. 一方で、Unit 4 以降では次第に本質物質が多様になり、Unit 4 の火砕流堆積物は CP タイプが約 98wt% を占めるが、1.5wt% 程度の gray,band タイプとごく少量の CR タイプを伴っている. さらに、Unit 5 の火砕流堆積物は CP タイプ 95wt% 程度、CR タイプ約 4wt%、gray,band タイプ 1wt% 程度、Unit 6 の火砕流堆積物では CP タイプが約 50wt%、CR タイプが約 20wt%、gray,band タイプが約 30wt% となり、時間とともに CR タイプと gray,band タイプの量比が急激に増加している.

さらに、全岩化学組成を分析した本質物質 (粒径およそ 40mm 以上) から、CP タイプ、CR タイプ、gray,band タイプの代表的な試料についてガラス組成分析を行った (図 1.3-13). 洞爺カルデラ形成噴火噴出物のガラス組成は、本質物質のタイプによらず大部分が SiO<sub>2</sub>=77wt% 以上の流紋岩質であるが、CP タイプと CR タイプは K<sub>2</sub>O 含有量が明瞭に異なり、CP タイプは K<sub>2</sub>O=3-3.5wt% 程度の非常に狭い範囲に集中するのに対して、CR タイプは K<sub>2</sub>O=1.3-2.8wt% と CP タイプよりも低い値を示す. 一方で、gray,band タイプはいずれの元素においても組成幅が広く、high-K<sub>2</sub>O 側では CP タイプとほぼ同じ組成を示すのに対して、low-K<sub>2</sub>O 側では CR タイプに類似した組成のガラスも見られるが、SiO<sub>2</sub> や Na<sub>2</sub>O に乏しく TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, CaO に富む組成まで広がっている. この結果は、例えば同じ白色軽石で斑晶量の多寡を判断しづらい小さな本質物質であっても、ガラス組成から CP タイプ・CR タイプを識別できることを示唆している.



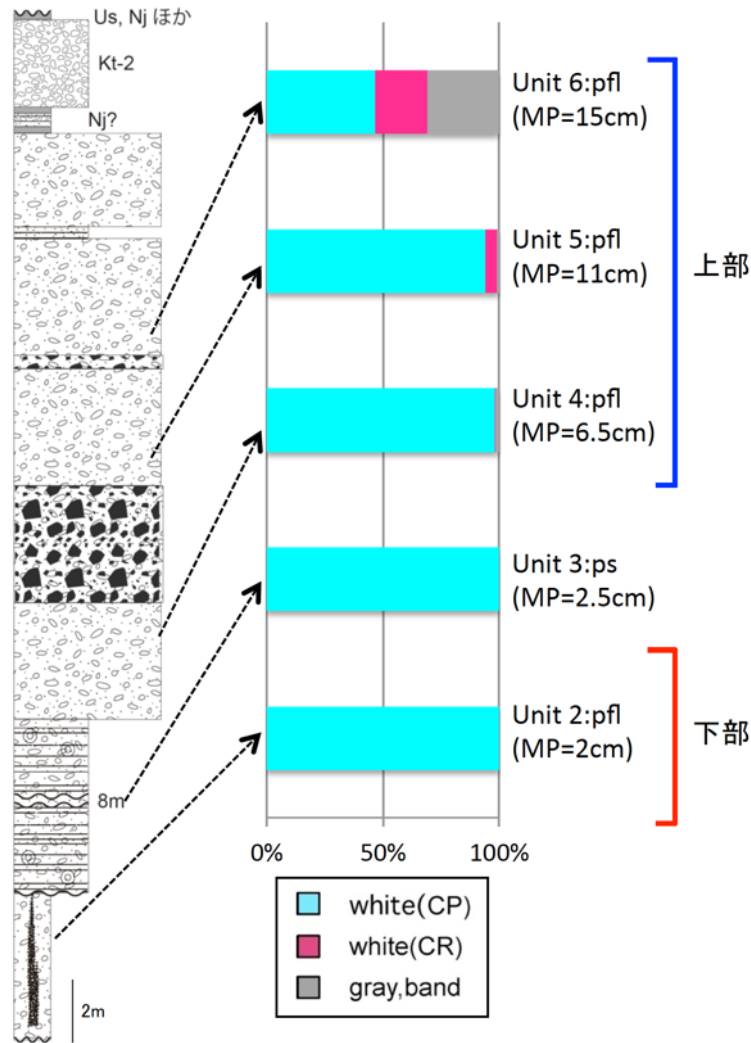


図 1.3-12. 伊達市上長和町における各ユニットの本質物質構成比.

図 1.3-14 は、伊達市でユニットごとに採取した試料から粒径およそ 4mm 以上の軽石片 (Unit 1 については細粒のガラス片) のガラス組成を分析した結果である。Unit 1~Unit 3 はいずれの図においても、図 1.3-13 の CP タイプとほぼ重複する狭い範囲にプロットされるが、Unit 4 以降は組成幅が広がっていく傾向が認められ、特に Unit 6 では  $K_2O=1.5-4.5wt\%$  程度の広範囲に満遍なく分布している。この傾向は、図 2-2-5 で示したように、Unit 2-3 は CP 軽石のみであるのに対して、Unit 4 以降は CR タイプと gray,band タイプの割合が増加していくことと調和的であり、ユニットごとのガラス組成分布からユニット対比が可能であることを示唆している。また、洞爺カルデラ形成噴火噴出物の大部分を占める CP タイプ軽石に注目すると、Unit 4~Unit 6 では、Unit 1~Unit 3 に比べて  $SiO_2$  や  $Al_2O_3$  の組成幅が広く (図 1.3-15)、CP タイプのガラス組成も Unit 1~Unit 3 あるいは Unit 4~Unit 6 への対比に利用できると考えられる。

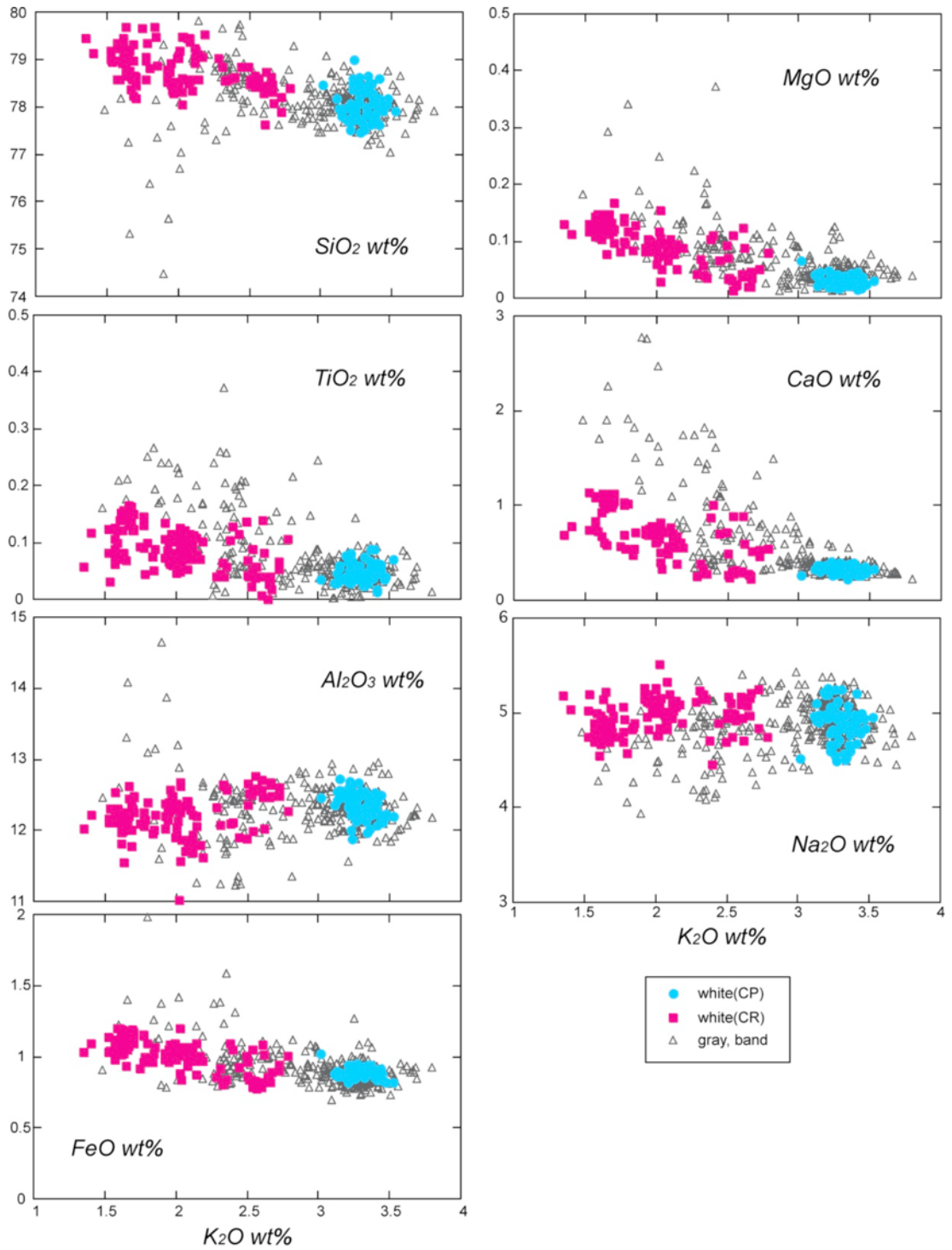


図 1.3-13. 本質タイプごとのガラス組成.

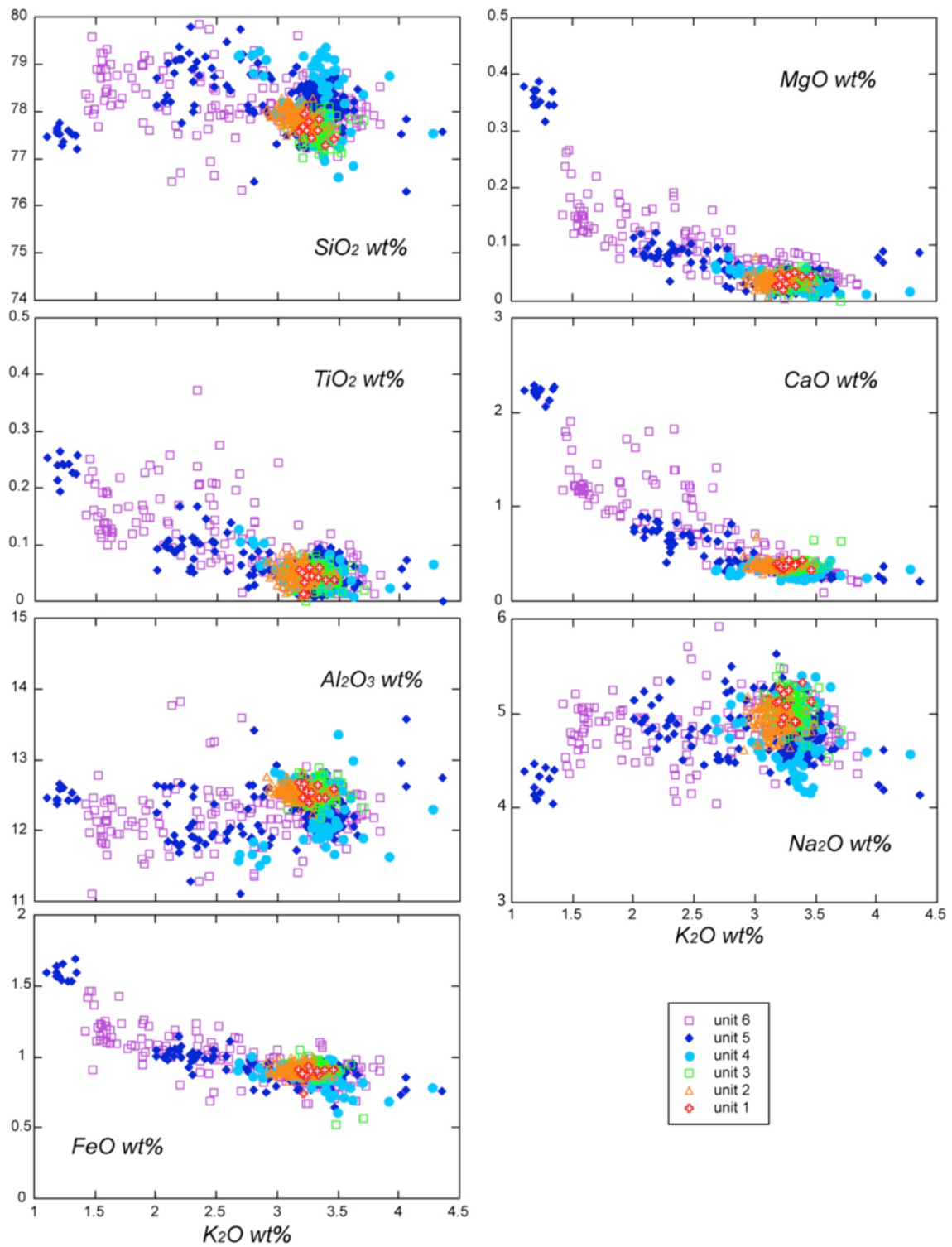


図 1.3-14. ユニットごとのガラス組成.

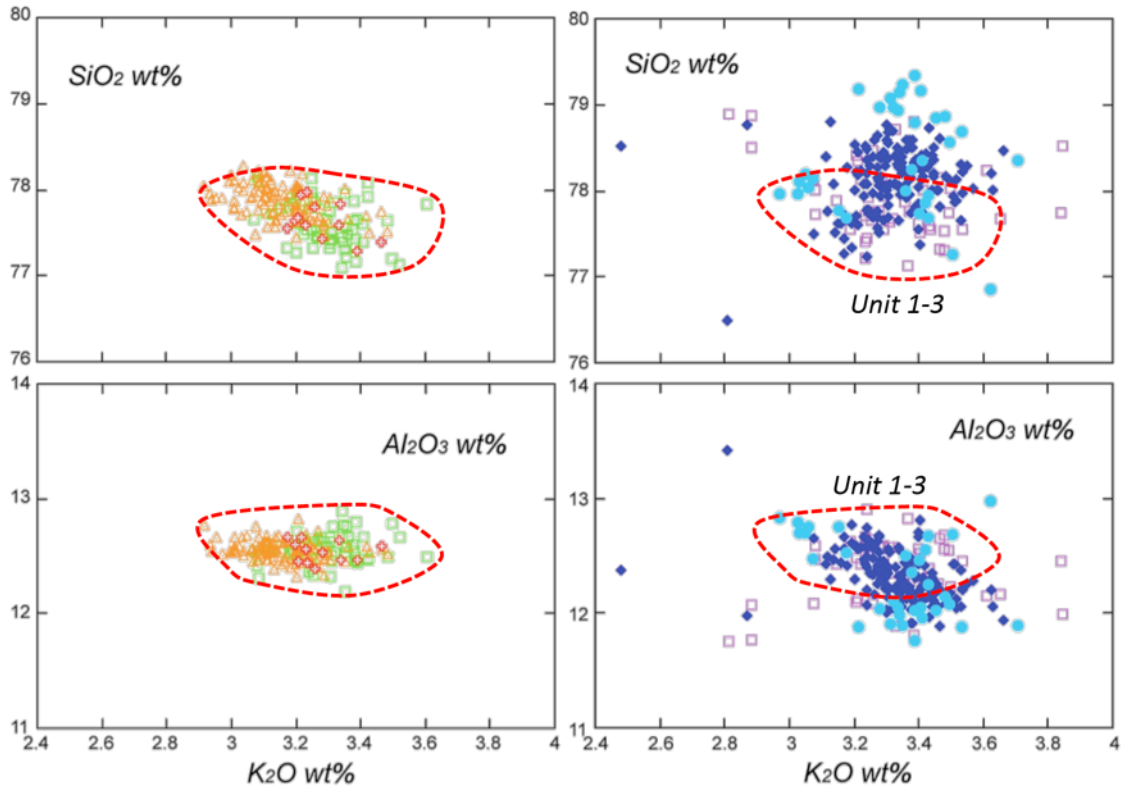


図 1.3-15. CP タイプ軽石のガラス組成.

近傍地域における検討結果から、本研究では、堆積物の特徴、時間間隙の有無、および本質物質の構成比から、洞爺カルデラ形成噴火噴出物を大きく2つのステージに区分した(図 1.3-16)。Stage 1 は、Unit 1~Unit 3 からなり、破碎度が高く火山豆石を大量に含む堆積物によって特徴づけられる。本質物質はほぼ CP タイプのみからなり、ガラス組成は非常に狭い範囲に集中する。Unit 2-Unit 3 境界には、何度かの短い時間間隙の証拠が認められた。一方 Stage 2 は、やや長い時間間隙をおいて始まったと考えられ、Unit 4~Unit 6 では粗粒な軽石や岩片に富む淘汰の悪い岩片濃集層と火砕流堆積物がほぼ連続的に噴出した。本質物質は CR タイプや gray,band タイプの割合が次第に増加し、ガラスの  $K_2O$  幅も時間とともに拡大することが明らかになった。

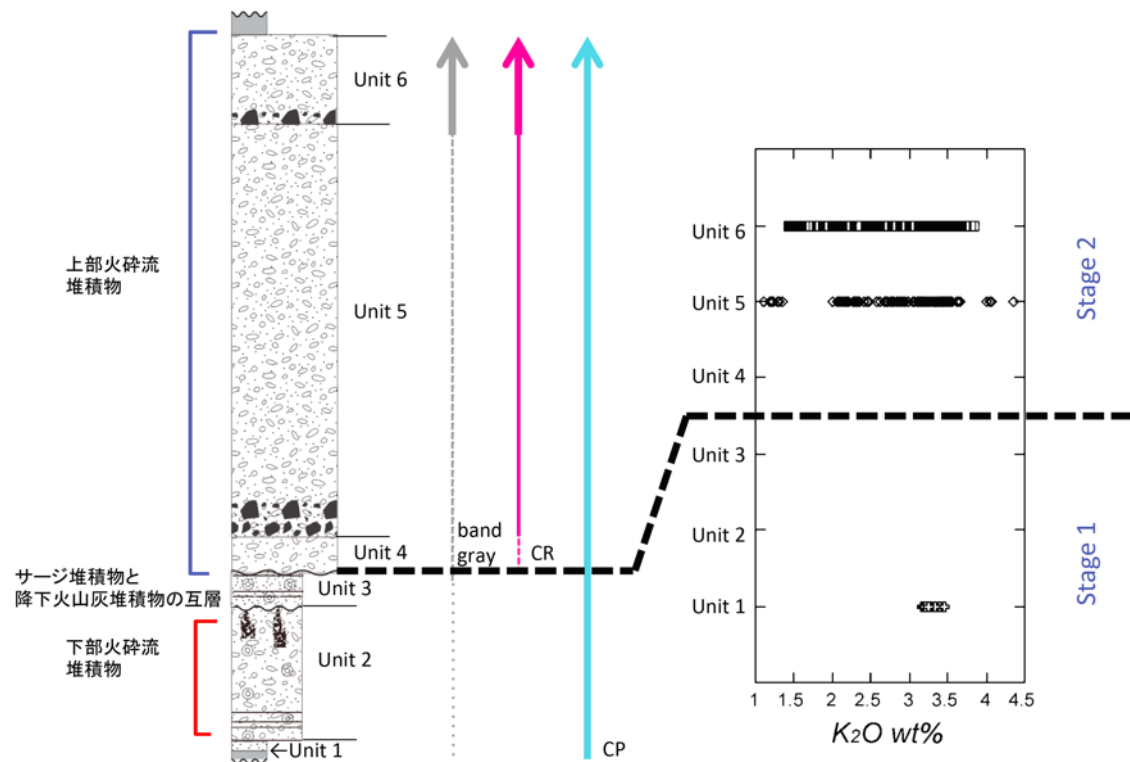


図 1.3-16. 近傍地域における層序変化.

### (5) 近傍層と遠方層の対比

昨年度の本研究では、本質物質の最大粒径や構成比を基準にして洞爺湖からおよそ 50km の範囲でユニット対比を行い、大部分の火砕流堆積物が Unit 5 または Unit 6 に対比されることを示した。しかしながら、stage 1 噴出物を確認できたのは、近傍地域の伊達市および洞爺湖町を除けば洞爺湖北東約 20km の喜茂別町のみ（Unit 2 が層厚約 65cm、Unit 3 が層厚約 10cm）であり、各ユニットの分布域や層厚は不明であった。そこで令和 2 年度は、特に洞爺カルデラ形成噴火噴出物の最下部まで観察できる露頭またはボーリングコアに注目して、stage 1 噴出物の分布について検討するとともに、図 1.3-16 にとりまとめた洞爺湖近傍地域における層序変化を元に、北海道内の遠方地域や東北地方まで範囲を広げユニット対比を行った。

図 1.3-17 は、洞爺カルデラ形成噴火噴出物のうち、Unit 2, Unit 3 の有無を確認できた露頭とその層厚を示した図である。洞爺湖北西約 25km のニセコ町では、洞爺カルデラ形成噴火噴出物の最下位から最上位までが観察できる露頭を発見した。本地点では、土壌の上に層厚約 20cm の豆石を含む細粒な火砕流堆積物（Unit 2）、層厚約 10cm の成層構造の発達した細粒な降下火砕堆積物（Unit 3）が認められ、その上位に層厚 15m 程度の粗粒で塊状非溶結の火砕流堆積物が累重していた（図 1.3-17 右）。上位の厚い火砕流堆積物には岩片濃集層は認められなかったが、直径 10cm 程度以上の軽石が濃集しているように見える部分があり、複数のユニットからなる可能性がある。さらに、洞爺湖北西約 35km の蘭越町で掘削されたボーリングコア 6 本および北北西約 45km の共和町で掘削されたボーリングコア 2 本についても観察したところ、いずれの地域においても最大層厚約 22m の洞爺カルデラ形成噴火噴出物が認められ、最大粒径約

5cmの本質物質を含む塊状無層理の基質支持層が大部分を占めていた(宮坂・中川,投稿中)。うち蘭越町の1本のボーリングコアではその下位に、やや層理の発達した茶褐色細粒火山灰層(Unit 3)および直径1cm以下の軽石を含む黄褐色の細粒火山灰質基質支持層(Unit 2)がそれぞれ層厚10cm程度で直接累重しているのが確認された(図1.3-17上)。一方の共和町では塊状無層理の基質支持層の最下部10-50cmで成層構造が見られる部分が観察されたが、蘭越のように明らかに粒度の異なる細粒火山灰層は認められず、Unit 2およびUnit 3は分布していないと考えられる。

これらの観察結果から、洞爺湖から約10kmの伊達市や洞爺湖町では層厚10-40m以上に及ぶUnit 2およびUnit 3堆積物は、洞爺湖から20-35kmの喜茂別町・ニセコ町・蘭越町ではその層厚が数10cm~1m未満に急減し、洞爺湖から45kmの共和町までは到達してなかったことが明らかになった。

そこで次に、地表に露出する火砕流堆積物の対比をさらに進めた(図1.3-18)。すると、洞爺湖北北西約45kmの共和町、北西約35kmの蘭越町、西方約40kmの黒松内町、西方約20kmの豊浦町などに分布する火砕流堆積物は、いずれもCPタイプが90wt%以上を占めており、CRタイプとgray,bandタイプが少量ずつ認められ、図2-2-5や図2-2-9のUnit 5に対比できる。一方で、洞爺湖北方約15kmの真狩村、北西約25kmのニセコ町、北方の倶知安町などに分布する火砕流堆積物は、CPタイプ40-80wt%程度、gray,bandタイプ20-40wt%、CRタイプ数-20wt%程度から構成されており、こちらはUnit 6に対比された。これらはいずれも各地域の洞爺カルデラ形成噴火噴出物の最上位を構成する層厚数~20m以上の火砕流堆積物であり、このことはUnit 5がUnit 6よりも広範囲に分布することを示している。

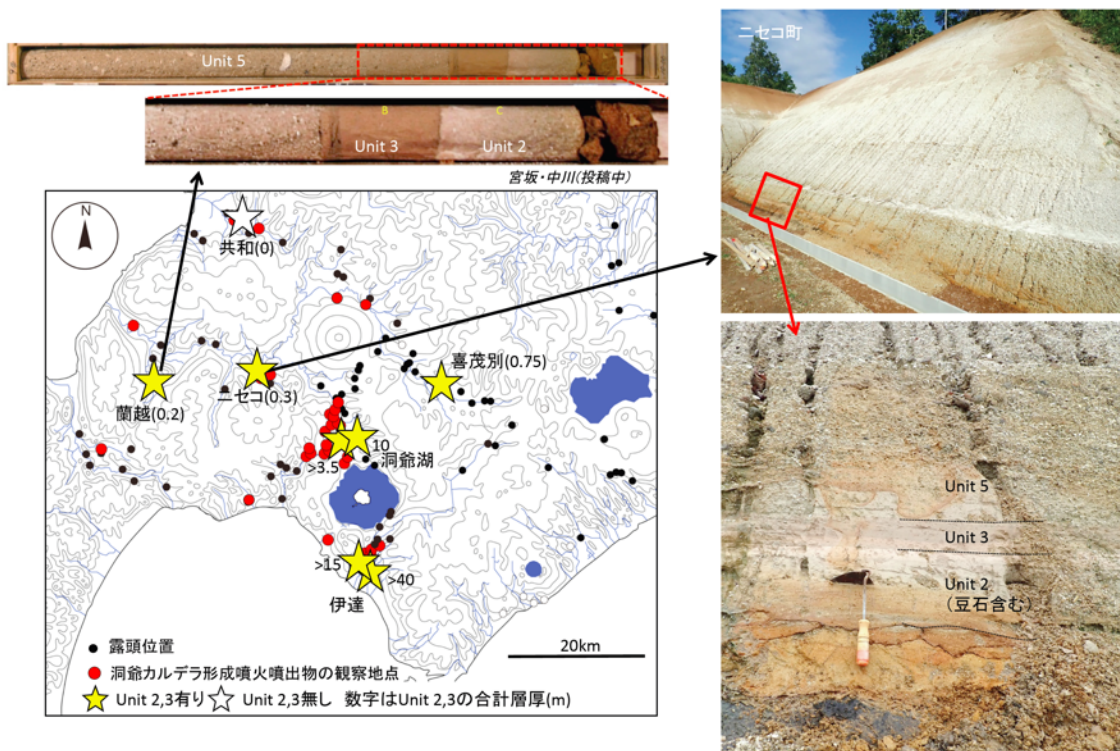


図 1.3-17. Unit 2,3 の有無を確認した地点とその層厚.

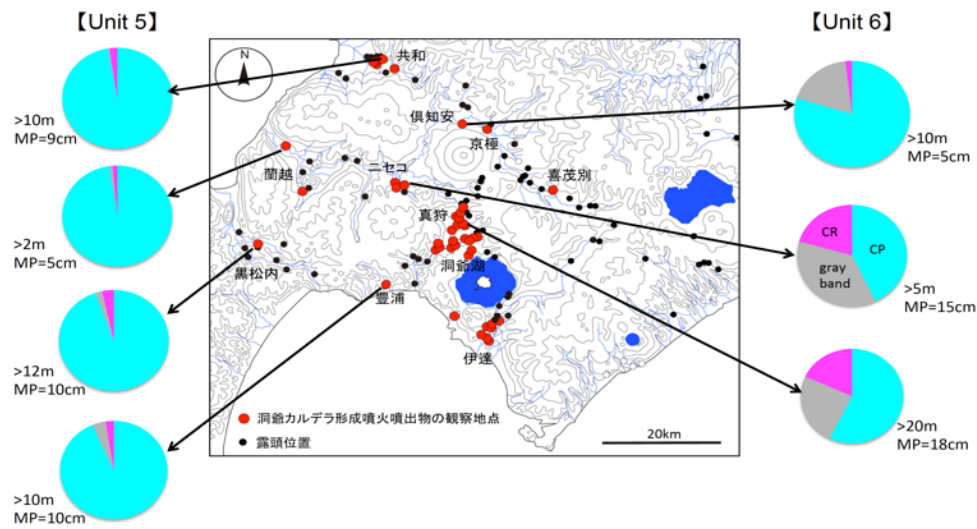


図 1.3-18. 地表に露出する火砕流堆積物の代表的な構成物分析結果.  
(数値は各地点での層厚, MP は本質物質の最大粒径)

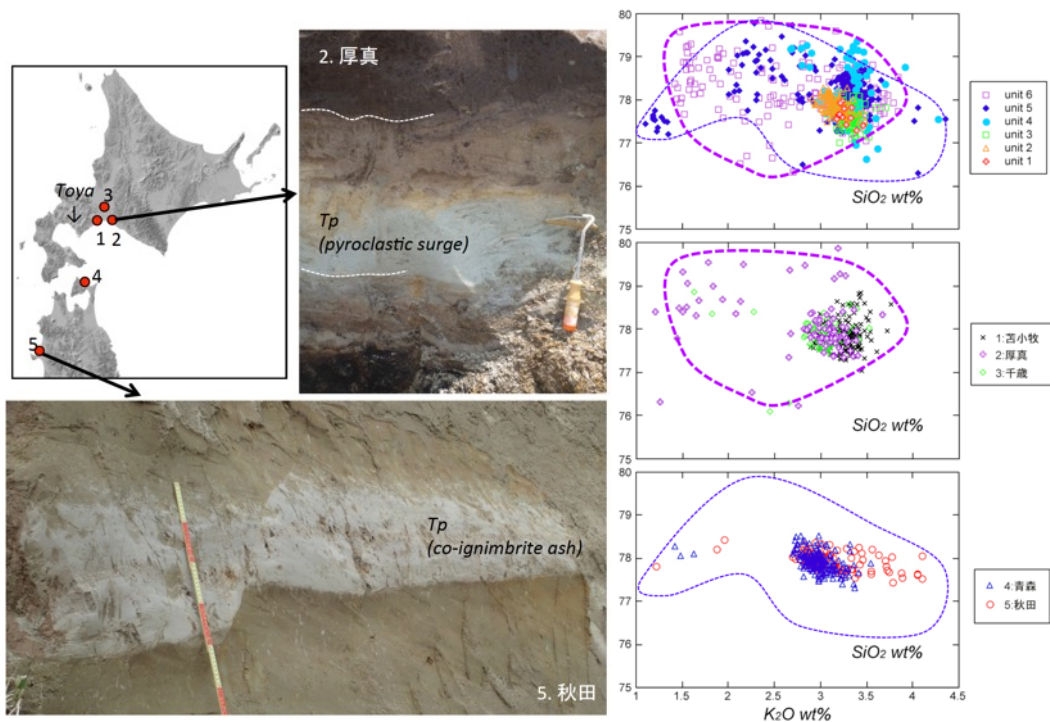


図 1.3-19. 石狩低地帯および東北地方における洞爺カルデラ形成噴火噴出物の露頭写真およびガラス組成分析結果. ガラス組成図の紫の点線は Unit 6, 青の点線は Unit 5 の組成範囲.

さらに、今年度は洞爺湖東方約 50-80km の石狩低地帯および南方約 120-300km の東北地方においても洞爺カルデラ形成噴火噴出物を採取し、ユニット対比を試みた (図 1.3-19). Amma-Miyasaka et al.(2020)は、東方約 50km の苫小牧市のボーリングコアで層厚 175cm の火砕流堆積物、東方約 80km の厚真町の露頭では層厚約 25cm のサージ堆積物を見出し (図 1.3-19 右上)、そのガラス組成から洞爺カルデラ形成噴火噴出物に対比していたが、本研究では新たに、洞爺湖東北東約 80km の千歳市のボーリングコアでも層厚約 40cm のサージ堆積物を採取した。いずれも本質物質の最大粒径は数-10mm 未満で細粒の火山灰基質が大部分を占めるため構成物量比による対比は困難であるが、厚真町および千歳市のガラス組成は  $K_2O=1-3.5wt\%$  に広がっており、その組成分布は図 2-2-7 の Unit 6 に類似している。一方で、洞爺湖南方約 120km の青森県、約 300km の秋田県では洞爺火山灰 (町田ほか, 1987) と呼称されている層厚 20-30cm の細粒火山灰層を採取した (図 1.3-19 下)。そのガラス組成の大部分は  $K_2O=2.5-3.5wt\%$  に集中しているが、 $3.5-4wt\%$  のものや  $K_2O=1-2wt\%$  のガラスもわずかに認められ、こちらは図 2-2-7 の Unit 5 に類似していることが明らかになった。以上から、Unit 5 は洞爺湖から南方約 300km まで、Unit 6 は東方約 80km まで分布することが確認された。

図 1.3-20 は、各地域の総合柱状図とそのユニット対比をまとめた図である。Goto et al. (2018) は共和・黒松内に分布する火砕流堆積物を Unit 2 に対比していたが、本研究では Unit 2 がニセコや喜茂別などで層厚を急激に減少することが確認された。さらに本質物質の構成比や石基ガラス組成から遠方地域の火砕流堆積物の大部分と石狩低地帯や東北地方に分布する洞爺カルデラ形成噴火噴出物が、Unit 5 または Unit 6 に対比されることも明らかになった。

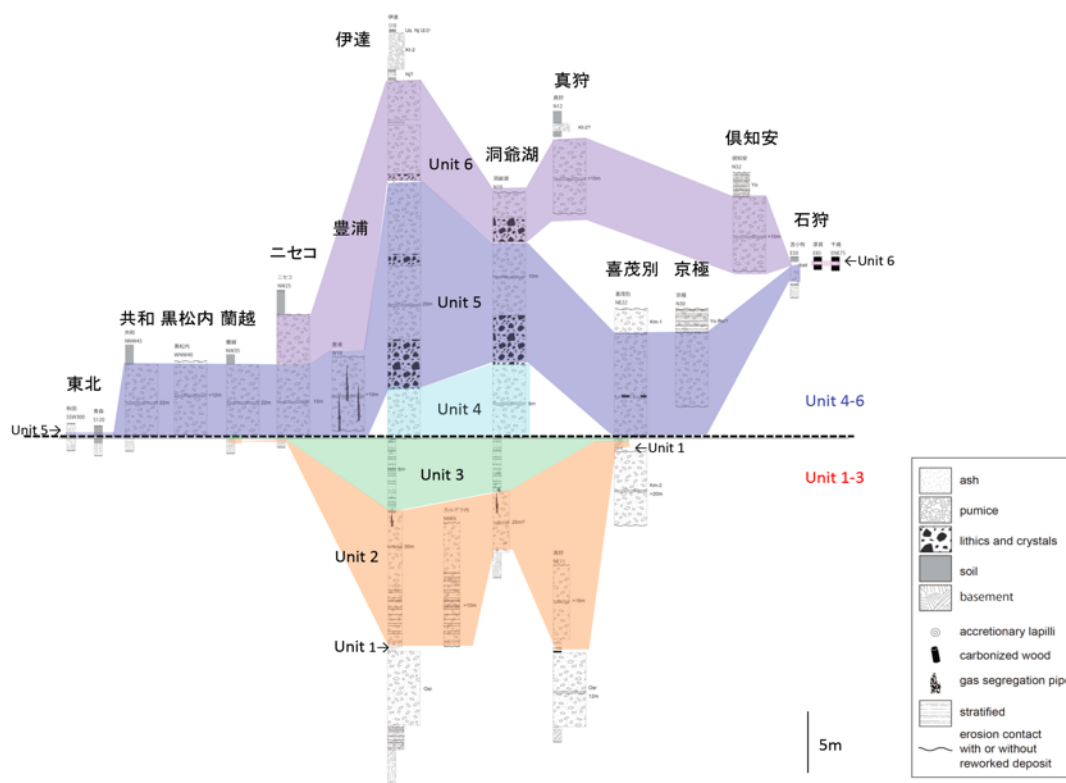


図 1.3-20.洞爺カルデラ形成噴火噴出物の対比柱状図.



## (6) 噴火規模と推移

図 1.3-21 は、今年度までの調査結果をもとに洞爺カルデラ形成噴火噴出物の分布をユニットごとに示した図である。すると、Unit 1 は洞爺湖近傍でも最大層厚 5cm と非常に薄く、洞爺湖西側には分布しないことが明らかになった。Unit 2 は洞爺湖南側で最大層厚 40m と最も厚いがその層厚は洞爺湖から 20km 程度で 10cm 程度まで急減する。Unit 3 は常に Unit 2 に伴って分布が確認され、その層厚は洞爺湖南方で最も厚く 10m 程度であるが、洞爺湖から 20km 程度で 10cm であった。Unit 4 は洞爺湖近傍地域のみで分布が確認され、その層厚は洞爺湖北側でやや厚く最大 8m であった。Unit 5 は洞爺湖近傍で最大層厚 25m 程度であるが、洞爺湖から約 45km の地点までほぼ層厚を減じることなく 21-22m であることが確認されたほか、東北地方にも co-ignimbrite ash として堆積していた。Unit 6 は洞爺湖北側に主に分布しその最大層厚は 20m 以上である。西側～北西側遠方には分布しないことが確認された一方で、東側約 80km 程度まで層厚数 10cm のサージ堆積物が堆積したと考えられる。

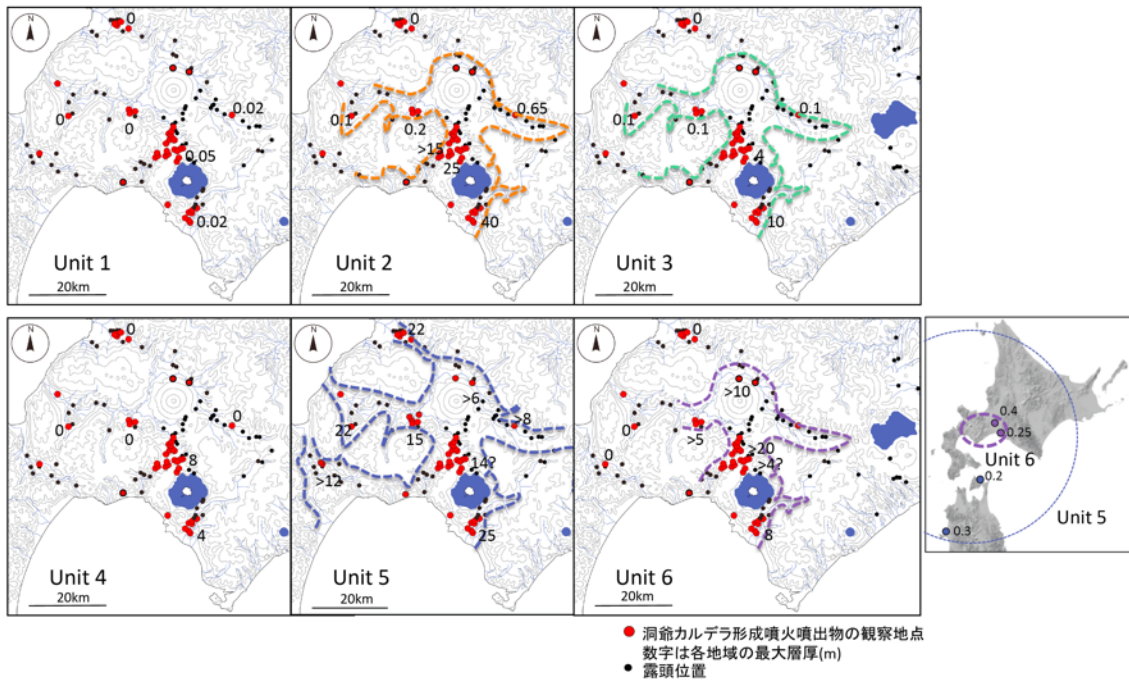


図 1.3-21.洞爺カルデラ形成噴火噴出物のユニットごとの分布図.

図 1.3-21 をもとに洞爺湖からの距離と層厚を用いて各ユニットの噴出体積を概算し、洞爺カルデラ形成噴火の推移をまとめた (図 1.3-22). 洞爺カルデラ形成噴火は、堆積物の特徴、時間間隙の有無、および本質物質の構成比から、大きく 2 つのステージに区分される. Stage 1 は小規模なマグマ水蒸気噴火によって降下火山灰堆積物を噴出 (Unit 1) 後、 $30\text{km}^3\text{DRE}$  程度のやや規模の大きな火砕流噴火を起こした (Unit 2). Unit 2 の最後には、ガスが抜ける程度の時間間隙を挟んで小規模な火砕流噴火を繰り返しており、その後に約  $7.5\text{km}^3\text{DRE}$  のサージ堆積物と降下火砕物を噴出した (Unit 3). Unit 2, Unit 3 には大量の豆石が認められ、破碎度も大きいことから、水の関与が大きい噴火であったと考えられる. Unit 3 後にはやや長い時間間隙をおいて火砕流噴火が始まり、その噴出量は Unit 4 で約  $1\text{km}^3\text{DRE}$ , Unit 5 で約  $105\text{km}^3\text{DRE}$ , Unit 6 で約  $25\text{km}^3\text{DRE}$  であった. 総噴出量約  $170\text{km}^3\text{DRE}$  のうち、Unit 5 が約 60% を占め本噴火で最大規模であり、本層最下部に岩片濃集層を伴うことを考え合わせると、この時期に火道を形成・拡大して大規模噴火を起こし、その後に陥没カルデラを形成した可能性が高い. この結論は、Goto et al. (2018) とは異なり、池田・勝井 (1989) や塩谷 (2012MS) と調和的である. なお本質物質のタイプの量比は CP タイプ : CR タイプ : gray,band タイプ = 9 : 0.5 : 0.5 程度であり、Unit 1~Unit 3 の本質物質がほぼ CP タイプのみからなるのに対して、Unit 4 以降は多様になることは、Stage 2 における複数回の岩片濃集層噴出と関連があるかもしれない.

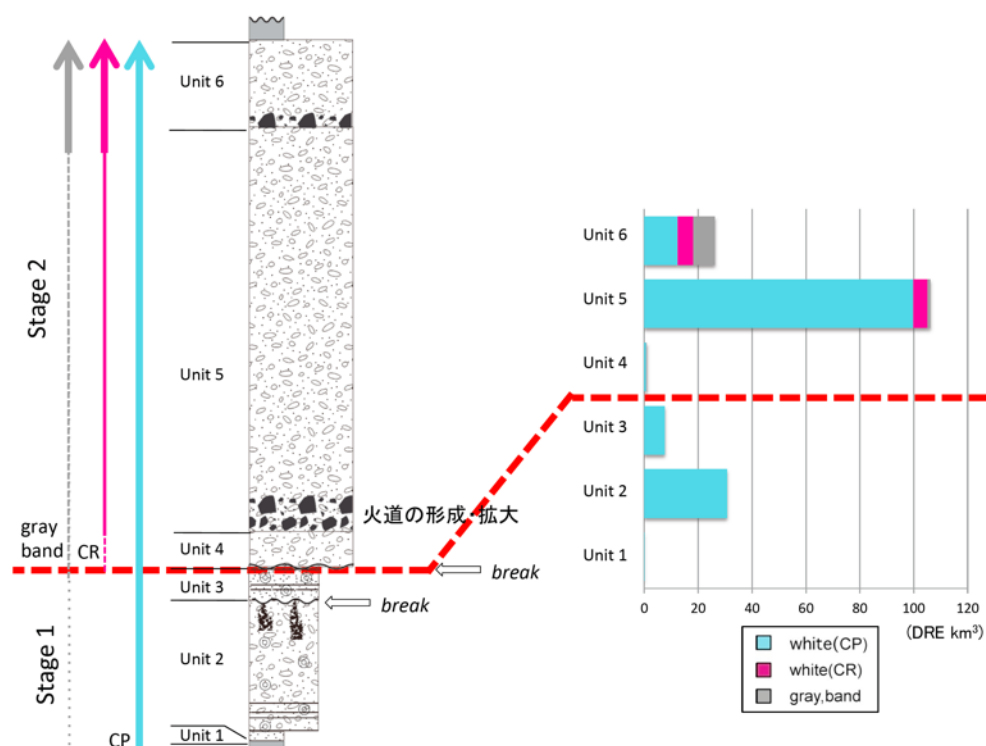


図 1.3-22.カルデラ形成噴火の噴火推移.

## (7) まとめ及び今後の課題

今年度の成果は以下の通りである。

1. 洞爺火山後カルデラ火山の1つである中島火山の溶岩ドーム形成時期を推定するため K-Ar 年代測定を実施した結果、それぞれ 0.05Ma, 0.10Ma という年代値が得られた。これらは洞爺カルデラ形成噴火の噴火年代 (106ka) よりも若く、これまでに報告されているテフラ・ドームの噴火年代 (48~40ka) と同程度であり、中島火山は洞爺カルデラ形成噴火の直後から活動を始めていた可能性が考えられる。

2. 洞爺湖近傍地域における調査の結果、洞爺カルデラ形成噴火は、層相・時間間隙の有無・本質物質の構成比およびガラス組成から大きく2つのステージに区分された。Stage 1 の Unit 1~Unit 3 は破砕度が高く豆石を多く含む細粒降下火山灰・火砕流堆積物・サージ堆積物からなり、Unit 2~Unit 3 境界には複数の短い時間間隙を示す証拠が認められた。本質物質は斑晶に乏しい白色軽石 (CP タイプ) のみからなりガラス組成幅は非常に狭い。一方で、Unit 3-Unit 4 境界にはやや長い時間間隙があったと考えられ、Stage 2 の Unit 4~Unit 6 は岩片濃集層を伴う粗粒で無層理な火砕流堆積物のみからなる。その本質物質は CP タイプが主体であるが、斑晶に富む白色軽石 (CR タイプ)、および灰色軽石・縞状軽石 (gray,band タイプ) の割合が時間とともに増加しており、ガラス組成幅も広がっていく傾向が認められた。

3. 2 で明らかになったユニットごとの特徴をもとに遠方地域の洞爺カルデラ形成噴火噴出物について対比を行った結果、その大部分が Stage 2 の Unit 5 または Unit 6 に対比されることが明らかになった。総噴出量約 170km<sup>3</sup>DRE のうち、Unit 5 が約 60% を占め本噴火で最大規模であり、本層最下部に岩片濃集層を伴うことを考え合わせると、この時期に火道を形成・拡大して大規模噴火を起こし、その後に陥没カルデラを形成した可能性が高い。なお本質物質のタイプの量比は CP タイプ : CR タイプ : gray,band タイプ = 9 : 0.5 : 0.5 程度であった。

次年度は、先カルデラ噴火である長流川火砕流堆積物の噴火推移、後カルデラ火山の噴火史を再検討するとともに、岩片構成比分析からカルデラ形成噴火の火口位置の変遷について検討する。

## 引用文献

Amma-Miyasaka, M., Miura, D., Nakagawa, M., Uesawa, S., Furukawa, R. (2020). Stratigraphy and chronology of silicic tephra in the Shikotsu-Toya Volcanic Field, Japan: Evidence of a Late Pleistocene ignimbrite flare-up in SW Hokkaido. *Quaternary International*.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.11.019>

雁澤 好博・臼井 里沙・田中 瞳・東 剛 (2007). SAR 法による洞爺火細粒堆積物の赤色熱ルミネセンス年代測定. *地質学雑誌*, 113, 470-478.

Goto, Y., Matsuzuka, S., Kameyama, S., Danhara, T. (2015). Geology and evolution of the Nakajima islands (Toya caldera, Hokkaido, Japan) inferred from aerial laser mapping and geological field surveys. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 60, 17-33.

- Goto, Y., Suzuki, K., Shinya, T., Yamauchi, A., Miyoshi, M., Danhara, T., Tomiya, A. (2018). Stratigraphy and lithofacies of the Toya ignimbrite in southwestern Hokkaido, Japan: Insights into the caldera-forming eruption at Toya caldera. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, 127, 191-227.
- 北海道電力 (2016). 泊発電所地盤 (敷地周辺の地質・地質構造) について-岩内平野に分布する岩内層-. 66p.
- 池田 稔彦・勝井 義雄 (1986). 洞爺カルデラの形成とその噴出物. 日本火山学会 1986 年秋季大会講演要旨.
- 中川 光弘・宮坂 瑞穂・富島 千晴・松本 亜希子・長谷 龍一 (2018). 支笏湖南方地域の火口近傍堆積物層序からみた 46 ka 支笏カルデラ形成噴火推移. *地学雑誌*, 127, 247-271.
- Lee, I.W. (1996). Component analysis of lag breccia in the youngest Toya pyroclastic flow deposits; Southwest Hokkaido, Japan. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, 41, 31-34.
- 町田 洋・新井 房夫・宮内 崇裕・奥村 晃史 (1987). 北日本を広くおおむね洞爺火山灰. 第四紀研究, 26, 129-145.
- Miyabuchi, Y., Okuno, M., Torii, M., Yoshimoto, M., Kobayashi, T. (2014). Tephrostratigraphy and eruptive history of post-caldera stage of Toya volcano, Hokkaido, northern Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 281, 34-52.
- 宮坂 瑞穂・中川 光弘 (投稿中). 蘭越町および共和町のボーリングコアに産出する洞爺カルデラ形成噴火噴出物について. 北海道大学地球物理学研究報告.
- 奥村 晃史・八木 浩司・寒川 旭 (1984). 黒松内低地帯の後期更新世段丘に関する年代試料. 第四紀研究, 23, 209-212.
- 塩谷 和樹 (2003MS). 洞爺カルデラの火山地質学的研究. 北海道大学修士論文, 41p.
- 曾屋 龍典・勝井 義雄・新井田 清信・堺 幾久子・東宮 昭彦 (2007). 有珠火山地質図 (第 2 版). 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.
- 高島 勲・山崎 哲良・中田 英二・湯川 公靖 (1992). 北海道洞爺湖周辺の第四紀火砕岩及び火山岩の TL 年代. *岩鉱*, 87, 197-206.
- 横山 泉・勝井義雄・大場与志男・江原幸雄 (1973). 有珠山 - 火山地質・噴火史・活動の現況および防災対策. 北海道防災会議, 254p.

