

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

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

平成 31 年 3 月

目次

はじめに.....	1
1 火山活動評価のための調査研究.....	9
1.1 支笏カルデラの事例調査	9
1.2 十和田カルデラの事例調査	35
1.3 大山火山の事例調査	65
1.4 阿蘇カルデラの事例調査	77
1.5 火山活動長期評価の考え方	83
2 噴火規模及び影響範囲推定のための調査研究.....	95
2.1 支笏カルデラ噴出物の岩石学的検討	95
2.2 阿蘇カルデラ噴出物の岩石学的検討	153
2.2.1 後カルデラのマグマの深度と成因	153
2.2.2 阿蘇カルデラ噴出物の実験岩石学的検討	189
2.2.3 阿蘇カルデラ噴出物の地球化学的検討	209
2.3 始良カルデラ噴出物の岩石学的検討	215
2.4 鬼界カルデラ噴出物の岩石学的検討	237
2.5 カルデラ形成噴火堆積物の噴出量	261
3 火山モニタリング評価のための調査研究.....	277
3.1 カルデラ噴火前兆評価シミュレーション技術開発	277
3.2 活動的カルデラ火山の地下構造調査	299
3.2.1 阿蘇カルデラ	299
3.2.1.1 阿蘇カルデラの地下構造調査	299
3.2.1.2 阿蘇カルデラの火山性流体調査	371
3.2.2 始良カルデラの地下構造調査	451
3.2.3 海底カルデラ地下構造探査手法の検討	477
4 各カルデラの成果取りまとめ.....	483

はじめに

本業務は、火山の特性、地下構造、地球物理学的及び地球化学的調査手法等の最新の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・指標、火山活動のモニタリング評価基準・指標に関する知見を整備することを目的としている。その達成のため、以下の3項目の調査研究を実施した。

(1) 火山活動評価のための調査研究

将来の火山活動の可能性評価のためには、過去に大規模噴火を起こした火山や主要な活火山の活動履歴情報を整備し、評価基準・指標を策定する必要がある。今年度は巨大噴火の事例調査として、支笏カルデラ・十和田カルデラ・大山火山・阿蘇カルデラを対象とした調査研究を実施している。また、これまでに得られた成果を基に、将来の火山活動可能性評価の指標を策定するための知見を取りまとめた。

- 1) 支笏火山は約6万年前の大規模噴火の後、約4万年前にカルデラ形成噴火を起こして現カルデラを形成した火山である。今年度は、前年度に示したカルデラ形成噴出物の新たなユニット区分毎の分布・噴出量・マグマ組成・石質岩片組成を明らかにした。その結果、カルデラ形成噴火初期には支笏湖北西側の火口から噴火、その後、新たな火道が南東側にも開口しつつ、火道は深部へと拡大していった可能性が高い。また、支笏-洞爺火山地域の噴火履歴をとりまとめ、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、その後約40万年間の休止期間をおいて約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700 km³に及ぶマグマを噴出したことを明らかにした。
- 2) 十和田カルデラでは6.1~1.5万年前に大型カルデラを形成した火山活動が起きており、その後の最新期の火山活動でも、小型のカルデラ形成を含む比較的規模の大きな火山活動が発生している。平成30年度は、前年度に引き続き、主に先カルデラ期のテフラについて火山ガラス化学組成分析を実施し、そのデータを用いることで、給源近傍相と遠方相の対比を行ない、より高時間分解能な先カルデラ期の噴火活動史を構築した。さらに、これまでの岩石学的データを取りまとめ、マグマ組成多様性の成因及び先カルデラ期とカルデラ形成期で認められるマグマ化学組成のギャップの成因について考察を行った。マグマ供給系の時代変遷については、カルデラ形成期の間はマグマ供給系が安定的に持続していたと見られるものの、1.5万年前の噴火エピソードLにおいて、珪長質マグマ溜まりが完全崩壊することにより、一旦リセットされたと考えられる。この時には、マグマ組成は急激に玄武岩質安山岩へと変化している。その後、後カルデラ期においては、マグマ組成が玄武岩質安山岩から流紋岩へと1万5千年間で急速に珪長質化している。噴火エピソードLによるマグマ溜まりの崩壊に関わらず、マグマ噴出率は依然として高く、Sr同位体比も更に上昇していることから、珪長質マグマの生成・供給は連続的に続いているものと考えられる。
- 3) 大山火山では、約6万年前に国内で最大規模のプリニー式噴火である大山倉吉降下火砕物が噴出している。また、大山火山のマグマは、沈み込んだスラブの溶解物(スラブメルト)と熱源となるマントルとの相互作用で生じており、日本列島の他地域とは異なる成因を持っている。

る。今年度は Sr, Nd, Pb 同位体比測定とマスバランス計算によるアダカイト質マグマ起源物質の推定を行い、これまでの検討結果も合わせて岩石学的なマグマ供給系の発達モデルを構築した。大山火山では、高噴出期にはスラブメルトに対する下部地殻の同化作用が進行しており、マグマ組成変化はマグマの生産量と関連している。このようなマグマの成因を理解することにより、組成変化の時系列パターンから火山活動の長期予測が可能となろう。

- 4) 阿蘇カルデラでは約 9 万年前に阿蘇 4 火砕流噴火を噴出し、現在のカルデラが形成されている。今年度は、主に阿蘇 4/3 間降下テフラ群及び阿蘇 4 火砕流噴火初期の堆積物について野外調査を実施した。その結果、阿蘇 4 噴火とその前のマグマでの黒雲母斑晶の出現は、阿蘇 4 噴火開始最初期に加えて、阿蘇 4 火砕噴火の約 2000 年前と約 12000 年前及びであることが分かった。また、阿蘇 4 噴火の前、少なくとも 10000 年前からは、それ以前よりも火山活動が低下していた可能性がある。
- 5) これまでに実施した大規模噴火実績のある代表的火山の噴火履歴及び岩石学的調査の結果を踏まえ、将来の火山活動可能性評価の指標を策定するための知見を以下の様にとりまとめた。
 - ① マグマ噴出率は一定ではない事例の方が多く、長期の将来予測ではその増減を考慮する必要がある。
 - ② 大規模噴火を起こす珪長質マグマは地殻物質の部分熔融で生産されており、大規模噴火に先駆けてこれを示唆する噴出物の地球化学的な変化が現れる事例が多い。
 - ③ 反対に活発な火山活動が終息へと向かう場合には、噴出率の低下と伴に地殻物質の関与が少なくなる地球化学的な特徴が現れる。地球化学的指標としては、噴出物の主成分組成だけでなく、微量成分や Sr, Nd, Pb 同位体組成の時間変化データが有効である。これらの知見は、階段図に代表される定量的な活動履歴を使って将来の可能性を考慮すべき火山をスクリーニングする際に、重要な判断指標となり得よう。

(2) 噴火規模及び影響範囲推定のための調査研究

短時間のうちに膨大な量のマグマを噴出し大規模火砕流となるカルデラ形成噴火に関する知見を整備することは、最重要課題である。カルデラ火山のマグマ供給系における噴火準備状況の把握に向けた物理探査や、カルデラ火山の活動将来予測のシミュレーションを行うためには、大規模噴火のマグマ溜まりの物理化学条件、構造、それらの時間変化に関する現状の正確な把握と、そのような時間変化が生じる理由を合理的に説明するモデルに関する知見の整備が必要不可欠である。今年度も、支笏・阿蘇・始良・鬼界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) 支笏カルデラ噴出物の岩石学的検討では、カルデラ形成期のマグマ供給系を構成するサブマグマシステムの特徴と混合・成因関係をこれまでに検討してきた。約 6 万年前の社台噴火のマグマ供給系はより低温の珪長質マグマ系 (F) とより高温のマフィックマグマ系 (M) の 2 つに区分され、F と M は噴火フェーズごとに異なっていた。F はデイサイト質マグマ (D) と安山岩質マグマ (A) が混合することによって形成され、この混合は 61ka 社台噴火の少なくとも 130 年以上前には始まっており、この F サブマグマシステムに噴火開始の 5~6 ヶ月前に玄武岩質のマフィックマグマ (B) が混合していることなどが明らかになった。また、約 4 万年前のカルデラ形成期噴火のマグマ供給系は、深さ約 4~10 km 程度の斑晶に乏しい珪

長質マグマ系 (CP) と斑晶に富む安山岩質マグマ系 (CR), そしてマフィックマグマ系 (M) の3つのサブマグマシステムから構成される. この CP と CR がほぼ同じ深度に共存する特徴は, 海外のカルデラ研究で提示されているマッシュゾーンでの大規模珪長質マグマ生成モデルと非常に調和的である. また, 斜方輝石斑晶の累帯構造より CP では 1600 年前ころから流紋岩質マグマとデイサイト質マグマの混合が起き, マグマが蓄積されたと見積もられる. FTIR で CP の斜方輝石を分析したところ, H₂O 飽和深度は平均 3.7 km であることが明らかになった. この深度はマグマ溜まりの代表的な深度と考えられ, 地質温度圧力計および熱力学モデルより推定された CP の深度とも矛盾しない. CP について U-Th 放射非平衡分析を行った結果, CP は幅広い U/Th 比を示し, また大部分の試料は Th-excess の放射非平衡をもつことが明らかになった. このことは, CP が 40 万年以上前に生成した大量の流紋岩質マグマと, 40 万年前よりずっと新しい時代に生成した少量のデイサイト質マグマとの混合によって生成したことを示唆している.

- 2) 阿蘇のマグマ供給系の物理化学条件を推定するため, 平成 28 年度に導入した高分解能二次イオン質量分析計を用いて, 阿蘇 1 直前の降下火砕物, 阿蘇 4 火砕流堆積物およびその直前の降下火砕物, 後カルデラの降下火砕物中の斑晶ガラス包有物および石基ガラスに含まれる水と二酸化炭素濃度の分析数を追加した. その結果, 阿蘇の苦鉄質斑晶ガラス包有物は, 深部から供給された揮発性成分に富む苦鉄質マグマが圧力深度約 12km(約 300MPa)で揮発性成分に飽和した後, 地下数 km 以浅にまで上昇・脱ガスしたことによって生産されたと考えられる. 一方, 石英安山岩質～流紋岩質斑晶ガラス包有物は, 苦鉄質マグマが地下 12km(約 300MPa)で揮発性成分に不飽和な条件で結晶化することにより, メルトに濃縮した揮発性成分が最終的には飽和したものだと考えられる. さらに, 阿蘇 1 火砕流マグマ溜まりの温度・圧力・含水量を決定するために 200MPa で高温高压実験を行った. 高含水量下における斜長石の晶出する温度は圧力変化に乏しいことと, より高压で斜方輝石の晶出領域が拡大することから, 阿蘇 1 メルトと平衡であったと考えられる斜長石と斜方輝石が同時に晶出するのは 200MPa よりも深いことが予想される. この結果より, 阿蘇 1 から阿蘇 4 にかけて, マグマ溜まりが浅くなっていった可能性が示された. 阿蘇マグマの起源物質を把握する目的で実施してきた阿蘇カルデラ噴出物および阿蘇周辺の基盤岩の化学組成・同位体比の分析からは, 阿蘇カルデラの大規模噴火をひきおこしたマグマの起源物質は, 基本的にマントルに由来する苦鉄質マグマに様々な割合で地殻が混染したものを結晶分化させたものであることが示された.
- 3) 始良カルデラのマグマシステムの解析のため, 3 万年前の入戸火砕流噴火を含む過去約 20 万年前の噴出物の系統的な調査・採取を行ない, 岩石・地球化学的データを取得し, 噴火期ごとにマグマ供給系の生成プロセスや噴火に至るまでの変遷や, メルト包有物の組成分析からマグマの温度・圧力・含水量を検討してきた. 特に 3 万年前の破局噴火の初期噴出物である大隅降下軽石に含まれる斑晶中のガラスインクルージョンの含水量からは, おおよそ 1kbar の圧力が推定され, マグマ溜まりの天井の深さは約 4~5 km 程度と推測されている. 平成 30 年度は, 始良カルデラに関連する噴出物のこれまでの岩石学的な検討結果を取りまとめた. 重要な観測事実は, 以下の 4 つである. ① 3 万年前の破局噴火の少なくとも更に約 3 万年前から,

入戸火砕流噴火で噴出した流紋岩マグマの蓄積が開始していた。② この蓄積期間中に、マグマ溜まりの深さには大きな変化がなかった。③ 斑晶組織の累帯構造からは、入戸噴火直前のマグマ溜まりへの高温・苦鉄質マグマの注入を示唆する。④ 入戸火砕流噴火後の流紋岩マグマの化学組成は、入戸火砕流噴火までの流紋岩マグマとは明瞭に区別が可能であり、カルデラ下には別の流紋岩マグマが蓄積し噴出していることを示している。

- 4) 鬼界カルデラを形成した約 7.3 千年前の鬼界アカホヤ噴火の噴出物について、平成 25～29 年度に岩石学的解析とメルト包有物化学分析を行い、流紋岩マグマについては輝石温度計で $902 \pm 15^{\circ}\text{C}$ 、鉄チタン鉱物温度計で $874 \pm 6^{\circ}\text{C}$ 、安山岩マグマについては輝石温度計で $975 \pm 5^{\circ}\text{C}$ が得られた。これらの温度推定結果とメルト包有物の H_2O および CO_2 濃度を用いてマグマのガス飽和圧力を見積もると、流紋岩マグマは $146 \pm 53\text{MPa}$ 、安山岩マグマは $115 \pm 27\text{MPa}$ の圧力下にあったと推定された。両マグマのガス飽和圧力の平均値は $133 \pm 46\text{MPa}$ であることから、地殻密度を 2500kg/m^3 と仮定すると、鬼界アカホヤ噴火マグマ溜まりの主体は深さ $5 \pm 2\text{km}$ にあったと推定できた。今年度は、これらのメルト包有物分析によるマグマの深度推定の確度と妥当性を検討するため、①竹島火砕流堆積物に含まれるメルト包有物 30 個の追加分析による圧力データの蓄積、②竹島火砕流上部ユニットに含まれるスコリアの全岩化学組成データを用いた安山岩マグマの熱力学解析を行った。①では、メルト包有物の H_2O および CO_2 濃度から得られた圧力について、今年度までの結果全てをまとめたところ、流紋岩マグマは $153 \pm 50\text{MPa}$ 、安山岩マグマは $105 \pm 25\text{MPa}$ と算出された。両マグマの圧力の平均値は $128 \pm 46\text{MPa}$ である。これらの平均値と標準偏差は平成 29 年度に得られた値とほぼ同じであった。②においては、安山岩マグマの熱力学解析結果と安山岩スコリアの岩石学的解析・メルト包有物分析から得られた安山岩マグマの温度・圧力・含水量・メルト量・斑晶量を比較した結果、おおよそ整合的な結果が得られた。さらに、鬼界アカホヤ噴火に至るマグマ供給系の発達過程を検討するために、9.5 千年前の噴火噴出物と 95 千年前のカルデラ噴火の噴出物について EPMA および SIMS によるメルト包有物化学分析を実施した。その結果、9.5 千年前噴出物に含まれるメルト包有物は、主成分元素組成は 7.3 千年前の竹島火砕流スコリアに含まれるメルト包有物と同様であるが、揮発性成分濃度に関しては同メルト包有物とはやや異なることが判明した。また、95 千年前の火砕流堆積物に含まれる流紋岩メルト包有物の主成分元素および揮発性成分の特徴は、7.3 千年前の鬼界アカホヤ噴火の流紋岩メルト包有物のそれとは異なることが判明した。これらの結果は、9.5 千年前の噴火と 95 千年前のカルデラ噴火では、7.3 千年前のカルデラ形成とは異なるマグマが活動したことを示唆している。
- 5) カルデラ形成を伴う大規模噴火の噴出量は、長期的噴火予測、噴火の活動度評価、地球物理学的・岩石学的な定量的評価を行うための重要な基本パラメータの 1 つであり、マグマ噴出量-時間階段図の高精度化のためにも重要である。平成 27 年度は、阿蘇 4 火砕流堆積物及び十和田八戸火砕流堆積物、平成 28 年度は、始良入戸火砕流堆積物及び十和田毛馬内火砕流堆積物、平成 29 年度は、洞爺火砕流堆積物、屈斜路 IV 火砕流堆積物及び屈斜路 I 火砕流堆積物を対象に、噴火直後の復元分布図と噴出量推定を行った。これらの噴出量には、降下テフラは含まれておらず、総噴出量を求めるためには、火砕流に伴う降下テフラの噴出量の推定が必要となる。今年度は、上記の内、比較的影響が大きいと思われる阿蘇 4 噴火、始良 Tn 噴火、

洞爺噴火に伴う降下テフラの噴出量を推定した。推定に当たっては、既存の陸域及び海域の降下テフラの情報を収集し、新たに等層厚線図を作成した上で、降下テフラの噴出量と、総噴出量を推定した。阿蘇 4 降下テフラの体積は、 $590\sim 920\text{ km}^3$ ($240\sim 370\text{ km}^3\text{DRE}$)と推定され、火砕流堆積物と合わせた阿蘇 4 噴火の総噴出量は、 $840\sim 1,640\text{ km}^3$ ($380\sim 790\text{ km}^3\text{DRE}$)となった。始良 Tn 降下テフラの体積は、 440 km^3 ($180\text{ km}^3\text{DRE}$)と推定され、火砕流堆積物と合わせた始良 Tn 噴火の総噴出量は、 $940\sim 1,040\text{ km}^3$ ($380\sim 430\text{ km}^3\text{DRE}$)となった。洞爺降下テフラの体積は、 150 km^3 ($60\text{ km}^3\text{DRE}$)と推定され、火砕流堆積物と合わせた洞爺噴火の総噴出量は、 $230\sim 310\text{ km}^3$ ($100\sim 140\text{ km}^3\text{DRE}$)となった。

(3) 火山モニタリング評価のための調査研究

大規模なカルデラ形成噴火のマグマ噴出量は数十～数百 km^3 程度であり、同様な規模の噴火が起こるためには、噴火準備過程でこれと同等以上の規模のマグマ溜まりが地下に形成されるものと考えられる。このような大規模噴火を想定した火山活動モニタリングに求められるマグマの蓄積に伴う広域地殻変動を評価するためのシミュレーション技術開発と、実際のカルデラにおけるマグマだまりの位置確認のための地下構造調査を実施した。

① カルデラ噴火前兆評価シミュレーション技術開発

平成 29 年度までに検証された粘弾性地殻変動モデルの振る舞いを、噴火にともなうマグマ排出及びその前後におけるマグマ供給に対する地殻の応答に適用し、その振る舞いを始良カルデラにおける事例に応用することにより、同カルデラ下におけるマグマ蓄積の様子や地殻の粘性率について、次のような制約を与えることができた：(1) 弾性地殻下の粘弾性地殻の有効粘性率は約 $5\times 10^{18}\text{ Pa s}$ であり、(2) 深さ 約 $10\sim 15\text{ km}$ でのマグマの定置の始まりは 1914 年噴火の約 50 年前にはじまり、そこへのマグマ供給は噴火前後において少なくとも約 $0.01\text{ km}^3/\text{yr}$ である。このように制約された粘弾性モデルの振る舞いにより、1914 年の噴火後の 50 年間程度におけるマグマ蓄積量は弾性体モデルによる見積もりよりも小さく、しかしそれ以降については弾性体モデルによる見積もりよりも～数倍大きくなることが、予測された。また、弾性体モデルの振る舞いを外挿されて求められていた 1914 年噴火直前の隆起量が、その 3 分の 1 程度でしかなかったことも予測することができた。本研究により、噴火にともなうマグマ排出前後の測地信号について、地殻の粘弾性を考慮して再解析する必要性を提案することができた。

② 活動的カルデラ火山の地下構造調査

本調査は前記の広域地殻変動パターンの数値シミュレーションモデルを検証するため、活動的カルデラの地下構造の調査を行うもので、阿蘇カルデラと始良カルデラを対象とした探査を実施した。

1) 阿蘇カルデラの地下構造を求めるため、昨年度実施した比抵抗構造解析に引き続き、深度方向への感度を高めつつより詳細な構造を求める目的で、これまでに取得した 100 の測点からなる、カルデラを覆うような広帯域 MT 法探査データを用いた 3 次元インバージョン解析を実施した。そして精度よく求められた 3 次元比抵抗モデルについて、中央火口丘の地下に現れる低比抵抗異常領域の検証を行った。これまでに見出した低比抵抗異常ブロックは、中岳火口での現在の活動を支えるマグマの供給経路を反映していると考えられるが、先行研究の

結果を考慮すると、マグマ溜まりが形成されているのは、深度 6km 程度を中心とした領域である可能性が高いと判断された。そこで、低比抵抗異常ブロックのうち最も比抵抗の低い領域でもある深度 2~9km について、マグマ溜まりを仮定したメルト分率の算出を行った。その結果、メルト量>約 50% (結晶量<約 50%) の流動可能な状態のマグマが溜まっている領域 (狭義のマグマ溜まり) は、最大 15 km³程度と推定されることが分かった。次に、昨年度観測を行った中岳第一火山口周辺の 9 地点のデータをこれまでのデータに追加し、3 次元インバージョンによる比抵抗構造の再解析を実施した。これにより、これまで不明であった阿蘇火山のより浅部の地下構造を求めることができた。一方で、広帯域 MT 法では探査が困難であった地殻下部の比抵抗構造の解明を目指し、電話回線設備を利用した長基線の電磁探査法であるネットワーク MT 法の既存データによる構造解析を引き続き実施し、阿蘇カルデラでの、ネットワーク MT 法探査の適用拡大に向けた可能性を検討する研究を行った。その結果、網目状のダイポール配置のもと 3 次元比抵抗構造解析を実施すれば、さらに深部までの高解像度の比抵抗モデルを得られる可能性があることを示した。

- 2) 阿蘇カルデラのマグマ供給系の空間的広がりやマグマ起源揮発性物質のフラックスを明らかにするため、一昨年度からの温泉・湧水のモニタリング (年 4 回) を継続するとともに、昨年度に開始した阿蘇外輪山における土壌 CO₂ フラックス観測を行った。土壌 CO₂ フラックス観測では、阿蘇火山北外輪山の外輪山-カルデラ境界部の落差 360m の斜面の上半部の 2~3 ヶ所にマグマに由来すると考えられる CO₂ の放出ゾーンをとらえることに成功した。さらに土壌ガスの CO₂ の $\delta^{13}\text{C}$ を測定した結果、特定のエリアで深部由来の CO₂ を多く含むことがわかったが、その CO₂ フラックスはさほど大きくはなかった。阿蘇カルデラ内の温泉水等について、統計的手法として主成分分析を用いてマグマ起源熱水の組成の特徴について検討した結果、SO₄ 成分は浅層地下水流動の湧出成分であると考えられること、カルデラ北部には、基盤として胚胎する花こう岩由来と思われる F 成分に富む地下水 (または熱水) が深い深度から供給されていると考えられること、阿蘇カルデラの内部において、深層から CO₂ が供給されており、その流体上昇に地域特性があると考えられること等がわかった。そして、現在までに利用可能な H₂O, CO₂, Cl に関するマグマへの溶解度やマグマ-熱水流体間の分配のデータを用いて、深部マグマから脱ガスする熱水流体の化学的特徴を推定する手法を示した。最も単純なマグマ進化モデルを用いて、初期に供給される苦鉄質マグマ~最後に固結する珪長質マグマに至る過程で、放出される熱水流体の特徴を検討した結果、C/Cl 比が最も有効であることがわかった。この比の空間分布から、阿蘇カルデラ内北西部では小規模な珪長質マグマの生成・固化による熱水供給があり、カルデラ南部では苦鉄質マグマ供給および珪長質マグマ生成に伴い放出された熱水流体が上昇していると考えられる。比較のため、九重火山および十和田火山において、地下水に含まれるマグマ起源の C/Cl 比を検討している。九重火山では、火山活動年代の若い東部の地下水に C/Cl 比が高いマグマ起源熱水流体が混入していることから、苦鉄質マグマの供給が現在も東部を中心に生じている可能性がある。また、十和田火山では、カルデラから 10 km 離れた南西部の一地点に苦鉄質マグマの供給を示す熱水流体の上昇が認められた。これらの比較の結果、それぞれに C/Cl 比の分布や C/Cl 比の値のバリエーションの範囲に特徴があることがわかった。

- 3) 始良カルデラの地下構造調査では、平成 27 年度に整備した地震観測網を用いて、地震波トモグラフィ手法による地下の 3 次元的な P 波および S 波の伝搬速度構造の解析を実施した。昨年度に分解能を 5 km に向上させることにより、カルデラ中央部の地下 15 km に顕著な低速度層を検出した。今年度は観測データの地震数を 255 個と増やし、更に解像度を向上させた。少なくともカルデラ内の 10 km 以浅には、顕著な速度異常は存在しない。遠地地震を使ったレシーバー関数による地下構造境界の検出では、桜島の及び始良カルデラの中央部にかけての領域では、15 km から 30 km の深さでは、レシーバー関数が負となる領域があり、北部に行くにしたがって、負の領域が拡大していることが明らかになった。この負の領域は、15 km 以下の低速度層の上面に対応するものと思われる。地下構造の異常に対応する場所においてマグマの蓄積による地盤の隆起・膨張が地表面に現れるかどうかを検討することを目的とし設置した全地球測位システム連続観測では、始良カルデラの中心から離れる方向に変動を検知することができた。変動量は 0.3 cm から 1.2 cm であり、1 年あたりの変動量は 0.15 cm から 0.6 cm であった。広範囲に観測されたこの変動は、深部における圧力源の存在を示唆している。また、深部マグマの動態と関連している可能性がある深部低周波地震の検知能力の向上試験を地震計アレイ観測で実施し、観測点において相関を取ることで検知力が増加し、さらに、スタックすることにより、S 波を明瞭化することができた。
- 4) 海底カルデラである鬼界カルデラを対象に、海底下に存在する可能性があるマグマ起源の低抵抗体の検出が可能かどうかを検討するために、海底電位差磁力計の投入と回収を行い、海底での電磁場の時間変動のデータを取得し、地磁気地電流法に基づいて初期的に解析した。その結果、ほぼ全ての観測点の海底電位差磁力計が海底で振動していることが明らかになった。このことは、この海域の海底では海底設置型機器が振動しやすい環境にあることを示している。その原因は、①設置場所が火山地域の特有の急冷溶岩の散乱した海底の起伏が激しいところである、②水深が浅く海域近辺の黒潮や島嶼間の流れの強い海流の影響を受けている、であると結論づけた。そのため、機器振動の影響の小さなデータ区間を抽出するなど注意深く時系列データ解析を行い、地磁気地電流法に基づいて 10 観測点のデータから電磁場応答関数を推定した。推定した応答関数を用い、インバージョンにより 3 次元比抵抗構造を推定した。

(3) 各カルデラの成果取りまとめ

複数の項目において研究を実施している火山については、項目ごとのまとめだけではなく、項目を横断して検討を行い、これまでの成果について取りまとめた。

1) 支笏カルデラ

支笏カルデラ噴出物の岩石学的検討から、カルデラを形成した流紋岩マグマは地殻物質の部分溶融により生成されたと考えられている。大局的にみると支笏は洞爺-支笏カルデラ火山群の一部を構成するものであり、10 数万年前から大規模カルデラ噴火が繰り返されてきた。珪長質マグマの組成は時代毎に変化しており、珪長質マグマの起源物質が活動中心毎に異なることを意味していよう。また、約 4 万年前にカルデラ形成噴火を起こした支笏カルデラのは、約 8.5 万年前から先駆的な活動が起きていたことが明らかになった。約 4 万年前のカル

デラ形成期噴火のマグマ供給系は、深さ約 4~10 km 程度の斑晶に乏しい珪長質マグマ系と斑晶に富む安山岩質マグマ系、そしてマフィックマグマ系の 3 つのサブマグマシステムから構成される。珪長質マグマ中の斜方輝石の H₂O 飽和深度からは、マグマ溜まりの平均的な深度が 3.7 km であったと推定されている。

2) 阿蘇カルデラ

阿蘇カルデラ噴出物は、Sr, Nd, Pb 同位体組成から、カルデラを形成した珪長質マグマは同位体的に枯渇したマントルと、4~12%程度の地殻物質の部分溶融液によって、ほぼ説明できることが明らかになった。同じ九州の始良カルデラの入戸火砕流がほぼ地殻物質の溶けた均質な流紋岩マグマのみからなることと比べると、阿蘇カルデラの噴出物はマントルの寄与が大きいことが特徴となっている。約 9 万年前の最後のカルデラ形成噴火である阿蘇 4 噴出物の揮発性成分濃度からは、噴出したマグマは、深さ 12km のマグマ溜まりから地下 8km 程度まで上昇した後に爆発的に噴出したか、マグマ溜まりから直接由来した可能性が高いと考えられる。MT 法による地下構造探査では、深さ 20 km までの地下比抵抗構造を明らかにすることが出来た。すなわち、深部から現在活動中の中岳に繋がるマグマ供給路の存在と、カルデラ浅部には巨大なマグマ溜まりがないことが明らかになっている。また、地下水の地球化学的調査からも、阿蘇カルデラ下に珪長質マグマ溜まりが存在しないことが示唆されている。

3) 始良カルデラ

始良カルデラ噴出物の岩石学的検討により、約 3 万年前に始良カルデラから入戸火砕流として噴出した流紋岩マグマと組成がほぼ一致する流紋岩マグマが、岩戸火砕流噴火以降の約 5 万年間、始良カルデラ下のほぼ一定の圧力条件（天井深さ約 4~5 km）に貯留していたことが推定された。また、地球物理学的観測からは、現在この深度にマグマ溜まりは存在せず、更に深いカルデラ中央部の深度 15 km 付近に低速度層が存在している。後カルデラ期の桜島火山では、歴史時代になり噴出率の上昇と共に噴出物が苦鉄質化する現象が起きているが、これが地震波観測で見つかった低速度層とどのような関係にあるのかは分かっていない。今後は、地球化学的観測を行うことにより、カルデラ下に存在する低速度層がどのようなマグマであるのかを識別することが必要である。

4) 鬼界カルデラ

鬼界カルデラ噴出物の岩石学的検討により、約 7 千年前の鬼界アカホヤ噴火降下軽石及び火砕流堆積物の流紋岩マグマのマグマ溜まりは、深さ 5±2km にあったと推定された。一方、後カルデラ期の噴出物はマグマ組成が鬼界アカホヤ噴火とは明瞭に区別され、異なるマグマ供給系が形成されている。海底電磁気探査により、現在の鬼界カルデラ地下の 3 次元比抵抗構造を推定したが、マグマ溜まりに相当する構造は検出出来ていない。

1 火山活動評価のための調査研究

1. 1 支笏カルデラの事例調査

【実施内容】

支笏火山は約 6 万年前の大規模噴火の後、約 4 万年前にカルデラ形成噴火を起こして現カルデラを形成した火山である。平成 26～28 年度にカルデラ形成噴火とその直前の噴出物を対象にしたボーリング掘削、トレンチ調査、地表調査を実施し、大規模噴火前の休止期から準備期へと至る事例を調査した。平成 29 年度は、支笏-洞爺火山地域のテフラ層序をその給源火山ごとに見直してテフラ名を再定義したほか、給源火山ごとのテフラの岩石学的特徴や、支笏-洞爺火山地域の全体の噴火史とマグマ噴出率について検討した。また支笏火山の約 6 万年前の社台噴火および約 4 万年前の支笏カルデラ形成噴火については、その噴火推移を取りまとめた。今年度は、前年度に示したカルデラ形成噴出物の新たなユニット区分毎の分布・噴出量・マグマ組成・石質岩片組成を明らかにした。その結果、カルデラ形成噴火初期には支笏湖北西側の火口から噴火、その後、新たな火道が南東側にも開口しつつ、火道は深部へと拡大していった可能性が高い。また、支笏-洞爺火山地域の噴火履歴をとりまとめ、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、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 700 km³に及ぶマグマを噴出したことを明らかにした。

【研究成果】

(1) 支笏-洞爺火山地域のテフラ層序

支笏-洞爺火山地域のテフラ層序に関しては、下記のフローチャートの通りボーリング掘削および地表調査とそれらの地質記載、岩石記載およびガラス組成分析を中心に行った(図 1-1-1)。支笏-洞爺火山地域の後期更新世火山(洞爺・クッタラ・羊蹄・尻別・支笏)について近傍地域においてテフラを採取し、その岩石学的特徴を支笏周辺地域のテフラと比較することにより、各テフラの給源火山を特定した。また、支笏-洞爺火山地域の安山岩質火山活動の活動期間を特定するため、代表的な中新世～更新世火山について試料を採取して K-Ar 年代を測定した。

その結果、北海道南西部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 0.5Ma 頃までに支笏-洞爺火山地域で収束したこと(図 1-1-2)、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(図 1-1-3, 図 1-1-4)、現在までに約 700km³に及ぶマグマを噴出したことが明らかになった。このような特徴は、他の大規模珪長質火山地域と比較すると、総噴出量では Taupo 火山地域や Yellowstone 火山地域などに劣るものの噴出率は数 km³/ky でほぼ同等であり、最も若い大規模珪長質火山地域の 1 つであることが明らかになった。

支笏-洞爺火山地域の噴火履歴の解明

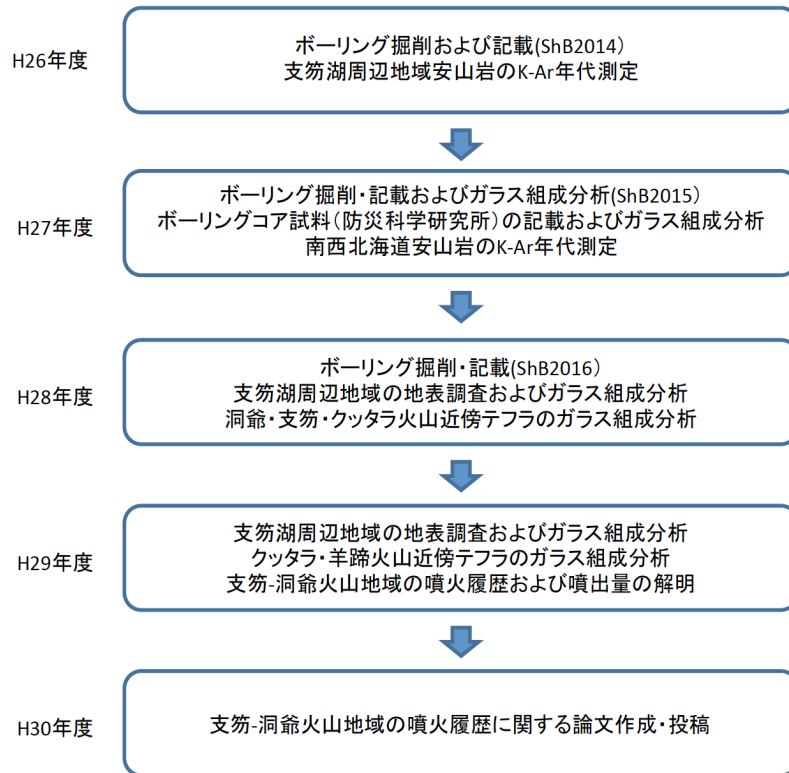


図 1-1-1 支笏-洞爺火山地域のテフラ層序に関する研究フローチャート。

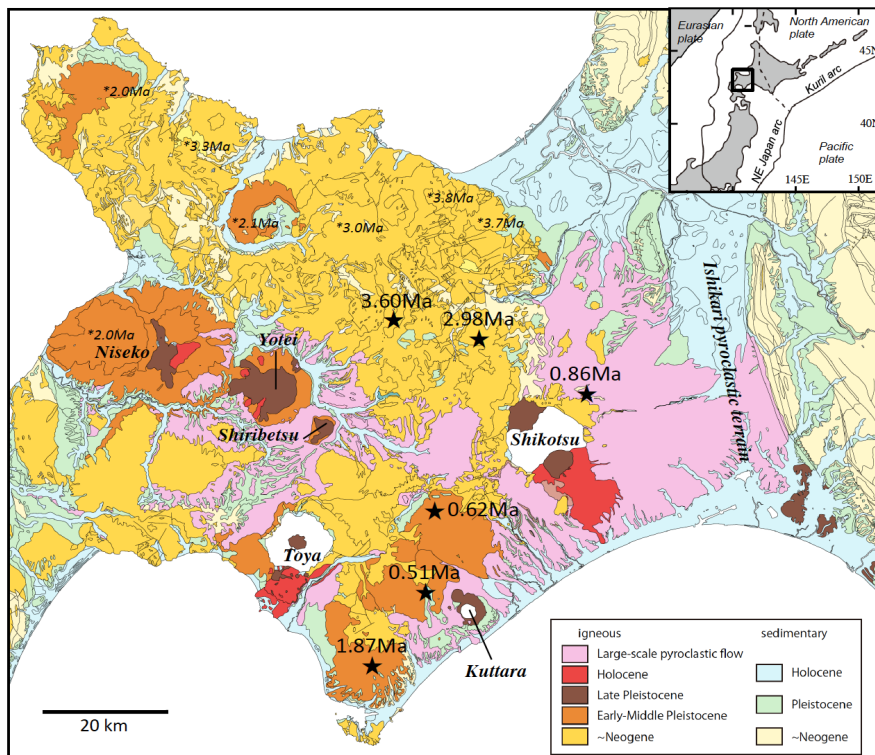
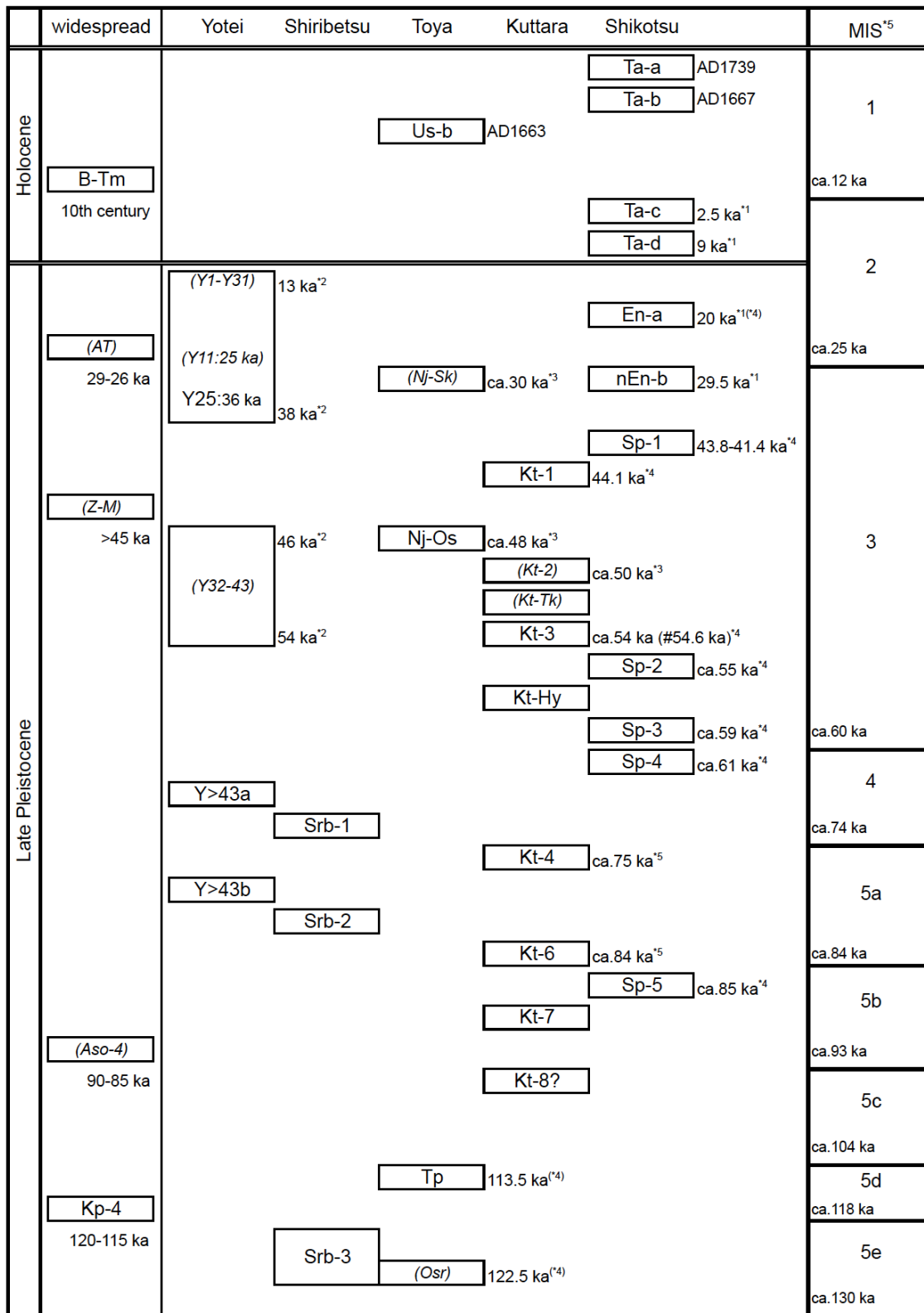


図 1-1-2 南北海道の地質図および火山岩の年代値。

★ : 本研究による K-Ar 年代値, * : Watanabe, 1990.



¹Furukawa and Nakagawa (2010), ²Uesawa et al. (2016b), ³Miyabuchi et al. (2014), ⁴this study, ⁵Sase et al. (2004)
not calibrated

図 1-1-3 支笏-洞爺火山地域のテフラ層序

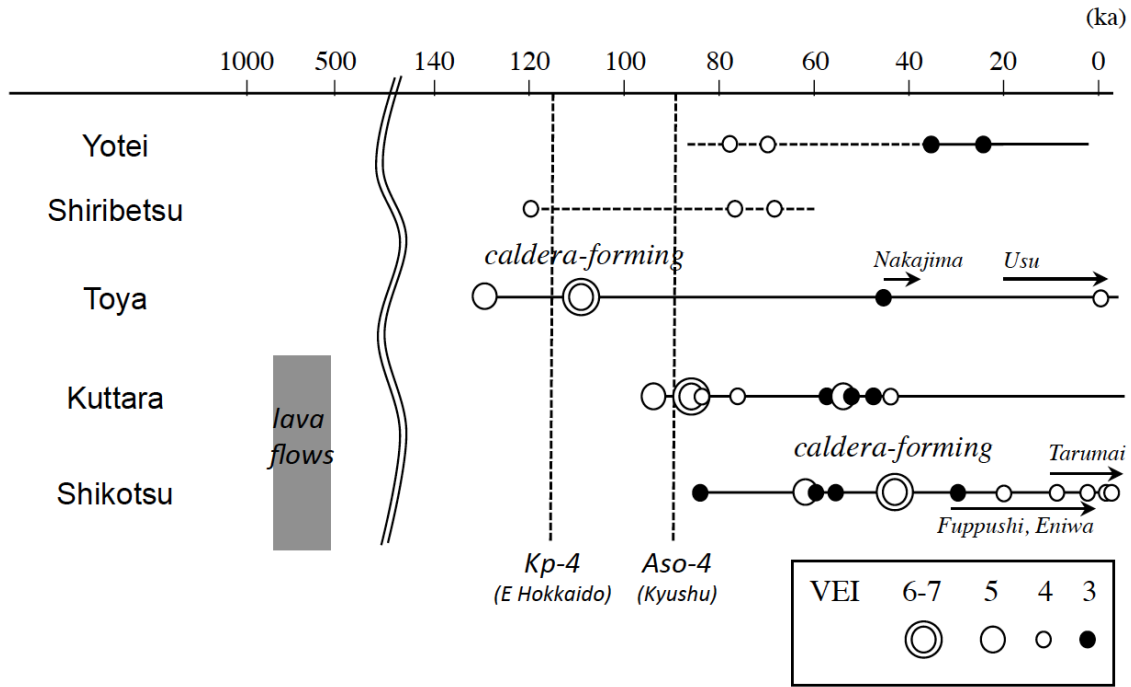


図 1-1-4 支笏-洞爺火山地域の噴火史

(2) 支笏火山 61ka 社台噴火の噴火推移

61ka 社台噴火は、支笏火山の4つの活動期区分(85kaの初期, 61-55kaの先カルデラ期, 44kaのカルデラ形成期, 30ka以降現在までの後カルデラ期)のうち, 先カルデラ期の最も規模の大きな噴火である(噴出量約50km³, 図1-1-5). 61ka 社台噴火の噴火推移に関しては, 下記のフローチャートの通りボーリング調査, トレンチ調査および地表調査とそれらの地質記載, 岩石記載およびガラス組成分析を中心に行った(図1-1-6).

その結果, 61ka 社台噴火は, 噴出物の堆積構造および噴出物の構成物から Unit A から Unit C の大きく3つの地質ユニットに区分され, それぞれに対応する3つの噴火フェーズに分けられることが明らかになった. Phase 1では軽石質プリニー式噴火の後噴出率が急減, Phase 2では新たにスコリア質プリニー式噴火が始まり, Phase 2前期では噴出率の増減を繰り返した後, 後期に噴出率が上昇, Phase 3では火砕流噴火へ移行している. 61ka 社台噴火では, 白色軽石が噴火初期から末期まで消滅することなく常に噴出し続けており, 珪長質マグマ(苦鉄質マグマ)から苦鉄質マグマ(珪長質マグマ)へ時間とともに置き換わっていくという他の火山で一般的に見られる噴火推移とは異なっている. このことは, 各噴火フェーズは火道の拡大または新しい火口の開口によって発生したことを反映しているのかもしれない.

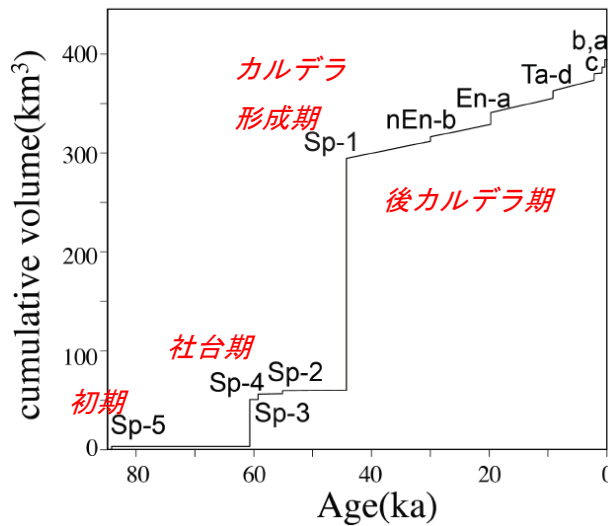


図 1-1-5 支笏火山の噴出量階段ダイアグラム.

支笏火山61ka社台噴火の噴火推移の解明

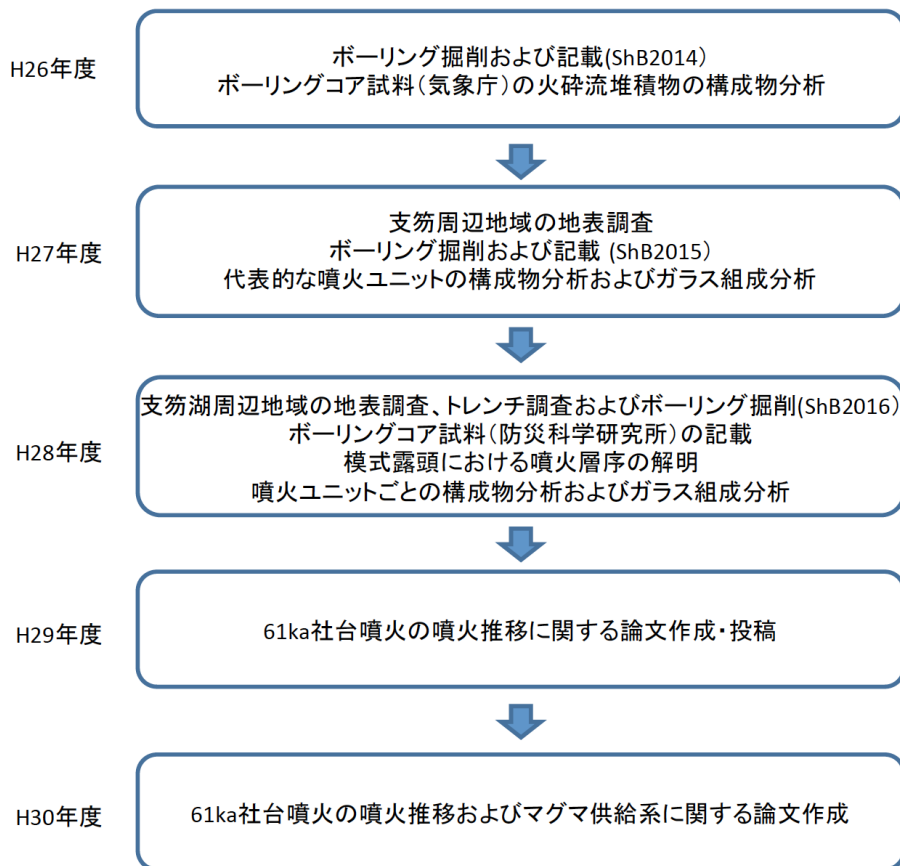


図 1-1-6 支笏火山 61ka 社台噴火の噴火推移に関する研究フローチャート.

1) 61ka 社台噴火噴出物の層序とユニット区分

61ka 社台噴火噴出物は主に降下火砕堆積物と火砕流堆積物からなり，降下火砕堆積物は支笏湖

からほぼ真東に軸を持ち、火砕流堆積物は支笏湖南側で厚く東側にも分布が確認される（図 1-1-7）. 本研究では、61ka 社台噴火噴出物を堆積構造および噴出物の構成物から、Unit A から Unit C の大きく 3 つの地質ユニットに区分した（図 1-1-8, 図 1-1-9）.

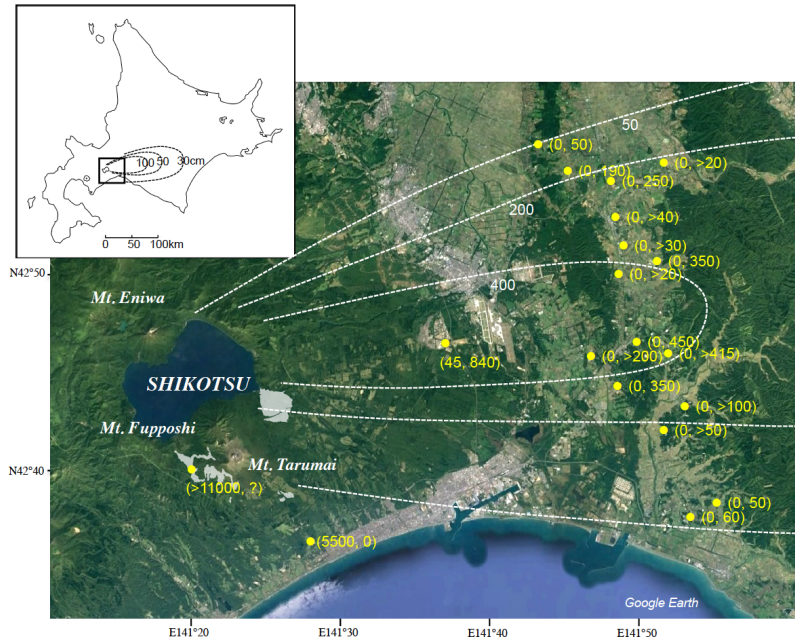


図 1-1-7 61ka 社台噴火の噴出物分布図.

黄色の数値は各地点の層厚（火砕流堆積物、降下火砕堆積物）cm

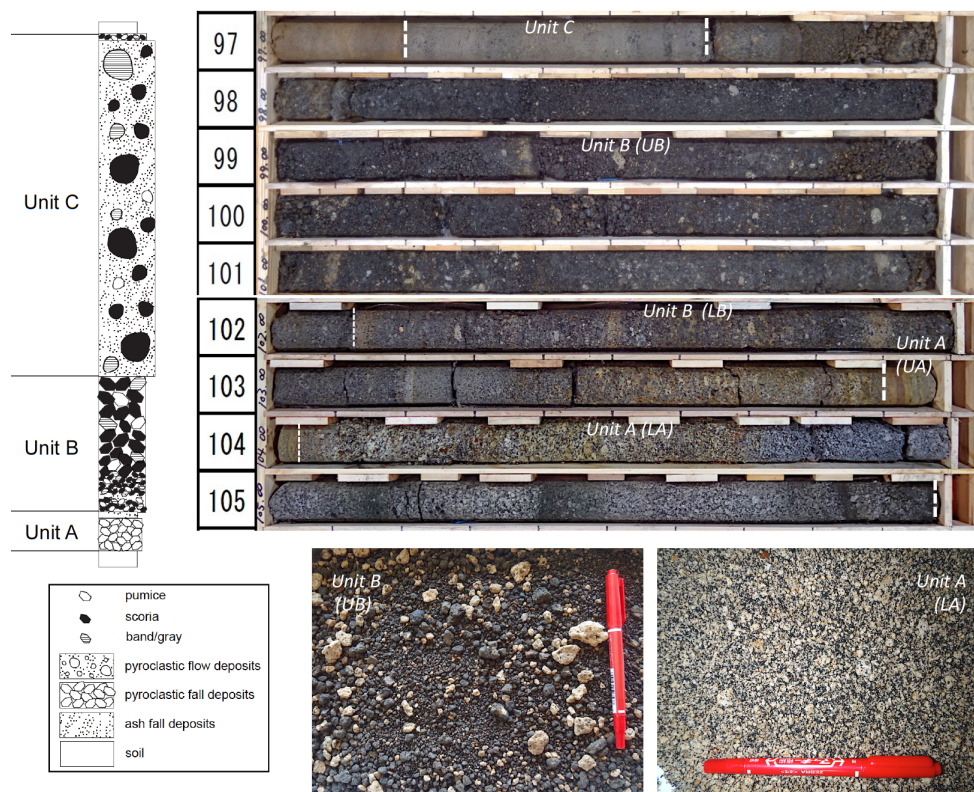


図 1-1-8 61ka 社台噴火の総合柱状図および噴出物の写真.

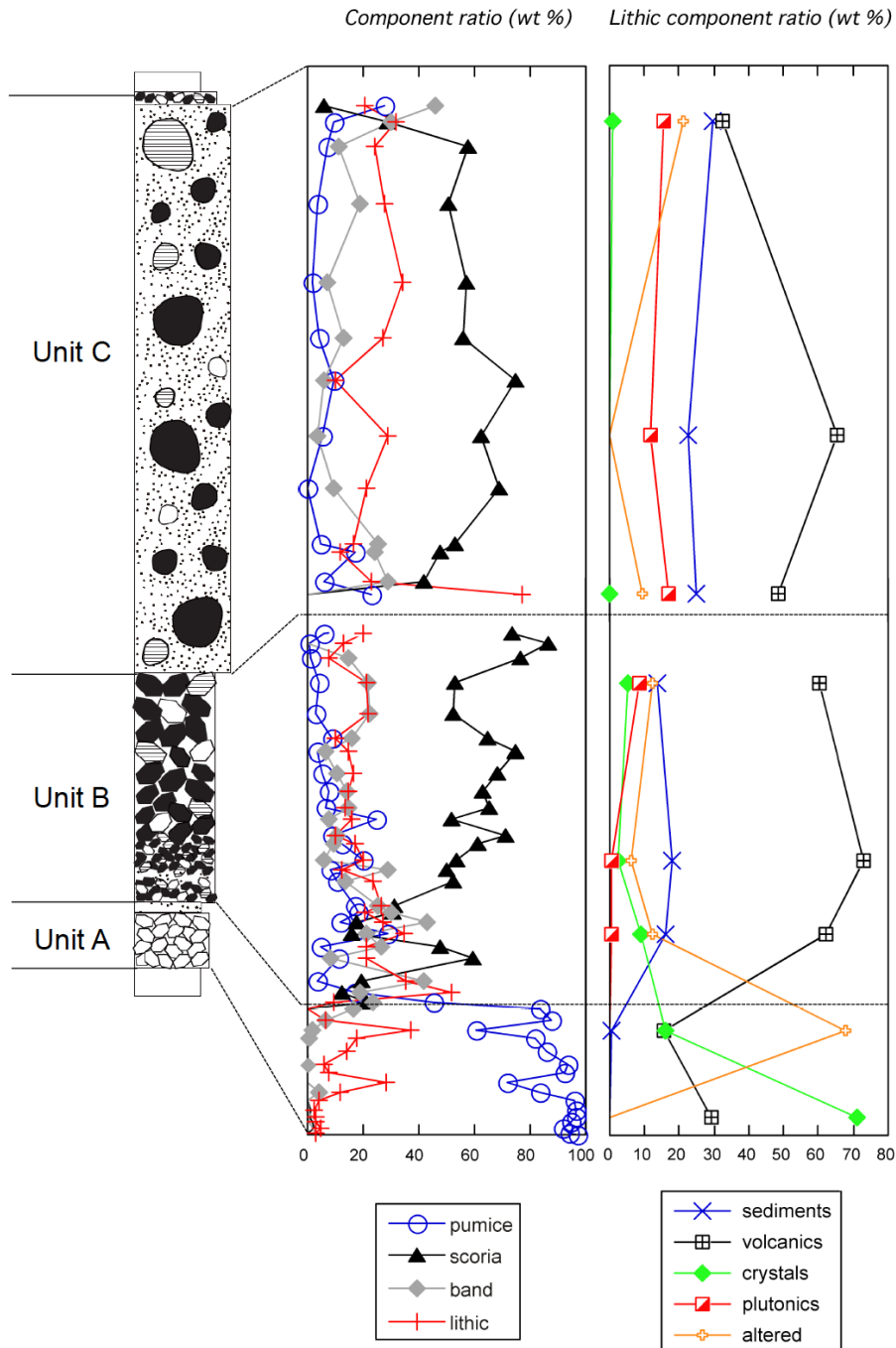


図 1-1-9 61ka 社台噴火の構成物分析結果.

最下位の Unit A は軽石主体の降下火砕堆積物で、茶褐色土壌を直接覆う軽石堆積物 (LA : 宮坂・中川, 2018 の A1, A2 に相当) とその上位の火山灰堆積物 (UA : 宮坂・中川, 2018 の A1, A2 に相当) からなる (図 1-1-8). Unit B は Unit A を直接覆うスコリア主体の降下火砕堆積物で、全体的にはより細粒で粒径や色彩の異なる層が成層している部分を LB (宮坂・中川, 2018 の B1-B4 に相当), より粗粒で黒色部分と赤黒色部分が繰り返す部分を UB (宮坂・中川, 2018 の B5 に相当) とした (図 1-1-8). さらに最上位の Unit C は、スコリア主体の火砕流堆積物 (宮坂・中川, 2018 の C1 に相当) とその上位の小規模な降下火砕堆積物 (宮坂・中川, 2018 の C2 に

相当) からなる (図 1-1-8). 山縣 (1994) では, 支笏湖南側で LB の一部が Unit C 火砕流堆積物に狭在すると述べているが, 本研究で再検討した結果, 支笏湖東側では Unit B 降下火砕堆積物はすべて Unit C の下位に存在しており, 支笏湖南側の厚い Unit C 火砕流堆積物中には Unit B 降下火砕堆積物は認められないことが明らかになった.

図 1-1-9 は, 模式露頭における構成物重量比および岩片種重量比を示した図である. すると, 構成物重量比は, Unit A では白色軽石が 60%以上を占め, 岩片量が上部で次第に増加し, 同時に灰色軽石を少量伴っている. Unit B では, 最下部で最も岩片量が多くスコリアが出現し始める. 下部では構成物重量比の変化が大きい, 上部ではスコリアが 50%以上を占めるようになり白色軽石は 30%以下に急減する. Unit C では, 最下部で岩片量が約 80%, 白色軽石が 20%程度を占めるが, その後岩片量は 30%以下程度まで急減しスコリアが 50%程度以上となる. 岩片種重量比に注目すると, Unit A では結晶片や変質岩岩片が主体であるのに対して, Unit B, Unit C では火山岩岩片が主体となり, Unit C では堆積岩や深成岩の岩片が増加する傾向が認められることが明らかになった.

2) 61ka 社台噴火の噴火推移

本研究では, 61ka 社台噴火を Unit A, Unit B, Unit C にそれぞれ対応する 3 つの噴火フェーズ (Phase 1 : 軽石質のプリニー式噴火, Phase 2 : スコリア質のプリニー式噴火, Phase 3 : 火砕流噴火) に分類した (図 1-1-10).

Phase 1 では安定的な噴煙柱から降下軽石堆積物が供給されたが (LA), この噴煙柱は UA で衰退したと考えられる. Phase 2 では噴煙柱高度が一定ではなく噴出率の増減を繰り返しながら (LB) 次第に噴出率が上昇していった. UB で噴煙柱高度は最大になったが, この時期は間欠的な噴火を繰り返して色調の異なる成層構造が形成された可能性が考えられる. その後 Phase 3 の大規模火砕流噴火が起こり, その後小規模なスコリア質プリニー式噴火を伴って活動は終了したと考えられる.

Phase 2 および Phase 3 の最初期で岩片量が急増すること, Phase 2 でスコリアが出現し始め火山岩岩片が急増すること, Phase 3 で堆積岩・深成岩の岩片が増加することなどから, 各噴火フェーズは火道の拡大または新しい火口の開口によって発生した可能性が考えられる. また, 噴出量約 50km³ の噴火を通じて軽石が消滅することなく常に噴出し続けるという特徴が認められ, 珪長質マグマ (苦鉄質マグマ) から苦鉄質マグマ (珪長質マグマ) へ時間とともに置き換わっていくという他の火山で一般的に見られるものとは異なっている (Pallister et al., 1996, Takahashi and Nakagawa, 2015 など). この特徴は, 成層マグマ溜まりからの噴出や単独の火道からの噴出では説明するのが難しく, 少なくとも白色軽石は, スコリアや縞状軽石・灰色軽石とは独立したマグマ溜まりから, 別の火道を通して噴出した可能性を示唆している.

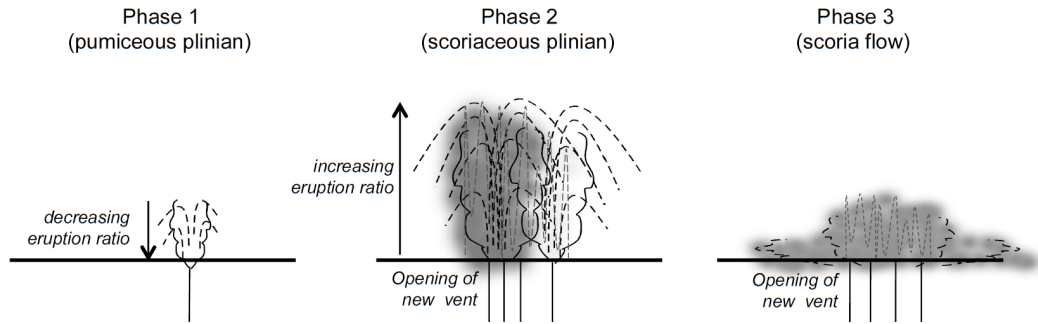


図 1-1-10 61ka 社台噴火の推移.

(3) 支笏カルデラ形成噴火の噴火推移

支笏カルデラ形成期噴火の発生年代は 43.8ka, 噴出体積は約 250km³ と見積もられている (図 1-1-5). 支笏カルデラ形成期の噴火推移に関しては, 下記のフローチャートの通りボーリング調査, トレンチ調査, 地表調査およびドローン調査とそれらの地質記載, 岩石記載およびガラス組成分析を中心に行った (図 1-1-11).

その結果, 支笏カルデラ形成期噴火は 6 つの噴火ユニット (Unit A~Unit F), 5 つの噴火フェーズに区分される (Phase 1=Unit A: マグマ水蒸気噴火および phreatoplinian 噴火, Phase 2=Unit B: プリニー式噴火, Phase 3=Unit C: 大規模火砕流噴火, 風化を伴う程度の休止期において Phase 4=Unit D および Unit E: 小規模な火砕流堆積物, Phase 5=Unit F: 小規模なプリニー式噴火). Phase 1 から Phase 2 において火道の開口や拡大があったこと, Phase 3 の大規模火砕流発生の後に大量のラグブレッチャが噴出して現在のカルデラがほぼ形成されたと考えられること, やや長い休止期において始まったと考えられる Phase 4 以降は噴出体積が急減し苦鉄質マグマが変化していることなどから, 狭義の支笏カルデラ形成噴火は Phase 3 までであると考えられる. Phase 4 以降の噴火活動様式や噴火規模の変化は, 苦鉄質マグマが変化することによって生じた可能性も考えられる.

1) 模式露頭の解析による支笏カルデラ形成期噴出物

中川ほか (2018b) では, 支笏湖南方の模式露頭 (図 1-1-12) において, 層相, 構成物の変化および時間間隙に注目して (図 1-1-13), 支笏カルデラ形成期噴出物を A から F の 6 つの噴火ユニット, 1 から 5 の 5 つの噴火フェーズに再区分した (図 1-1-14). その結果 Phase 2-3 と Phase 4-5 の間には浸食や再堆積が起こっていたほか, 特に Phase 3-4 間には堆積物の風化が認められるなど一定の時間間隙が存在することが指摘された.

支笏火山61ka社台噴火のマグマ供給系の解明

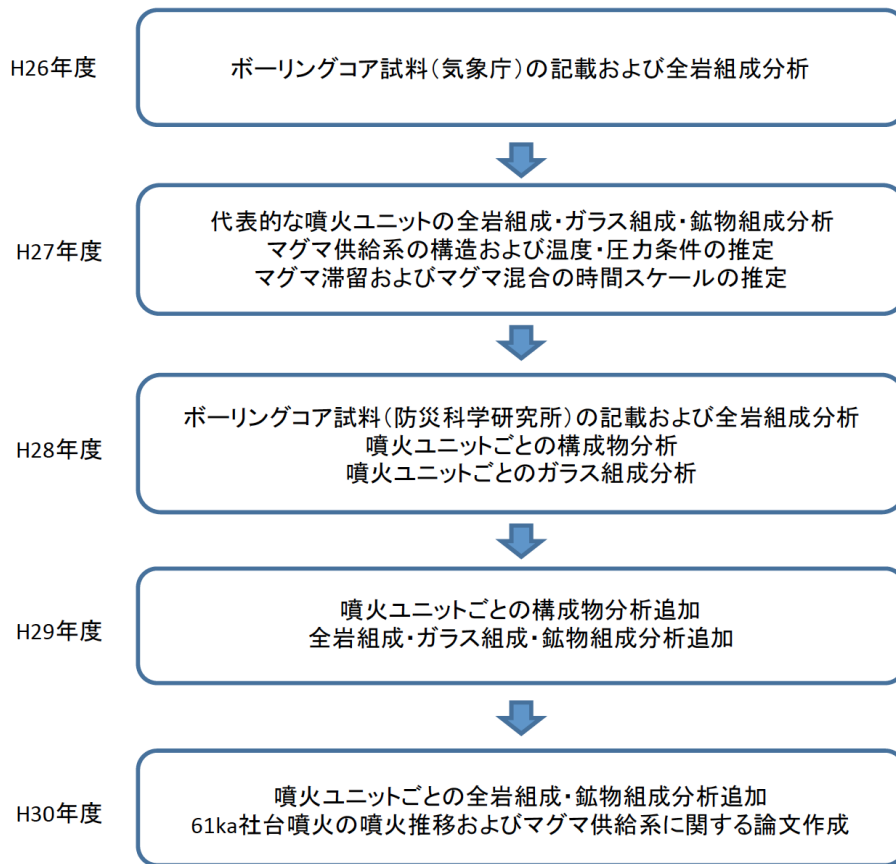


図 1-1-11 支笏カルデラ形成期の噴火推移に関する研究フローチャート.

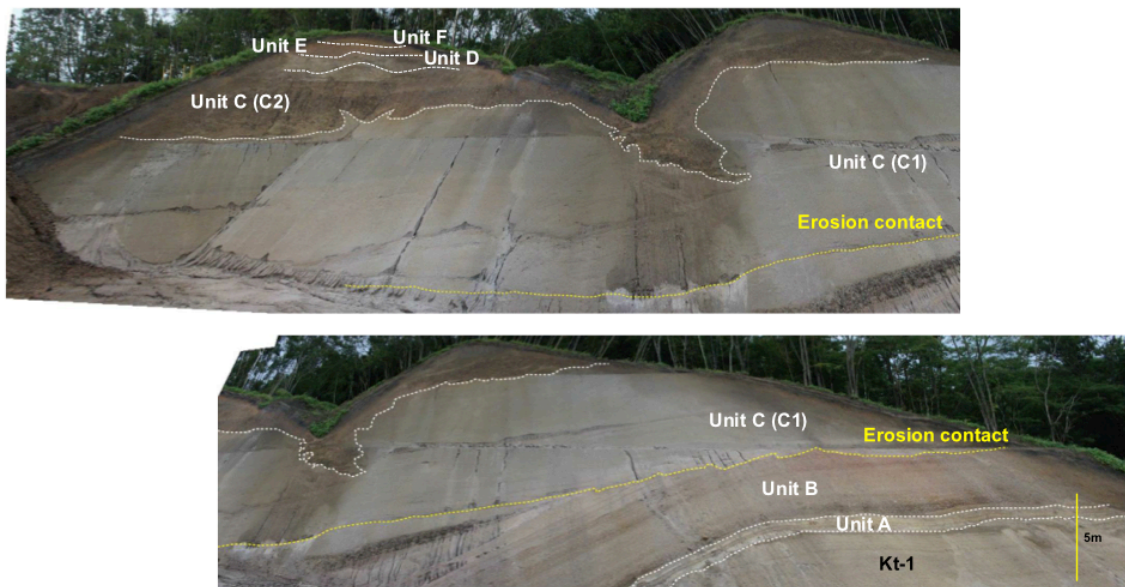


図 1-1-12 模式露頭の全体写真.

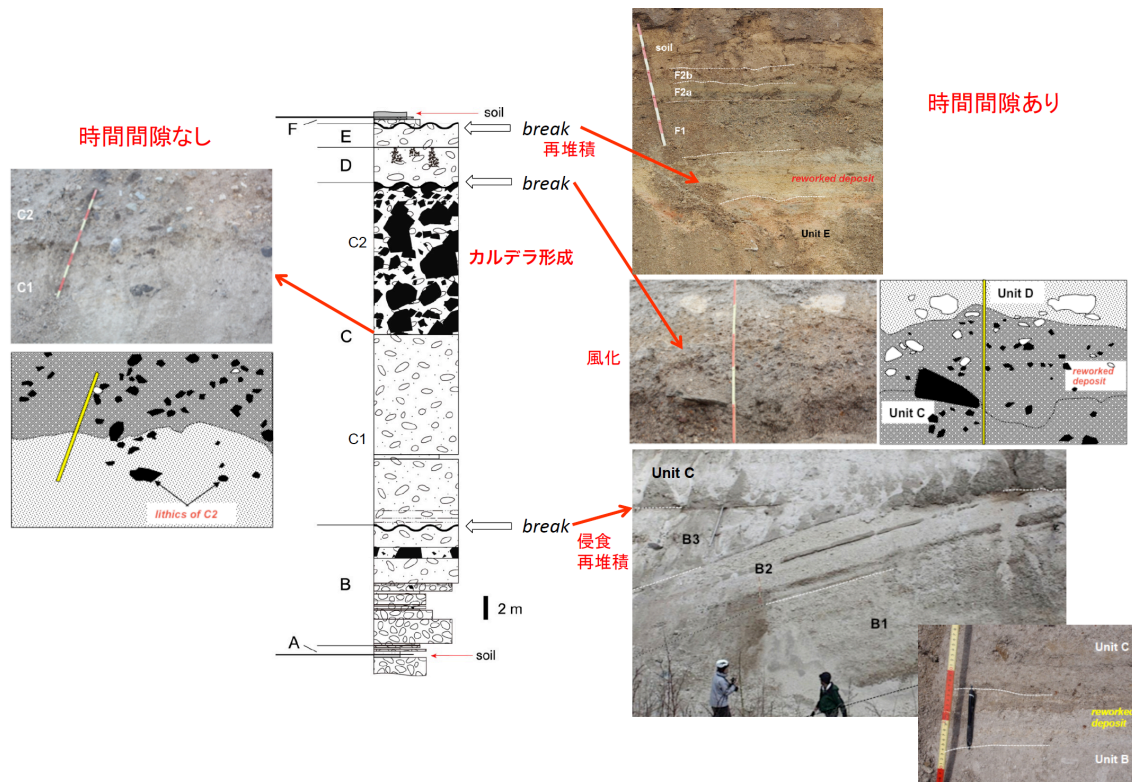


図 1-1-13 模式露頭における柱状図とユニット境界部の産状.

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

図 1-1-14 模式露頭の解析による支笏カルデラ形成期の噴火推移.

Phase 1 はマグマ水蒸気噴火および phreatoplinian 噴火で始まり Unit A の火砕サージ堆積物を噴出した。その後時間間隙をおかずにマグマ噴火に移行し、Phase 2 ではプリニー式噴火が開始し、厚い降下軽石堆積物を堆積した。Phase 2 後期には噴煙柱が不安定になり、火砕サージ堆積物や火砕流堆積物も噴出している (Unit B)。侵食間隙において、Phase 3 では爆発的な噴火に

より大量の火砕流堆積物を噴出し、最後にラグブレッチャが堆積した (Unit C). さらにその後休止期において、Phase 4 では小規模な火砕流堆積物が間欠的に噴出し (Unit D, Unit E), 最後の Phase 5 では、火砕サージを伴う小規模なプリニー式噴火が発生している (Unit F). カルデラ形成噴火を通じて、斑晶に乏しい CP タイプ軽石が存在しており、Phase 3 の末期から斑晶に富む CR タイプ軽石が噴出し始めるという特徴がある。

2) 模式露頭と支笏湖周辺地域および支笏湖東方地域との層序の対比

本研究では、支笏湖南方の模式露頭でのユニット区分 (図 1-1-13) を元に、支笏湖を中心とした広範囲において分布調査を行った(図 1-1-15). 手法としては、ボーリング調査, トレンチ調査, 地表調査のほか、今年度はドローン調査を追加した (図 1-1-16). 図 1-1-17 から図 1-1-20 はそれぞれ、支笏湖周辺地域および支笏湖東方地域の代表的な露頭の柱状図であり、図 1-1-21 には各ユニットの層厚分布を示した。ユニットの対比は、岩相、本質物質の種類、時間間隙の有無、岩片量比や岩片種構成比、火山ガラスの組成などを用いて行った。その結果、ユニットごとに分布域や層厚が異なることが明らかになった。

Unit A 堆積物は最下部に炭化物の薄層を伴う粗粒砂サイズの火砕サージ堆積物である A1 と、火山豆石を含む火砕サージ堆積物と降下軽石堆積物の互層からなる A2 の大きく 2 つに分けられ、本質物質は CP タイプのみである (図 1-1-14). A1 は支笏湖北東側でやや厚いが全方向に分布しており、最大層厚は 5cm と非常に薄いものの、支笏湖南東 60km の地点でも確認できる (図 1-1-21). 一方で A2 は南西方向に主軸を持ち、支笏湖東方 5km では豆石を含む火砕サージ堆積物が 450m 以上の厚さがあるが、その他の露頭では層厚 20cm 以下で急激に薄くなる。

Unit B 堆積物は、模式露頭では下位から降下軽石堆積物 (B1), 火砕サージおよび火砕流堆積物と降下軽石堆積物の互層 (B2), そして火砕流堆積物 (B3) からなり、いずれも本質物質は CP タイプのみである (図 1-1-14). B1 は東南東に主軸をもち、最大層厚は 450cm, 南東約 60km においても層厚は 210cm で非常に厚い降下軽石堆積物である (図 1-1-21). 支笏湖東方地域の B2 には火砕サージ堆積物は認められないが、B1 に比べて粒径や構成物の変化による成層構造が発達している (図 1-1-19, 図 1-1-20). 多くの地点で上部が削剥されており、支笏湖周辺地域の東側では上位の B3 火砕流によって、支笏湖東方地域においては B3 火砕流堆積物に覆われていないことによって浸食された可能性がある。噴火当初の層厚は不明であるが主軸は南東方向と考えられ、支笏湖南東約 60km においても層厚は 130cm である (図 1-1-21). B3 は最大層厚約 30m で、流走距離は 20km 程度である。1 地点を除き、B3 火砕流堆積物の上位は再堆積物に覆われているか、あるいは上部が浸食されているのが観察された (図 1-1-17, 図 1-1-18).

Unit C 堆積物は、大規模な火砕流堆積物 (C1) とその上位の岩片濃集層 (C2) からなり、C1 の本質物質は斑晶に乏しい CP タイプのみであるが、C2 には斑晶に富む CR タイプも少量確認できる (図 1-1-14). C2 岩片濃集層は支笏湖東～南側の近傍地域にのみ分布しており (図 1-1-17), C1 火砕流堆積物は近傍地域では溶結度や岩片量の異なる複数のフローユニットからなっている (図 1-1-17, 図 1-1-18). C1 と C2 を合わせた Unit C 堆積物は東方で厚く、最大層厚約 80m で支笏湖から 50km 程度まで分布が確認された (図 1-1-21).

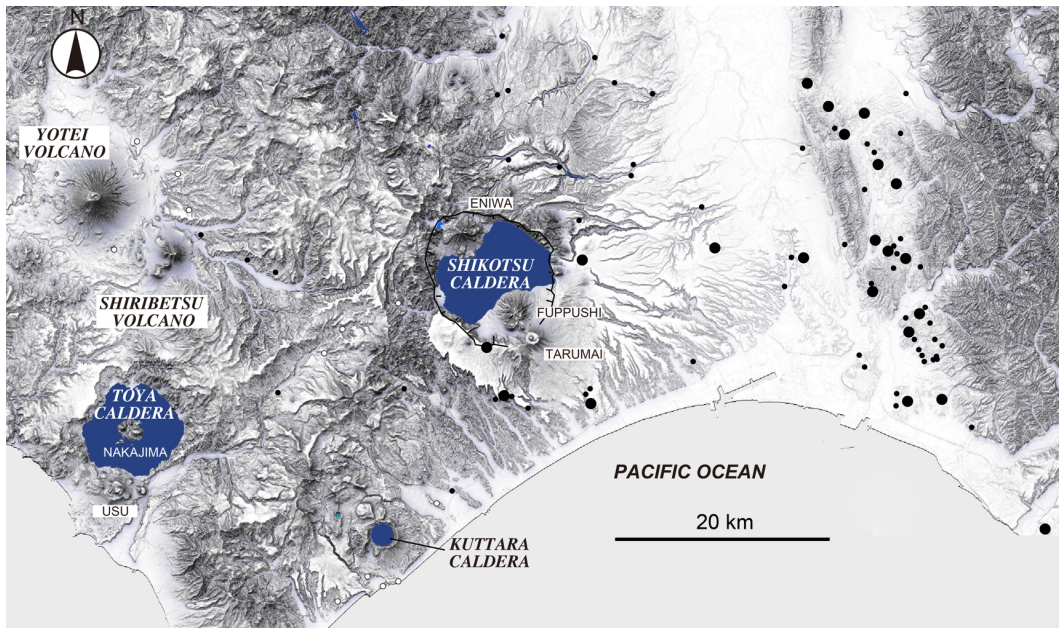


図 1-1-15 調査地点 (● : 本研究による調査地点, ★ : ドローン調査地点).
 黒い点線枠は柱状図範囲.

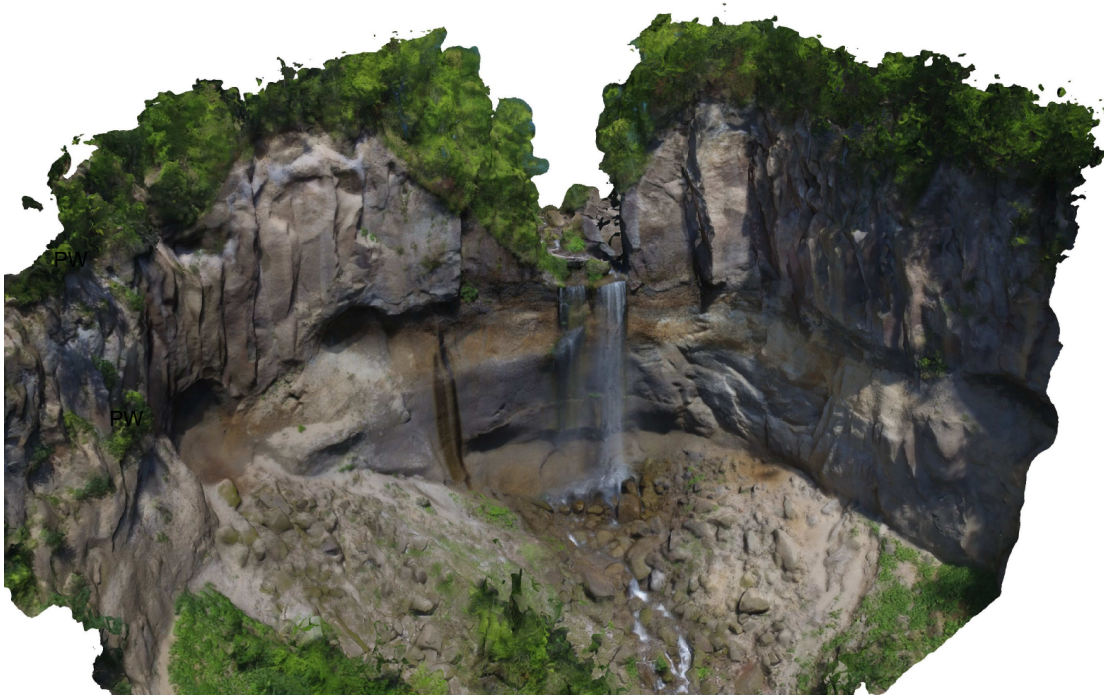


図 1-1-16 支笏湖近傍でのドローン調査結果の画像.

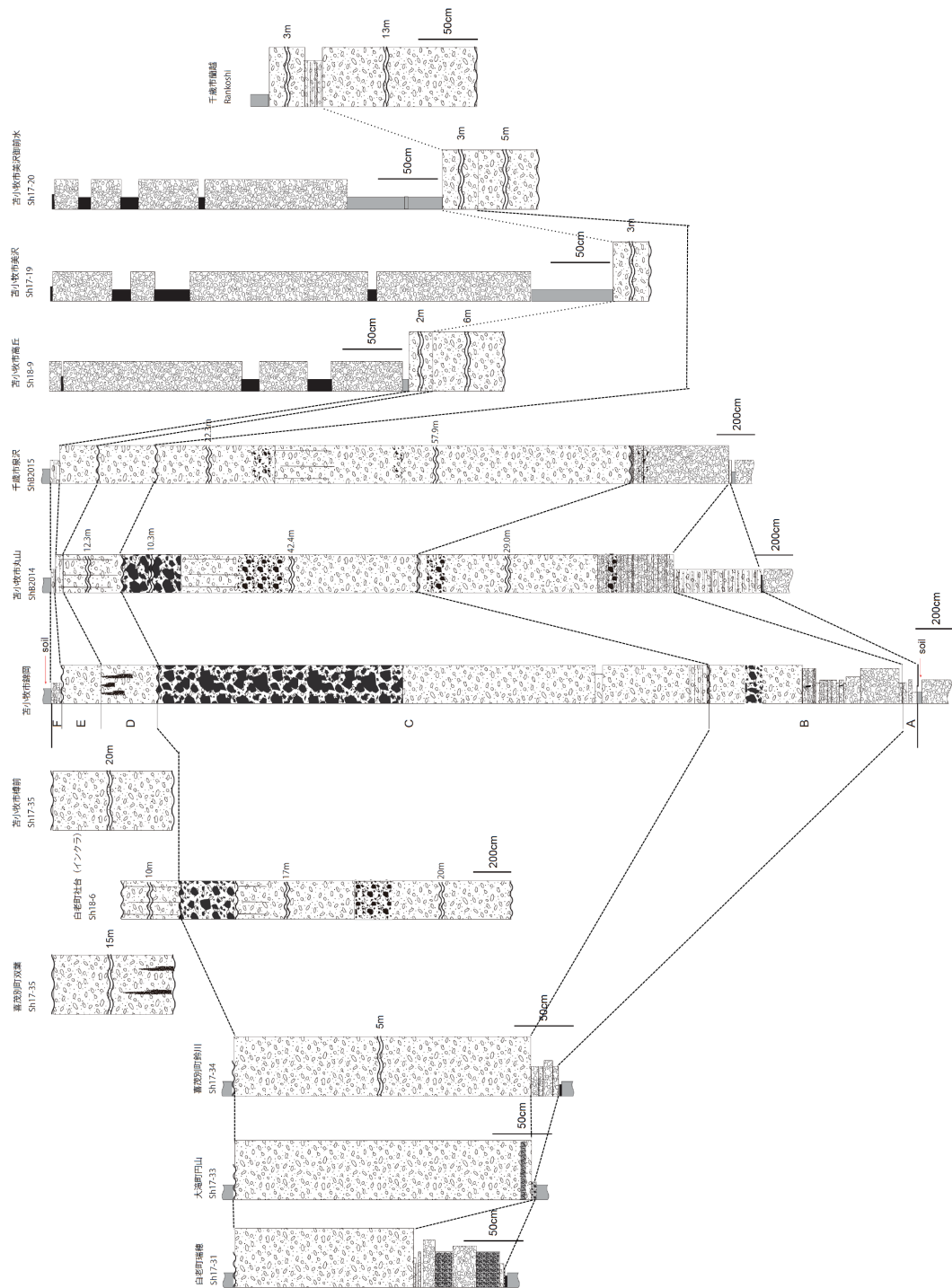


図 1-1-17 支笏湖周辺地域の対比柱状図 (南側). 赤枠は模式露頭の柱状図.

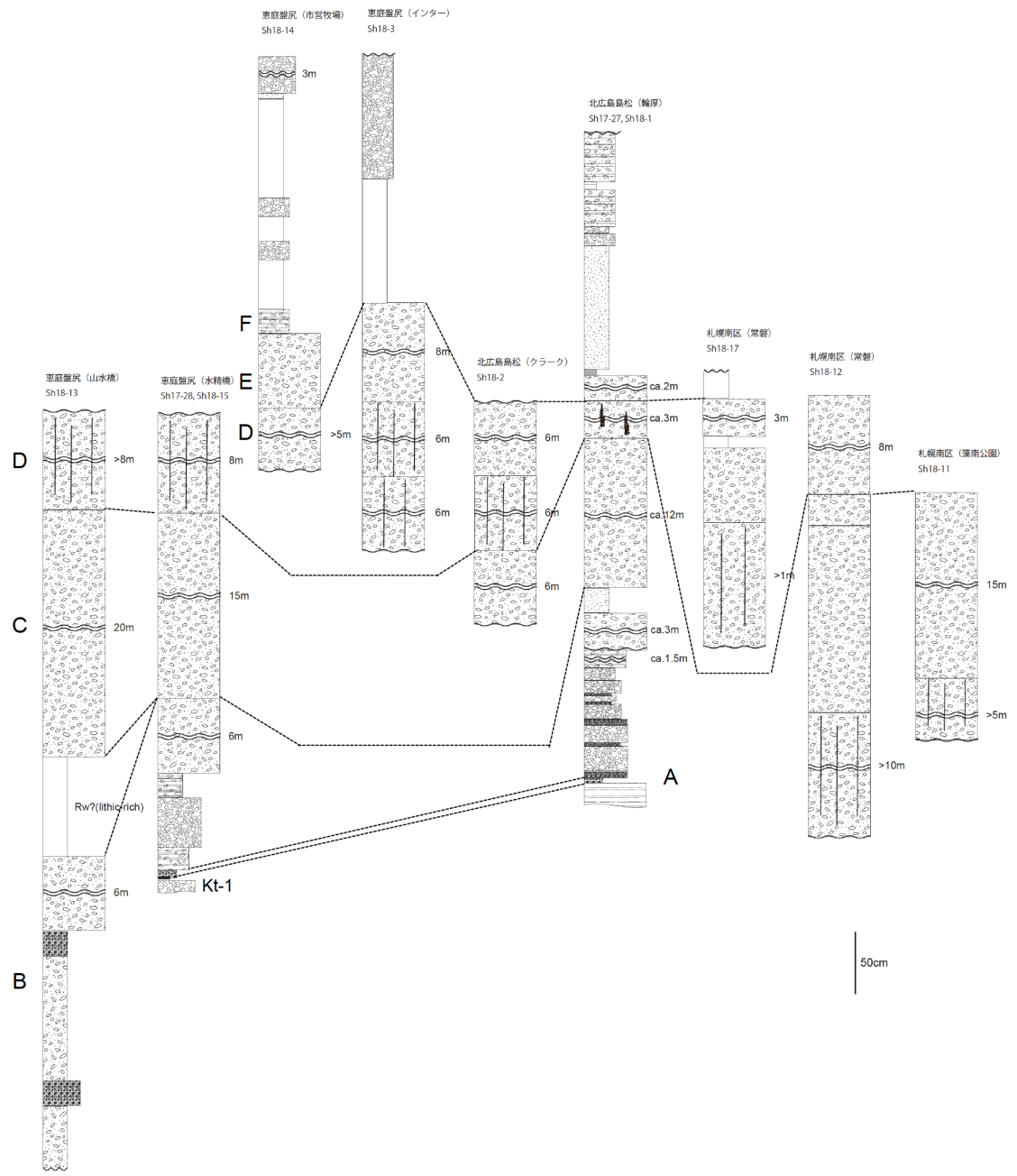


図 1-1-18 支笏湖周辺地域の対比柱状図 (北側).

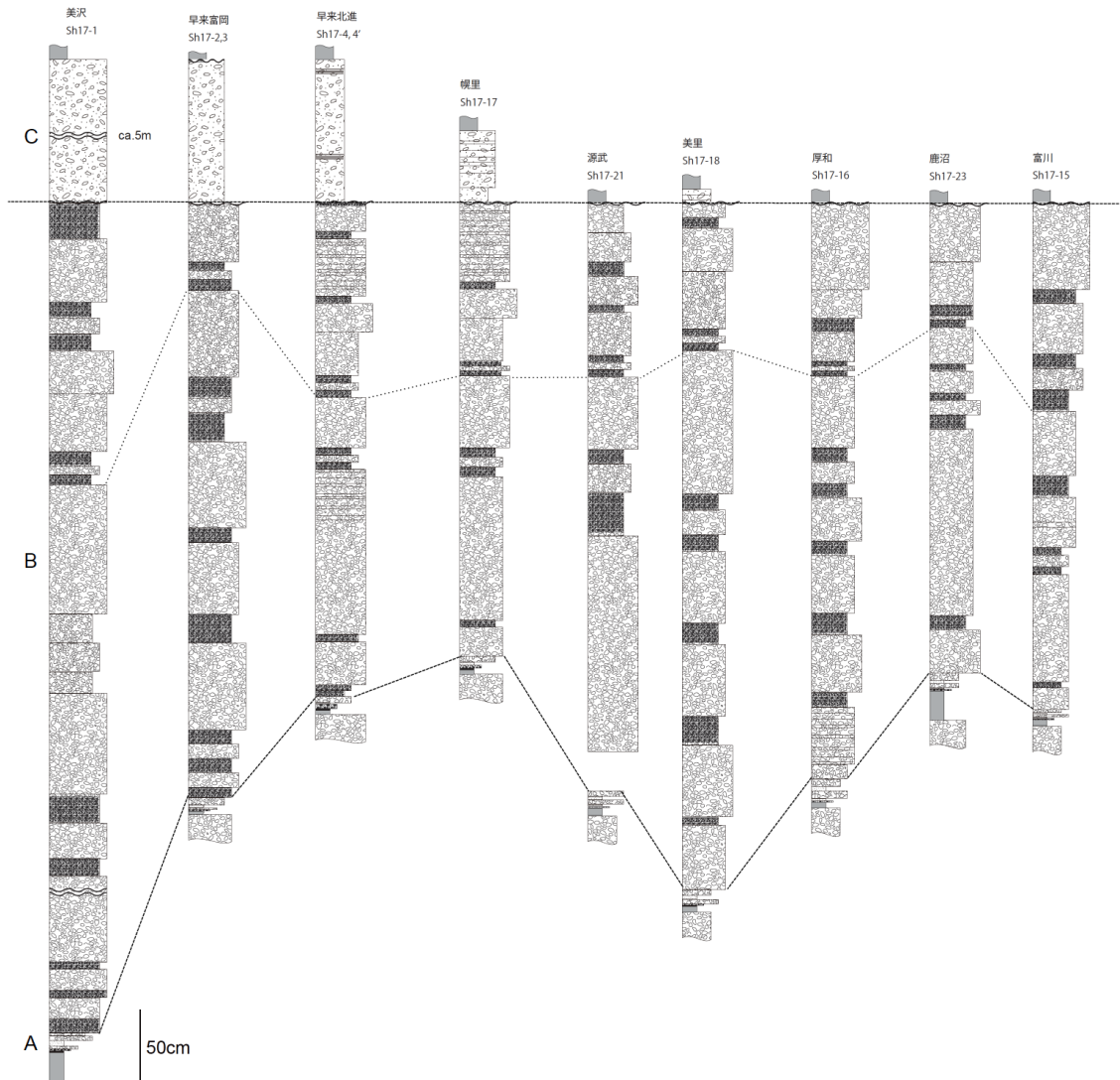


図 1-1-19 支笏湖東方地域の対比柱状図（南側）.

Unit D 堆積物および Unit E 堆積物は、いずれも CP タイプと CR タイプの軽石が共存する火砕流堆積物である (図 1-1-14). 模式露頭および支笏湖東方 5km のボーリングコアでの産状から、1) 岩片濃集層の上位に存在する、2) ガス抜けパイプが見られる、3) 支笏湖近傍では弱溶結～強溶結している、といった特徴のうちいずれかが観察された層を Unit D、その上位の CR タイプ軽石がやや多い火砕流堆積物を Unit E として、対比を行った (図 1-1-17, 図 1-1-18). その結果、Unit D 堆積物は最大層厚 35m 程度で流走距離約 20km、Unit E 堆積物は最大層厚 3m 程度で流走距離約 20km となった (図 1-1-21).

Unit F 堆積物は、下位の降下軽石堆積物 (F1) と上位の火砕サージ堆積物 (F2) からなり、F1 が CR タイプ軽石主体なのに対して、F2 は CP タイプ軽石が大部分を占める (図 2-3-4). 火砕流堆積物上位の F1 降下軽石堆積物および F2 火砕サージ堆積物は、支笏湖東～南側 20km 以内の範囲に確認された (図 1-1-17, 図 1-1-18). 最大層厚は 70cm と非常に規模は小さい (図 1-1-21). 支笏湖東方では、Unit C 火砕流堆積物の上位に CP タイプ軽石のみからなる火砕サージ堆積物が観察されるが、これらと Unit F 堆積物との関係は不明である (図 1-1-19, 図 1-1-20).

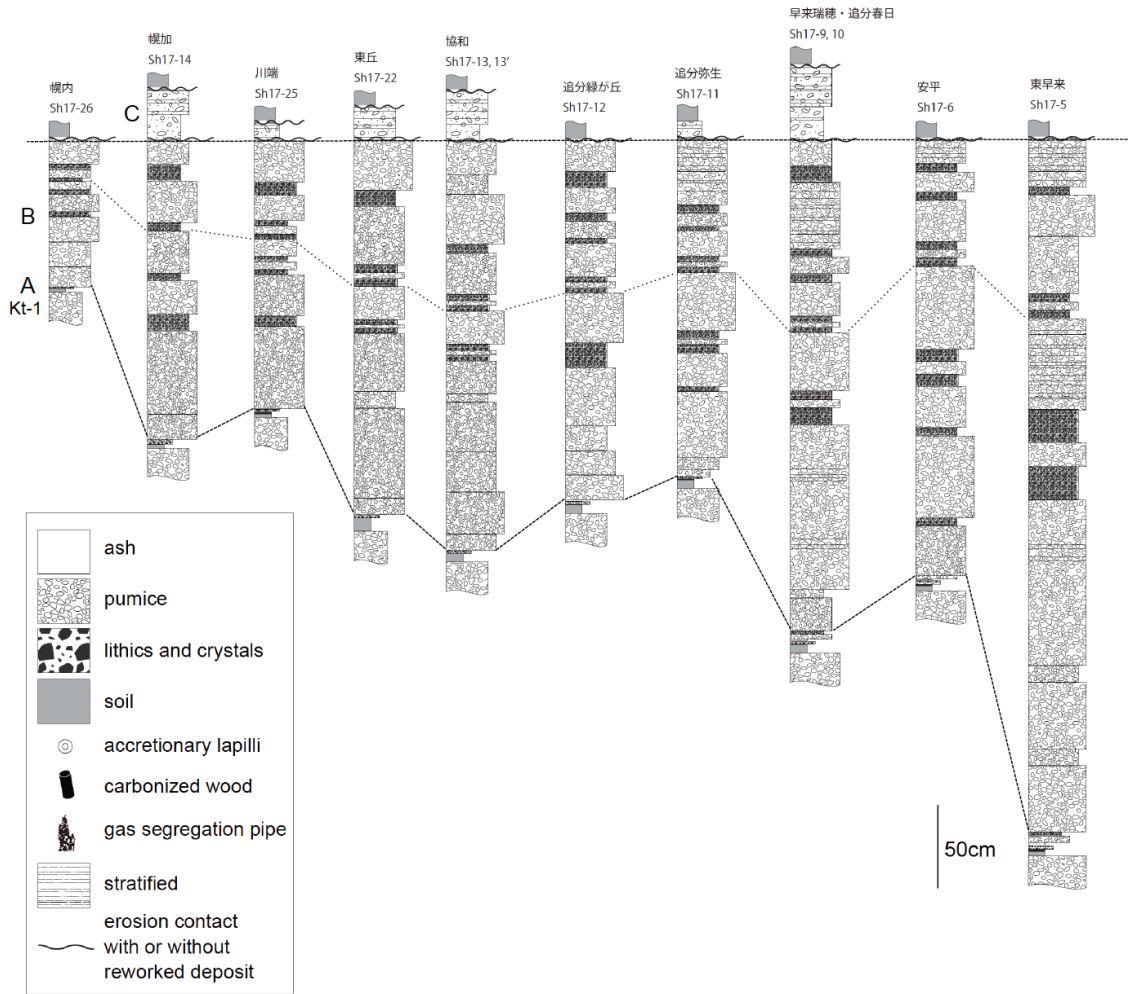


図 1-1-20 支笏湖東方地域の対比柱状図（北側）.

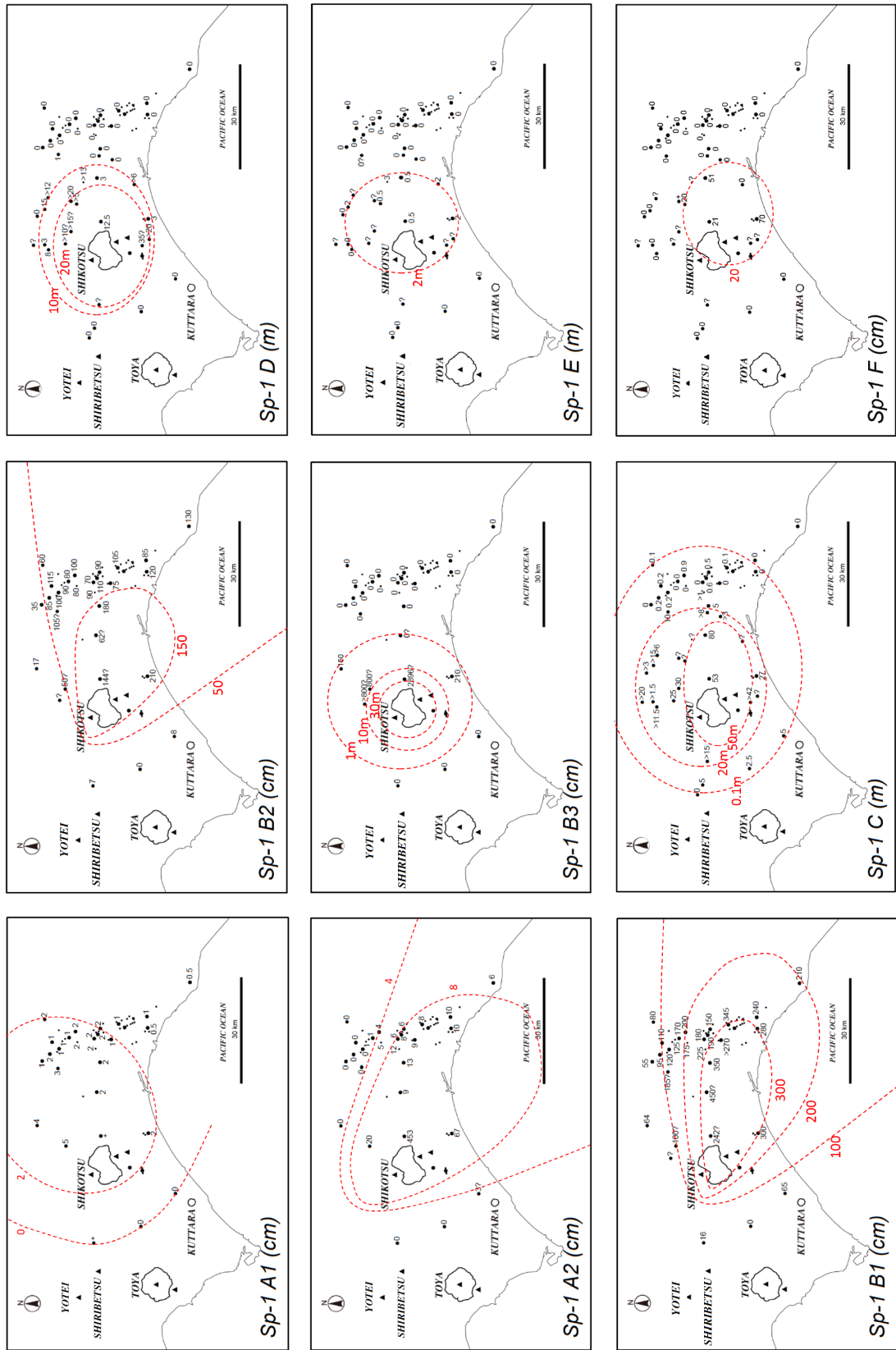


図 1-1-21 噴火ユニットごとの層厚分布.

3) 噴火ユニットごとの噴出体積

本研究では、図 1-1-21 の層厚分布を元に各ユニットのマグマ噴出量を推定した。降下火砕堆積物の体積は Hayakawa (1985) を用いて、火砕流堆積物は分布範囲を円で近似し平均層厚を用いてみかけ体積を計算した。さらに、噴出物の密度を 1.5g/cm^3 を仮定して DRE 体積 (溶岩密度: 2.5g/cm^3) を算出した。また、中川ほか (2018b) によるユニットごとの CR タイプ軽石の構成比から、噴出物中の CR マグマの体積も求めた (図 1-1-22)。

その結果、支笏カルデラ形成期の噴出体積は DRE 換算で、降下火砕堆積物で約 50km^3 、火砕流堆積物で約 85km^3 、合計 135km^3 となった。ユニットごとに見ると、Unit A で 1.5km^3 であったが、引き続き Unit B では約 50km^3 、Unit C では約 70km^3 となり、この 2 つのユニットで全体の噴出量の 90% 近くを占める。その後 Unit D 以降は、 13.7km^3 、 0.8km^3 、 0.2km^3 と急激に減少した。また Unit C2 から出現し始めた CR マグマの体積は合計 2.6km^3 で、総噴出量約 135km^3 の 2% 以下であるが、Unit D 以降における CR マグマの割合は約 15% である。このように Unit C までと Unit D 以降では、噴出体積も CR タイプの占める割合も大きく異なることが明らかになった。

	unit	sub unit	CR
F	0.2	0.2	0.05
E	0.8	0.8	0.4
D	13.7	13.7	2.0
C	70.3	70.3	0.1
B3	48.0	9.5	0.0
B2		9.7	0.0
B1		28.8	0.0
A2	1.5	1.3	0.0
A1		0.3	0.0
total		134.5	2.6

図 1-1-22 噴火ユニットごとの噴出体積。

4) 火口域の時空変遷

中川ほか (2018b) では、Unit B で岩片量が増加し Unit C2 に最大になることから、この時期に火道の拡大やカルデラ形成が起こっていたと指摘しているが (図 1-1-14)、ここでは岩片種構成比から火口域の時空変遷について考察する。

図 1-1-23 は、各噴火ユニットの噴出体積を反映させた支笏カルデラ形成期の総合柱状図と、模式露頭における岩片種構成比の時間変化を示した図である。すると、Unit A では火山岩岩片が大部分を占めるのに対して、B1 では次第に堆積岩岩片の量比が増加し B1 最上

部で堆積岩岩片が 70wt%以上になる。その後 B2 では深成岩岩片が普遍的に認められるようになり、B3 では岩片量がさらに増加し深成岩も 20wt%以上となる。C1 には深成岩岩片は含まれず堆積岩岩片量比も急減する。そして岩片量最大の C2 では、変質岩岩片が 70wt%以上まで急激に増加する傾向が認められた。

さらに、図 1-1-24 は支笏湖周辺地域の地質図と支笏湖東方地域における B2 岩片種構成比の空間変化を示した図である。これまでの研究により、B1 と B2 では粒度分布が異なり、B1 は淘汰が良く 1 つの正規分布曲線で近似できるのに対して、B2 は淘汰が悪く複数の正規分布曲線が存在していることが明らかになっている。このことから、B1 ではプリニー式噴火で 1 本の噴煙柱から降下火砕堆積物が供給されていたのに対して、B2 では複数の噴煙柱が形成されていた可能性があると考えられていた。そこで、B2 のうち、支笏湖東方地域で広範囲で対比の取れた最も淘汰が悪い層に注目して、複数地点で岩片種構成比を分析した。すると、より北側の露頭では火山岩岩片が多いのに対して、南側にいくほど堆積岩岩片量比が増加する傾向があることが明らかになり、このことは 1 つの噴煙柱からの供給では説明が難しいことを示している。

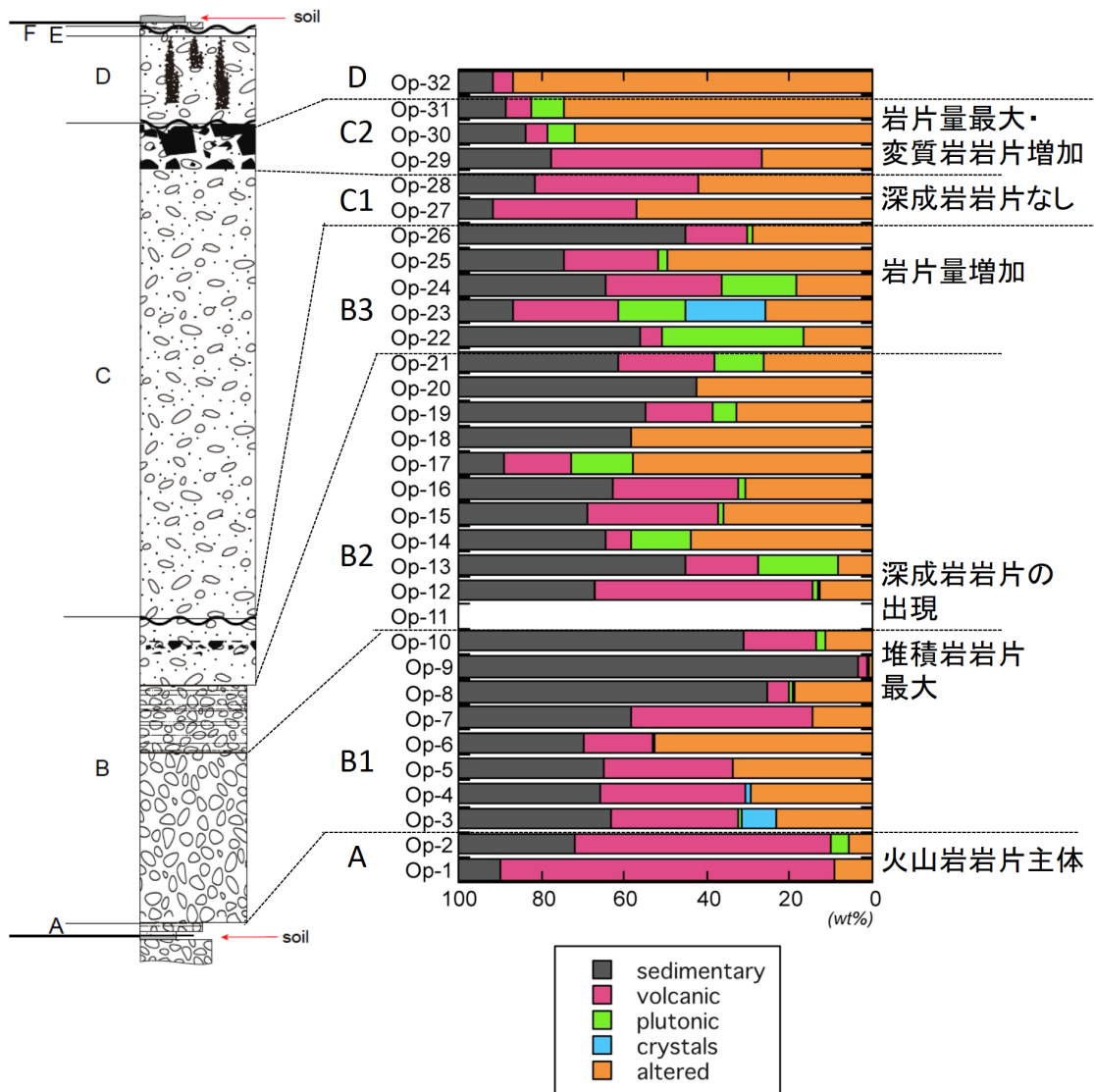


図 1-1-23 支笏カルデラ形成期の総合柱状図および模式露頭での岩片種構成比の時間変化。

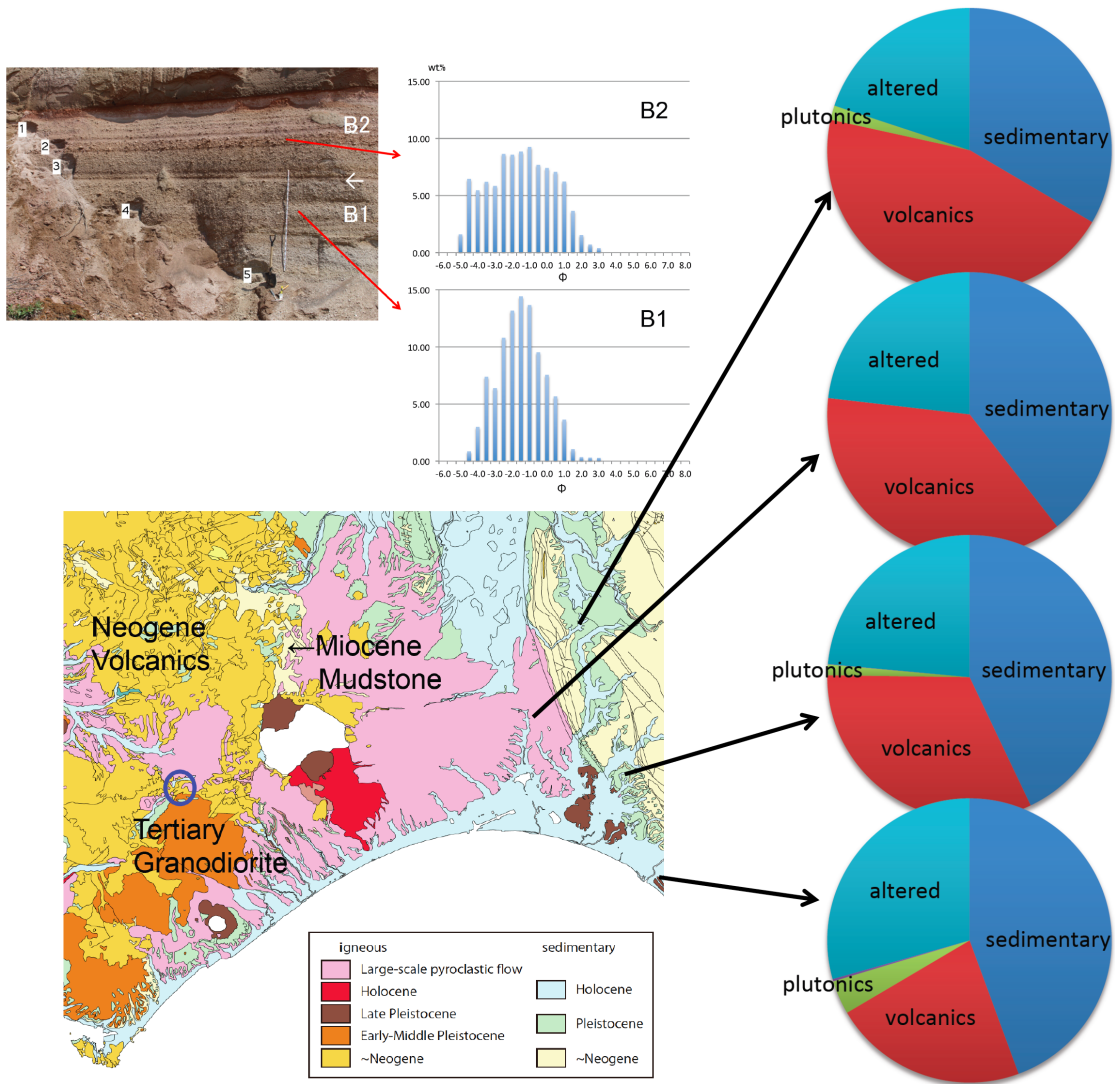


図 1-1-24 支笏湖周辺地域の地質図と支笏湖東方地域における B2 岩片種構成比の空間変化。
地質図は産業技術総合研究所地質調査総合センター編（2015）を改変。

支笏湖周辺地域には、第三紀の花崗閃緑岩と中新世の堆積岩の上位に、中新世～中期更新世の火山岩が支笏湖の北西～南西側を中心に分布している（図 1-1-24）。これら 3 つを考え合わせると、A から B1 初期では火山岩岩片主体であることから支笏湖北西側の火口から噴火、B1 後期に向かって噴出物の淘汰はよいものの堆積岩岩片の割合が増加することから火道が深部に向かって拡大したと考えられる。一方、B2 では淘汰が悪く岩片種構成比に空間変化が認められることから、新たな火道が南東側にも開口しつつ、深成岩岩片が含まれることから火道は深部へと拡大していった可能性が高い。C1 では岩片量も少なく深成岩も含まれないことから安定した火道から大量の火砕流堆積物を噴出し、その後火道が大きく広がって大量の変質岩岩片が噴出したと考えられる。

5) ガラス組成の時間変化

図 1-1-25 は、代表的な露頭において各噴火ユニットの本質物質のガラス組成を測定した結果である。すると、いずれの噴火ユニットも $\text{SiO}_2=75\%$ 以上の珩長質なガラスを含むほか、Unit A と Unit D で SiO_2 が低く FeO に富む苦鉄質な組成のガラスが多く、Unit C、Unit F に向かってそれぞれ組成幅が珩長質側にする傾向が認められる。図 2-3-4 および図 2-3-12 より、斑晶鉱物に富む CR タイプの軽石は C1 までは全く認められないことから、Unit A の苦鉄質なガラスは、CR タイプマグマとは別の苦鉄質なマグマ (M タイプマグマ) に由来することを強く示唆している。

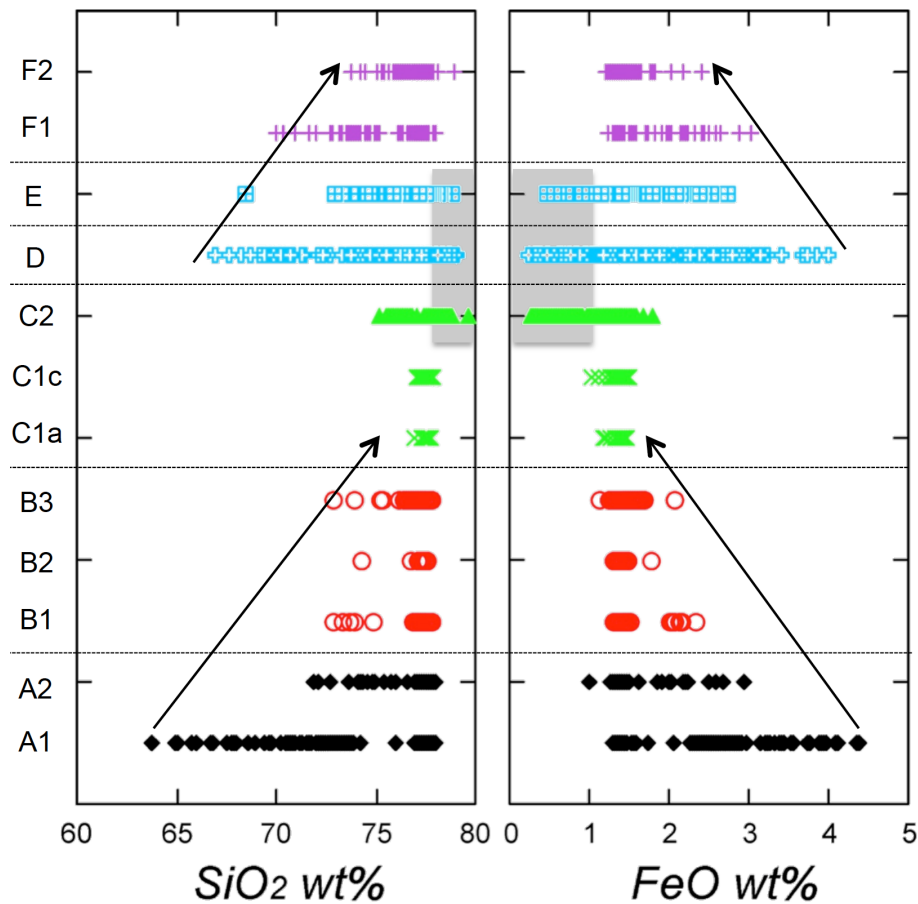


図 1-1-25 本質物質のガラス組成の時間変化.

6) 支笏カルデラ形成期の噴火推移

中川ほか (2018b) では、模式露頭での層序から支笏カルデラ形成期噴出物を Unit A~Unit F の 6 つの噴火ユニットに分類し (図 1-1-14)、これらが 5 つの噴火フェーズに区分されることを明らかにした (Phase 1 : マグマ水蒸気噴火および phreatoplinitic 噴火, Phase 2 : プリニー式噴火, Phase 3 : 大規模火砕流噴火, 風化を伴う程度の休止期において Phase 4 : 小規模な火砕流堆積物, Phase 5 : 小規模なプリニー式噴火)。しかしながら、ボーリング調査, トレンチ調査, 地表調査, ドローン調査などを支笏湖周辺地域および支笏湖東方地域で行い、模式露頭との層序の

対比, 各ユニットの噴出体積, 火口域の時空変遷, ガラス組成の時間変化などを検討した結果, Phase 1 から Phase 2 において火道の開口や拡大があったこと, Phase 3 の末期に現在のカルデラがほぼ形成されたと考えられること, Phase 3 と Phase 4 の間で噴出量が急激に減少しさらに苦鉄質マグマが変化するなどの特徴が認められることが明らかになった. Phase 3 と Phase 4 の間には風化が認められる他よりやや長い休止期間があったと考えられること (図 1-1-13) を考慮すると, 狭義の支笏カルデラ形成噴火は Phase 3 までであり, Phase 4 の小規模な火砕流噴火および Phase 5 の火砕サージを伴う小規模なプリニー式噴火は, 後カルデラ噴火の最初期の噴火とも言える (図 1-1-26). このように, 支笏カルデラは Phase 3 の最大規模の噴火で形成されその後に噴火活動は休止したと考えられるが, このモデルはカルデラ陥没に伴う lag breccia が放出された後に, 引き続いて大規模な火砕噴火が発生し火砕流が堆積したとする **Druitt and Sparks (1984)** によるカルデラ形成噴火のモデルとは異なっている.

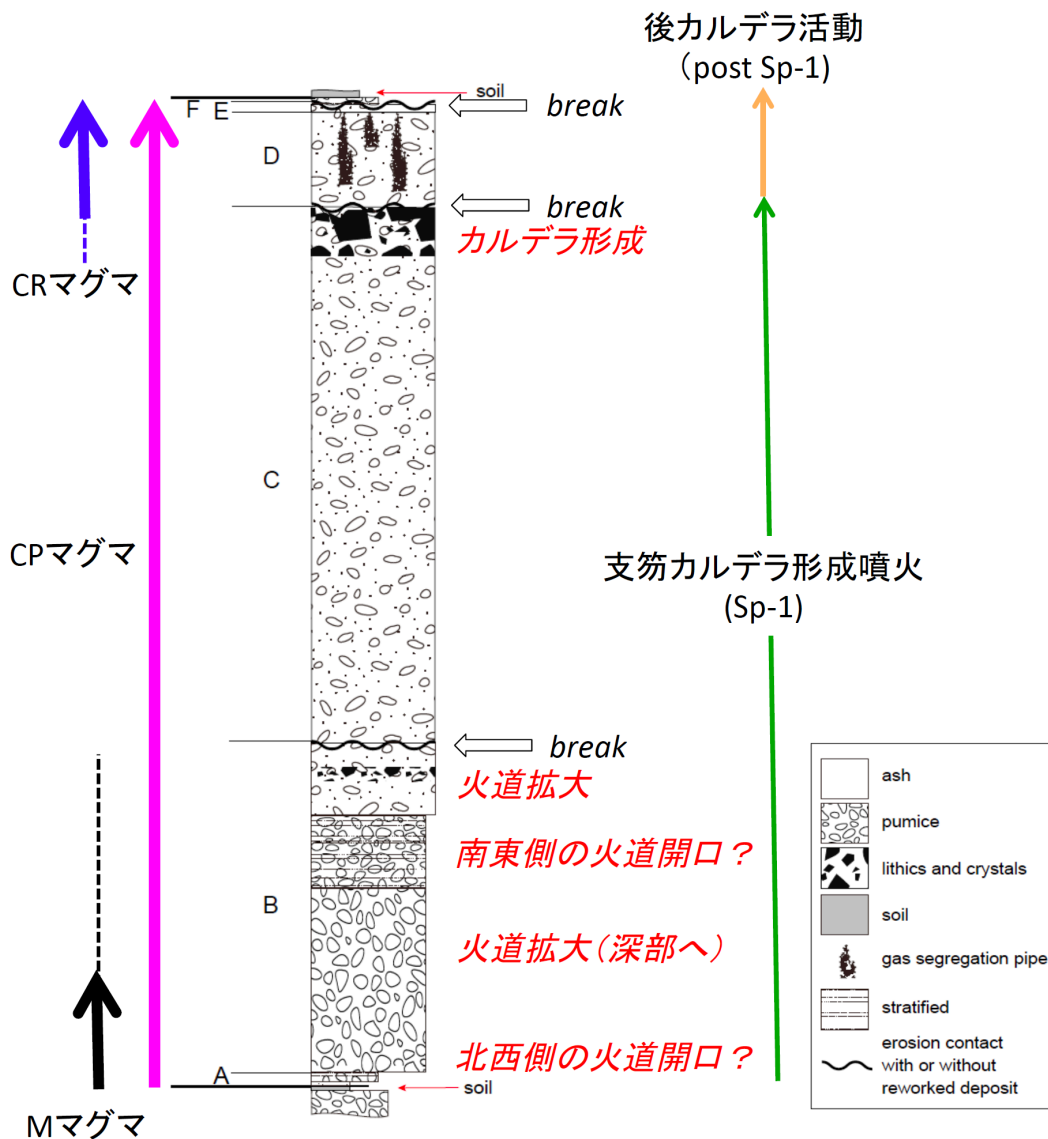


図 1-1-26 支笏カルデラ形成期の噴火推移.

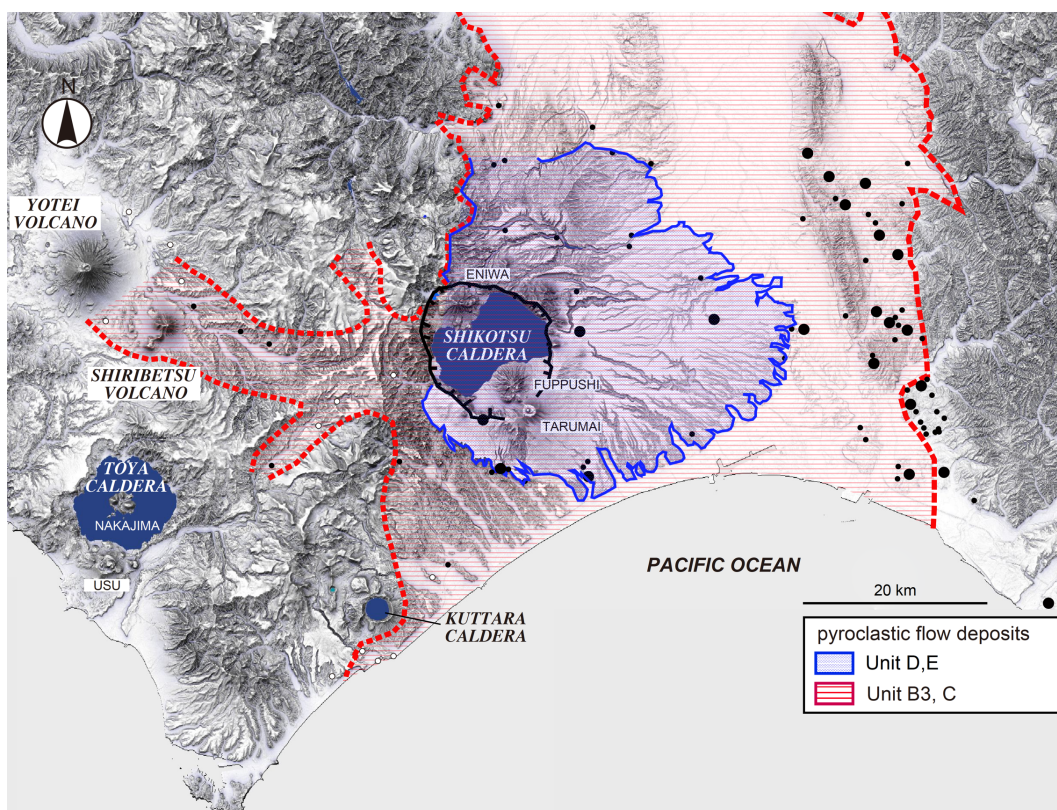


図 1-1-27 支笏カルデラ形成噴火（Unit B3, Unit C）および後カルデラ活動最初期（Unit D, Unit E）の火砕流分布図. 北川（2001MS），山元（2016）を改変.

(4) まとめと今後の課題

平成 25 年度～平成 30 年度委託研究に係る成果は以下の通りである。

1. 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 0.5Ma 頃までに支笏-洞爺火山地域で収束したこと，その後約 40 万年間の休止期間をおいて約 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 700km³に及ぶマグマを噴出したことが明らかになった。
2. 61ka 社台噴火は，噴出物の堆積構造および噴出物の構成物から Unit A から Unit C の大きく 3 つの地質ユニットに区分され，それぞれに対応する 3 つの噴火フェーズに分けられることが明らかになった。Phase 1 では軽石質プリニー式噴火の後噴出率が急減，Phase 2 では新たにスコリア質プリニー式噴火が始まり，Phase 2 前期では噴出率の増減を繰り返した後，後期に噴出率が上昇，Phase 3 では火砕流噴火へ移行している。61ka 社台噴火では，白色軽石が噴火初期から末期まで消滅することなく常に噴出し続けており，珪長質マグマ（苦鉄質マグマ）から苦鉄質マグマ（珪長質マグマ）へ時間とともに置き換わっていくという他の火山で一般的に見られる噴火推移とは異なっている。このことは，各噴火フェーズは火道の拡大または新しい火口の開口によって発生したことを反映しているのかもしれない。

3. 支笏カルデラ形成期噴火は6つの噴火ユニット (Unit A~Unit F), 5つの噴火フェーズに区分される (Phase 1=Unit A: マグマ水蒸気噴火および phreatoplinian 噴火, Phase 2=Unit B: プリニー式噴火, Phase 3=Unit C: 大規模火砕流噴火, 風化を伴う程度の休止期において Phase 4=Unit D および Unit E: 小規模な火砕流堆積物, Phase 5=Unit F: 小規模なプリニー式噴火). Phase 1 から Phase 2 において火道の開口や拡大があったこと, Phase 3 の大規模火砕流発生後に大量のラグブレッチャが噴出して現在のカルデラがほぼ形成されたと考えられること, やや長い休止期において始まったと考えられる Phase 4 以降は噴出体積が急減し苦鉄質マグマが変化していることなどから, 狭義の支笏カルデラ形成噴火は Phase 3 までであると考えられる. Phase 4 以降の噴火活動様式や噴火規模の変化は, 苦鉄質マグマが変化することによって生じた可能性も考えられる.

引用文献

- Druitt, T.H., Sparks, R.S.J. (1984). On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. *Nature*, 310, 679-681.
- Hayakawa, Y. (1985). Pyroclastic geology of Towada volcano. *Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo* 60, 507-592.
- 北川淳一 (2001MS). 支笏カルデラ形成時のマグマ溜まりの構造と噴出プロセス. 北海道大学大学院理学院修士論文. 112p
- 宮坂瑞穂・中川光弘 (2018). 支笏火山 61ka 社台噴火の噴火推移・トレンチ調査およびボーリング調査による再検討. *地学雑誌*, 127, 229-246.
- 中川光弘・宮坂瑞穂・三浦大助・上澤真平 (2018a) 南西北海道, 石狩低地帯におけるテフラ層序学: 支笏-洞爺火山地域の噴火履歴. *地質学雑誌*, 124, 473-489.
- 中川光弘・宮坂瑞穂・富島千晴・松本亜希子・長谷龍一 (2018b) 支笏湖南方地域の火口近傍堆積物層序からみた 46ka 支笏カルデラ形成噴火推移. *地学雑誌*, 127, 247-271.
- Pallister, J.S., Hoblitt, R.P., Meeker, G.P., Knight, R.J., Siems, D.F. (1996). Magma mixing at Mount Pinatubo: Petrographic and chemical evidence from the 1991 deposits. in *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mt. Pinatubo* edited by C.Newhall and R. Punonhbayan, University of Washington press, 687-731.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2015). 20 万分の 1 日本シームレス地質図 2015 年 5 月 29 日版. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Takahashi, R., Nakagawa, M. (2013). Formation of a compositionally reverse zoned magma chamber: Petrology of the AD 1640 and 1694 eruptions of Hokkaido-Komagatake volcano, Japan. *Journal of Petrology* 54, 815-838.
- Watanabe, Y. (1990). Pliocene to Pleistocene volcanism and related vein-type mineralization in Sapporo-Iwanai district, southwest Hokkaido, Japan. *Mining Geology*, 40, 289-298.
- 山縣耕太郎(1994). 支笏およびクッタラ火山のテフラクロノジー. *地学雑誌*, 103, 268-285.
- 山元孝広 (2016). 支笏カルデラ形成噴火のマグマ体積. *地質調査総合センター研究資料集*, 632.

