

平成 28 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 29 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。

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き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、性評価基準・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ほか、既存文献情報から始良カルデラと十和田カルデラから噴出した火砕流堆積物のマグマ噴出量計測も実施した。また、過去1千年間に3回のカルデラ形成噴火を起こしたインドネシアでの事例調査も合わせて行い、比較研究を実施した。

- 1) 支笏火山は約6万年前の大規模噴火の後、約4万年前に現カルデラを形成したと考えられている火山である。今年度は支笏火山についてこれまでの調査結果を整理するとともに、支笏・洞爺火山地域の噴火履歴を明らかにするため、より広域での地表踏査を行った。各地点では、テフラの地質記載、岩石記載、走査型電子顕微鏡による観察および電子線プローブマイクロアナライザによる火山ガラスの化学組成分析を実施し、テフラの同定および給源火山の推定を行った。また約4万年前のカルデラ形成噴火および約6万年前の大規模火砕噴火については、より詳細な地質記載を行い、代表的な3地点でトレンチ調査を実施、連続的に試料を採取した。その結果、支笏カルデラ周辺では約13万年前からそれ以前とは異なるカルデラ形成を伴う大規模な珪長質火山活動が始まったことがより明確になっている。また、支笏火山の活動開始は約8.5万年前に遡ること、6万年前の社台期の噴火推移とマグマ組成変化、4万年前の支笏カルデラ形成噴火の最初期の噴火推移を明らかにしている。
- 2) 十和田カルデラでは6～1.5万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。今年度は、カルデラ形成準備期にあたる6万年前以前の先カルデラ期について、噴出物の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、より詳細な噴火活動史を構築した。また、先カルデラ期以前の第四紀火山岩を対象として、各種放射年代測定を実施し、十和田火山の活動とそれ以前の火山活動を区分するとともに、十和田火山活動以前の第四紀火山活動時空変遷を明らかにした。その結果、十和田火山の活動開始を20万年前と特定でき、それ以前には約30万年間の活動休止期があることを明らかにした。さらに、平成27年度に引き続き、噴出物の微量元素組成・同位体比の測定を行ない、十和田火山噴出物の化学組成データをほぼ網羅した。その結果、昨年度判明した、カルデラ形成噴火前後のマグマ組成の特徴の違いをより詳細に把握することができた。この組成の違いはマグマ生成条件が変化したことを示唆している。
- 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。今年度は、火山活動の将来予測に結びつけられるようなマグマ噴出率変化と

マグマ組成変化の関係が大山火山でも確認できるかどうかを目的に、噴出物の岩石学的な検討を実施した。具体的には代表的な噴出物試料の全岩化学組成分析を実施し、岩石化学的な性質の時系列変化に注目し、大規模プリニー式噴火の頻発した高マグマ噴出率期とその他の時期では、K, Sr や Ba 含有量に違いがあり、特に Sr/Y 比で明瞭に両時期が二分されることを明らかにした。

- 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。今年度は阿蘇 4 火砕流噴火とその 1 つ前の阿蘇 3 火砕流噴火の間の降下火砕物（以下、阿蘇 4/3 間テフラ）について、野外調査を実施し層序を明らかにするとともに、全岩化学組成分析を行い化学組成の時間的変遷を明らかにした。その結果、特に阿蘇 4 噴火直前のテフラ群から、これまで知られていなかった黒雲母斑晶を含むものを検出している。
- 5) カルデラ形成を伴う大規模噴火の噴出量は、火山の活動履歴情報の基本データであり、マグマ噴出量時間階段図の高精度化、長期的噴火予測のためにも重要である。今年度は、始良カルデラ起源の入戸火砕流堆積物(30 ka)、十和田カルデラ起源の毛馬内火砕流堆積物(西暦 915 年頃)を対象に、既存文献、ボーリングデータ等を元に、精度良く大規模火砕流堆積物の復元分布図を作成の上、層厚を復元し、高精度に噴出量を算出した。その結果、入戸火砕流堆積物の復元体積として $200 \text{ km}^3 \sim 250 \text{ km}^3 \text{DRE}$ 、毛馬内火砕流堆積物の復元体積（現存堆積物の層厚分布から推定）は約 $0.20 \text{ km}^3 \text{DRE}$ （見かけ：約 0.56 km^3 ）～約 $0.23 \text{ km}^3 \text{DRE}$ （見かけ：約 0.65 km^3 ）と求められた。
- 6) 歴史時代に大規模噴火を繰り返したインドネシアのカルデラ火山では、これまでの研究により成層火山体を建設するステージからカルデラ形成噴火に至る数千年間で噴出率、噴火様式、マグマ組成、火口位置に変化が見られることがわかりつつある。今年度はこれまでの噴火履歴についての調査結果をとりまとめ、特に 1257 年にカルデラ形成噴火を起こしたロンボク島のリンジャニ火山を主体に、マグマ供給系の時間変化を検討した。その結果、インドネシア・リンジャニ火山の成層火山活動期噴出物は、その分布域ごとに記載岩石学的特徴・全岩化学組成とともに異なることが明らかになった。リンジャニ火山では時間とともに噴火位置が変化することから、このことはマグマ生成場の違いを反映している可能性が高い。

(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(粘性や圧縮率等)、構造(深さや広がり)、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。今年度は、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。また、高い空間分解能を持つ二次イオン質量分析計 (SIMS) と電子線マイクロアナライザー (EPMA) を新たに導入し、平成 27 年度までは困難だった、直径数 μm の斑晶内メルト包有物の揮発性成分濃度測定、微細な斑晶累帯構造の観察と化学組成分析を可能とした。

- 1) 約 4 万年前の支笏カルデラ形成噴火過程の詳細化を目的として、カルデラ陥没に先行した支笏降下火砕物の粒径分布解析を実施し、その解析から噴煙柱パラメータの活動推移を検討した。その結果、支笏降下火砕物はカルデラ内で同時発生した複数のプリニー式噴火の産物で、通常の単一火口からの噴火とは噴火の始まり方がそもそも異なっていたことが明らかになった。噴出物の岩石学的検討では、これまでのデータ（記載岩石学的特徴・全岩化学組成・鉱物化学組成）を精査・追加し、さらに同位体組成データを新たに追加することで、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・成因関係をより詳細に検討した。その結果、地殻物質の部分熔融が主な珪長質マグマ生成プロセスであることを明らかにした。また、噴火の準備プロセスの時間スケールをより詳細に検討するため鉱物組成累帯構造の観察・解析を進め、約 6 万年前の大規模火砕噴火のものと比較した。その結果、カルデラ形成期の珪長質マグマのマグマ滞留時間は 100 年～1500 年、約 6 万年前の珪長質マグマでは 30 年～140 年という値が得られた。今年度は新たに、支笏・洞爺火山地域の含水量を推定するため、有珠火山の玄武岩を対象に熱力学的解析を行ったほか、メルト包有物の含水量分析法を開発した。
- 2) 阿蘇火山の一連の活動の中でも最大規模かつ最後の火砕流噴火ステージである阿蘇 4 を対象に、これに至ったマグマ供給系の温度・圧力・化学組成などに関する知見を整備した。阿蘇 4 火砕流堆積物の直下の「黒雲母」を含む降下火砕物について化学分析を行い、阿蘇 4 火砕流噴火に至るマグマ供給系の変化を把握した。その結果、阿蘇 4 火砕流噴火に向かって苦鉄質マグマが低温の珪長質マグマに注入・混合したが、マグマの温度は時間とともに低下したことが示唆された。阿蘇 4 火砕流噴出物の珪長質端成分と、観測された苦鉄質マグマに対して熱力学的な解析を行った結果、見積もられた温度・圧力・含水量において、珪長質端成分マグマは噴火時には流動的で、黒雲母を晶出するが角閃石を晶出しないこと、苦鉄質マグマは結晶が多いためほとんど流動できない状態で、角閃石を晶出することが判った。当該珪長質端成分マグマの相平衡実験の結果、珪長質端成分マグマは黒雲母を晶出するが角閃石を晶出せず、熱力学的な解析結果が裏付けられた。天然の斑晶組み合わせ・組成を再現する圧力・含水量は 2 kbar あるいはそれ以下で全岩含水量が 2 wt.%前後であることが判った。さらに、マグマの化学組成・同位体組成の検討結果、阿蘇 1～4 及び後カルデラ期の噴出物は周辺の火山(雲仙や熊本金峰)のマグマに比べてカリウム量が明瞭に高いことと、各噴火ユニットでは同位体組成がほとんど変化しないことと、ユニット内に見られる化学組成(主要・微量)は結晶分化・親子マグマ混合・地殻の混染作用の比率の違いで説明できることが判った。
- 3) 約 3 万年前の始良カルデラ形成噴火過程の詳細化を目的として、カルデラ陥没に先行した大隅降下火砕物の粒径分布解析を実施し、その解析から噴煙柱パラメータの活動推移を検討した。その結果、大隅降下火砕物はカルデラ内で同時発生した複数のプリニー式噴火の産物で、通常の単一火口からの噴火とは噴火の始まり方がそもそも異なっていたことが明らかになった。噴出物の岩石学的検討では、始良カルデラのマグマシステムの理解のため、過去約 20 万年間に噴出した始良カルデラ及びこれを含む鹿児島地溝帯の火山岩の系統的な調査・採取を行ない、岩石・地球化学的データを取得した。その結果、少なくとも入戸火砕流噴火の約 3 万年前に発生した岩戸火砕流噴火から、入戸火砕流噴火で噴出した流紋岩マグマと組成的に

きわめて類似した流紋岩マグマが混交端成分として噴出していることが明らかになった。また、約 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を推定し、定置圧力を検討した。含水量から約 1000 bar の平衡圧力が推定され、マグマ溜まりの天井の深さは約 4~5 km 程度と推測される。

- 4) 鬼界カルデラを形成した約 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中の軽石について岩石学的解析を行い、同噴火の流紋岩マグマの化学的特徴と温度・圧力条件をこれまでに明らかにしている。今年度は、このマグマ溜まりに存在していた未分化マグマ起源と予想される火砕流堆積物中の安山岩スコリアについても、XRF による全岩化学分析、EPMA による鉱物・石基の微小領域化学分析、EPMA 及び SIMS によるメルト包有物の揮発性成分 (H_2O , CO_2 , S) 濃度測定を行い、未分化マグマの化学的特徴と温度・圧力条件を検討した。その結果、安山岩マグマの圧力条件は 80~180 MPa で、これまでに決定した流紋岩メルト包有物を用いて推定した圧力範囲 (100~280 MPa) におおよそ含まれる。この圧力は、深さは 3~7 km に相当する。

(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

カルデラ噴火の前兆を地殻変動観測の中に捉えていく手法の確立を目的として 3 次元並列有限要素コード OREGANO_VE を用いた地殻内におけるマグマの移動・蓄積に対する地殻・マン托ルの粘弾性応答、つまりマグマの挙動が生み出す地殻変動とそれにとまう応力場の時空間変化をこれまで検討してきた。今年度は 3 次元有限要素モデルに、粘性率の深さ方向の変化を導入した数値実験を実施し、粘性勾配の大小に関わりなく、シル状マグマの膨張がより深いところで生じた場合ほど、隆起後の沈降速度は大きくなることを明らかにした。また、その結果はシルが膨張した深さ辺りの粘性率が最も地表面変位に反映されるということ明らかになった。一方、一様粘性モデルを 1993~1995 年に屈斜路カルデラで観測された実際の地殻変動に適用した解析では、ポスト・インフレーションの粘弾性緩和によりうまく説明することが出来た。屈斜路カルデラ下のシルの膨張は、隆起の中心での時間変化と隆起のプロファイルより、その赤道半径が 1 km、深さが 5 km、そして開口量、つまりシルの中心での厚さは 9.06 m と制約された。

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、阿蘇カルデラと姶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、カルデラ内と周辺において MT 法による電磁探査を

昨年度に引き続き行った。昨年度取得したデータに対するインバージョンで作成した 3 次元比抵抗構造では、現在の中岳中央火口丘での噴火活動と対応した地殻浅部のマグマ供給系の存在をイメージングできている。一方で、15 km 程度より深い深度の比抵抗構造を求めるためには感度が不足していることも明らかになった。そこで、さらに詳細な構造を求めるために、本年度は調査範囲を広げ、測点間隔の粗いところを埋めるように補間調査を行っている。また今年度から、阿蘇カルデラ地下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、カルデラ及びその周辺の地下水及び河川水等の調査を行い、その地下水系の滞留時間及びマグマ起源物質の濃度を検討した。温泉水・湧水の放射性塩素及びイオウ同位体比を分析した結果、Cl 及び S はマグマ起源であること、この Cl 及び S はカルデラ内部の北側に主に上昇していることを明らかにした。また、暫定値であるが、浅層地下水系への Cl・S のフラックスは、火口から火山ガスとして放出される Cl・S と同程度であると見積もられた。

- 2) 始良カルデラの地下構造調査では、昨年度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、始良カルデラ中央部の地下 20 km において顕著な S 波の低速度異常の存在を確認することが出来た。速度異常域はカルデラ全域に及ぶようなものではなく、中央部に集中している。レシーバー関数による地下構造境界の検出では、桜島島内のデータを解析し、地震波速度構造と深部低周波地震発生領域の関係を明らかにした。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（GNSS）連続観測では、観測期間が短いので、大きな変動は見られていない。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、地震計アレイ観測により開始した。
- 3) 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、海底電位磁力計設置位置決定のための海底地形データの取得と、観測機器の海底への設置を実施した。観測機器は来年度に引き上げ、データを回収する予定である。

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 万年前に現カルデラを形成したと考えられている火山である。平成 27 年度は 6 万年前以前の支笏火山由来と考えられるプリニー式噴火堆積物が発見されたほか、6 万年前から始まる社台期噴火および約 4 万年前のカルデラ形成期噴火の推移や噴火規模が明らかになり、これらの堆積物について連続的に試料を採取することに成功した。平成 28 年度は、支笏火山についてこれまでの調査結果を整理するとともに、支笏・洞爺火山地域の噴火履歴を明らかにするため、より広域での地表踏査を行った。各地点では、テフラの地質記載、岩石記載、走査型電子顕微鏡による観察および電子線プローブマイクロアナライザによる火山ガラスの化学組成分析を実施し、テフラの同定および給源火山の推定を行った。また約 4 万年前のカルデラ形成噴火および約 6 万年前の大規模火砕噴火については、より詳細な地質記載を行い、代表的な 3 地点でトレンチ調査を実施、連続的に試料を採取した。その結果、支笏カルデラ周辺では約 13 万年前からそれ以前とは異なるカルデラ形成を伴う大規模な珪長質火山活動が始まったことがより明確になっている。また、支笏火山の活動開始は約 8.5 万年前に遡ること、6 万年前の社台期の噴火推移とマグマ組成変化、4 万年前の支笏カルデラ形成噴火の最初期の噴火推移を明らかにしている。

【研究成果】

(1) 支笏・洞爺火山地域の長期噴火履歴

北海道東部の阿寒・屈斜路火山地域、北海道中央部の十勝火山地域、北海道南西部の支笏・洞爺火山地域には、第四紀のカルデラ群が存在することが知られている(図 1.1-1)。このうち支笏・洞爺火山地域は、千島弧と東北日本弧の会合部に位置しており、洞爺カルデラ・クッタラカルデラ・支笏カルデラの 3 つのカルデラのほか、大規模成層火山である羊蹄火山と隣接する尻別火山も認められる。本地域のテフラ層序に関する研究は古くから行われており、放射性炭素年代値・海洋酸素同位体ステージなどとの関係から、約 13 万年前から洞爺火山、約 9 万年前からクッタラ火山、約 6 万年前から支笏火山が大規模珪長質噴火を繰り返していたほか、羊蹄火山・尻別火山は少なくとも 5 万年前には活動を始めていたことが明らかになっている(図 1.1-2, 図 1.1-3, 春日井ほか, 1980; 山縣, 1994; 加藤ほか, 1995; 森泉, 1998; Machida, 1999; 町田・新井, 2003; 佐瀬ほか, 2004; 中川ほか, 2011; Uesawa et al, 2016 など)。

昨年度までの本研究により、本地域は数百万年前から約 50 万年前頃まで火山活動を行った後、10 万～40 万年間程度の休止期を経て珪長質大規模噴火を繰り返していたことが明らかになったほか、支笏火山は 6 万年前以前にもプリニー式噴火を行っている可能性があることが示唆された。そこで、今年度は、北海道南西部・支笏・洞爺火山地域全体の長期噴火履歴を明らかにするため、より広範囲での地表調査を行い、各調査地点でテフラの地質記載をおこなった上で試料を採取した(図 1.1-4)。またこれらの遠方地域テフラの給源を推定するため、洞爺火山、クッタラ火山、支笏火山、羊蹄火山の南東に位置する尻別火山の山体付近において採取された試料について、岩石記載、走査型電子顕微鏡による観察および電子線プローブマイクロアナライザによる火山ガラス

の化学組成分析を実施し、各テフラの同定および給源火山の推定を行った。これらの結果については、昨年度までに行ったボーリング調査の結果等と合わせて考察し、代表的な調査地点について対比柱状図を作成した。

その結果、支笏-洞爺火山地域では中期更新世から続いた安山岩質の火山活動が 60～50 万年前には終了し、その後約 40 万年間の休止期を経て、約 13 万年前に洞爺火山、約 12 万年前には羊蹄火山南東の尻別火山が珪長質火山活動を開始したことが明らかになった。その後約 11 万年前に大規模なカルデラ形成噴火によって洞爺カルデラが形成され、その後活動は東へ広がったと考えられる。クッタラ火山は約 9 万年前、支笏火山は約 8.5 万年前に噴火を開始し、続いて羊蹄火山も約 7 万 5 千年前には活動を始めた。クッタラ火山・支笏火山では $VEI=5\sim6$ 程度の噴火が繰り返し起こり、約 4 万 5 千年前にはクッタラ火山で $VEI=6$ 、約 4 万 2 千年前には支笏火山で本地域ではサイダの $VEI=7$ 噴火が発生した。

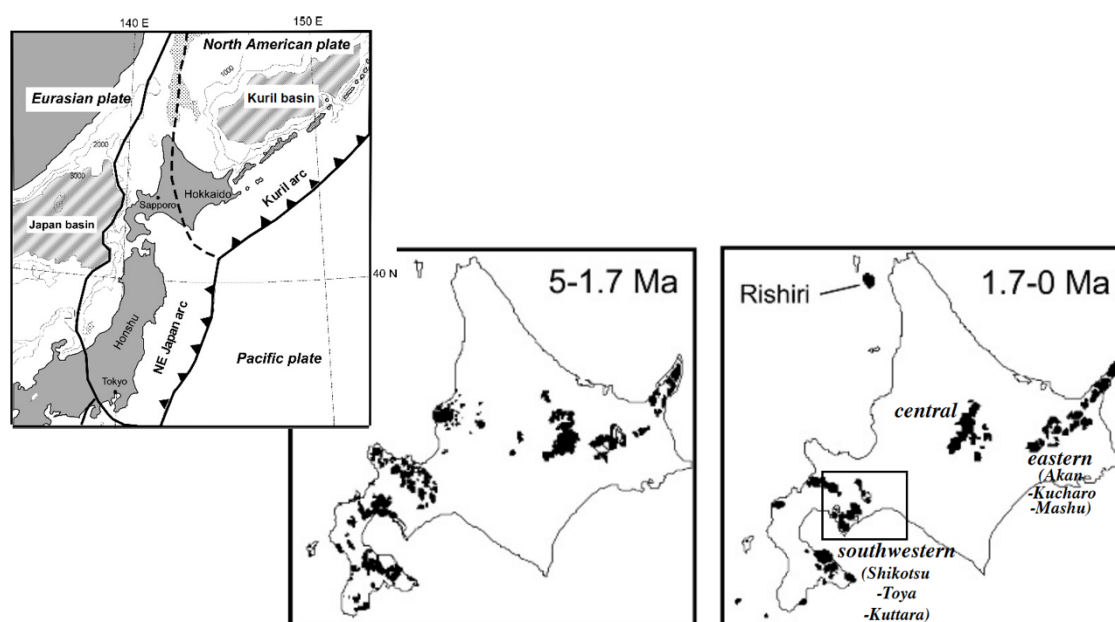


図 1.1-1. 北海道周辺のテクトニクス場と 5Ma 以降の火山活動域の時空変遷.

(Chapman and Solomon, 1976; Seno, 1985; 廣瀬・中川, 1999; 廣瀬ほか, 2000 を改変)

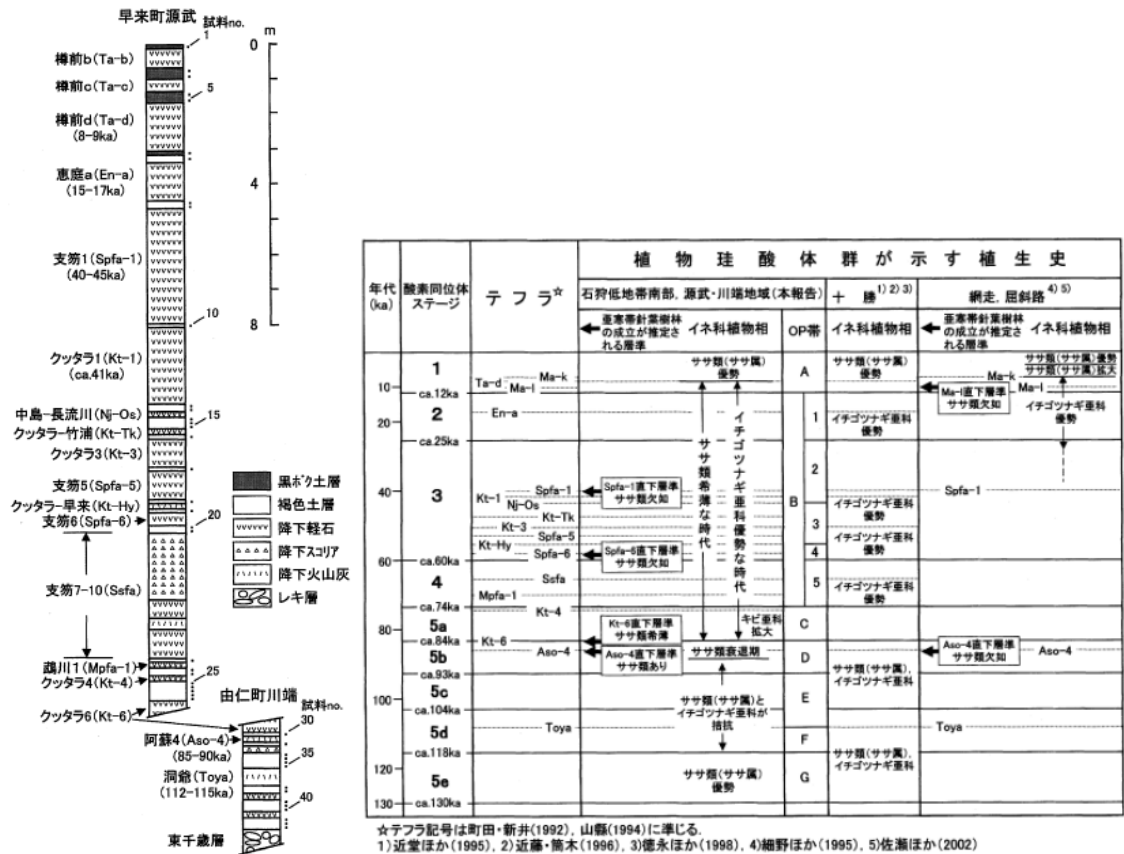


図 1.1-2. 支笏湖東方地域のテフラ層序およびテフラの推定年代値 (佐瀬ほか, 2004).

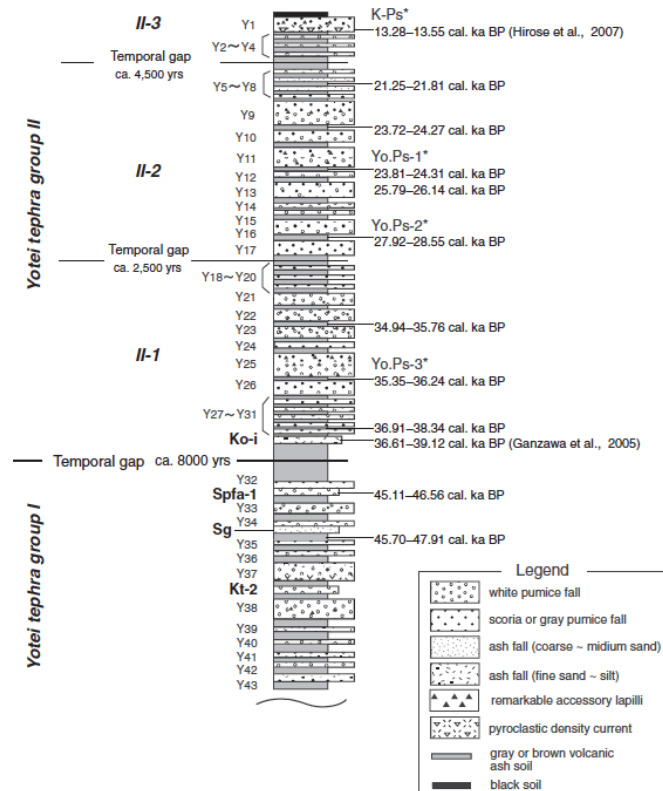


図 1.1-3. 羊蹄火山地域のテフラ層序 (Uesawa et al., 2016).

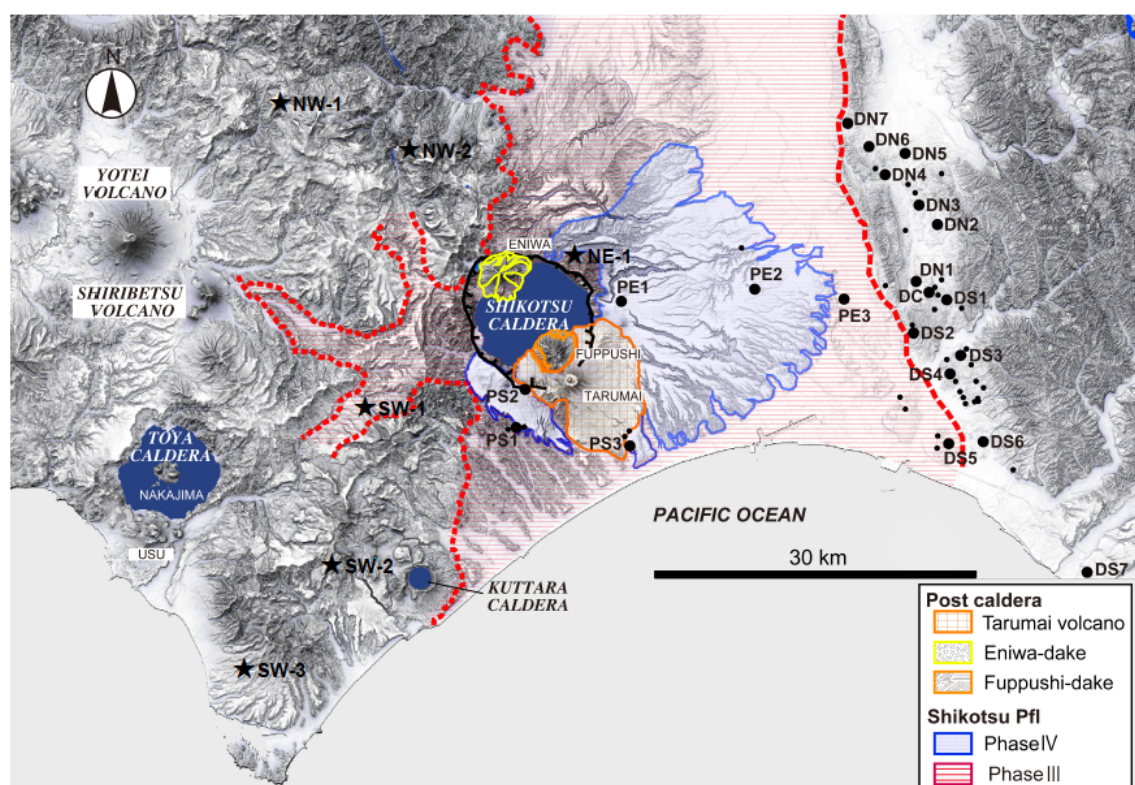


図 1.1-4. 調査地点図 (★は K-Ar 年代値測定地点, ●は地質調査地点).

表 1.1-1. 支笏-洞爺火山地域の火山岩の K-Ar 年代値.

No.	sample name	latitude, longitude	rock name	K(wt%)	Rad. Ar*(10 ³ ccSTP/g)	K-Ar age(Ma)	Non Rad. Ar(%)
NW-1	Mui-07	N42°55'36.58", E141°02'16.24"	2px andesite	1.73	24.22±0.31	3.60±0.09	22.42
NW-2	SAP-01	N42°54'00.52", E141°12'02.40"	2px andesite	1.40	16.24±0.23	2.98±0.07	27.09
SW-1	TK-2	N42°38'41.55", E141°06'48.80"	2px andesite	1.48	3.56±0.18	0.62±0.03	73.55
SW-2	RB-1-1	N42°31'12.94", E141°06'20.84"	ol-bearing 2px andesite	1.35	2.66±0.14	0.51±0.03	72.27
SW-3	MR-1	N42°25'09.23", E141°00'05.0"	2px andesite	0.53	3.86±0.15	1.87±0.08	65.80
NE-1	Mo-1	N42°49'31.13", E141°25'19.50"	2px andesite	1.58	5.30±0.15	0.86±0.03	54.84

先行研究によるテフラ層序と給源火山近傍テフラの岩石学的特徴

支笏・洞爺火山地域は、洞爺カルデラ・支笏カルデラ形成期の噴出物のほかクッタラ火山・支笏火山などに由来する複数の火砕流堆積物に厚く覆われているため、地表においてカルデラ形成期以前の噴出物を観察できる露頭は稀であり、これまでは支笏湖南側または東側遠方地域においてテフラ分布調査が行われてきた(勝井, 1959; 春日井ほか, 1980; 曾屋・佐藤, 1980; 山縣, 1994; 町田・新井, 2003). これらの研究では、テフラの同定は記載岩石学的特徴と火山ガラスや斑晶鉱物の屈折率によって行われているが、本研究では各テフラのガラス組成を利用した同定を試みた.

表 1.1-2 は従来の研究で明らかにされている支笏・洞爺火山地域の約 4 万年前までのテフラ層序である. 本表によると、支笏・洞爺地域には洞爺火山由来の長流川噴出物が最下位にあり、3 枚の外来テフラ(北海道東部屈斜路火山由来の Kc-4, 九州阿蘇火山由来の Aso-4, 北海道南部銭亀火山由来の Z-M)を挟んで、約 4 万~4 万 5 千年前の支笏カルデラ形成噴火(Spfa-1, Spfl)までの間に 18 枚のテフラ(洞爺火山由来の 3 枚, クッタラ火山由来の 10 枚, 尻別火山由来の 1 枚, 支笏火山由来の 4 枚)が確認されている. これらのうち、本研究では給源火山付近での試料を得られなかった Z-M, Kt-2, Kt-Hy, Aso-4, Kt-8, Kc-4, Osr 以外のテフラについて、新たに岩石記載を行い、火山ガラス組成を測定した(図 1.1-5, 図 1.1-6).

その結果、これらの火山由来のテフラは斑晶組み合わせとガラス組成によって容易に区別できることが明らかになった. 例えば、洞爺火山・尻別火山のテフラは無斑晶質な洞爺カルデラ形成噴火を除いていずれも角閃石斑晶に富む(表 1.1-2). しかしながら、洞爺火山噴出物のガラス組成は TiO_2 に乏しく Na_2O に富み、尻別火山噴出物は石英斑晶を含み他の噴出物に比べて最も K_2O が高いことによって識別できる(図 1.1-5, 図 1.1-6). 一方で、クッタラ火山と支笏火山噴出物の斑晶組み合わせは類似しているが、Kt-1 は石英を、Ssfa, Ssfl はかんらん石斑晶によって特徴づけられる(表 1.1-2). その他の噴出物についてはガラス組成によって区別することが可能で、クッタラ火山のガラス組成は、支笏火山に比べて TiO_2 が低い(図 1.1-6). クッタラ火山噴出物は時間とともに K_2O が増加する傾向があり、支笏火山は TiO_2 の減少とともに K_2O が増加している. 以上を Uesawa et al.(2016)による羊蹄火山のテフラと比較すると、約 4 万~4 万 5 千年前の支笏カルデラ形成噴火(Spfa-1, Spfl)までの期間には、ステージ I の Y43-33 の噴出物が確認されている(図 1.1-3). これらは角閃石斑晶を含むものがほとんどで、また羊蹄火山噴出物のガラス組成は他の火山噴出物に比べて Na_2O に富むという特徴があるため比較的容易に識別できる(図 1.1-5).

表 1.1-2. 支笏-洞爺火山地域における約 4 万年前までのテフラ層序と
給源火山近傍テフラの記載岩石学的特徴.

tephra	age(ka)	volcano	remarks	occurrence	Phenocryst content	Phenocryst assemblage
Spfa-1, Spfl	40-45 ^{*5}	Shikotsu	caldera-forming	ps, pfa, pfl	poor	pl > opx > ho, qt
Kt-1	40 ^{*3}	Kuttara	caldera-forming	pfa, pfl, ps ^{*4}	rich	pl, qt > opx > cpx
Z-M	>45 ^{*4}	Zenigame (S-Hokkaido)	(caldera-forming)	pfa ^{*4}	intermediate ^{*2}	pl > ho >> opx, cum ^{*2}
Nj-Os		Toya		pfa ^{*4}	intermediate	pl > opx > ho, cpx
Kt-2		Kuttara		pfa ^{*5}	intermediate-poor ^{*2}	pl > opx > cpx > ho ^{*2}
Kt-Tk	45 ^{*3}	Kuttara		sfa ^{*4}	intermediate	pl > opx >> cpx, ho
Kt-3	>47-51 ^{*4}	Kuttara		pfa, afa, ps, pfl ^{*4}	rich	pl > opx > cpx, ho
Spfa-5		Shikotsu		pfa	rich	pl > opx > cpx
Kt-Hy	51 ^{*2}	Kuttara		pfa, ps, afa, pfl ^{*4}	intermediate ^{*2}	pl > opx > cpx ^{*2}
Spfa-6		Shikotsu		pfa	rich	pl > opx > cpx
Ssfa, Ssfl	>60 ^{*4}	Shikotsu		pfa, afa, sfa, sfl	rich	pl > opx > cpx
Srb ⁴ (Km-pfl ⁴)	52-53 ^{*6} (70 ^{*4})	Shiribetsu		pfa, pfl ^{*4}	rich	pl > ho, opx, qt > cpx
Kt-4	49 ^{*1}	Kuttara		pfa, ps, pfl ^{*4}	intermediate	pl > opx > cpx, ho
Kt-5	57 ^{*2}	Kuttara		pfa ^{*4}	poor	pl > opx > cpx > ho
Kt-6	75-85 ^{*4}	Kuttara		pfa, ps, pfl ^{*4}	rich	pl > opx > cpx
Kt-7		Kuttara	caldera-forming?	pfa, pfl ^{*4}	poor	pl > opx > cpx
Aso-4 ⁴	85-90 ^{*4}	Aso(Kyusyu)	(caldera-forming)	afa ⁴	-	(pl > ho) ⁴
Kt-8		Kuttara		pfa, afa, ps, pfl ^{*4}	rich	pl > opx > cpx >> ho ⁴
Toya	112-115 ^{*4}	Toya	caldera-forming	afa, pfl, afa ^{*4}	intermediate	pl > opx
Kc-4(K-Hb)	115-120 ^{*4}	Kutcharo(E-Hokkaido)	(caldera-forming)	afa ⁴	poor ^{*2}	pl > opx ^{*2}
Osr ⁴	120-125 ^{*4}	Toya		pfa, afa, pfl ^{*4}	poor ⁴	pl > opx > cpx >> ho ⁴

^{*1} Katsui (1988), ^{*2} Yamagata(1994), ^{*3} Kato et al.(1995), ^{*4} Machida & Arai (2003), ^{*5} Aoki & Machida (2006), ^{*6} Nakagawa et al. (2011)

pfa: pumice fall deposit, sfa: scoria fall deposit, afa: ash fall deposit, ps: pyroclastic surge deposit

rich: >15vol%, intermediate: 5-15vol%, poor: <5vol%

pl: plagioclase, opx: orthopyroxene, cpx: clinopyroxene, opq: opaque minerals, hb: hornblende, qt: quartz, ol: olivine, bt: biotite

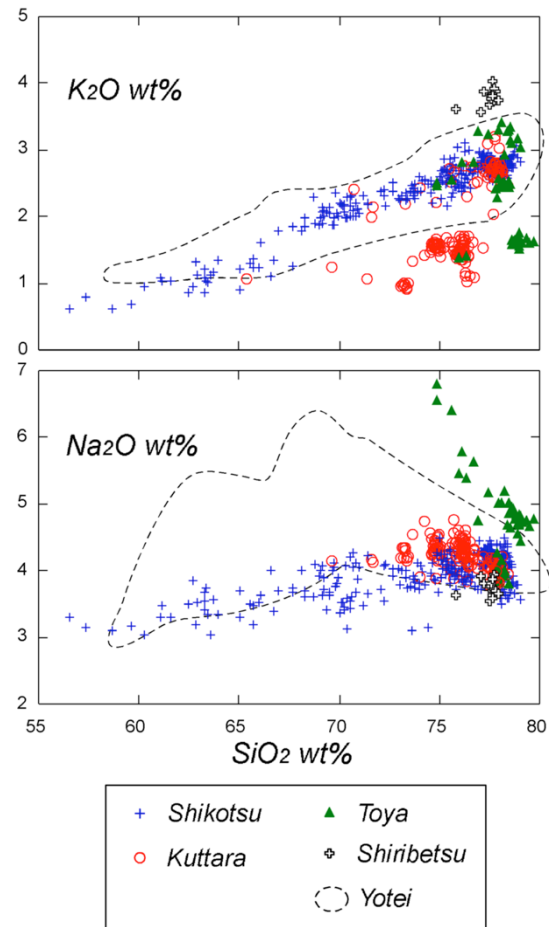


図 1.1-5. 給源火山近傍テフラのガラス組成 (火山ごと).

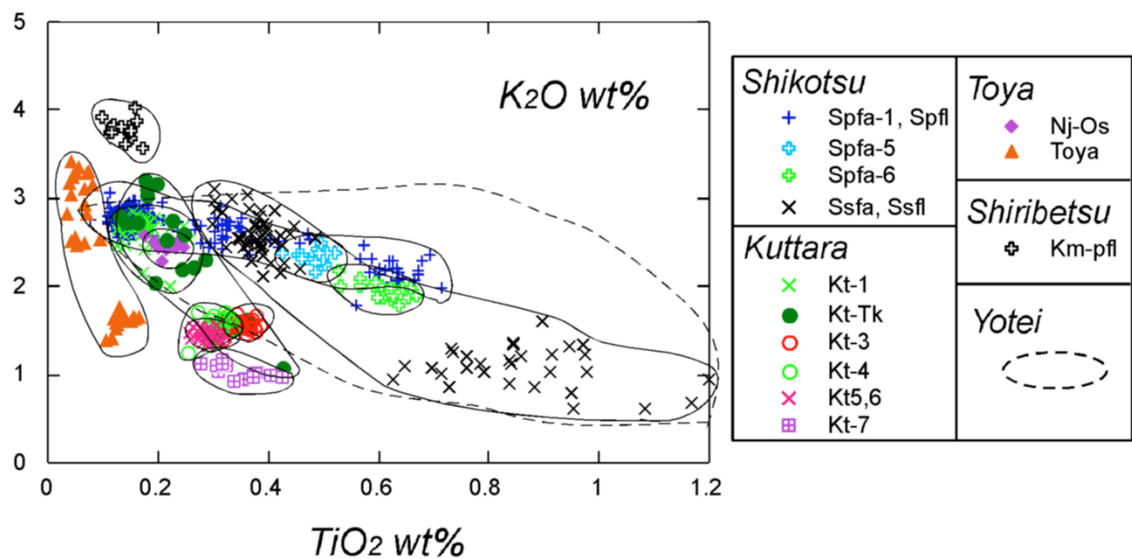


図 1.1-6. 給源火山近傍テフラのガラス組成 (噴出物ごと).

テフラの同定方法

図 1.1-4 に示したように、今年度は支笏湖の南側～東側の広範囲において地表調査を行うとともに(支笏湖から約 65 km まで)、地表調査地点のうち代表的な 2 露頭については、トレンチ調査も行った(支笏湖東方 40 km:DC, 支笏湖北東 40 km:DN5). 支笏カルデラ形成噴火噴出物(Spfa-1, Spfl)に厚く覆われる地域では平成 26 年度・平成 27 年度にボーリング調査を行っており(支笏湖東方 10 km:PE1, 支笏湖東方 25 km:PE2), 気象庁のボーリングコア(支笏湖南方 10 km:PS2), 防災科学技術研究所のボーリングコア(支笏湖南南東 25 km:PS3)と合わせて観察・記載の対象とした.

テフラの同定にあたっては, Spfa-1 & Spfl, Kt-1, Ssfa & Ssfl, Toya の 4 層を支笏・洞爺火山地域の鍵層とし (表 1.1-1, 図 1.1-7), その後, 各テフラと鍵層との層序関係を春日井ほか(1980), 山縣(1994)などと比較検討した. さらに記載岩石学的特徴とガラス組成から各テフラ層を同定し, 給源火山の推定を行った(図 1.1-8). その結果, 本地域では少なくとも 27 層のテフラが観察されることが明らかになった(図 1.1-9).

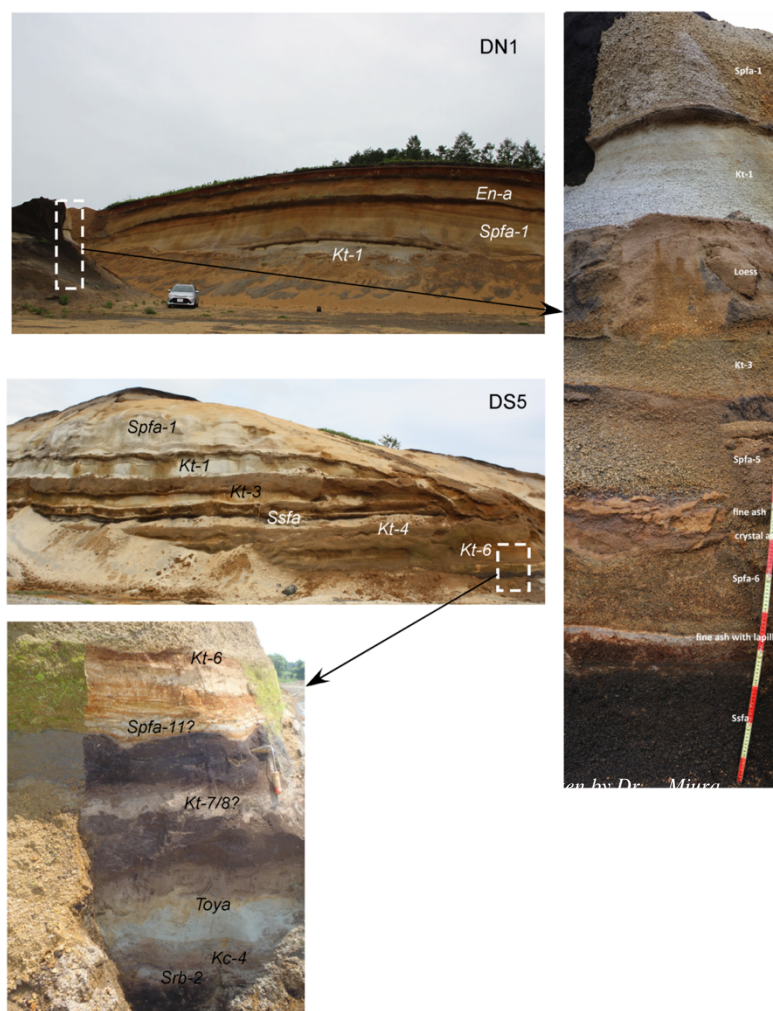


図 1.1-7. 支笏・洞爺火山地域の鍵層となるテフラとその他のテフラとの関係(DN1, DS5).

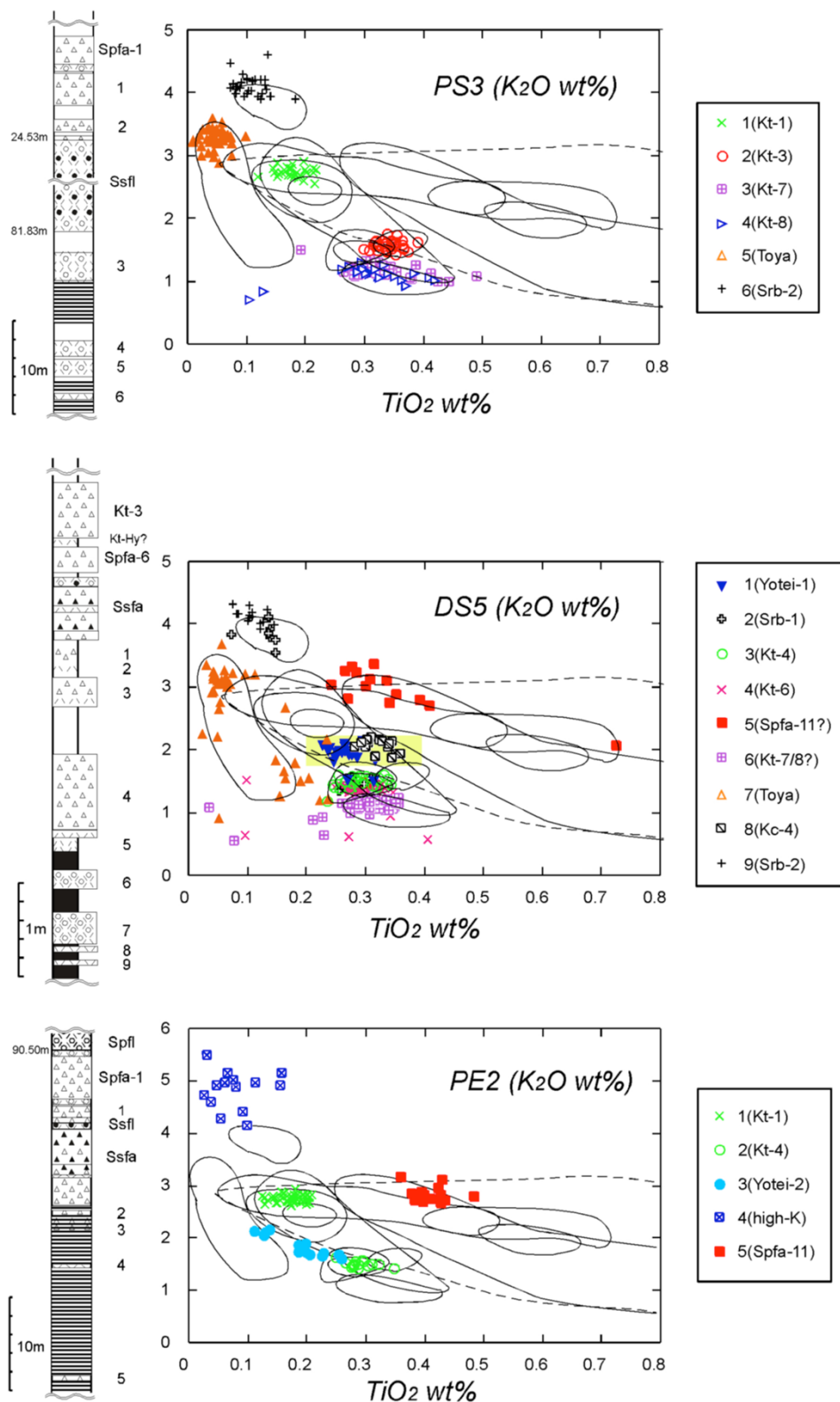


図 1.1-8. ガラス組成によるテフラの同定例(PS3, DS5, PE2).

(実線および点線は図 1.1-6 を引用, DS5 の黄色範囲は青木・町田, 2006 の Kc-Hb を引用)

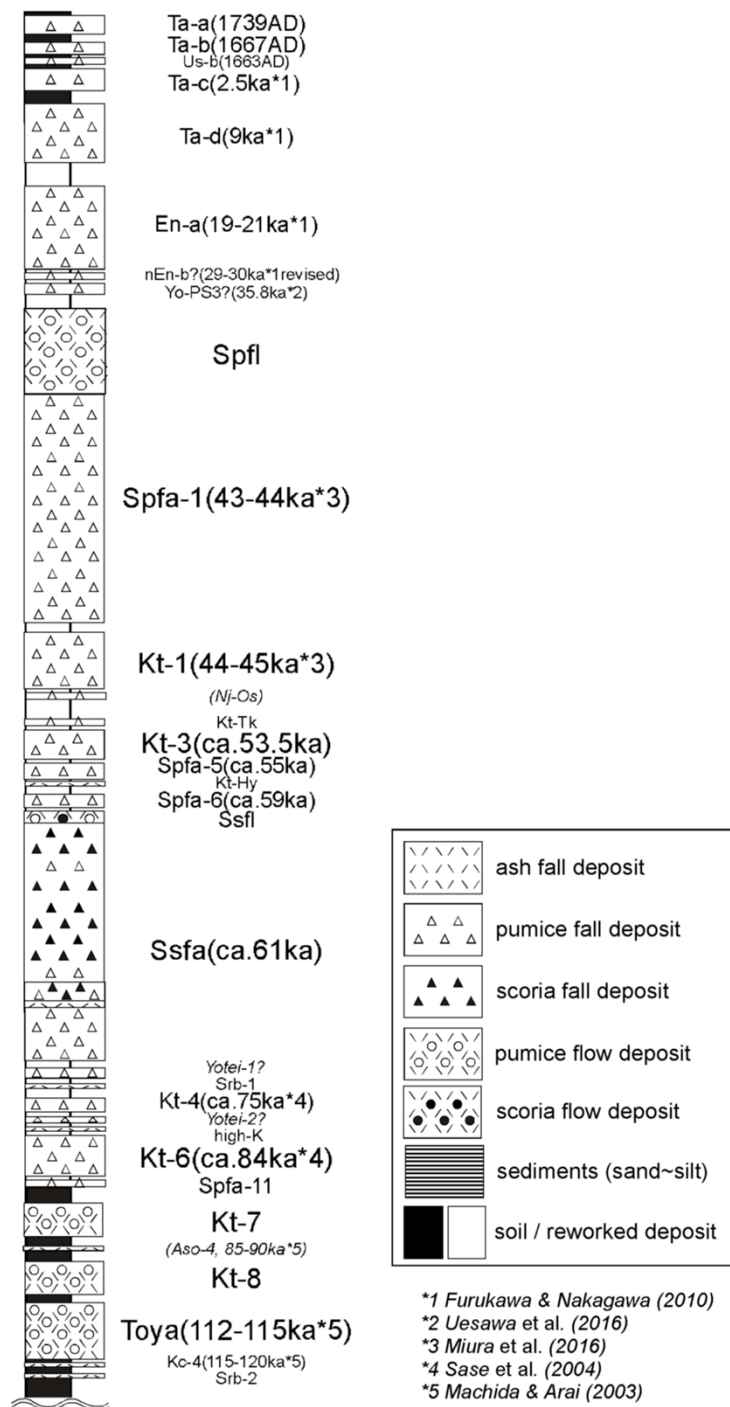


図 1.1-9. 支笏-洞爺火山地域のテフラ層序の総合柱状図.

支笏・洞爺火山地域のテフラ層序と各テフラの特徴

本研究では約 4 万年前の支笏カルデラ形成噴火噴出物(Spfa-1, Spfl)までのテフラについて詳細に検討した。その結果, Spfa-1 から Ssfa までに 6 枚(上位から Kt-1, Kt-Tk, Kt-3, Spfa-5, Kt-Hy, Spfa-6), Ssfa より下位で Toya までの間に 9 枚(Yotei-1?, Srb-1, Kt-4, Yotei-2?, high-K, Kt-6, Spfa-11, Kt-7, Kt-8), Toya 以下に 3 枚(Toya, Kc-4, Srb-2)のテフラを発見した(図 1.1-9, 表 1.1-3, 表 1.1-4, 表 1.1-5)。このうち Yotei-1?, Srb-1, Yotei-2?, high-K, Spfa-11, Srb-2 の 6 枚は従来記載されていなかったテフラである可能性が高い。代表的な露頭写真を図 1.1-10 に, 対比柱状図を図 1.1-11, 図 1.1-12 に示す。

Spfa-1 は本地域では PS1, PS2 を除くすべての地点において認められ, その厚さは最大で 600 cm におよぶ(PE1, PE3)。本質物質は粒径 60 mm 以下の無斑晶質な白色軽石のみからなる。Kt-1 は多くの露頭で厚さ 20 cm 以下の土壌を挟んで Spfa-1 の下位に存在する(図 1.1-10)。Spfa-1 にくらべて薄く(厚さ 50-100 cm 程度)粒径も小さい(最大粒径 40 mm 以下)。本質物質は斑晶に富む白色軽石からなり, 石英を多量に含むことによって特徴づけられる(表 1.1-4)。Kt-3, Spfa-5, Spfa-6 は比較的厚い降下軽石堆積物で, Kt-3 は調査地域のほぼ全域で認められるが, Spfa-5 は南部(DS5-DS7), Spfa-6 は北部(DN2~DN7)では確認できなかった(図 1.1-12)。本質物質は白色~褐色軽石が大部分を占め記載岩石学的特徴は非常に類似しているが(表 1.1-3, 表 1.1-4), ガラス組成によって区別することができる(図 1.1-6)。クッタラ由来の Kt-Hy は Spfa-5, Spfa-6 に挟まれる降下火山灰堆積物で DN2-DS7 に認められ, Kt-Tk は DS2 で Kt-3 上位の土壌中に散在する軽石である。Ssfa はいくつかの層からなる降下火砕物で, DC 地点では最下位に厚さ 100 cm 程度の降下軽石堆積物, その上位に厚さ 5 cm 程度の降下火山灰堆積物, さらに厚さ 300 cm 以上の縞状軽石・白色軽石を伴う降下スコリア堆積物の順で堆積している(図 1.1-10, 図 1.1-12)。本質物質はいずれも斑晶に富むが, スコリアは白色軽石よりもやや斑晶量が少なくかんらん石斑晶を含む(表 1.1-4)。

Ssfa より下位はクッタラ火山由来のテフラが多く, その間に羊蹄・尻別・支笏由来のテフラが挟まれる(図 1.1-9, 表 1.1-3)。これらのテフラは支笏・洞爺火山地域の南側でよく観察され(PS3, DS4-DS6), 主にガラス組成によって対比することができる(図 1.1-8)。Kt-4 と Kt-6 は DS5, DS6 で共存しており, それぞれ厚さ 30 cm, 90 cm, 最大粒径は 10 mm, 40 mm である。Kt-7(厚さ 235 cm)と Kt-8(厚さ 140 cm)は PS3 でのみ共存していることが確認され, DS5, DS6 などではいずれかが厚さ 20 cm で堆積している(図 1.1-11, 図 1.1-12)。Yotei-1?, Srb-1, Yotei-2?は本研究で新しく認識されたテフラで, Yotei-1?と Srb-1 は DS4-DS6 地点で Ssfa と Kt-4 の間に, Yotei-2?テフラは PE2 地点で Kt-4 の下位に存在する(図 1.1-12)。いずれも角閃石斑晶を含むが, Srb-1 は石英斑晶を伴い K_2O が高いことで区別され, Yotei-1?と Yotei-2?は他のテフラに比べて Na_2O に富むことで特徴づけられる(表 1.1-4, 表 1.1-5)。さらに, 平成 27 年度に PE2 コアで発見された支笏火山由来と考えられる Spfa-11(厚さ 25 cm, 最大粒径 30 mm)について, 今年度 DS5 地点の Kt-6 の直下, Kt-7/Kt-8 の上位においてほぼ同じガラス組成を持つ火山灰堆積物を発見した(図 1.1-8, 図 1.1-11, 図 1.1-12)。

Toya テフラは PS3 と DN2-DS5 地点で確認できる堆積物で, PS3 では厚さ 175 cm, DS5 では 25 cm である(図 1.1-11, 図 1.1-12)。無斑晶質の白色軽石からなり, 石英斑晶を含む(表 1.1-4)。

Toya テフラの下位には, Kc-4 のほか, 今回新しく Srb-2 テフラが発見された. これらは角閃石斑晶を含む火山灰堆積物で, Kc-4 は DS5 で厚さ 4 cm, Srb-2 は PS3 で 40 cm, DS5 で 6 cm である. Srb-2 は石英斑晶も含み, K₂O が高い(表 1.1-4, 表 1.1-5).

表 1.1-3. 本研究で確認されたテフラの特徴.

tephra	volcano	type locality	occurrence	thickness (cm)	Max. size (mm)	juvenile type	age(ka)	volume ⁴ (km ³ DRE)	VEI
Spfa-1, Spfl	Shikotsu	PE3	pfa	600, 1000	70	W-Pm	43-44 ^{*1}	ca. 100	7 ³
Kt-1	Kuttara	DC	pfa	100	40	W-Pm	44-45 ^{*1}	14.4	6 ³
Kt-Tk	Kuttara	DS2	pfa RW?	-		W-Pm, Bl-Sc, Band		2.5	4-5?
Kt-3	Kuttara	DC	pfa	35	10	T-Pm	ca. 53.5	20.1	6 ³
Spfa-5	Shikotsu	DC	pfa	30	25	T-Pm	ca. 55	ca. 1	5 ³
Kt-Hy	Kuttara	DN1	afa	5	<1	(ash)		0.6	4-5 ³
Spfa-6	Shikotsu	DC	pfa	20	5	T-Pm	ca. 59	ca. 1	5 ³
Ssfa, Ssfl	Shikotsu	PE2	sfa	840, 45	40, 20	Bl, G-Sc, W, T-Pm, Band	ca. 61	ca. 10	6 ³
Yotei-1?	Yotei?	DS5	pfa RW?	8	5	T-pm			4-5?
Srb-1	Shiribetsu	DS5	afa	2	<1	(ash)			4-5?
Kt-4	Kuttara	DS5	pfa	30	10	T-Pm	75 ^{*2}	>11?	5-6 ³
Yotei-2?	Yotei?	PE2	pfa RW?			T-pm			4-5?
high-K	?	PE2	afa	6	<1	(ash)			-
Kt-6	Kuttara	DS5	pfa	90	40	T-Pm	84 ^{*2}	>16.8?	6 ³
Spfa-11	Shikotsu	PE2	pfa	25	30	W-Pm	ca. 85		4-5?
Kt-7	Kuttara	PS3	pfl?	235	5	T, G-Pm	<85-90 ^{*3}		6 ³
Kt-8	Kuttara	PS3	pfl?	140	5	T, G-Pm	>85-90 ^{*3}		6 ³
Toya	Toya	PS3	pfl?	125	10	W-Pm	112-115 ^{*3}	ca. 118	7 ³
Kc-4	Kutcharo(E Hokkaido)	DS5	afa	4	<1	(ash)	115-120 ^{*3}	>150 ³	7 ³
Srb-2	Shiribetsu	PS3	afa	40	<2	(ash)			4-5?

^{*1} Miura et al.(2016), ^{*2} Sase et al. (2004), ^{*3} Machida & Arai (2003), ⁴Moriizumi (1998)

pfa: pumice fall deposit, sfa: scoria fall deposit, afa: ash fall deposit

W-Pm: white pumice, T-Pm: tan. Pumice, G-Pm: gray pumice, G-Sc: gray scoria, Bl-Sc: black scoria, Band: banded scoria and pumice

表 1.1-4. 本研究で確認されたテフラ中の本質物質のモード組成.

tephra	locality	sample No.	juvenile type	(vol%)	total ph	pl	opx	cpx	opq	hb	qtz	ol	bt
Spfa-1, Spfl	PE3	Sh13-2-10-11	W-Pm in Spfa-1		<5	++	+	tr	+	tr	tr	tr	-
Kt-1	DC	KT-1-1	W-Pm		20~30	++	+	+	+	-	++	-	-
Kt-Tk	DS2	Sh15-11-8	W-Pm, BI-S		20~30	++	+	+	+	tr	-	tr	-
Kt-3	DC	Sh15-11-7	T-Pm		13.5	8.0	2.7	0.6	2.0	-	-	-	-
Spfa-5	DC	Sh15-11-5	T-Pm		23.4	17.3	3.1	1.7	1.2	-	-	-	-
Kt-Hy	DN1	Sh16-1-3	(ash)		-	++	+	+	+	-	-	-	-
Spfa-6	DC	Sh15-11-4	T-Pm		20.7	14.8	4.0	0.8	1.1	-	-	-	-
Ssfa scoria	PE2	ShB15-98.3	BI-Sc		15.7	10.7	2.2	0.1	1.3	-	-	1.4	-
Ssfa pumice	PE2	ShB15-105.3	W-Pm		21.8	15.6	2.6	2.0	1.6	-	-	-	-
Ssfl scoria	PS2	Sy44.4	BI-Sc		21.0	17.2	2.0	0.6	0.6	-	-	0.7	-
Ssfl pumice	PS2	Sy8.8	T-Pm		36.9	27.1	4.9	2.9	2.1	-	-	-	-
Yotei-1?	DS5	Sh16-3-15	T-pm		13.6	7.0	0.2	0.2	1.6	4.5	-	-	-
Srb-1	DS5	Sh16-3-13	(ash)		-	++	+	+	+	+	+	-	-
Kt-4	DS5	Sh16-3-8	T-Pm		4.8	4.1	+	0.1	0.3	-	-	-	-
Yotei-2?	PE2	ShB15-108.1	T-Pm		3.2	2.0	0.1	+	0.4	0.7	-	-	-
high-K	PE2	ShB15-113.1	(ash)		-	++	-	-	-	-	+	-	tr?
Kt-6	DS5	Sh16-3-9	T-Pm		5.1	3.1	0.7	0.2	0.2	-	-	-	-
Spfa-11	PE2	ShB15-123.15	W-Pm		37.0	26.6	5.3	4.0	1.1	-	-	-	-
Kt-7	PS3	NO-8405	T, G-Pm		16.0	12.7	2.4	0.2	0.7	-	-	-	-
Kt-8	PS3	NO-9290	T, G-Pm		17.0	14.9	0.7	0.9	+	-	-	-	-
Toya	PS3	NO-9600	W-Pm		2.5	2.4	+	-	+	-	0.1	-	-
Kc-4	DS5	Sh16-3-18	(ash)		-	++	+	+	+	tr	-	-	-
Srb-2	PS3	NO-9800	(ash)		-	++	+	+	+	+	+	-	-

W-Pm: white pumice, T-Pm: tan. Pumice, G-Pm: gray pumice, G-Sc: gray scoria, BI-Sc: black scoria, Band: banded scoria and pumice

pl: plagioclase, opx: orthopyroxene, cpx: clinopyroxene, opq: opaque minerals, hb: hornblende, qt: quartz, ol: olivine, bt: biotite

表 1.1-5. 本研究で確認されたテフラ中の本質物質のガラス組成.

tephra	n	(wt%)	total	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Spfa-1	33		95.71	77.25	0.15	12.33	1.48	0.07	0.17	1.47	4.31	2.76	0.02
			0.74	0.16	0.02	0.10	0.04	0.02	0.01	0.04	0.14	0.10	0.02
Kt-1	100		95.06	77.70	0.18	12.01	1.50	0.05	0.20	1.61	4.00	2.74	0.02
			1.14	0.25	0.02	0.12	0.06	0.02	0.02	0.07	0.13	0.07	0.02
Kt-Tk	69		96.88	75.93	0.29	12.66	2.13	0.07	0.31	2.34	4.14	2.09	0.05
			1.60	1.78	0.08	0.96	0.63	0.03	0.12	0.65	0.32	0.66	0.04
Kt-3	121		96.80	74.77	0.34	12.90	2.75	0.09	0.45	2.71	4.36	1.56	0.06
			2.00	0.53	0.03	0.36	0.17	0.02	0.05	0.18	0.18	0.10	0.03
Spfa-5	32		96.17	73.86	0.47	13.09	2.67	0.08	0.60	2.85	3.97	2.34	0.07
			2.37	0.86	0.05	0.51	0.23	0.02	0.11	0.30	0.20	0.12	0.04
Kt-Hy	23		98.37	67.95	0.64	14.61	4.62	0.14	1.76	4.86	3.91	1.37	0.12
			1.66	6.11	0.19	1.94	2.50	0.05	1.51	2.21	0.68	0.58	0.07
Spfa-6	38		97.82	69.47	0.59	14.58	3.91	0.10	1.05	4.19	4.08	1.87	0.14
			2.96	1.56	0.07	0.97	0.51	0.04	0.24	0.73	0.41	0.18	0.04
Ssfl	47		97.81	72.86	0.52	13.39	2.85	0.08	0.81	3.40	3.84	2.12	0.11
			1.98	4.12	0.13	1.13	1.92	0.04	0.51	1.20	0.28	0.45	0.06
Ssfa	119		96.86	73.35	0.43	13.20	2.77	0.08	0.67	3.17	3.89	2.37	0.06
			2.32	5.63	0.17	1.96	1.69	0.05	0.67	2.33	0.37	0.66	0.04
Yotei-1?	18		96.34	75.08	0.27	13.41	1.88	0.13	0.38	2.08	4.77	1.96	0.04
			1.55	0.54	0.03	0.40	0.18	0.02	0.02	0.17	0.29	0.17	0.03
Srb-1	8		95.48	78.19	0.13	12.21	0.97	0.04	0.16	1.16	3.24	3.86	0.03
			0.90	0.83	0.02	0.17	0.06	0.02	0.02	0.11	0.73	0.19	0.03
Kt-4	56		95.89	76.04	0.29	12.60	2.39	0.09	0.36	2.45	4.25	1.49	0.05
			2.19	0.67	0.03	0.39	0.11	0.02	0.03	0.19	0.43	0.08	0.03
Yotei-2?	14		95.45	74.41	0.19	14.08	1.81	0.16	0.38	2.08	4.97	1.86	0.07
			1.34	1.56	0.05	0.70	0.32	0.02	0.13	0.46	0.19	0.19	0.04
high-K	14		97.80	76.95	0.08	12.46	1.02	0.06	0.06	0.68	3.84	4.84	0.02
			1.71	0.48	0.04	0.22	0.32	0.03	0.04	0.21	0.42	0.36	0.02
Kt-6	60		96.86	76.61	0.29	12.32	2.33	0.08	0.37	2.41	4.15	1.40	0.04
			1.83	2.12	0.06	0.60	0.75	0.03	0.41	0.72	0.24	0.30	0.03
Spfa-11	30		95.94	76.67	0.37	11.92	2.00	0.06	0.36	1.93	3.77	2.86	0.05
			1.22	1.39	0.09	0.44	0.34	0.02	0.15	0.43	0.33	0.36	0.04
Kt-7	62		97.91	75.73	0.32	12.64	2.42	0.08	0.46	2.57	4.53	1.19	0.06
			1.94	1.42	0.05	0.48	0.44	0.02	0.17	0.43	0.25	0.08	0.04
Kt-8	87		96.01	76.28	0.30	12.67	2.19	0.08	0.40	2.57	4.34	1.10	0.05
			2.17	1.89	0.06	1.06	0.49	0.03	0.14	0.58	0.24	0.12	0.03
Toya	101		95.75	77.79	0.08	12.47	0.96	0.09	0.06	0.58	5.00	2.95	0.02
			1.28	0.98	0.07	0.52	0.27	0.02	0.08	0.51	0.42	0.68	0.02
Kc-4	15		95.01	77.06	0.32	12.38	1.66	0.08	0.38	1.92	4.09	2.06	0.04
			1.27	0.69	0.02	0.37	0.12	0.03	0.06	0.35	0.28	0.10	0.03
Srb-2	42		96.47	77.62	0.11	12.22	0.93	0.06	0.13	1.04	3.75	4.12	0.03
			1.59	0.35	0.02	0.19	0.08	0.02	0.02	0.06	0.23	0.15	0.03

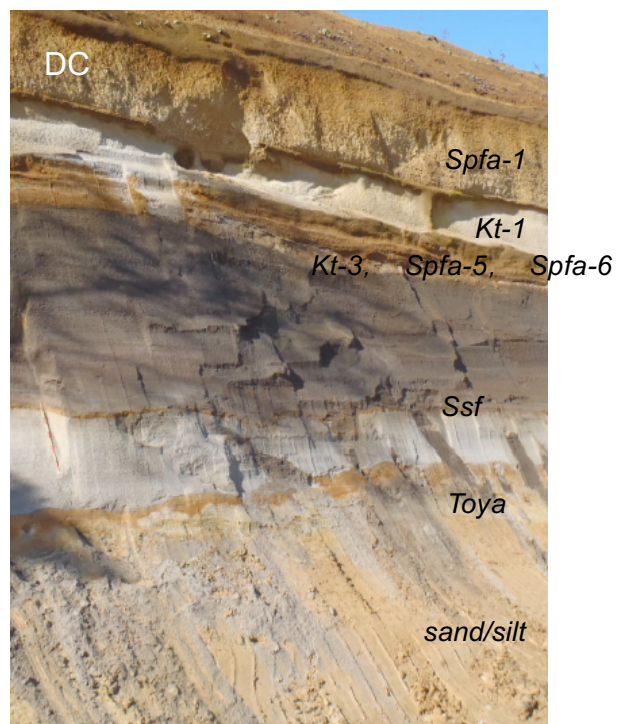
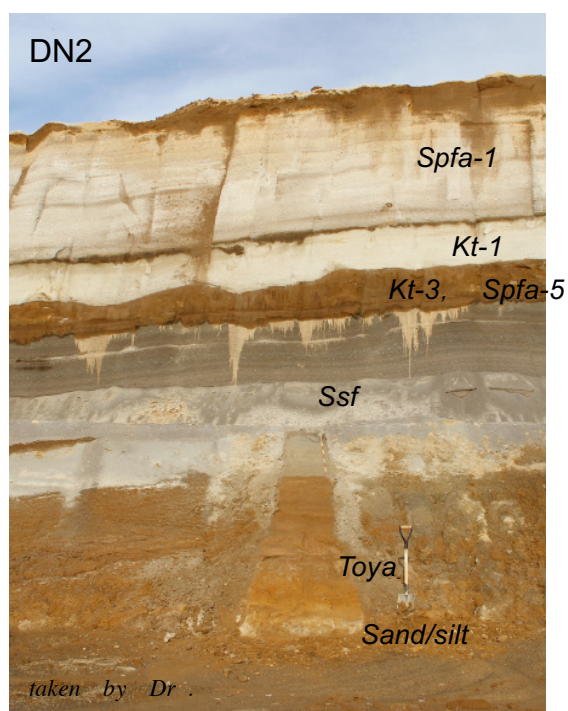
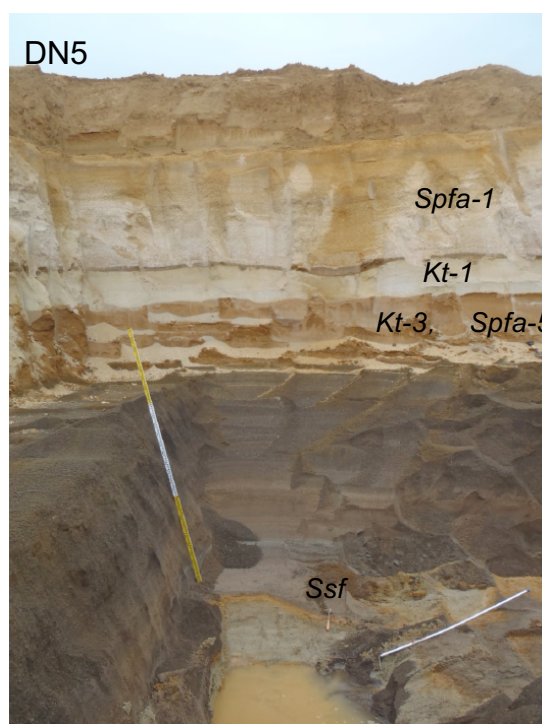


図 1.1-10. 支笏-洞爺火山地域の露頭写真.

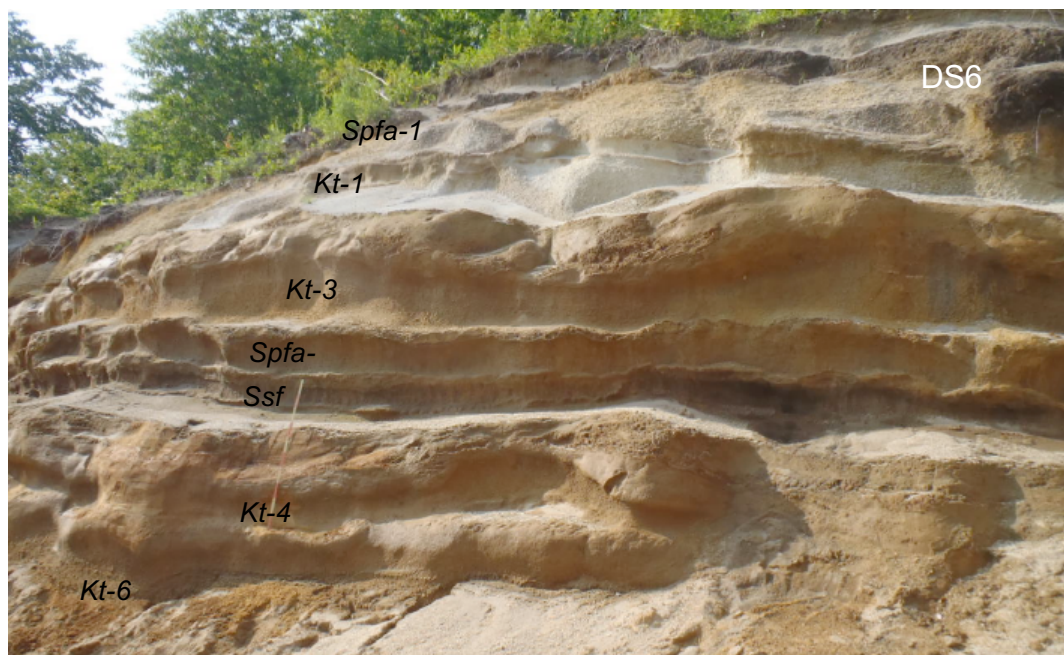


図 1.1-10. 支笏-洞爺火山地域の露頭写真 (つづき).

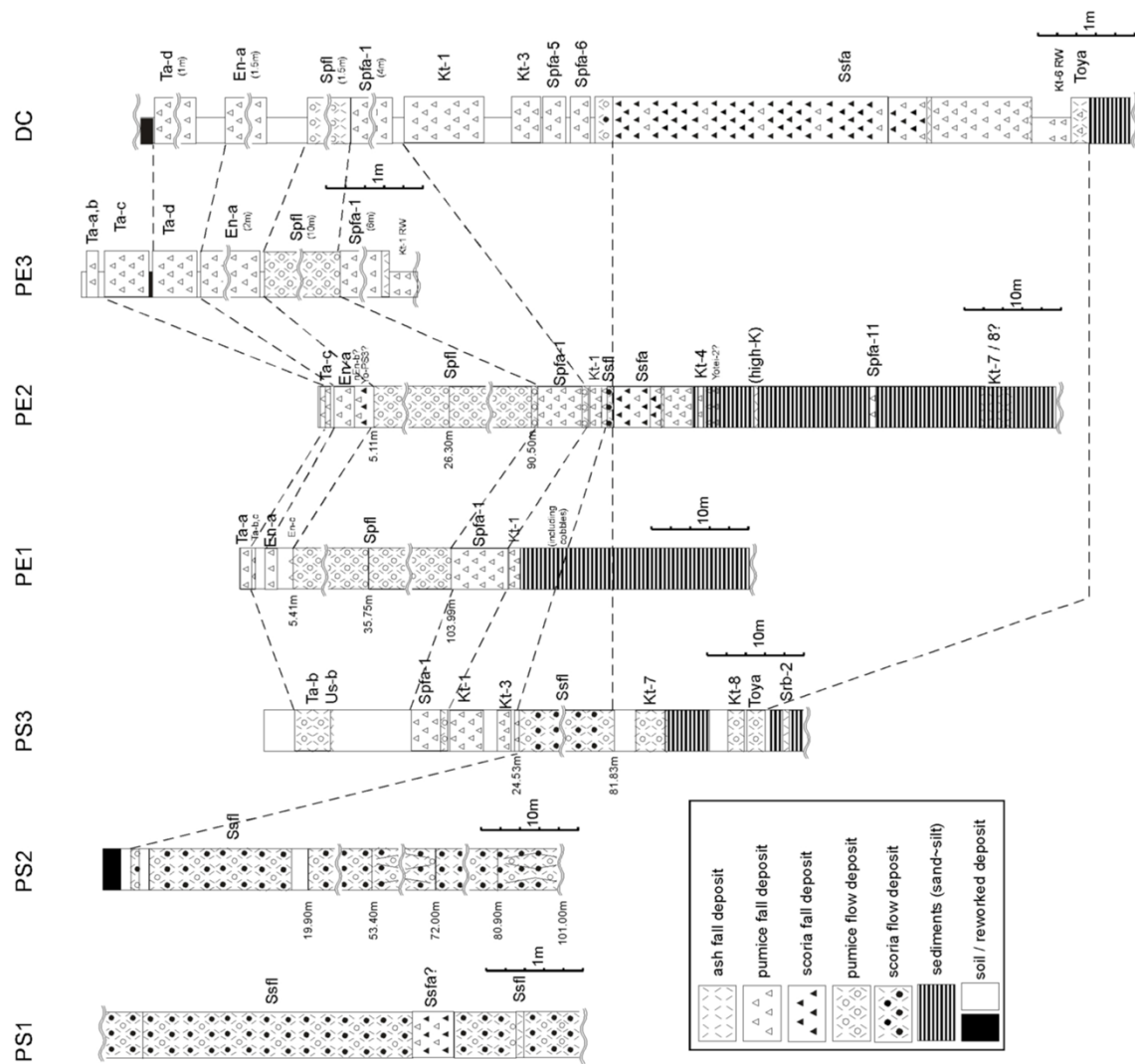


図 1.1-11. 支笏-洞爺火山地域のテフラ層序の対比柱状図（支笏湖近傍，西～東）.

支笏-洞爺火山地域の噴火史

支笏-洞爺火山地域のテフラ層序を再考したところ、約 13 万年前以降の層序が確立された。特に約 4 万年前以前に新しく 6 枚のテフラが発見された結果、尻別火山の噴火開始年代が従来の約 5 万年前から 12 万年前、羊蹄火山と支笏火山が約 5～6 万年前から約 8 万年前まで遡ることが明らかになった(図 1.1-13)。

平成 27 年度までに測定した支笏-洞爺火山地域火山岩の K-Ar 年代(図 1.1-14)と、今回明らかになったテフラ層序から本地域の火山活動は以下のようにまとめられる。支笏-洞爺火山地域の火山活動は、北部地域では約 300 万年前頃に終了したのに対し、南部地域では 200 万年前頃には活動を始め 85～50 万年前頃まで活発であり、いずれも主に安山岩質溶岩を噴出している。その後約 40 万年間の休止期を経て、13 万年前に洞爺火山(Osr, 表 1.1-2)、12 万年前に尻別火山(Srb-2)で珪長質噴火が始まった。11 万年前には洞爺火山で大規模な珪長質噴火(Toya)が起きて、直径約 10 km のカルデラが形成された。その後活動は東方へ移動し、2 万年程度の休止期の後、クッタラ火山が約 9 万年前(Kt-8)に、支笏火山が約 8 万 5 千年前(Spfa-11)に噴火を開始した。この時期はクッタラ火山で VEI=6 程度の噴火が頻発している(Kt-8～Kt-4)。また約 7 万 5 千年前頃からは、支笏-洞爺火山地域の背弧側で羊蹄火山も噴火し始めた(Yotei-2?)。約 6 万年前以降はクッタラ火山・支笏火山が活動の中心であり(Kt-3～Kt-1, Ssfa, Ssfl, Spfa-6, Spfa-5, Spfa-1, Spfl)、約 4 万 5 千年前には VEI=6 の Kt-1 噴火と VEI=7 の Spfa-1, Spfl 噴火が相次いで発生し、支笏火山では直径約 20 km の支笏カルデラが形成された。その後は羊蹄火山と後カルデラ火山の活動が活発であり、洞爺カルデラの中島火山や有珠火山、支笏カルデラの不風死火山、恵庭火山、樽前火山が噴火を繰り返している。

火山地域全体で見ると、長い休止期の後これらの火山は並行して活動しており、約 13 万年前以降にいくつかの爆発的噴火の活発な時期があるように見える(130～110 ka, 95～75 ka, 60～45 ka)。

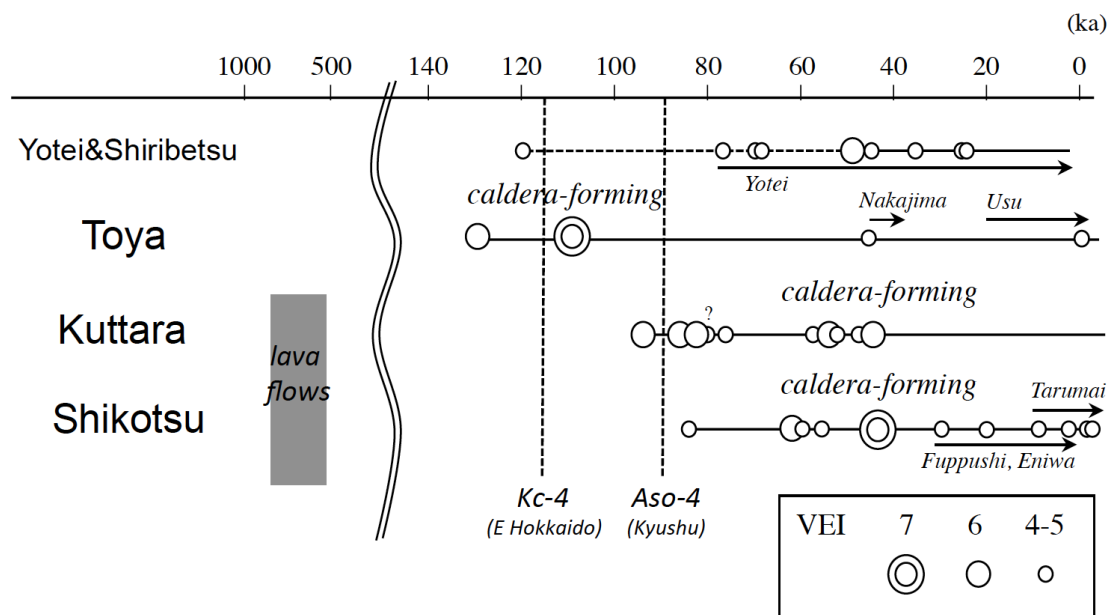


図 1.1-13. 支笏-洞爺火山地域の噴火史.

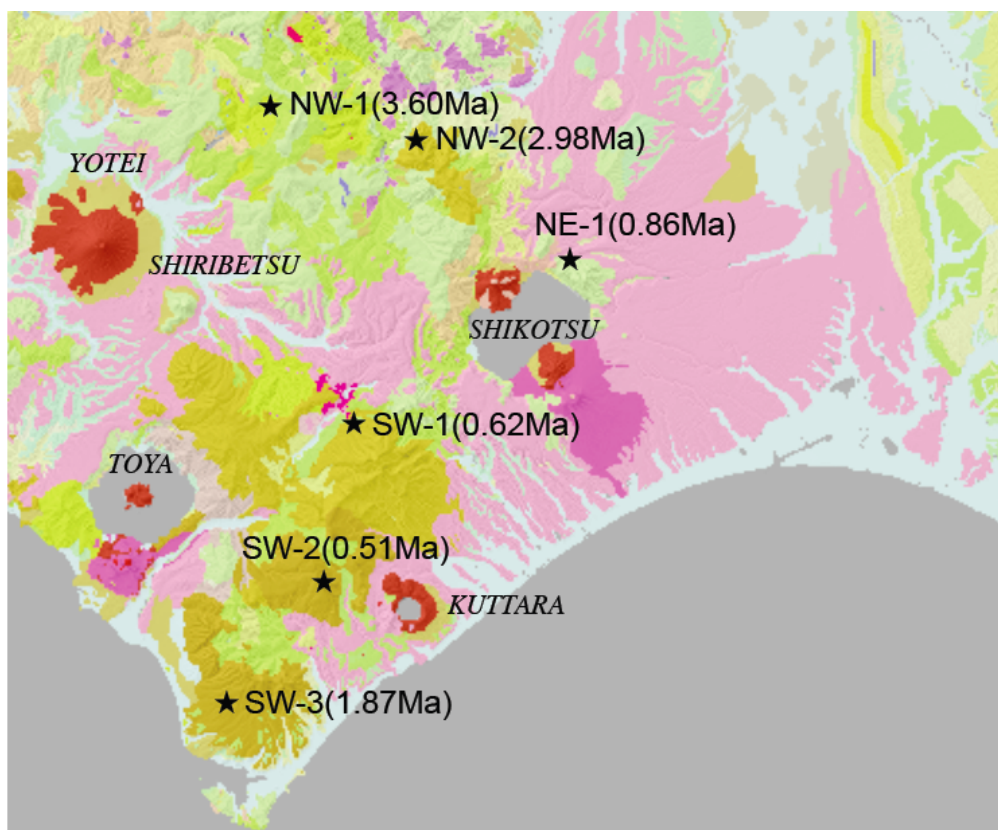


図 1.1-14. 支笏-洞爺火山地域火山岩の K-Ar 年代.

マグマ組成の時間変化

支笏・洞爺火山地域の火山活動を 13～11 万年前, 9.5～7.5 万年前, 6～4 万年前に分けて, ガラス組成の時間変化について考察した(図 1.1-15). すると, 13～11 万年前の噴出物は洞爺火山・尻別火山由来の $\text{SiO}_2=75\sim80\text{ wt\%}$ の高 SiO_2 流紋岩のみからなるが, K_2O 含有量は $1.5\sim4.5\text{ wt\%}$ で非常に幅広い. 一方, 9.5～7.5 万年前にはすべての火山が活動を開始し, クッタラ火山において SiO_2 や K_2O に乏しい岩石が噴出し始めた($\text{SiO}_2=70\sim80\text{ wt\%}$, $\text{K}_2\text{O}=1.0\sim4.0\text{ wt\%}$). このステージの噴出物は, 火山ごとに K_2O 組成が異なるという特徴が認められる. 一方で, 6 万年前以降になると $\text{SiO}_2=55\sim65\text{ wt\%}$ の玄武岩～安山岩質マグマが支笏火山, クッタラ火山, 羊蹄火山から噴出するようになる. 珪長質マグマは $\text{SiO}_2=70\sim80\text{ wt\%}$ で, この時期に SiO_2 組成幅は最大となるが, K_2O 含有量は $\text{K}_2\text{O}=2.0\sim3.0\text{ wt\%}$ で 4 万年前頃にはすべての火山でほぼ同じ組成に収束するように見える.

このようなマグマ組成の時間変化は, 支笏・洞爺火山地域の火山活動が珪長質火山活動から始まり, その後苦鉄質マグマの影響が増加していったことを示している. 多様な珪長質マグマが火山ごとに独立して発生し, それぞれ数回以内の噴火で消費されたと考えられる.

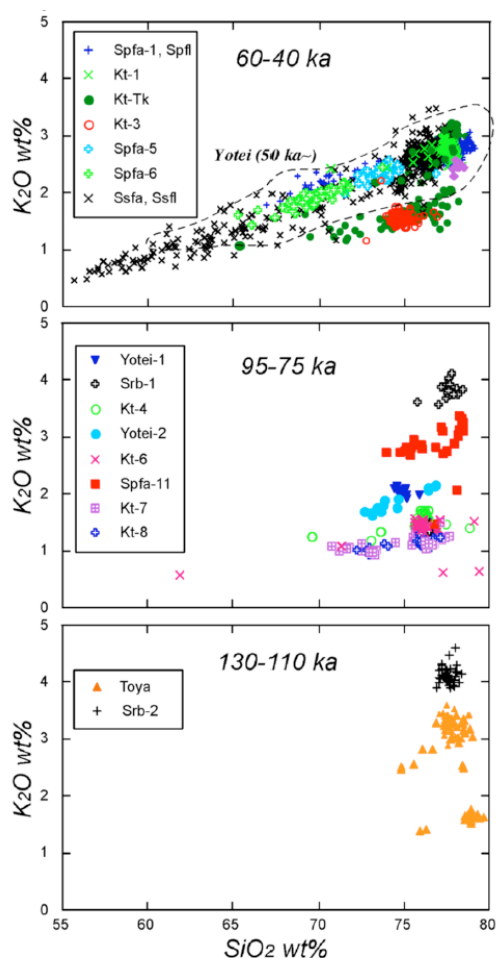


図 1.1-15. 支笏・洞爺火山地域のガラス組成の時間変化.

(2) 社台期大規模火砕噴火の噴火推移

(1) の支笏洞爺火山地域の長期噴火履歴によると、支笏火山の噴火史は下記のようにまとめられる(図 1.1-16). 約 8 万 5 千年前に噴火を開始し(初期:Spfa-11), その後 2 万 5 千年程度の休止期を経て, 約 6 万年前に大規模な火砕噴火(Ssfa, Ssfl)が始まった(社台期). 昨年度までの研究によると, 約 5 万 5 千年前までに引き続いた 2 回の噴火(Spfa-6, Spfa-5)は, 軽石主体のプリニー式噴火のみであったと考えられる. 1 万 5 千年程度の休止期の後, 約 4 万年前に支笏カルデラ形成噴火が発生し(カルデラ形成期:Spfa-1, Spfl), 約 3 万年前から不風死火山, 恵庭火山, 樽前火山が噴火を繰り返している(後カルデラ期).

昨年度は支笏湖東方約 20km の地点でボーリング調査を行い(図 1.1-4, 図 1.1-11, PE2), 6 万年前の大規模火砕噴火(Ssfa・Ssfl)の初期から末期までの全噴出物を採取することに成功した. その結果, 社台期大規模火砕噴火はプリニー式噴火から火砕流発生へと移行したことが示唆された. そこで, 今年度はこのボーリングコア試料に加え, 支笏湖東方 40 km(DC)および支笏湖北東 40 km(DN5)においてトレンチ調査を行い(図 1.1-4, 図 1.1-12), 詳細な地質記載に基づいて連続的に試料を採取し, 構成物分析およびガラス組成分析を行った. その結果, 本研究では PE2 地点における地質記載および構成物分析結果を基準として, 社台期大規模火砕噴火噴出物を 5 つのユニットに区分した(Ssfl, Ssfa-I~IV).

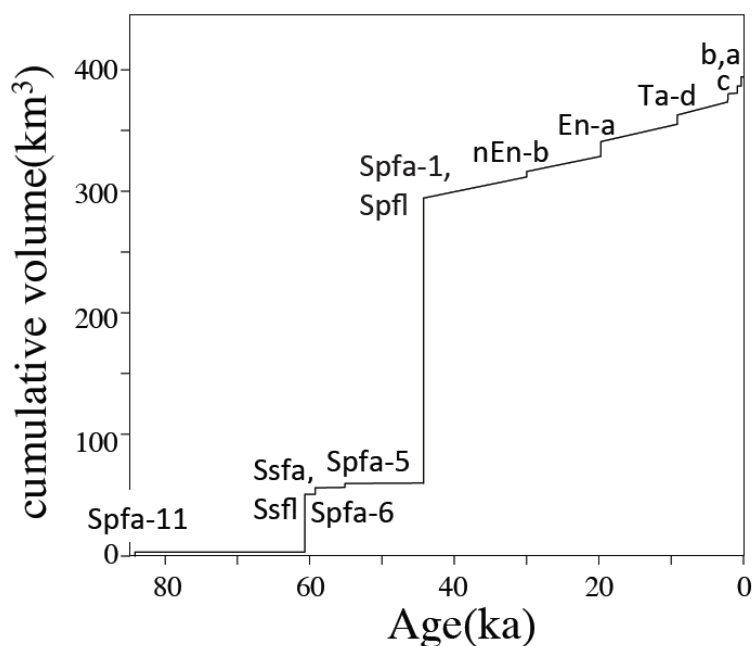


図 1.1-16. 支笏火山の噴出量階段図.

社台期大規模火砕噴火のテフラ層序

昨年度掘削したボーリングコア PE2 は支笏湖東方約 20km の地点で掘削されたもので、掘削長は 180 m である(図 1.1-17). 深度 95.71 m までがカルデラ形成期噴火堆積物(Spfa-1)で、その下位に茶褐色土壌をはさんでクッタラ火山由来の Kt-1(深度 95.83~96.83 m)と Kt-3 を含む土壌(深度 96.83~97.20m)があり、その下位の深度 97.20~106.02 m にスコリアを含む一連の堆積物が約 880 cm の厚さで認められた(図 1.1-17). この堆積物を詳細に見ると、深度 97.20~97.63 m はスコリアを含む塊状細粒火山灰層で火砕流堆積物であると考えられる(Ssfl). さらにその下位の深度 97.63~102.12 m は少量の軽石を含む降下スコリア堆積物(Ssfa-IV), 深度 102.12~103.90 m は主に灰色軽石とスコリアからなる降下火砕堆積物(Ssfa-III), 深度 103.90~104.03 m は細粒の降下火山灰堆積物(Ssfa-II), 深度 104.03~106.02m は主に白色~灰色軽石からなる降下軽石堆積物(Ssfa-I)であり、その下位には炭質のシルト層が堆積している. 本研究では、Ssfa-I について 15 試料, Ssfa-II について 1 試料, Ssfa-III について 11 試料, Ssfa-IV について 22 試料, Ssfl について 2 試料の計 51 試料を採取した.



図 1.1.17. ボーリングコア写真(PE2).

さらに、今年度は地表調査により社台期大規模噴火噴出物全体が観察できるであろうと考えられる代表的露頭 2 箇所について、トレンチ調査を行った(図 1.1-4)．支笏湖東方 40 km の DC 地点では、Ta-d, En-a, Spfl, Spfa-1, Kt-1, Kt-3, Spfa-5, Spfa-6 の下位に、厚さ約 400 cm の降下火砕堆積物が認められた(図 1.1-18)．本地点では、火砕流堆積物 Ssfl に対応すると考えられる地層は存在せず、Ssfa-IV と Ssfa-III との境界が明瞭ではないが、Ssfa-IV と Ssfa-III を合わせた層厚は約 300 cm である．上位ほど優黒色で全体的に層状構造が発達しており、下位の 80 cm 程度の範囲では粒径や色彩の異なる層が 10 層以上確認できる．その下位には厚さ 5 cm 程度の降下火山灰堆積物(Ssfa-II)があり、さらに厚さ 100 cm の降下軽石堆積物が認められた(Ssfa-I)．Ssfa の下位には Kt-6 を含む土壌を挟んで、Toya テフラが存在し、その下位は粘土質堆積物であった．本研究では、Ssfa-I について 7 試料、Ssfa-II について 1 試料、Ssfa-III または Ssfa-IV について 30 試料の計 38 試料を採取した．

支笏湖北東 40 km の DN5 地点においては、Spfa-1, Kt-1, Kt-3, Spfa-5 の下位に、厚さ約 270 cm の降下火砕堆積物が認められた(図 1.1-19)．本地点では、最上部から 20 cm 程度のところに火山灰質の薄層が認められ、これより上部の細粒物に富む部分を含めて Ssfl に対応する可能性がある．本地点でも Ssfa-IV と Ssfa-III との境界は明瞭ではなく、上部から約 100 cm 程度は優黒色であるが、さらに 70 cm 程度下位は茶褐色となり、その下位 30 cm 程度は灰褐色である．DC 地点と同じく全体的に層状構造が発達しており、下位の 100 cm 程度の範囲では粒径や色彩の異なる層が 10 層以上確認できる．その下位には厚さ 4 cm 程度の降下火山灰堆積物(Ssfa-II)があり、さらに厚さ 40 cm 程度の降下軽石堆積物が認められた(Ssfa-I)．Ssfa の下位は粘土質堆積物であった．本研究では、Ssfa-I について 5 試料、Ssfa-II について 1 試料、Ssfa-III または Ssfa-IV について 29 試料の計 35 試料を採取した．



图 1.1-18. 露头写真(DC).



图 1.1-19. 露头写真(DN5).

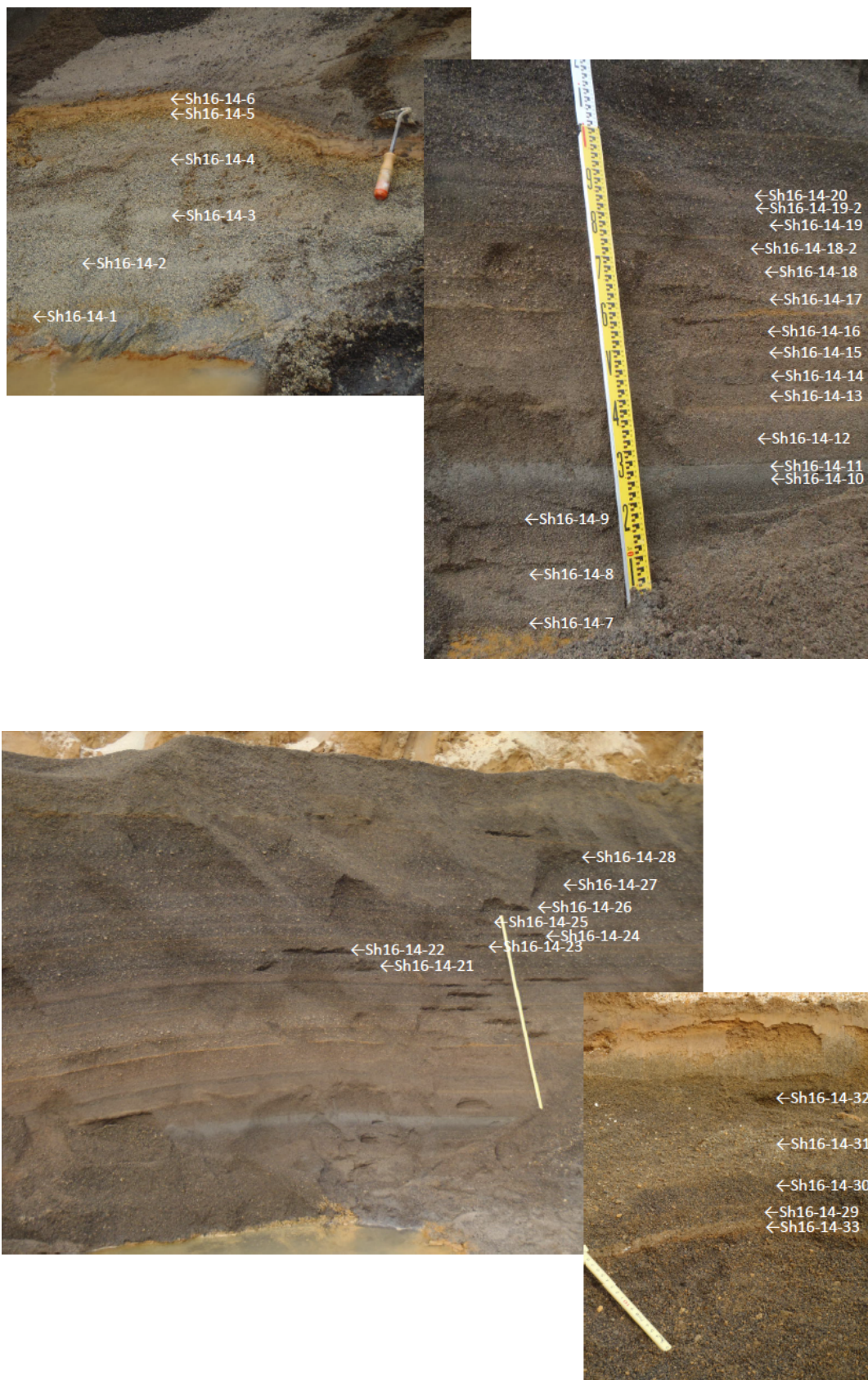


図 1.1-19. 露頭写真(DN5)つづき.

社台期大規模火砕噴火噴出物の構成物分析

支笏湖東方約 20 km でのボーリング調査(PE2)および支笏湖東方 40 km(DC)および支笏湖北東 40 km(DN5)におけるトレンチ調査のテフラ層序から、社台期大規模噴火はプリニー式噴火の進行に伴って軽石主体の噴火からスコリア主体の噴火へ移行していること、噴火の後期に火砕流が噴出した可能性が高いことが示唆された。そこで、マグマの変化を定量的に明らかにするために、3 地点において採取した試料を 4 mm, 2 mm の篩でふるった後、2 mm 以上の粒子について白色軽石、スコリア、縞状軽石または灰色軽石、岩片の 4 種類に分類して構成物分析を行った(図 1.1-20)。

その結果、支笏湖東方約 20 km の PE2 地点では Ssfa-I から Ssfa-IV に向かって次第に 4 mm 以上の粒子の割合が増加すること、Ssfa-I では本質物質はほぼすべてが白色軽石であり、Ssfa-II, III ではスコリアや縞状軽石・灰色軽石が出現し初めその割合が大きく変化すること、Ssfa-IV では本質物質の大部分をスコリアが占め白色軽石の割合は激減しながらも存在し続けること、Ssfa-I では再び白色軽石の割合が増加することが明らかになった(図 1.1-21)。支笏湖東方 40 km の DC 地点では噴出物の粒度構成は大きく異なり、2 mm 以下のものが 60 wt%以上を占めている(図 1.1-22)。しかしながら、Ssfa-I から Ssfa-IV に向かって 2 mm 以上の粒子が増加する点や、Ssfa-I ~Ssfa-IV で見られる構成物量比の大まかな傾向は、PE2 地点とほぼ同様である。よって、地質記載では区別できなかった Ssfa-III と Ssfa-IV の境界を、本研究ではスコリアの構成比が安定的に最大となる部分とした。ただし、Ssfa-IV 中のスコリア構成比は 40-60%程度で、PE2 に比べると低い。一方で、支笏湖北東 40 km の DN5 の構成物分析結果は、他の地点のものとやや異なる(図 1.1-23)。粒度構成は支笏湖東方 40 km の DC 地点とほぼ同じで、2 mm 以下のものが 60 wt%以上を占め、Ssfa-I から Ssfa-IV に向かって 2 mm 以上の粒子が増加する傾向が認められる。しかしながら、構成物量比は Ssfa-I, II については他地点と同様であるが、Ssfa-III と Ssfa-IV との境界で見られたスコリア構成比の急増が顕著ではなく、すべての構成物が 15~35 wt%ずつ存在している。よって、本研究では白色軽石の割合が急減して安定する部分からを Ssfa-IV とした。

全体としては白色軽石主体のプリニー式噴火の後、噴出率は急減、その後苦鉄質マグマの割合が増加するに従って噴出率も上昇し最後に火砕流噴火へ移行したと考えられる。また、支笏湖東方の PE2 地点と DC 地点では Ssfa-I~Ssfa-IV の層厚比がほぼ同じであるのに対して、支笏湖北東の DN5 地点では Ssfa-III の割合が高いことが明らかになった。このような給源からの方位または距離と構成物量比の違いが何を反映しているのかについては、2 mm 以下の粒子を含め分析を進める必要がある。

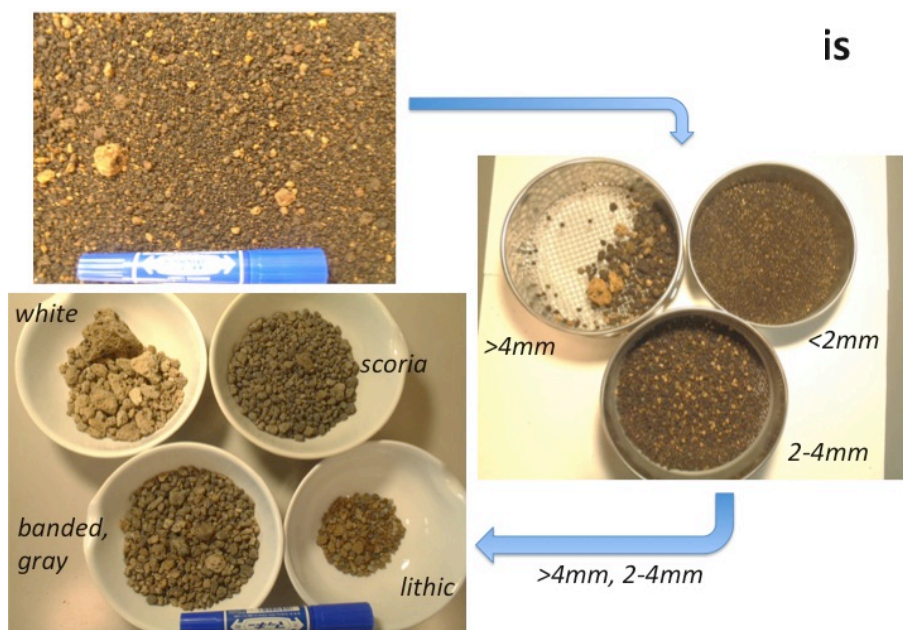


圖 1.1-20. 構成物分析法.

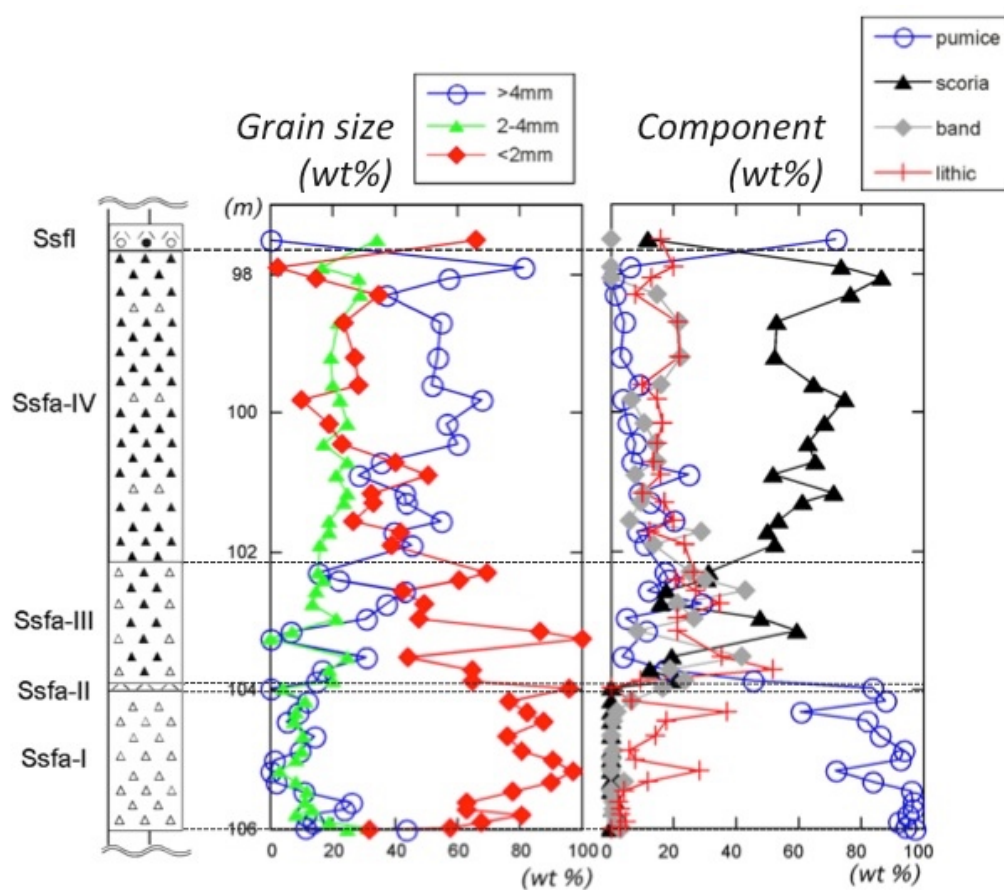


圖 1.1-21. 構成物分析結果(PE2).

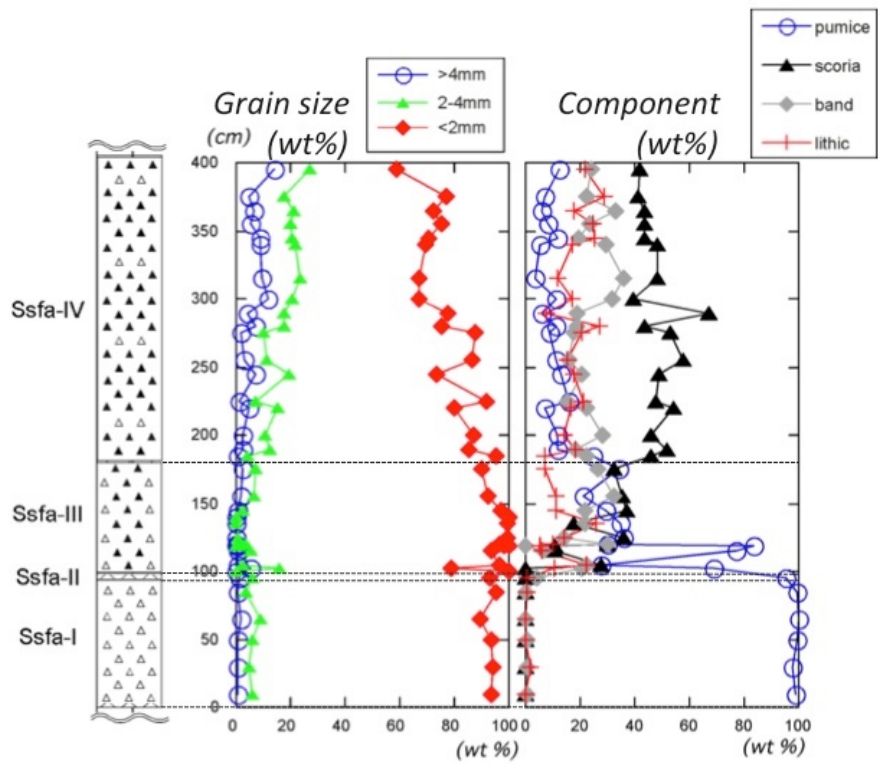


圖 1.1-22. 構成物分析結果(DC).

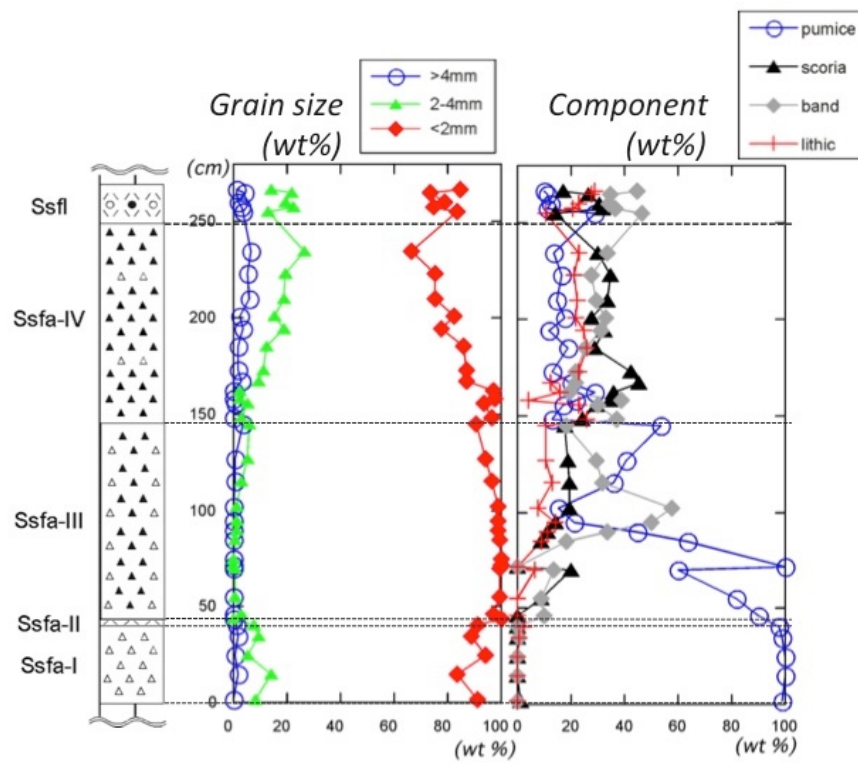


圖 1.1-23. 構成物分析結果(DN5).

社台期大規模火砕噴火噴出物のガラス組成分析

平成 28 年度までの研究では、DC 地点と DS2 地点の 2 箇所採取した Ssfa-IV の試料についてのみガラス組成を分析し、他の社台期噴出物(Spfa-5, Spfa-6)に比べて組成幅が広く直線的なトレンドを示すことが明らかになっていた。そこで、今年度は、社台期大規模火砕噴火噴出物を連続的に採取できた PE2 コアの Ssfa, Ssfl と支笏湖南部の PS1 地点で採取した Ssfl についてガラス組成分析を行った。

Ssfa と Ssfl は珪長質側で収束し苦鉄質側ではやや組成幅が広がっているが、CaO のハーカー図などではほぼ直線状のトレンドを示している(図 1.1-24)。Ssfa は $\text{SiO}_2=55\sim78$ wt%であるのに対して、Ssfl では $\text{SiO}_2=61\sim78$ wt%でやや組成幅が狭い。本質物質のタイプ別に見ると、白色軽石は Ssfa, Ssfl とともに $\text{SiO}_2=73\sim78$ wt%で類似しているのに対して、Ssfa のスコリアは $\text{SiO}_2=55\sim62$ wt%, Ssfl のスコリアは $\text{SiO}_2=61\sim67$ wt%で組成が異なっており、縞状軽石や灰色軽石はそれぞれ白色軽石とスコリアの間にプロットされる。スコリアの組成幅が広い点は、石基ガラス中のマイクロライト・ナノライトの影響を受けているためと考えられるが、Ssfa と Ssfl の組成の違いは、石基結晶度だけでなく、マグマそのものの組成が異なることを反映しているのかもしれない。

また、PE2 コアで採取した Ssfa のユニットごとの組成変化に注目すると、 $\text{SiO}_2=75$ wt%以上の白色軽石ではすべてほぼ同じ組成を示すが、Ssfa-I には $\text{SiO}_2=75$ wt%以下のガラスは認められず、Ssfa-II は $\text{SiO}_2=65\sim67$ wt%, その後 Ssfa-III, Ssfa-IV と次第に SiO_2 の組成範囲が広くなる傾向が認められる(図 1.1-25)。白色軽石のみからなる Ssfa-I からスコリア主体の Ssfa-IV 中の白色軽石までガラス組成がほぼ同じであることから珪長質マグマは噴火を通して同じであること、一方でより苦鉄質なマグマは初期にはスコリアと白色軽石の中間的な組成を示すがその後 SiO_2 に乏しくなることから、時間とともに組成が変化していたことが示唆される。

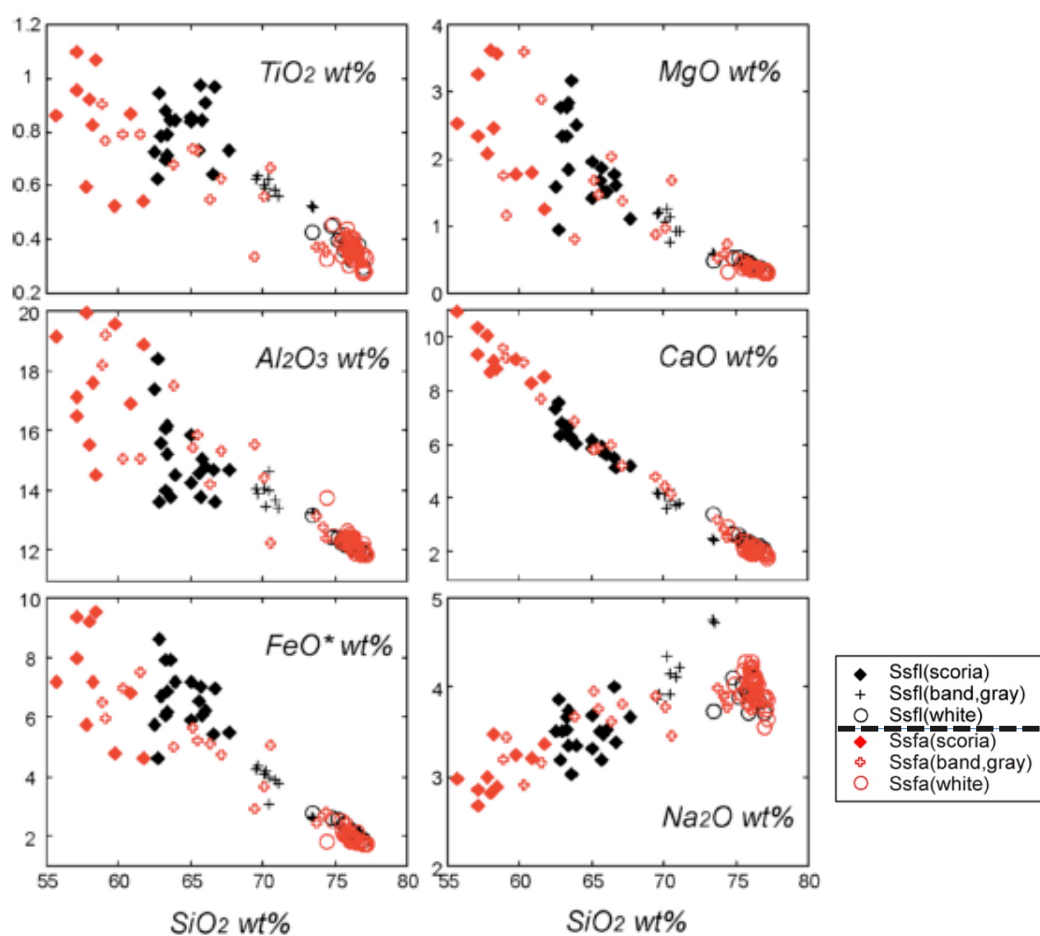


図 1.1-24. 社台期大規模火砕噴火噴出物のガラス組成(本質物質のタイプ別).

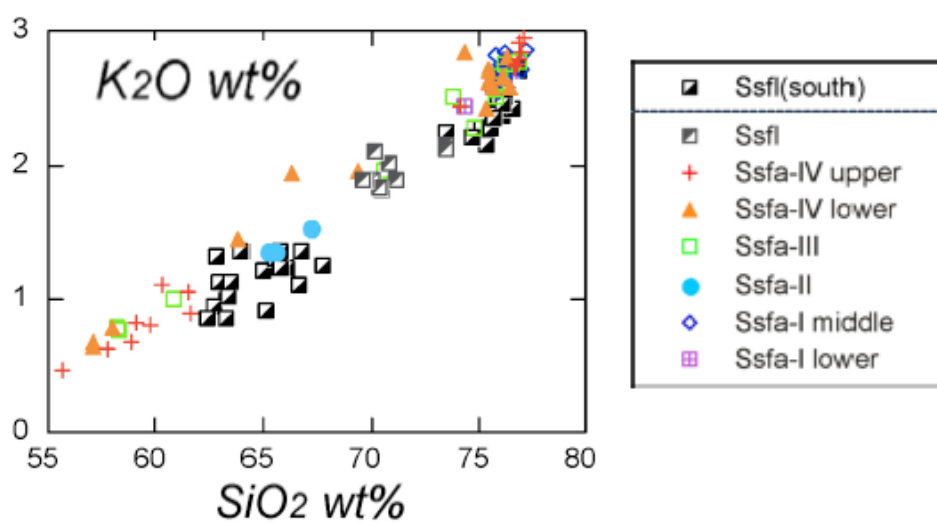


図 1.1-25. 社台期大規模火砕噴火噴出物のガラス組成(ユニット別).

(3) カルデラ形成期噴火のテフラ層序

昨年度までの地質調査およびボーリング調査によって、約 4 万年前に発生した支笏カルデラ形成噴火(カルデラ形成期)は大きく 5 つの噴火フェーズに分類され(PhaseI: マグマ水蒸気噴火期, PhaseII: 大規模なプリニー式噴火による降下軽石堆積物卓越層から火砕流堆積物卓越層への移行期, PhaseIII: 大規模火砕流堆積物噴出期, PhaseIV: 厚い岩片濃集層を伴う火砕流堆積物噴出期, PhaseV: 大規模噴火終息期), これらは時間間隙をはさんで, Stage1(従来の Spfa-1: PhaseI, II)と Stage 2(従来の Spfl: PhaseIII~V)の大きく 2 つに区分されることが明らかになった(図 1.1-26, 図 1.1-27). 粒度分析および構成物解析を行った結果, 支笏カルデラ形成期噴火は以下のように進行したと考えられる(図 1.1-28). 約 4 万年前の噴火は直前噴火を伴うことなく, マグマ水蒸気噴火から開始した (PhaseI). その後火口が拡大または移動して, 一本の噴煙柱からの大規模なプリニー式噴火へ移行(PhaseII-1), プリニー式噴火から噴煙柱不安定へ移行する過程で火口の拡大が起こり, また同時に複数の火口を形成 (PhaseII-2), 小規模火砕流が発生した (PhaseII-3). ここまでが Stage1 で, その後短い時間間隙をおいて開始した Stage2 は, 大規模火砕流噴火から始まり大量の火砕流を全方向へ広く流出した(PhaseIII). 火砕流噴火の後半になって大量の岩片を放出するようになり, この時期にカルデラがピークを迎えたと考えられる (PhaseIV). そして最後に小規模なマグマ噴火を起こして活動が終焉した(PhaseV). しかしながら, この噴火推移は主に PS3 地点(図 1.1-4, 図 1.1-26, 図 1.1-27)における解析結果を元にしたモデルであり, これが広範囲に分布するカルデラ形成期噴出物の地質学的特徴を説明できるのか定かではない.

そこで平成 28 年度は, このうち特に Stage1 噴出物 (いわゆる Spfa-1) に注目して, 噴火初期のマグマ水蒸気噴火噴出物(PhaseI)と大規模なプリニー式噴火による降下軽石堆積物卓越層から火砕流堆積物卓越層への移行期噴出物(PhaseII)の地質学的特徴を検討するため, 支笏湖北東~南東側の広範囲において分布調査を行うとともに(図 1.1-4, 図 1.1-11, 図 1.1-12), 地表調査地点のうち代表的な露頭(支笏湖東方 25 km:PE3)についてはトレンチ調査を実施した(図 1.1-29). その結果, PhaseI 噴出物は 3 つのユニットに分けられ噴火最初期には薄く広く高温のブラスト状堆積物が覆ったと考えられること, PhaseII 噴出物は遠方では 2 つのユニットのみが認められることが確認された. また, 支笏湖から 40km 以上離れた東部~北東部の数地点において, PhaseIII の火砕流堆積物の上位にサージ堆積物が新たに認められた.

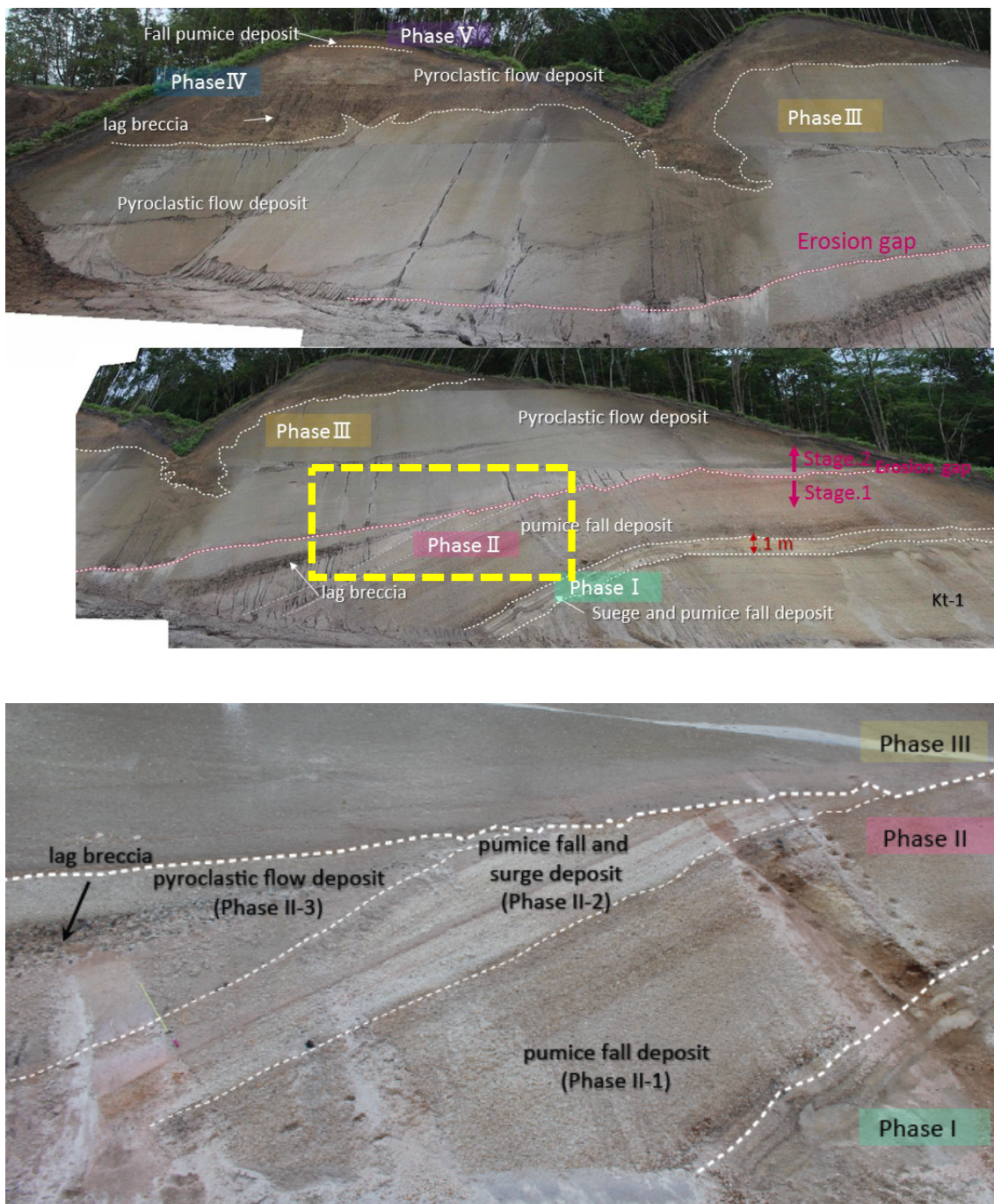


図 1.1-26. カルデラ形成期噴出物の模式露頭写真(PS3).

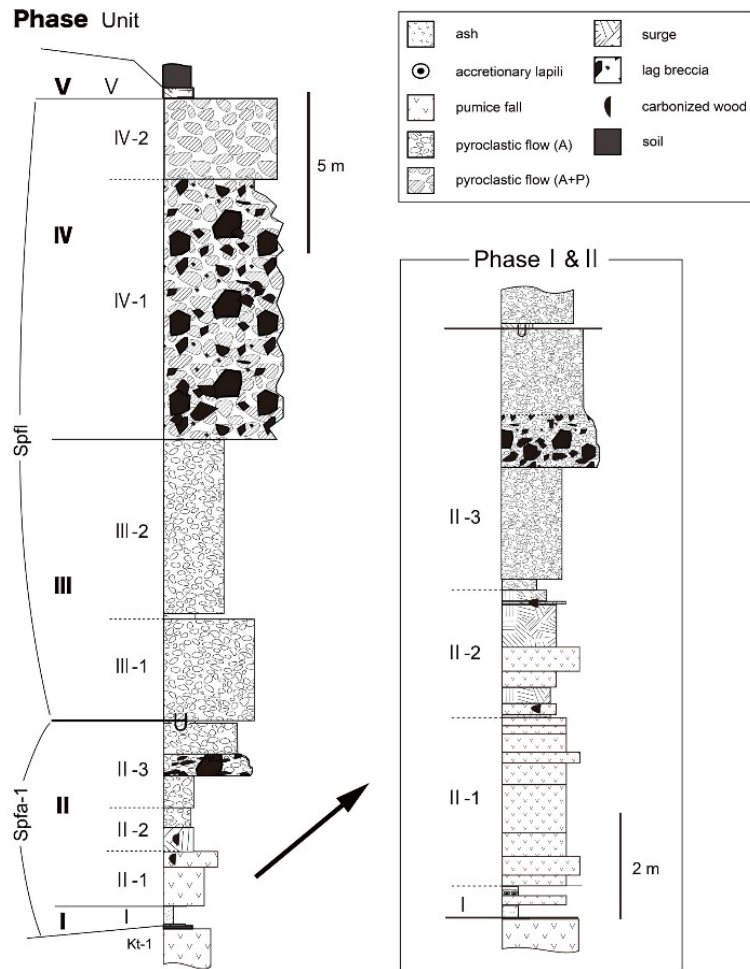


図 1.1-27. カルデラ形成期噴出物の模式露頭柱状図(PS3).

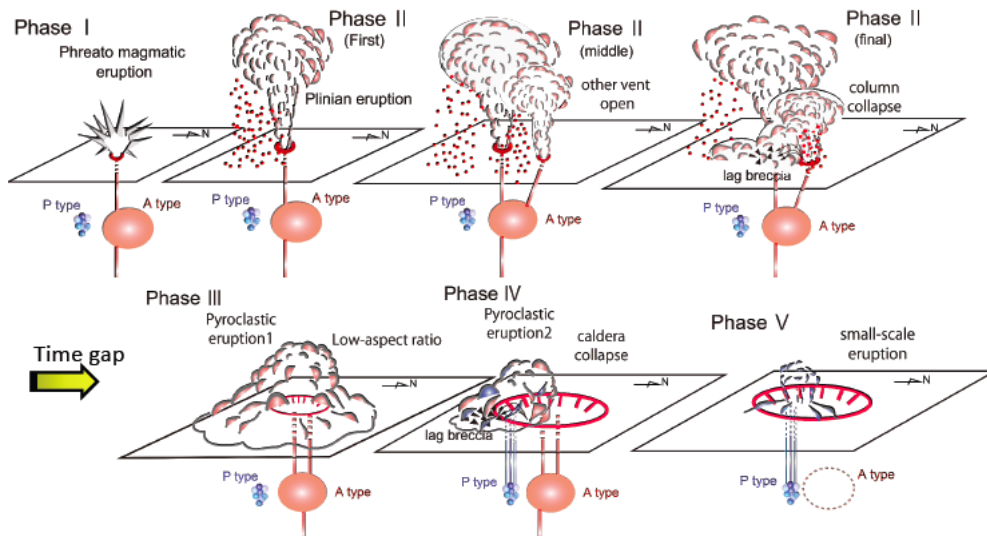


図 1.1-28. カルデラ形成噴火の推移.



图 1.1-29. 露头写真(PE3).

PhaseI 噴出物のテフラ層序

今年度は、支笏湖北東～南東側の広範囲において分布調査を行うとともに(図 1.1-4, 図 1.1-11, 図 1.1-12), 地表調査地点のうち代表的な露頭(支笏湖東方 25 km:PE3)についてはトレンチ調査も行った。その結果, PhaseI 噴出物は下位から炭化物を含む火山灰層(PhaseI-1), 粗粒で結晶質な鉱物片からなる火山灰～火山礫層(PhaseI-2), 降下軽石層と火山豆石を含む火山灰層の互層(PhaseI-3)の 3 つのユニットに分けられることが明らかになった(図 1.1-30)。

支笏湖南南東約 15 km にある PS3 地点では, PhaseI 堆積物が最も厚く, 層厚は約 65 cm である。このうち最下部の 1 cm ほどが PhaseI-1, PhaseI-2 に相当し, その上位に降下軽石層と火山灰層の互層からなる PhaseI-3(下位から厚さ約 20 cm の火山灰層, 厚さ約 25 cm の降下軽石層, 厚さ約 10 cm の火山灰層, 厚さ約 10 cm の降下軽石層)が累重している。一方で支笏湖東方 25 km の PE3 地点では, やはり最下部の 1cm ほどが PhaseI-1, PhaseI-2 に相当し, その上位に層厚約 11 cm の降下軽石層と火山灰層の互層からなる PhaseI-3 が認められる。さらに遠方の支笏湖東方 40 km の DN2 地点では, PhaseI-1, PhaseI-2 は厚さ 1～2 cm, PhaseI-3 は層厚 5～6 cm である。一方, 支笏湖北東約 40 km の DN5 地点では PhaseI-3 に相当する層が認められず, 層厚約 1 cm の PhaseI-1, PhaseI-2 のみが確認された。支笏湖南東約 65 km の DS7 地点は支笏湖から最も遠方ではあるが, 層厚約 1 cm の PhaseI-1, PhaseI-2 と層厚約 9 cm の PhaseI-3 がはっきりと識別できる。このように PhaseI-1, PhaseI-2 は, 支笏湖からの距離に関わらずほぼ一定の層厚で薄く広く堆積しているのに対して, PhaseI-3 は南東方向に主軸を持つ堆積物であることが明らかになった。PhaseI-1 が炭化物を含み PhaseI-2 がガラスに乏しく粗粒で結晶質な鉱物片から構成されることから, 噴火最初期に支笏湖から少なくとも 65 km の範囲が高温のブラスト状堆積物に覆われ, その後マグマ水蒸気噴火へと移行した可能性が考えられる。

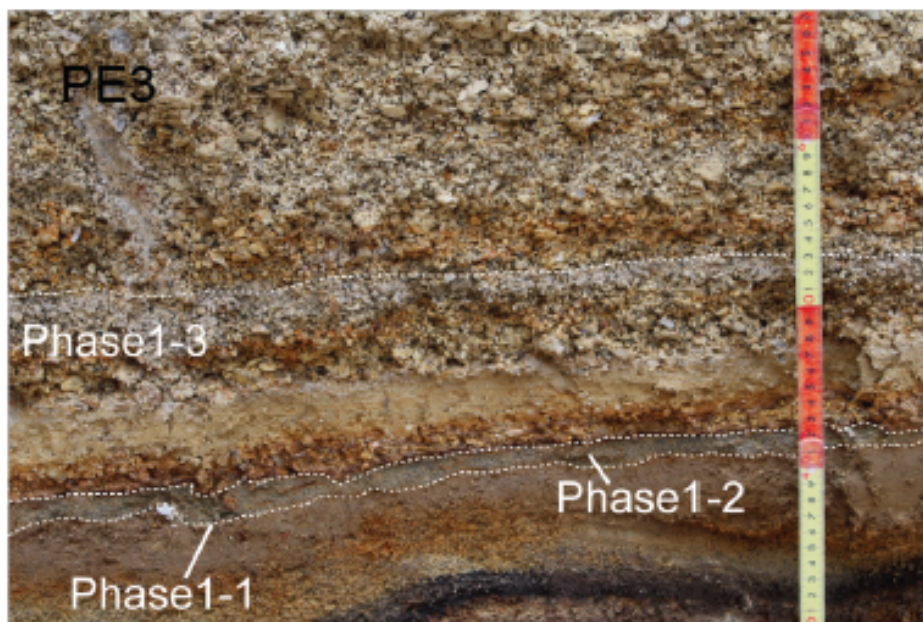
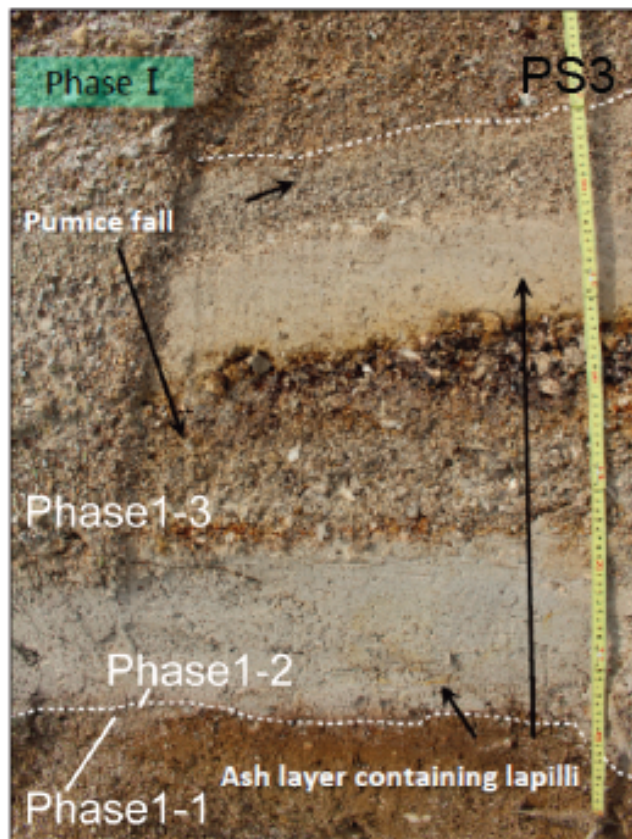


図 1.1-30. PhaseI 噴出物の露頭写真.

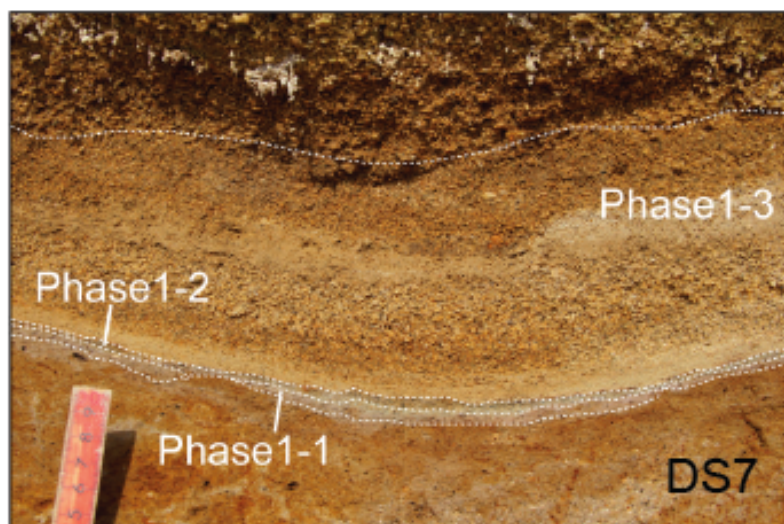
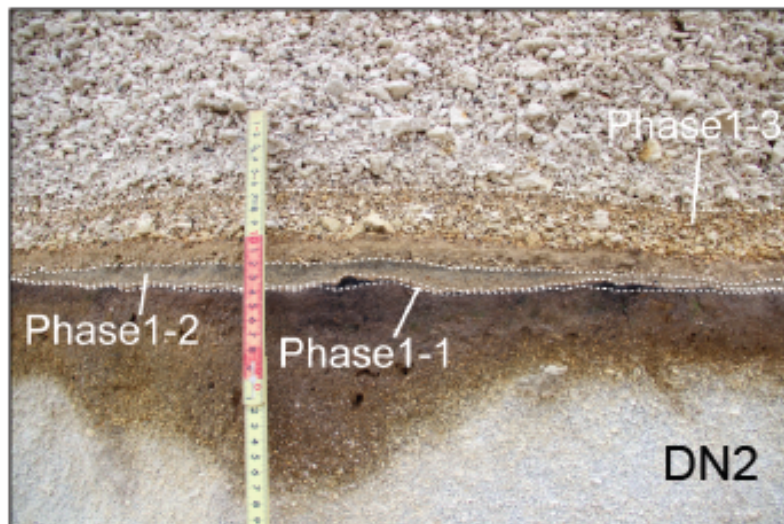
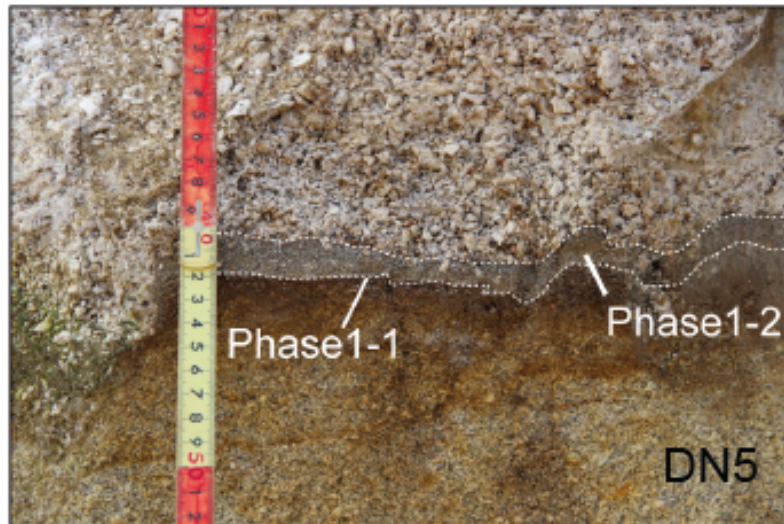


図 1.1-30. Phase I 噴出物の露頭写真 (つづき. 写真は三浦氏撮影).

PhaseII 噴出物のテフラ層序

模式露頭(PS3)では、PhaseI の上位に降下軽石堆積物(図 1.1-26; PhaseII-1, 層厚約 3 m), サージ堆積物と降下軽石堆積物の互層(図 1.1-26; PhaseII-2, 層厚約 2.5 m), ラグブレッチャを含む火砕流堆積物(図 1.1-26; PhaseII-3, 層厚約 5 m)が累重しているのが確認されていたが、支笏湖北東～南東側の広範囲において分布調査を行ったところ(図 1.1-4, 図 1.1-11, 図 1.1-12), PhaseII 噴出物は支笏湖東方 25km より遠方では PhaseII-1, PhaseII-2 のみが認められることが明らかになった(図 1.3-6).

例えば、支笏湖東方 25km の PE3 地点では、層厚約 12 cm の PhaseI 堆積物の上位に、厚さ約 3 m の成層構造があまり発達していない PhaseII-1, 成層構造がはっきりした厚さ約 2 m の PhaseII-2 があり、これらは PhaseIII の火砕流堆積物に覆われている(図 1.1-29 図 1.1-31). さらに遠方の支笏湖東方 40 km の DN2 地点では、PhaseII-1 は層厚約 2 m, PhaseII-2 は層厚約 1.5 m で、ほぼ同じ割合で厚さが減少している. 一方、支笏湖北東約 40 km の DN5 地点では PhaseII-1 は厚さ約 0.7 m, PhaseII-2 は約 1.5 m で PhaseII-2 の方が厚い. 同様に支笏湖南東約 65 km の DS7 地点でも PhaseII-2 の方が厚く、PhaseII-1 は厚さ約 1 m, PhaseII-2 は約 2.5 m となっている. 上記のようなユニットごとの層厚の空間分布を考え合わせると、PhaseII-1 の主軸が東側であるのに対して、PhaseII-2 はそれよりも南東側に厚く分布していること、PhaseII-2 の方が PhaseII-1 よりも広範囲で厚く堆積していること、PhaseII-3 は支笏湖南南東約 15 km の PS3 地点や支笏湖東方約 5 km の PE1 地点など支笏湖近傍にのみ認められる堆積物であることが明らかになった. このように、支笏湖東方約 40～60 km の範囲は PhaseII の露出が比較的良い. そのため本地域で南北に縦断するように複数箇所調査を行い、ユニットごとの層厚、構成物の重量比、粒度を詳細に記載することにより、PhaseII の噴火推移が明らかになる可能性がある.

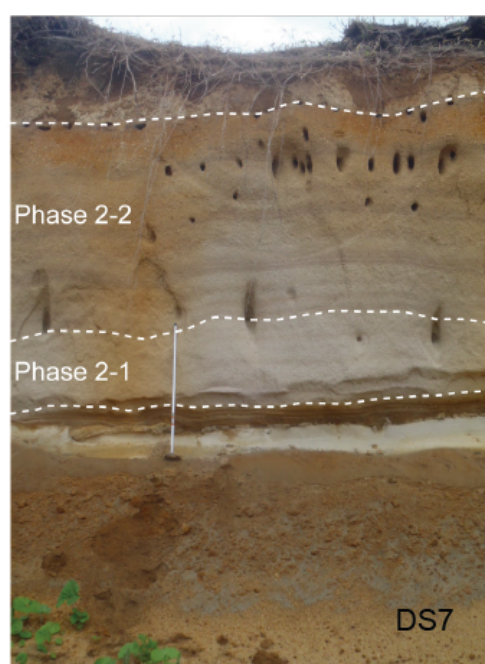
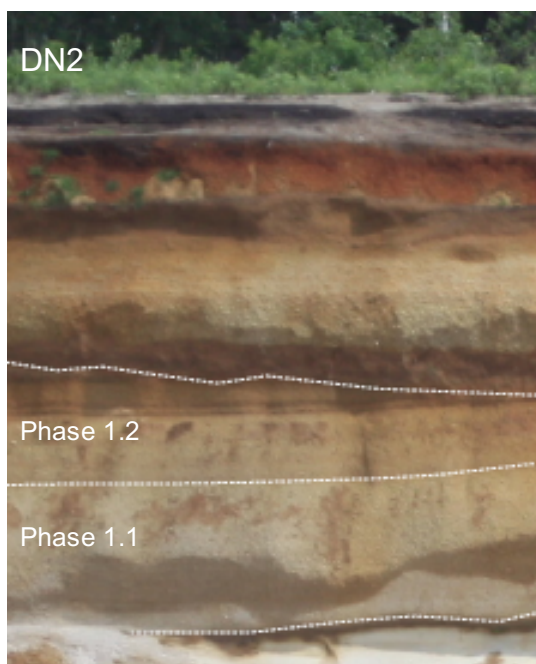
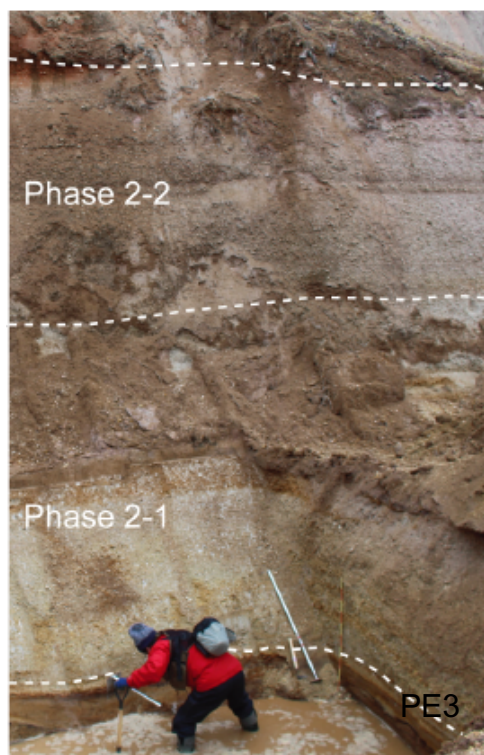
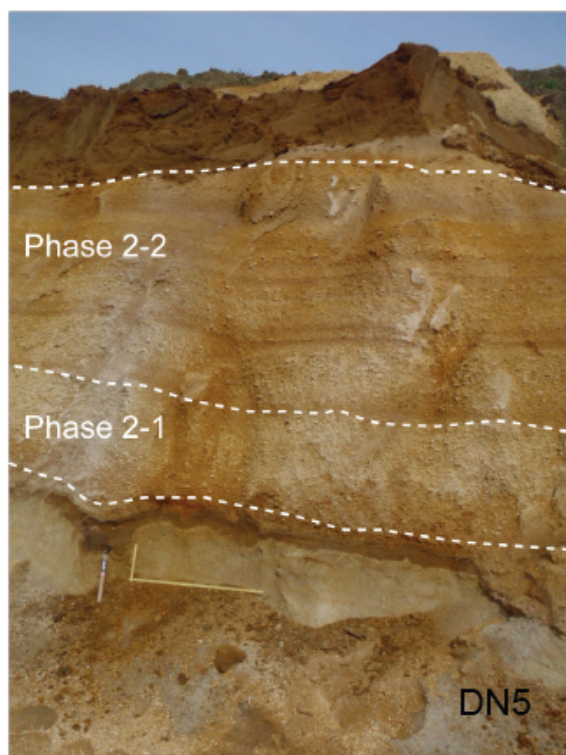


図 1.1-31. PhaseII 噴出物の露頭写真.

サージ堆積物の発見

約 4 万年前の支笏カルデラ形成噴火は、マグマ水蒸気噴火期の PhaseI, 大規模なプリニー式噴火による降下軽石堆積物卓越層から火砕流堆積物卓越層への移行期である PhaseII, 大規模火砕流堆積物噴出期の PhaseIII, 厚い岩片濃集層を伴う火砕流堆積物噴出期である PhaseIV, 大規模噴火終息期の PhaseV に分けられ, PhaseII と PhaseIII の間には浸食間隙があることが明らかになっている(図 1.1-26, 図 1.4-27). これまでの研究により, PhaseIII 堆積物は支笏湖東方では約 30 km 程度まで分布している(図 1.1-4)とされてきたが, 今年度の地表調査により支笏湖北東約 40 km の DN3 地点や支笏湖北東約 40 km の DC 地点などで厚さ数十 cm の火砕流堆積物があること, またその直上にサージ状の堆積物を発見した. これらは支笏湖近傍のボーリングコアなどには確認されておらず, 今後さらに多くの地点で分布を確認していく必要がある.

(4) まとめ

- ・支笏・洞爺火山地域では中期更新世から続いた安山岩質の火山活動が 0.6~0.5 Ma には終了し, その後約 40 万年間の休止期を経て, 約 13 万年前に洞爺火山, 約 12 万年前には羊蹄火山南東の尻別火山が珪長質火山活動を開始したことが明らかになった. その後活動は東へ広がり, クッタラ火山は約 9 万年前, 支笏火山は約 8.5 万年前に噴火を開始し, 続いて羊蹄火山も約 7.5 万年前には活動を始めた. 支笏・洞爺火山地域の火山活動は, 数万年程度の休止期をはさんで 13~11 万年前, 9.5~7.5 万年前, 6~4 万年前の大きく 3 つに区分される.
- ・社台期大規模火砕噴火噴出物は, 下位から主に白色~灰色軽石からなる降下軽石堆積物(Ssfa-I), 細粒の降下火山灰堆積物(Ssfa-II), 主に灰色軽石とスコリアからなる降下火砕堆積物(Ssfa-III), 少量の軽石を含む降下スコリア堆積物(Ssfa-IV), 軽石・縞状軽石・スコリアなどからなる火砕流堆積物(Ssfl)の大きく 5 つのユニットに分けられる. 全体としては白色軽石主体のプリニー式噴火の後, 噴出率は急減, その後苦鉄質マグマの割合が増加するに従って噴出率も上昇し最後に火砕流噴火へ移行したと考えられる. 社台期大規模火砕噴火噴出物のガラス組成は, 白色軽石については Ssfa, Ssfl は類似しているのに対して, スコリアについては Ssfa と Ssfl で組成が異なり, Ssfa のスコリアガラス組成は時間とともに次第に SiO₂ に乏しくなる傾向が認められた.
- ・カルデラ形成期噴火は, マグマ水蒸気噴火期の PhaseI, 大規模なプリニー式噴火による降下軽石堆積物卓越層から火砕流堆積物卓越層への移行期である PhaseII, 大規模火砕流堆積物噴出期の PhaseIII, 厚い岩片濃集層を伴う火砕流堆積物噴出期である PhaseIV, 大規模噴火終息期の PhaseV に分けられていたが, 詳細な地質調査を行った結果, PhaseI 噴出物はさらに 3 つのユニットに分けられ噴火最初期には薄く広く高温のプラスト状堆積物が覆ったと考えられる. また, PhaseII 噴出物はこれまで 3 つのユニットに分けられていたが, 遠方では下位の 2 つのユニットのみが認められ, ユニットごとに主軸が異なることが明らかになった. さらに, 支笏湖から 40 km 以上離れたいくつかの地点において, 火砕流堆積物の上位にサージ堆積物を新たに発見した.



図 1.1-32. サージ堆積物の露頭写真.

引用文献

- 青木かおり・町田洋(2006). 日本に分布する第四紀後期広域テフラの主元素組成-K₂O-TiO₂ 図によるテフラの識別. 地質調査所研究報告, 57, 239-258.
- Chapman, M.E., Solomon, S.C., 1976. North America-Eurasia plate boundary in northeast Asia. *Journal of Geophysical Research* 81, 921-930.
- 廣瀬亘・中川光弘(1999). 北海道中央部～東部の新第三紀火山活動：火山学的データおよび全岩化学組成からみた島弧火山活動の成立と変遷. 地質学雑誌, 105, 247-265.
- 廣瀬亘・岩崎深雪・中川光弘(2000). 北海道中央部～西部の新第三紀火山活動の変遷：K-Ar 年代, 火山活動様式および全岩化学組成から見た東北日本弧北端の島弧火成活動の変遷. 地質学雑誌, 106, 120-135.
- 春日井昭・藤田亮・細川貢史朗・岡村聡・佐藤博之・矢野牧夫(1980). 南部石狩低地帯の後期更新世のテフラ-斜方輝石の屈折率と Mg-Fe 比との比較研究-. 地球科学, 34, 1-15.
- 加藤茂弘・山縣耕太郎・奥村晃史(1995). 支笏・クッタラ両火山起源のテフラに関する加速器質量分析(AMS)法による ¹⁴C 年代. 第四紀研究, 34, 309-313.
- 勝井義雄(1959). 支笏降下軽石堆積物について,特に支笏カルデラ形成直前の活動について. 火山, 2, 33-48.
- 勝井義雄・横山泉・岡田弘・我孫子勤・武藤春達(1988). 倶多楽 (日和山). 北海道防災会議, 99p.
- Machida, H. 1999. Quaternary widespread tephra catalog in and around Japan: Recent progress. *The Quaternary Research* 38, 194-201.
- 町田洋・新井房夫 (2003). 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, 336p.
- Miura, D., Uesawa, S., Takeuchi, S. (2016). Kuttara volcanic complex and ignimbrites. IWCC 6 Excursion Guide Book, 19-25.
- 森泉美穂子(1998). クッタラ火山群の発達史. 火山, 43, 95-111.
- 中川光弘・上澤真平・坪井宏太(2011). 南西北海道, 尻別火山起源の喜茂別火砕流と洞爺火砕流の偽層序関係. 日本火山学会 2011 年秋季大会講演予稿集, 66.
- 佐瀬隆・山縣耕太郎・細野衛・木村準(2004). 石狩低地帯南部, テフラ-土壌累積層に記録された最終間氷期以降の植物珪酸体群の変遷-特にササ類の地史的動態に注目して-. 第四紀研究, 43, 389-400.
- Seno, T., 1985. Is northern Honshu a microplate? *Tectonophysics* 115, 177-196.
- 曾屋龍典・佐藤博之(1980). 千歳地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 図幅). 92p.
- Uesawa, S., Nakagawa, M., Umetsu, A. (2016). Explosive eruptive activity and temporal magmatic changes at Yotei Volcano during the last 50,000 years, southwest Hokkaido, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 325, 27-44.
- 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.

1.2 十和田カルデラの事例調査

【実施内容】

十和田カルデラでは6～1.5万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28年度は、カルデラ形成準備期にあたる6万年前以前の先カルデラ期について、噴出物の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、より詳細な噴火活動史を構築した。また、先カルデラ期以前の第四紀火山岩を対象として、各種放射年代測定を実施し、十和田火山の活動とそれ以前の火山活動を区分するとともに、十和田火山活動以前の第四紀火山活動時空変遷を明らかにした。その結果、十和田火山の活動開始を20万年前と特定でき、それ以前には約30万年間の活動休止期があることを明らかにした。さらに、平成27年度に引き続き、噴出物の微量元素組成・同位体比の測定を行ない、十和田火山噴出物の化学組成データをほぼ網羅した。その結果、昨年度判明した、カルデラ形成噴火前後のマグマ組成の特徴の違いをより詳細に把握することができた。

【研究成果】

(1) 先カルデラ期噴火活動史の詳細化

はじめに

十和田火山先カルデラ期噴出物の給源近傍相については、本委託研究によるこれまでの調査及び5万分の1地質図幅「十和田湖」作成のための調査結果により、従来よりも詳細な地質層序が明らかにされつつある。他方、給源遠方（上北平野）におけるテフラ層序については、既に詳細が判明しており（Hayakawa, 1985; 松山・大池, 1986; 中川ほか, 1986）、その堆積年代についても比較的精度良く決定されつつある（Matsu'ura et al., 2014; Ito et al., submitted; 工藤未公表データ）。しかしながら、給源近傍相と遠方テフラの対比については、未だ十分には行われていない。十和田火山の階段ダイアグラムの高精度化のためには、給源近傍相と遠方相の対比を行ない、年代データの乏しい給源近傍相に年代軸を入れるとともに、給源近傍相と遠方相を合わせて噴出量を見積もり直すことが必要である。そこで今回、先カルデラ期噴出物の給源近傍相と遠方相の対比を目的として、前年度から引き続き、火山ガラスの主成分元素分析を行なった。ここでは、その結果を報告するとともに、階段ダイアグラムを改訂し、先カルデラ期の噴火活動史について考察を行なった。

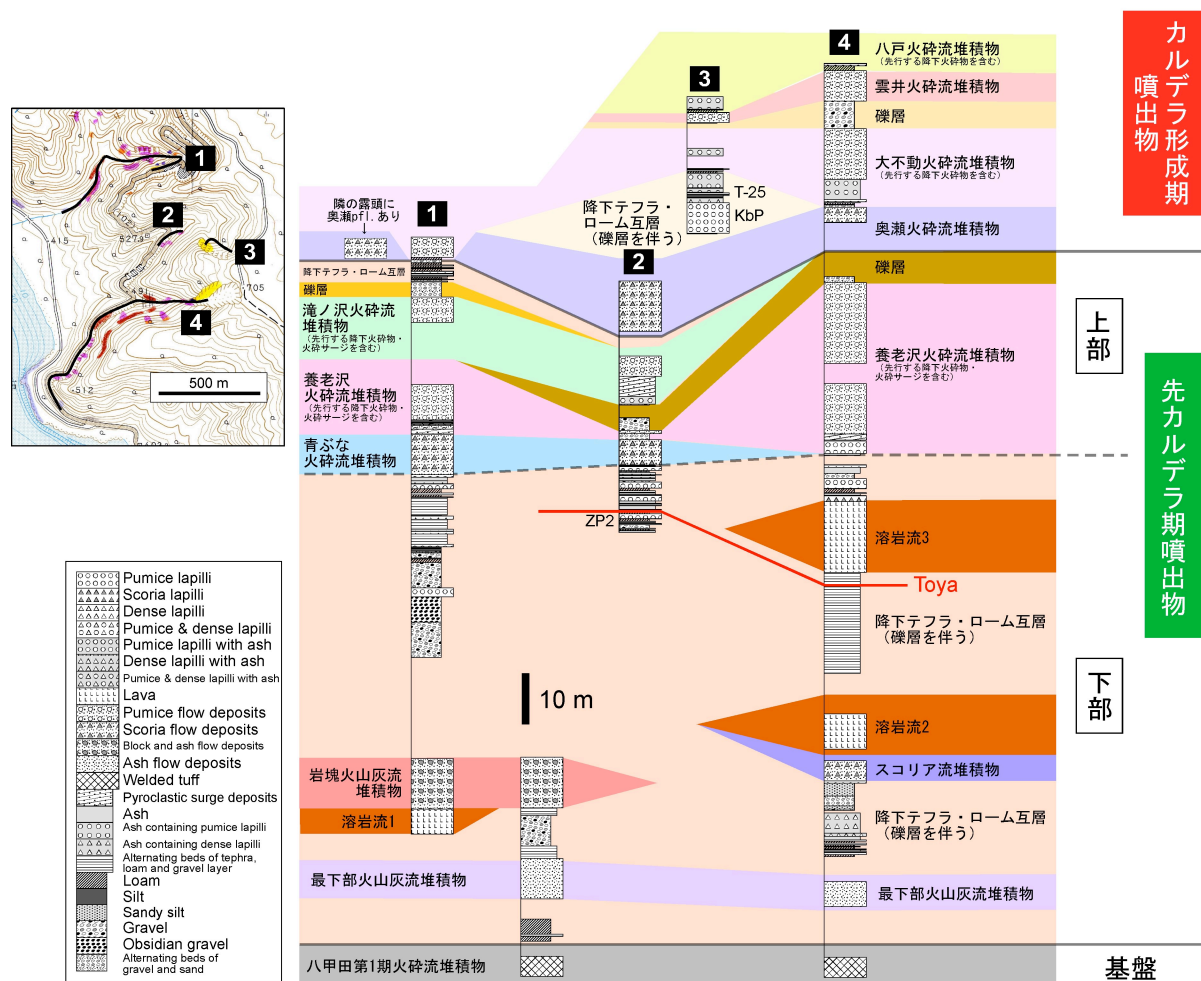


図 1.2.1 十和田カルデラ北東壁（青樫山付近）の地質層序. 5 万分の 1 地質図幅「十和田湖」の調査による未公表データを含む. 左上の位置図に国土地理院発行の 2 万 5 千分の 1 地形図「十和田湖東部」「陸奥焼山」を利用した.

層序・地質記載

図 1.2.1 に十和田カルデラ北東壁付近の地質層序を示す. この付近では, Hayakawa (1985) により命名された先カルデラ期の火山体の 1 つである「青樫火山」の断面が露出している. この付近は, 地層がほぼ水平～北東に 10° 緩傾斜していること, 火砕堆積物が大部分を占めるが, 溶結相が認められないことから, 火口からある程度離れた山麓緩斜面であったと推定される. 露出は断続的ではあるものの比較的良好で, 広域テフラである Toya (町田ほか, 1987) を挟在すること (Hayakawa, 1985; 早川, 1993) も含め, 先カルデラ期噴出物の層序確立のために適した場所の 1 つである.

この付近では, 約 76 万年前の八甲田第 1 期火砕流堆積物を基盤として, これを層厚 250 m 程度の十和田火山噴出物が覆う (図 1.2.1). このうち, 先カルデラ期噴出物の層厚は 140 m に達する. この付近の先カルデラ期噴出物は, 降下テフラ・ローム互層を主体として溶岩流及び火砕流堆積物を挟む下部と, 火砕流堆積物を主体とする上部に区分することができる (図 1.2.1).

先カルデラ期噴出物下部は, 降下テフラ・ローム互層（しばしば礫層を伴う）を主体とし, 少

なくとも 3 枚の玄武岩質安山岩～安山岩溶岩流と 3 枚の火砕流堆積物（スコリア流堆積物・岩塊火山灰流堆積物）を挟む（図 1.2.1）. このうち、最上位の溶岩流直下の層準に Toya が挟在する（図 1.2.1）.

先カルデラ期噴出物上部は、火砕流堆積物を主体とし、火砕サージ堆積物、降下テフラ及び礫層を伴う（図 1.2.1）. 火砕流堆積物は、軽石流あるいはスコリア流堆積物からなり、少なくとも 3 枚識別できる. 層厚はそれぞれ 10～30 m 程度である. これらの火砕流堆積物を、下位より、青樫火砕流堆積物、養老沢火砕流堆積物、滝ノ沢火砕流堆積物と命名した（図 1.2.1）. これらは、今回の一連の研究により初めて認識されたものであり、従来はカルデラ形成期の奥瀬火砕流堆積物あるいは大不動火砕流堆積物に一括されていたものと推測される. 以下に、各火砕流堆積物の層相・分布・体積について、記載を行なう.

青樫火砕流堆積物：長径 10 cm 以下の黒色スコリア、白色軽石、両者が混じった縞状スコリア火山礫と、基質の火山灰からなるスコリア流堆積物である. 火山礫はスコリアが最も多く、軽石が最も少ない. Toya よりも上位層準にあり、ローム層や再堆積物層を挟んで養老沢火砕流堆積物に覆われる（図 1.2.1）. 層厚は最大 8 m で、十和田カルデラ北東壁付近のみに分布する（図 1.2.2）. 平均層厚 6 m と推定分布域を乗じて求めた体積は、 0.07 km^3 （DRE）である.

養老沢火砕流堆積物：長径 20 cm 以下の灰色～白色軽石火山礫と基質の火山灰からなる軽石流堆積物である. 場所により、灰色軽石のみからなる場合、白色軽石のみからなる場合、両者を含む場合があることから、フローユニットによって含まれる軽石のタイプが異なる可能性がある. 青樫火砕流堆積物をローム層または再堆積物を介して覆い、礫層を挟んで滝ノ沢火砕流堆積物に覆われる（図 1.2.1）. 層厚は最大 30 m である. 直下に降下軽石堆積物や火砕サージ堆積物を伴うことがある. 十和田カルデラの北東、北西及び南西～南方と、カルデラ全周にかけて比較的広く分布する（図 1.2.2）. 平均層厚 7.5 m と推定分布域を乗じて求めた体積は、 0.48 km^3 （DRE）である.

滝ノ沢火砕流堆積物：長径 15 cm 以下の灰色軽石火山礫と基質の火山灰からなる軽石流堆積物である. 養老沢火砕流堆積物を礫層を介して覆い、カルデラ形成期最初の噴出物である奥瀬火砕流堆積物よりも下位層準にある（図 1.2.1）. 層厚は最大 10 m である. 直下に降下軽石堆積物や火砕サージ堆積物を伴うことがある. 養老沢火砕流堆積物と非常によく似た層相を示すが、滝ノ沢火砕流堆積物の軽石の方がより斑晶量が少ない特徴がある. 十和田カルデラの北東、北西及び南方に分布し、養老沢火砕流堆積物よりは分布域が狭い（図 1.2.2）. 平均層厚 6 m と推定分布域を乗じて求めた体積は、 0.18 km^3 （DRE）である.

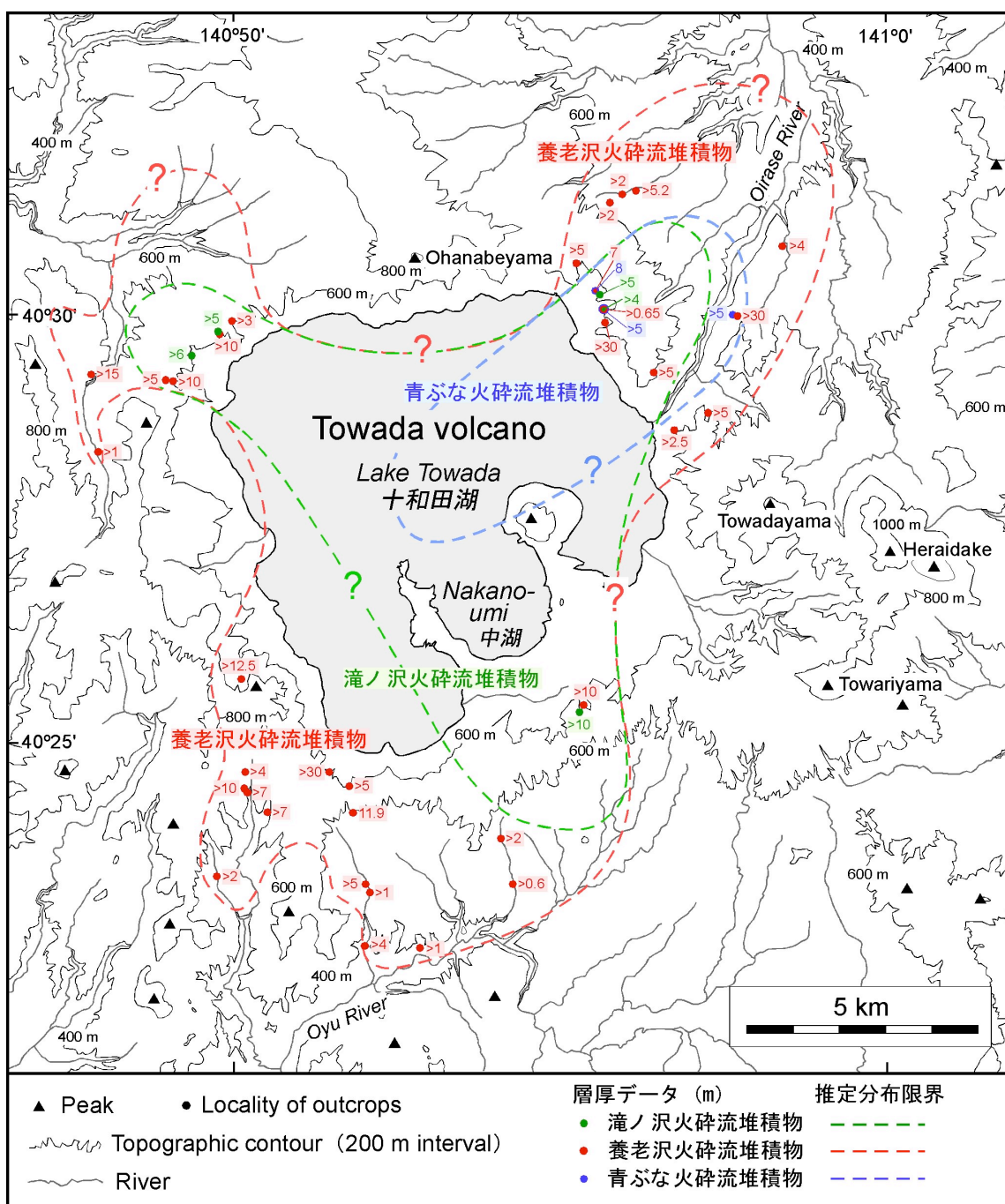


図 1.2.2 先カルデラ期火砕流堆積物の分布. 5 万分の 1 地質図幅「十和田湖」の調査による未公表データを含む.

主成分元素全岩化学組成

先カルデラ期噴出物の全岩化学組成ハーカー図を図 1.2.3 に示す. なお, 全岩化学組成のデータは, 2014 年度委託研究と 5 万分の 1 地質図幅「十和田湖」の調査研究によるものである. 先カルデラ期噴出物は $\text{SiO}_2=52.8\sim71.5$ wt.% の玄武岩質安山岩～流紋岩からなる. 従来の研究 (Hunter and Blake, 1995 など) では, 先カルデラ期噴出物は玄武岩質安山岩～安山岩からなると報告されてきたが, 実際にはデイサイト～流紋岩組成のものが存在し, その組成幅は十和田火山全噴出物の組成幅に匹敵する.

先カルデラ期噴出物上部の 3 枚の火砕流堆積物については, それぞれが異なる組成領域を示し, 全

岩化学組成から識別することが可能である（図 1.2.3）．また，養老沢火砕流に伴う降下軽石堆積物及びそれと同時期と推定される降下軽石堆積物については，組成領域が養老沢火砕流堆積物と非常に良く一致する．十和田火山のカルデラ形成期～後カルデラ期では，噴火エピソード毎にマグマ組成が異なることが知られているが（工藤，2010a；2014～15 年度委託研究），その特徴は先カルデラ期でも同様である．

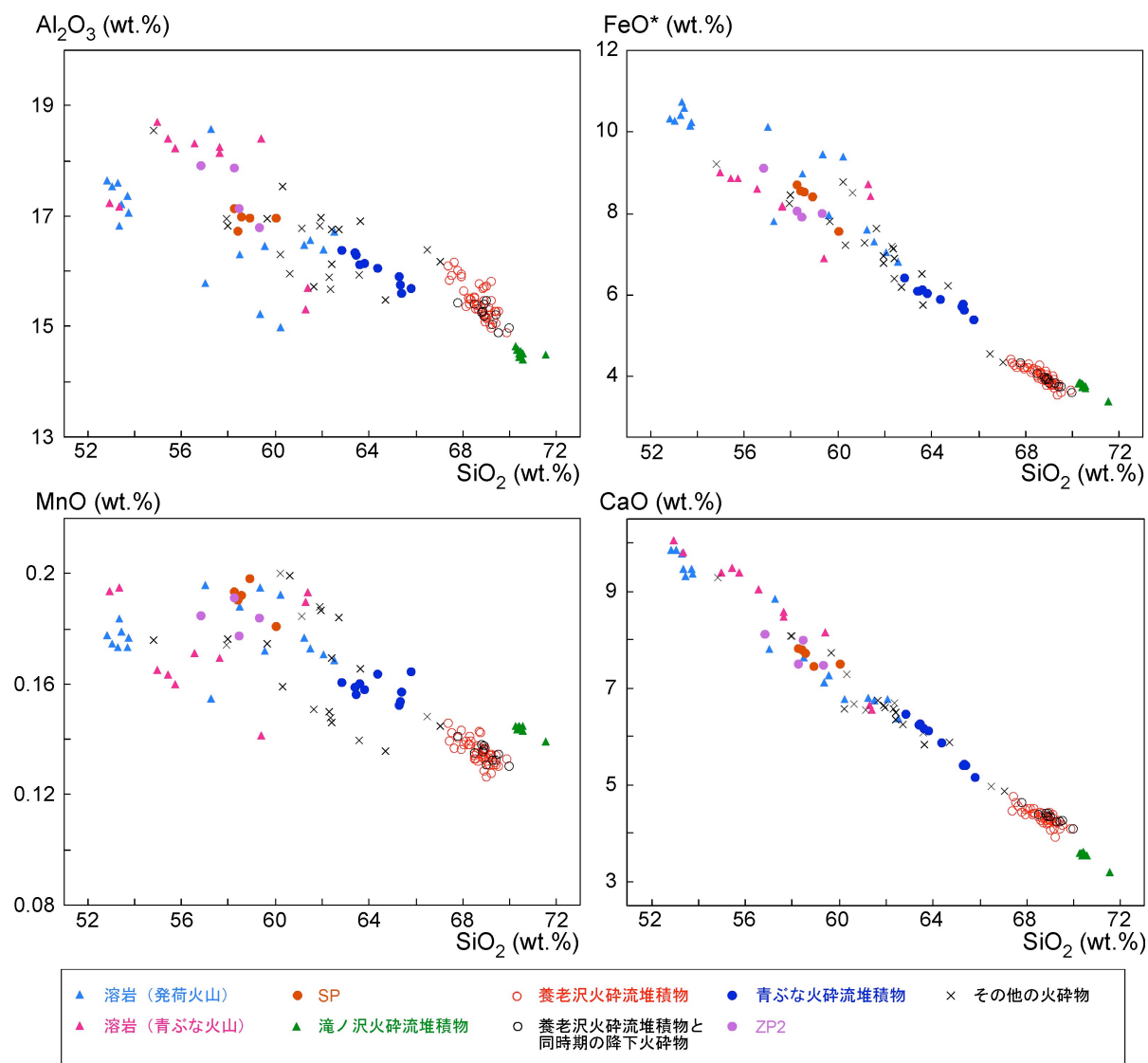


図 1.2.3 先カルデラ期噴出物の主成分全岩化学組成ハーカー図．

火山ガラス主成分元素分析

分析手法

火山ガラス主成分元素分析は，（株）古澤地質に依頼した．試料は，いずれもテフラ中の軽石礫であり，給源近傍相から 6 試料，遠方相から 5 試料を選択した．前処理は，古澤（2003）の方法を基本とした．試料を粉砕した後，ナイロン製使い捨て #255 メッシュシート（糸径 43 μm ，オープニングワイド 57 μm ）を用い，流水中で洗浄した．残渣を #125 メッシュシート（糸径 70 μm ，オープニングワイド 133 μm ）を用い水中で篩い分けした．これにより 1/8～1/16 mm に粒度調

整した試料を超音波洗浄機を用いて洗浄し，表面に付着した粘土分などを洗い流した．次に，偏光顕微鏡を用いて試料から火山ガラスのみを手選し，これをエポキシ樹脂を用いてスライドガラス上に包埋し，#3000 カーボランダムで研磨，1 μm のダイヤモンドペーストにて鏡面研磨した薄片を作成した．主成分元素分析には，エネルギー分散型X線マイクロアナライザー（EDX）を用いた．加速電圧は 15 kV，試料電流は 0.3 nA である．4 μm 四方の範囲を約 150 nm のビーム径にて走査させて測定した．スタンダードには高純度人工酸化物結晶（純度 99.99%以上の SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , MnO , MgO ），純度 99.99%以上の単結晶 NaCl , KCl , CaF_2 を用いた．これを，アメリカ標準局 NIST620 ガラス，旧 NISTK-961 ガラスおよび glass-D（沢田ほか，1997）を用いてチェックした．また，ASTIMEX, Taylor などのいわゆる EPMA 用標準物質などでもその精度をチェックした．K についてはニチカ製高純度 Adularia（沢田ほか，1997）を用い，ダブルチェックした．ワーキングスタンダードには AT テフラの火山ガラスを用い，測定時毎に値をチェックした．分析結果を前年度に分析したものと合わせて，図 1.2.4 のハーカー図に示す．

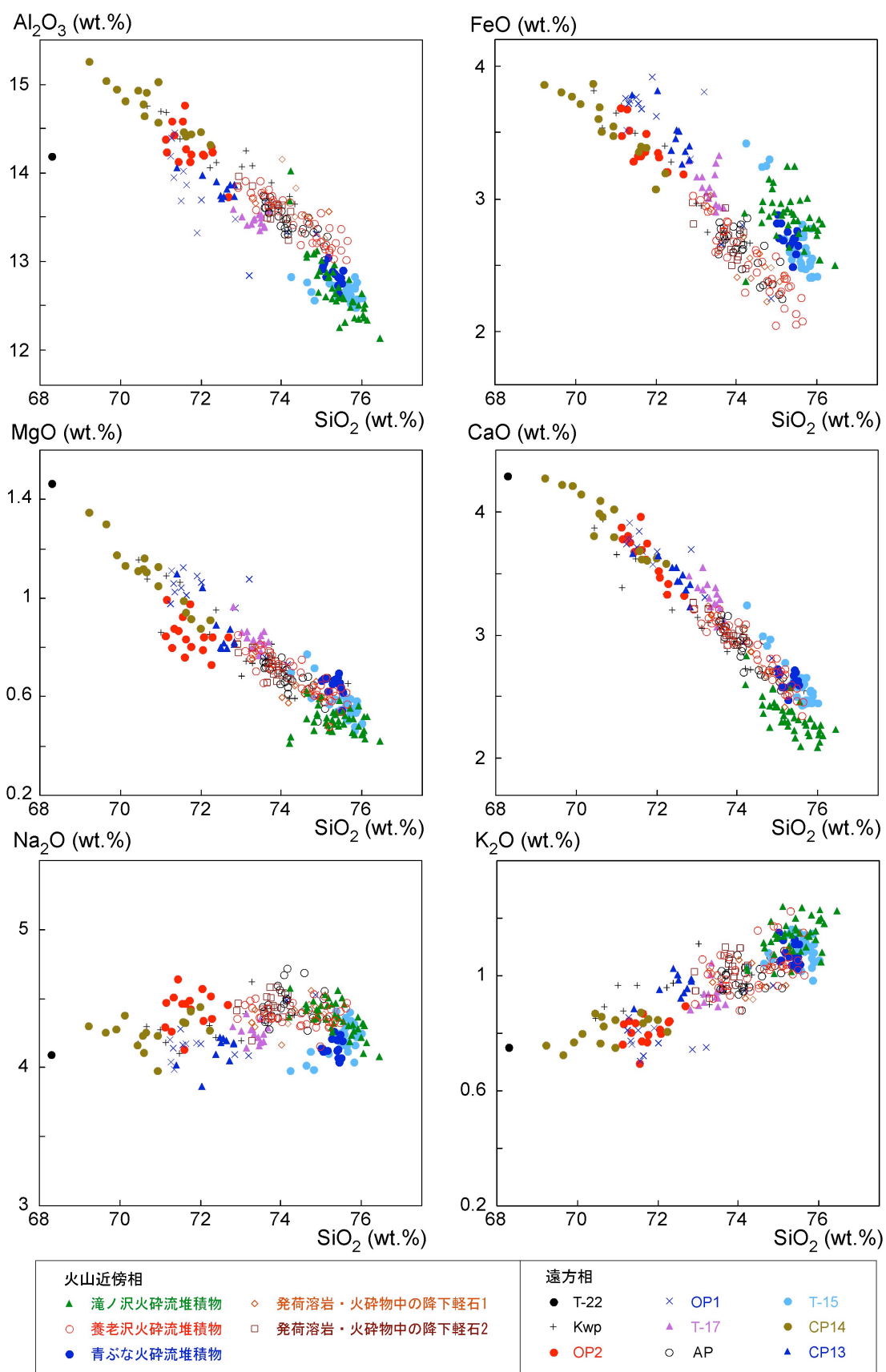


図 1.2.4 十和田火山先カルデラ期噴出物の火山ガラス主成分元素ハーカー図.

分析結果

今年度は、給源近傍相から養老沢火砕流堆積物（3 地点から 3 試料）、滝ノ沢火砕流堆積物（2 地点から 2 試料）、及びカルデラ壁南東（発荷付近）で見られる降下軽石堆積物（1 試料）を、遠方相から降下テフラである Kwp, OP1, AP, T-15 及び CP13（磯，1976；大池・中川，1979；大和，2005）を分析に供した．いずれの噴出物も奥瀬火砕流堆積物・RP よりも下位，Toya（町田ほか，1987）よりも上位の層準に挟在するテフラであり，今回の分析はこれらの層準の対比を目的としている．前年度の委託研究により分析されたデータと合わせると，CP13～RP までの層準では，QP を除く遠方テフラについて，火山ガラス化学組成もしくは全岩化学組成データのどちらかが揃ったことになる（表 1.2.1）．

先カルデラ期噴出物は，多くの元素のハーカー図において，ほぼ一連の組成変化傾向を示し，テフラ毎に SiO₂ 含有量の幅に差が認められる（図 1.2.4）．また，Al₂O₃，FeO，CaO，Na₂O のハーカー図では，一部のユニットで組成トレンドの違いが認められる（図 1.2.4）．例えば，遠方相テフラでは，同じ SiO₂ 量で比較した時に，T-15 は AP よりも FeO 量が多く，Al₂O₃，Na₂O 量が少ない特徴が認められる．

表 1.2.1 先カルデラ期噴出物の給源近傍と遠方での対比表．

給源近傍の火山噴出物							上北平野(給源東方)での降下テフラ					
年代 (ka)	テフラ名	火山ガラス 化学組成	全岩化 学組成	斑晶組み合わせ	体積 (DRE, km ³)		年代 (ka)	テフラ名	火山ガラス 化学組成	全岩化 学組成	斑晶組み合わせ	体積 (DRE, km ³)
60.7	奥瀬火砕流堆積物・RP		○	Pl, Opx, Cpx, Opq	4	←対比→	60.7	RP		○	Pl, Opx, Cpx, Opq	0.76
60.7-88.7	滝ノ沢火砕流堆積物	○	○	Pl, Opx, Cpx, Opq	0.18	相当する遠方テフラなし	68.3	T-22	○		Pl, Opx, Cpx, Opq	0.07
							77.2	SP		○	Pl, Opx, Cpx, Opq	0.3
							80.4	OP2	○		Pl, Opx, Cpx, Opq	0.79
							81.9	OP1	○		Pl, Opx, Cpx, Ol, Opq	1.06
							83.3	QP			Pl, Opx, Cpx, Ol, Opq	0.42
							85.5	T-17	○		Pl, Opx, Cpx, Ol, Opq	0.42
						87	Aso-4			—	—	
88.7	養老沢火砕流堆積物・降下火砕物	○	○	Pl, Opx, Cpx, Opq, ±Ol	0.48	←対比→	88.7	AP	○		Pl, Opx, Cpx, Opq, ±Ol	1.9
91.6	青樫火砕流堆積物	○	○	Pl, Opx, Cpx, Opq, ±Ol	0.07	←対比→	91.6	T-15	○		Pl, Opx, Cpx, Ol, Opq	0.14
91.6-112	溶岩流-3(青樫山)		○	Pl, Opx, Cpx, Opq	?	?	98.3	CP14	○		Pl, Opx, Cpx, Opq	1.21
							99.3	CP13	○		Pl, Opx, Cpx, Ol, Opq	1.16
							100.8	T-13			Pl, Opx, Cpx, Opq	0.12
							102.1	Sc2			Pl, Opx, Cpx, Ol, Opq	0.35
							108.6	Sc1			Pl, Opx, Cpx, Opq	0.13
112	Toya			—	—	←対比→	112	Toya			—	—
114.1	ZP2		○	Pl, Opx, Cpx, Opq	—	←対比→	113.4	ZP2			Pl, Opx, Cpx, Ol, Opq	0.4

給源近傍相と遠方相の対比

前述した火山ガラス化学組成，全岩化学組成及び記載岩石学的データを用いて，給源近傍相と遠方相の対比を行なった．対比関係をまとめたものを表 1.2.1 に示す．

青樫火砕流堆積物は，火山ガラス化学組成と斑晶鉱物組み合わせが T-15 と一致し，その他に特徴が一致する遠方テフラは見つからない（図 1.2.4，表 1.2.1）．よって，青樫火砕流堆積物は，T-15 に対比できると判断される．

養老沢火砕流堆積物は，火山ガラス化学組成と斑晶鉱物組み合わせが AP と一致し，その他に特徴が一致する遠方テフラは見つからない（図 1.2.4，表 1.2.1）．層序関係からも，養老沢火砕流堆積物は青樫火砕流堆積物の 1 つ上位に位置しており，上北平野で AP が T-15 の 1 つ上位に位置する関係と調和的である．以上のことから，養老沢火砕流堆積物は AP と対比できると判断さ

れる。また、カルデラ壁南東（発荷付近）で見られる降下軽石堆積物（2 地点，2 試料）についても、火山ガラス化学組成（図 1.2.4），全岩化学組成（図 1.2.3）及び斑晶鉱物組み合わせの特徴が養老沢火砕流堆積物と AP に一致することから，これらは全て対比できると判断される。

滝ノ沢火砕流堆積物は，養老沢火砕流堆積物の上位，奥瀬火砕流堆積物の下位に位置することから，対比候補となる遠方テフラとしては，下位より T-17，QP，OP1，OP2，Kwp，SP，T-22 がある。しかし，T-17，OP1，OP2，Kwp，T-22 とは火山ガラス化学組成が不一致であり（図 1.2.4），SP と全岩化学組成が不一致で（図 1.2.3），QP と斑晶組み合わせが不一致である（表 1.2.1）。このように，現時点で対比可能な遠方テフラは認められない。滝ノ沢火砕流堆積物は直下に降下軽石堆積物を伴うことから，この噴火で降下テフラがもたらされたことは確実ではあるが，少なくとも上北平野には分布していないと考えられる。

Kwp は岩手山北東麓に分布する降下テフラで，土井（2000）により上北平野に分布する OP2 に対比されると考えられてきた。しかし，Kwp と OP2 の火山ガラス化学組成を比較すると， SiO_2 のレンジは一部で重なるものの，Kwp の方が K_2O 量が若干高く，組成領域が一致しない（図 1.2.4）。Kwp は，他の十和田系テフラと一連のトレンドを成すことから（図 1.2.4），今のところ十和田火山起源であることに疑いはないが，Kwp と OP2 の対比については今後再検討が必要と考えられる。

階段ダイアグラムの改訂と考察

今回，給源近傍に分布する先カルデラ期の火砕流堆積物が 3 枚認識され，そのうちの 2 枚が遠方テフラと対比された（表 1.2.1）。火砕流堆積物の体積を加算して改訂した階段ダイアグラムを図 1.2.5 に示す。なお，この階段ダイアグラムには，今回対比できなかった火砕物や溶岩は含まれていない。今回，後述のように，先カルデラ期噴出物の中に約 90 ka の同時期面を入れることができたので，溶岩類の噴出量を加えて階段ダイアグラムの改訂を行なうことが今後の課題である。

先カルデラ期の顕著な火砕流噴火は，92～60 ka の間に 3 回発生した（図 1.2.5）。これらの火砕流噴火は，10 万年以降の噴出率が上昇した時期，かつカルデラ形成期に先行する時期に発生している（図 1.2.5）。このうち，約 90 ka の養老沢火砕流堆積物は，カルデラ壁のほぼ全周に分布しており（図 1.2.2），体積が 0.48 km^3 （DRE）と比較的規模が大きい。養老沢火砕流堆積物に対比される AP は，噴出量が 1.9 km^3 （DRE）であり，先カルデラ期の中では最も規模の大きな降下テフラである（表 1.2.1）。これに養老沢火砕流堆積物の体積を加算すると，この噴火による総噴出量は 2.4 km^3 （DRE）となる。これまで知られている中では，この噴火が先カルデラ期最大規模の噴火となる（図 1.2.5）。しかしながら，その規模は，カルデラ形成期最初の噴火エピソード Q（噴出量： 4.8 km^3 ，火砕流堆積物だけでも 4 km^3 ）には及ばない。火山活動史全般で見ても，噴出量 4 km^3 （DRE）以上の噴火はカルデラ形成期でしか発生しておらず，カルデラ形成期における噴火規模の大きさが際立っている（図 1.2.5）。

従来，先カルデラ期噴出物は，カルデラ北東壁付近に分布するものに対して「青樫火山」（Hayakawa, 1985）あるいは「青樫火砕物・溶岩」（宝田・村岡，2004），カルデラ南西壁付近に分布するものに対して「発荷火山」（Hayakawa, 1985）あるいは「発荷溶岩・火砕物」（工藤，

2016) という名称で呼ばれ、それぞれが別々の噴出中心からもたらされた産物と見なされてきた (Hayakawa, 1985). それらの火山活動時期については、青樫火砕物・溶岩は 112 ka の Toya を挟むことから 10 万年前前後であることが判明していたが (Hayakawa, 1985), 発荷溶岩・火砕物については長らく不明なままであった. 最近, 工藤 (2016) によって, 発荷溶岩・火砕物から 0.09 ± 0.04 Ma の K-Ar 年代が報告され, 青樫火砕物・溶岩と発荷溶岩・火砕物が, ほぼ同時期の火山活動による産物である可能性が指摘された. さらに今回, 約 90 ka の養老沢火砕流堆積物とそれと同時期の降下火砕物がカルデラ壁全周で確認でき, これが青樫火砕物・溶岩と発荷溶岩・火砕物の双方に挟有されていることが判明した. これは, 「青樫火山」「発荷火山」の双方が, 90 ka の時間面を挟んで同時期に活動していたことを示す. この事実は, そもそも「青樫火山」「発荷火山」という区分自体が妥当なのかどうかという疑問を提示する. かつて Hayakawa (1985) は, 噴火堆積物の分布域と層相の違いから, カルデラ北東側に分布する火砕物主体の「青樫火山」と, カルデラ南西側に分布する溶岩主体の「発荷火山」に区分した. しかしながら, 分布が隔たっている要因は, その後のカルデラ陥没によるものであり, 別々の給源を想定する根拠にはならない. また, 層相の違いについても, カルデラ中心から北東側の青樫山付近で火砕物が卓越し, 南西側の発荷付近で溶岩が卓越するのは, 卓越風の影響を考えれば当然のことである. また, 溶岩が到達するかしないかは当時の地形にも左右される. さらに, 青樫火砕物・溶岩と発荷溶岩・火砕物では, 溶岩の岩石学的特徴に系統的な違いは認められない. 以上のことから, 先カルデラ期において複数の火山・給源を想定すべき積極的な根拠は今のところ見つからない. 「青樫火山」「発荷火山」という区分については, 今後は用いず, 先カルデラ期噴出物として一体化して扱うのが良いと考える.

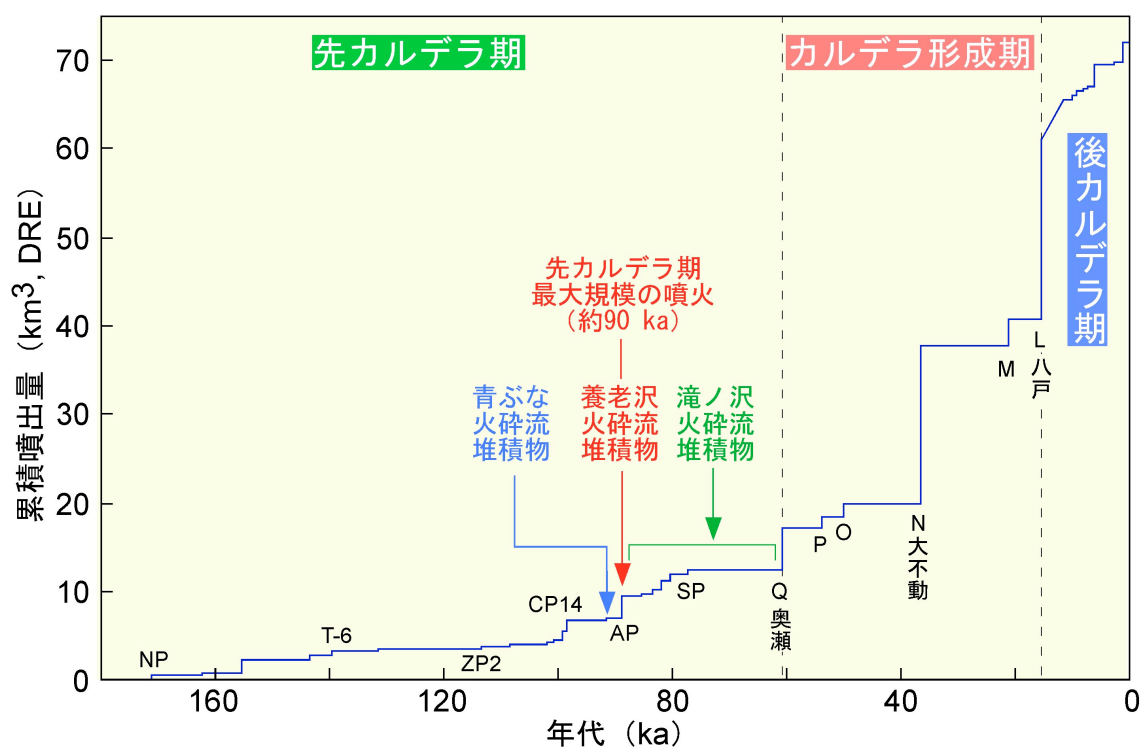


図 1.2.5 十和田火山の階段ダイアグラム. Hayakawa (1985), 中川ほか (1986), 工藤 (未公表データ) 等を用いて作成した.