

平成 25 年度 大規模噴火事例調査

(平成 25 年度 受託事業成果報告書)

平成 26 年 3 月

国立大学法人 北海道大学

目次

1. はじめに

2. 支笏火山の研究史

3. 研究手法

3-1. 地質調査および試料採取

3-2. 室内分析

4. 野外調査結果

4-1. 地質調査結果

4-2. K-Ar 年代測定結果

4-3. 支笏カルデラ形成噴火のテフラ層序

5. 室内分析結果

5-1. 本質物質のタイプ

5-2. 全岩化学組成

5-3. 石基ガラス組成

6. 議論

6-1. 支笏カルデラ形成噴火・最初期の噴出物について

6-2. デイサイト質～流紋岩質マグマ(Aタイプ軽石)の多様性

6-3. 安山岩質～デイサイト質マグマ(Pタイプ軽石)の多様性

7. まとめ

参考文献

表目次

表 1-1. 平成 25 年度業務内容が本報告書で記載されている節.

表 4-1. K-Ar 年代測定結果.

目次

- 図2-1. 北海道南西部のカルデラ火山群.
- 図2-2. 支笏火山噴出物の階段図.
- 図2-3. 支笏カルデラ形成噴火の火砕流分布図.
- 図2-4. 支笏カルデラ形成噴火のマグマ供給系の変遷.
- 図3-1. 支笏湖周辺地域の地形図.
- 図4-1. 露頭全景(白老町森野).
- 図4-2. Spfa1拡大写真(白老町森野).
- 図4-3. Ssfl拡大写真(白老町森野).
- 図4-4. 露頭全景(白老町社台川上流).
- 図4-5. 支笏火山の位置図と支笏カルデラ形成噴火噴出物の露頭位置.
- 図4-6. 支笏カルデラ形成噴火の柱状図.
- 図4-7. 露頭全景(苫小牧市錦岡).
- 図4-8. Spfa1下部のマグマ水蒸気爆発堆積物(苫小牧市錦岡).
- 図4-9. Spfa1とSpflとの境界部(苫小牧市錦岡).
- 図4-10. 露頭全景(千歳市美々).
- 図4-11. Spfa1下部(千歳市美々).
- 図4-12. 露頭全景(千歳市蘭越).
- 図5-1. 全岩SiO₂量と斑晶量との関係.
- 図5-2. 全岩SiO₂量の時間変化.
- 図5-3. 噴火ユニットごとの全岩化学組成のハーカー図.
- 図5-4. Aタイプ軽石の全岩化学組成のハーカー図.
- 図5-5. 噴火ユニットごとの石基ガラス組成のハーカー図.
- 図5-6. Aタイプ軽石の石基ガラス組成のハーカー図.
- 図6-1. 火山灰の薄片写真(オープンニコル).
- 図6-2. 火山灰試料とクッタラカルデラ・支笏カルデラAタイプ軽石との石基ガラス組成の比較.
- 図6-3. 石基ガラス組成の時間変化.
- 図6-4. Aタイプ軽石の多様性.
- 図6-5. Pタイプ軽石の多様性.

1. はじめに

本調査は、火山活動の可能性評価のため、火山活動とその休止期間の関係を火山の特性や地形・地質調査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、火山活動の可能性をより定量的に評価するための基準を作成すること、及び代表的なカルデラの地球物理学的・地球化学的観測データと現象を調査し、火山モニタリングを評価するための基準を作成することを目的とする。大規模噴火準備期の噴出物は、直後の膨大な噴出物で埋没していることが多く、これまでその実態は明らかにされていない。そこで、過去の大規模噴火とその直前の噴出物を対象にしたボーリング掘削を含む地質調査を実施し、大規模噴火前の休止期から準備期へと至る事例を調査する。

上記の目的を達するため、平成25年度は、約4万年前に大規模なカルデラ形成噴火を起こした北海道の支笏カルデラを事例として、これまでの調査結果を整理した上で、長期の火山活動履歴調査のための地表踏査主体の地質調査を行い、支笏湖周辺地域の5火山についてK-Ar法による年代測定を行った。また、支笏カルデラ形成噴火の噴火履歴を詳細に検討するため、3カ所の露頭において層序を記載し噴出物のサンプリングを行った。さらに、次年度以降の研究計画で実施予定のボーリング掘削調査のサイト適地として3カ所を選定した。室内分析では、支笏カルデラ形成噴火噴出物の偏光顕微鏡観察、蛍光X線分析装置(XRF)による数ppm以上の全岩主成分・微量成分分析、電子線プローブマイクロアナライザーによる化学組成分析を実施した。また、2014年度以降実施予定のICP-MSによる微量成分分析および質量分析装置によるSr・Nd同位体比分析のための試料分解・抽出手法を確立するとともに、国内外のカルデラ火山との比較を行うための情報収集等を実施した。

その結果、現在の支笏湖周辺地域の火山はおよそ3.60-0.51Maに活動しており、約40万年の静穏期を経て、支笏火山は6万年前頃に活動を開始したことが示唆された。約4万年前に発生した支笏カルデラ形成噴火はマグマ水蒸気噴火で始まり、プリニー式噴火から大規模火砕流へと移行しており、その噴出物は、斑晶に乏しいデイサイト質一流紋岩質のAタイプ軽石と斑晶に富む安山岩質ーデイサイト質のPタイプ軽石に分類されること、Aタイプ軽石はカルデラ形成噴火を通して噴出し続けているが、Pタイプ軽石は火砕流堆積物の上部ユニットにのみ認められることが確認

された。また、Aタイプ軽石は、降下軽石堆積物、火砕流堆積物の下部ユニット噴出物、火砕流堆積物の上部ユニット噴出物とで組成が異なり、その端成分マグマが時間とともに変化したことを示唆している。一方で、Pタイプ軽石の組成も火砕流堆積物の上部ユニットの中で変化することが明らかになった。

本報告書では、今年度行った調査の内容および結果をまとめるとともに、今後の課題についても報告する。今年度の実施計画における業務内容とその内容が本報告書で記載されている主な節との対応表を表1-1にまとめる。

表 1-1. 平成 25 年度業務内容が本報告書で記載されている節.

業務内容	本報告書の節
長期の火山活動履歴調査	4-1. 地質調査結果
K-Ar法による年代測定	4-2. K-Ar年代測定結果
大規模噴火準備期の噴火履歴の詳細化	4-3. 支笏カルデラ形成噴火のテフラ層序
ボーリング掘削調査のサイト適地の選定	4-1. 地質調査結果
噴出物の観察	5-1. 本質物質のタイプ
全岩化学組成分析	5-2. 全岩化学組成
火山ガラス組成分析	5-3. 石基ガラス組成

2. 支笏火山の研究史

大規模な珪長質マグマ噴火を起こすカルデラ噴火は、人々の生活に壊滅的な被害を与える自然現象のひとつであり、個々のカルデラ火山においてそのマグマ供給系の構造とその時間変化、あるいはマグマの生成メカニズムを明らかにすることは非常に重要である。これまで、1回の噴出量が数100km³を超えるようなカルデラ形成噴火については、特に詳細な地質学的・岩石学的検討が行われており、大量の均質な珪長質マグマに少量の苦鉄質マグマが注入することによって成層マグマ溜まりが形成され噴火に至るというモデルが一般的に提唱されている(Smith, 1979; Christensen and DePaolo, 1993; Streck and Grunder, 1997ほか)。しかしながら、近年の詳細な岩石学的研究により、多くの大規模噴火では親子関係のない独立した複数の珪長質マグマが共存していることが明らかになってきた(板東・中川, 2008; 松本ほか, 2010; Nakagawa et al., 2013など)。

北海道南西部には、支笏カルデラ、洞爺カルデラ、クッタラカルデラなど第四紀に形成されたカルデラが多数存在し、大規模珪長質噴火が繰り返し起こった地域である(図2-1)。山縣(1994)によると、支笏火山は約6万年前に大規模噴火を開始し、スコリア質の降下火砕物(Ssfa)とスコリア流堆積物(Ssfl)を堆積した(図2-2)。その後数千年ごとに爆発的な噴火を繰り返し(Spfa6, Spfa5)、さらに1万年前後の休止期において、約4万年前に最大規模のカルデラ形成噴火が開始した(図2-2 Spfa1 & Spfl)。この噴火はマグマ水蒸気噴火で始まり、プリニー式噴火から大規模火砕流を発生した(勝井, 1959; 山縣, 1994; 町田・新井, 2003)。プリニー式噴火の降下軽石及び火山灰(Spfa)は道南地方を除く北海道全域を覆い、大規模火砕流(Spfl)は全方向に流下した。噴出体積は約400km³と推定され、この噴火によって現在の12km×14kmの支笏カルデラが形成されたと考えられている。支笏カルデラ形成後には、後カルデラ火山として風不死岳(26000年前ー)、恵庭岳(21000年前ー)、樽前山(9000年前ー)が活動しており、特に樽前火山は17世紀以降少なくとも6回のマグマ噴火をおこなっている活動的火山である(古川・中川, 2010)。

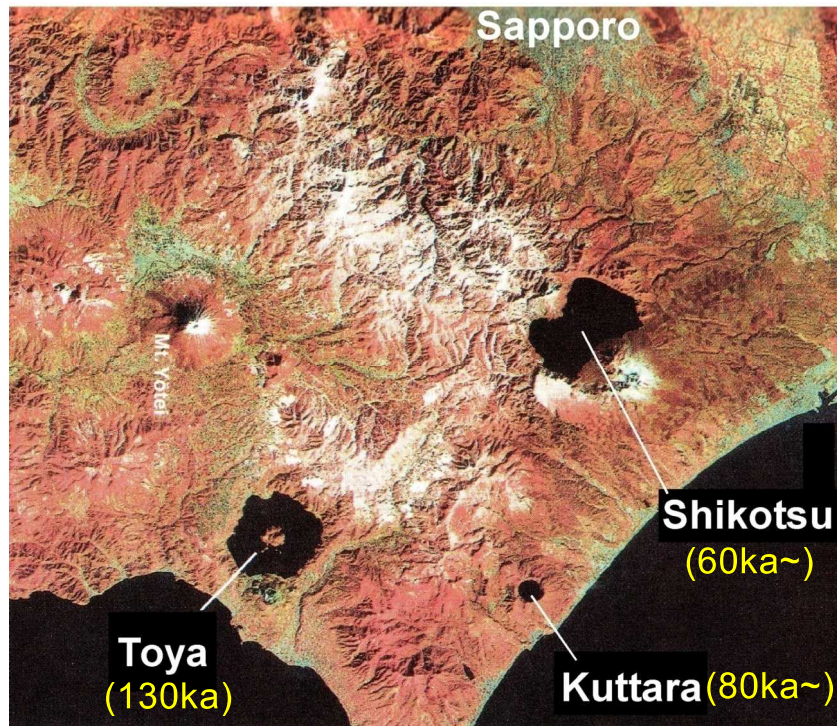


図2-1. 北海道南西部のカルデラ火山群.

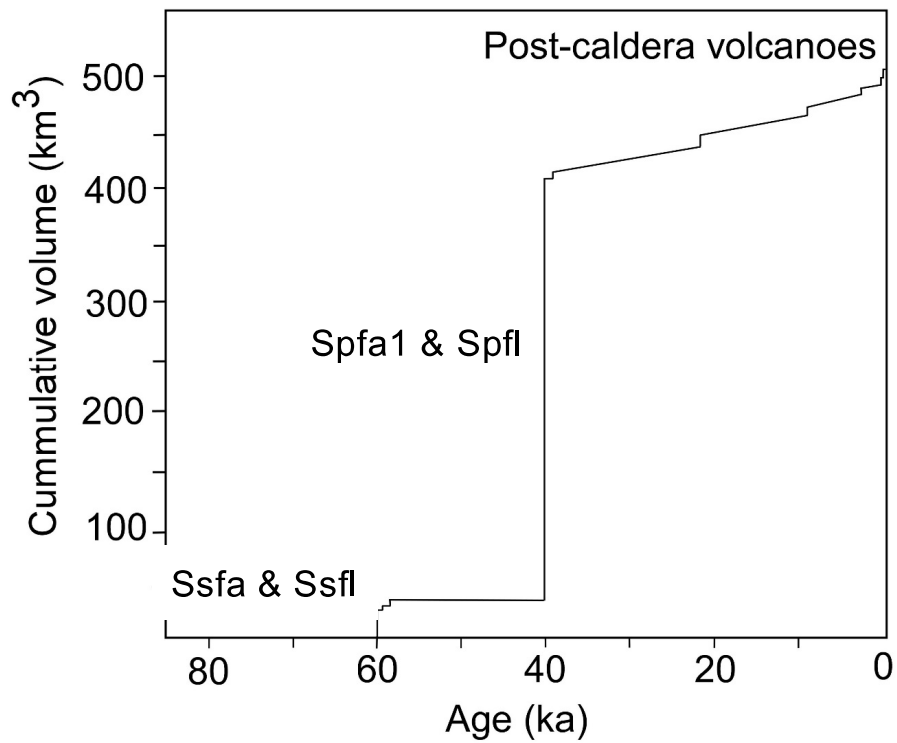


図2-2. 支笏火山噴出物の階段図.

山縣(1994)を加筆・修正.

支笏カルデラ形成噴火の噴出物は、下位の降下軽石堆積物(Spfa1)と上位の火砕流堆積物(Spfl)からなり(勝井, 1959), 北川(2000MS)によりSpflはさらにLowerユニットとUpperユニットに細分された(図2-3). 北川(2000MS)は, カルデラ形成噴火のすべての噴火ユニットについて岩石学的研究を行い, 本質物質が斑晶に乏しくデイサイト質一流紋岩質のA(aphyric)タイプと斑晶に富み玄武岩質安山岩―デイサイト質のP(porphyrific)タイプに分類されること, 降下軽石堆積物と火砕流堆積物のLowerユニットではAタイプのみが噴出し, 火砕流堆積物のUpperユニットではAタイプに加えてPタイプも噴出していることを明らかにした(図2-4). さらに, それぞれのマグマはマグマ混合によって生成されており, その端成分マグマはAタイプでは流紋岩質マグマとデイサイト質マグマ, Pタイプでは別のデイサイト質マグマと玄武岩質マグマからなる. つまり, 珪長質マグマとして3種類以上の流紋岩―デイサイト質マグマが存在し, それに加えて苦鉄質マグマとして玄武岩質安山岩マグマが存在したと考えられている. このように, 支笏カルデラ形成噴火のマグマ供給系については概要が得られているが, これまでの研究は本質物質のタイプごとのマグマの違いに注目しており, カルデラ形成噴火を通して噴出し続けるデイサイト質一流紋岩質のAタイプマグマの時間変化については言及していない.

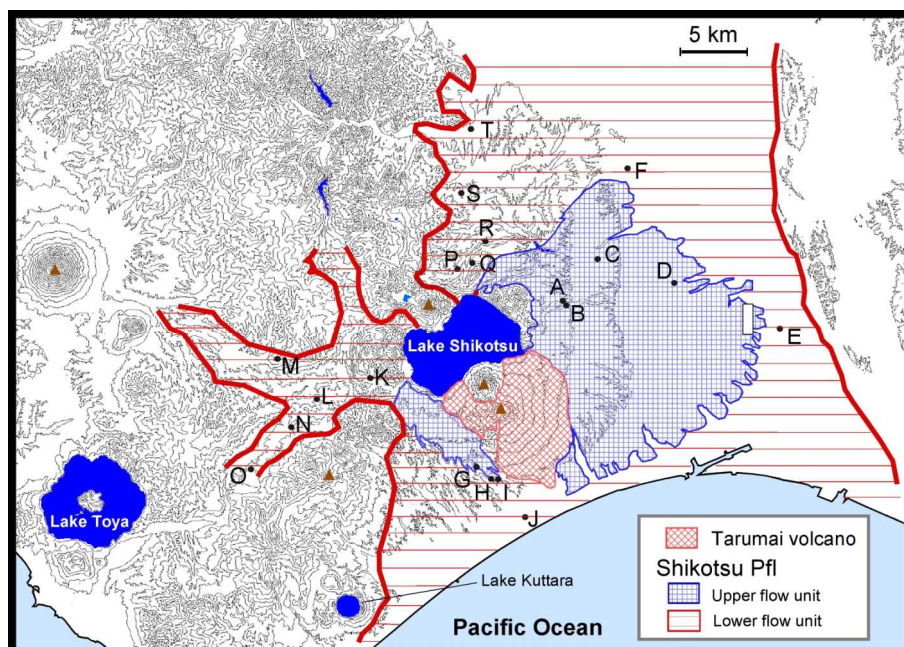


図2-3. 支笏カルデラ形成噴火の火砕流分布図.

北川(2000MS)を加筆・修正.

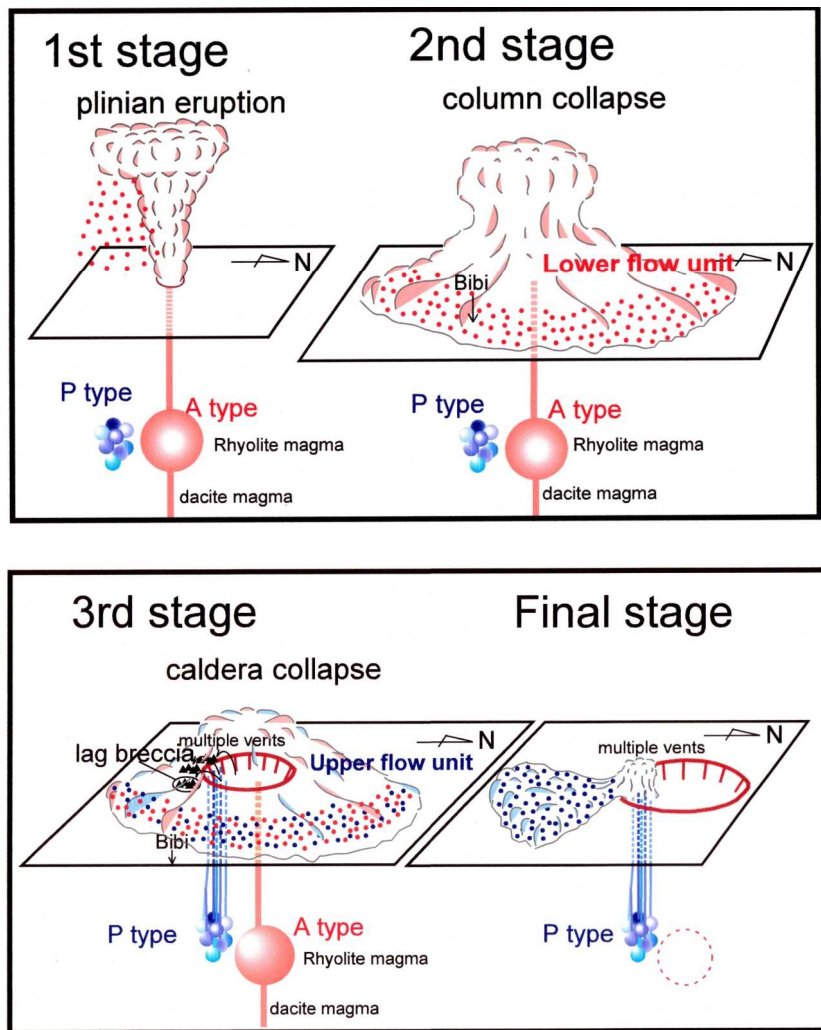


図2-4.支笏カルデラ形成噴火のマグマ供給系の変遷.
北川(2000MS)を加筆・修正.

そこで本年度の調査では、約4万年前に大規模なカルデラ噴火を起こした北海道の支笏火山を対象として、長期火山活動履歴の概要を把握し、特に大規模噴火については最初期から破局噴火、そして噴火の終焉へと至るマグマ供給系の時間変化を地質学的・岩石学的に明らかにすることを主な目的とした。

3. 研究手法

3-1. 地質調査および試料採取

本調査では、支笏火山北部および西部の5火山についてその噴火年代を明らかにするため、できるだけ新鮮な試料を採取した(図 3-1▲). また、支笏火山の噴出物に関しては、図 3-1 の赤線で示した支笏湖北部～東部～南部の広範囲にわたって地表踏査を行い、主要な露頭(図 3-1◆)において6 万年前および4 万年前の大規模噴火噴出物の層序を調査した. 特に4 万年前のカルデラ形成噴火については詳細な柱状図を作成し、噴出物の時間変化を検討するために約 200 個の試料を採取した. なお、次年度以降の研究計画に備え、6 万年前の大規模噴火噴出物については気象庁のボーリング試料を収集するとともに、ボーリング掘削調査のサイト適地として3カ所を選定した(図 3-1★).

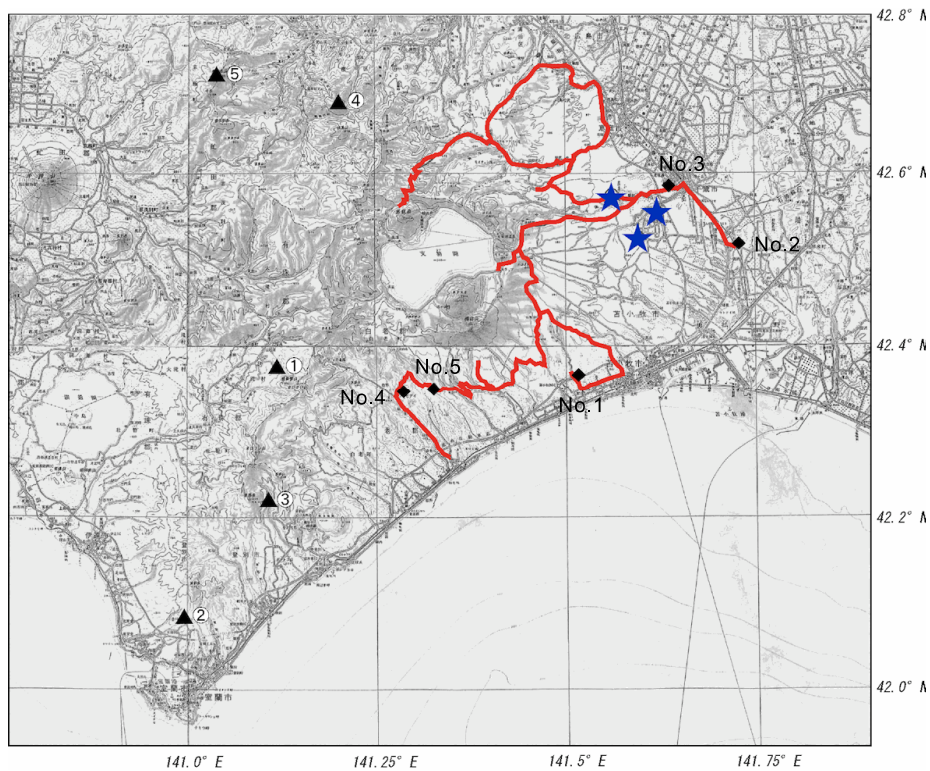


図 3-1. 支笏湖周辺地域の地形図.

赤線: 地表踏査ルート, ▲①～▲⑤: K-Ar 年代測定試料採取地点,
◆No.1～◆No.5: 主要な露頭地点, ★: ボーリング掘削調査候補地.

3-2. 室内分析

支笏火山周辺の5火山から採取した岩石について、K-Ar法による年代測定を実施した。サンプルの処理および分析は、株式会社蒜山地質年代学研究所に依頼した。

また、支笏カルデラ形成噴火の噴出物を主な対象として、斑晶量分析、全岩化学組成分析、石基ガラス組成分析を行った。また比較のため、クッタラカルデラ噴出物や火山灰土についても石基ガラス組成を測定した。サンプルの処理および分析は、すべて北海道大学大学院理学研究院で行った。斑晶量の測定は、支笏カルデラ形成噴火噴出物の代表的な11試料について行った。洗浄・乾燥した後に軽石を乳鉢で粉碎し、水篩により斑晶鉱物を分離して重量%で測定した。全岩化学組成分析は、162試料について行った。1:2のガラスビードを作成し、主成分元素、微量成分元素について北海道大学理学部の蛍光X線分析装置(Panalytical社製MagiX Pro)を用いて測定した。石基ガラス組成は、クッタラカルデラ噴出物3試料を含む38試料の薄片を用いて、波長分散型EPMA(日本電子社製JXA-8800)でZAF補正法を適用して測定した。測定条件は加速電圧が15kV、電流値は10nAで、ビーム径を10 μ mに広げて測定を行った。

4. 野外調査結果

4-1. 地質調査結果

今年度は、支笏火山噴出物のうち、特に6万年前および4万年前の大規模噴火噴出物について支笏湖周辺地域において地表踏査を行った(図 3-1 赤線)。その結果、支笏湖南部の白老町森野(図 3-1◆No.4)および白老町社台川上流(図 3-1◆No.5)において両者が共存する露頭を発見した。白老町森野においては、約6万年前に噴出した社台火砕流堆積物(Ssfl)の上位に、クッタラ火山起源の降下軽石堆積物(Kt-1)、4万年前支笏カルデラ形成噴火の降下軽石堆積物(Spfa1)、火砕流堆積物(Spfl)が認められる(図 4-1)。本露頭における支笏カルデラ形成噴火の降下軽石堆積物(Spfa1)は火山豆石を多く含む火山灰層であり、マグマ水蒸気爆発によって堆積したものと考えられる(図 4-2)。また、社台火砕流堆積物(Ssfl)の本質物質は、粒径数十cmに及ぶスコリアからなる(図 4-3)。一方で、白老町社台川上流においては、約11万年前に噴出した洞爺カルデラ形成噴火の火砕流堆積物(Toya)、河川堆積物の上位に社台降下スコリア堆積物(Ssfa)および社台火砕流堆積物(Ssfl)、クッタラ火山起源の降下軽石堆積物(Kt-1)、4万年前支笏カルデラ形成噴火の火砕流堆積物(Spfl)が認められる(図 4-4)。本露頭では6万年前の大規模噴火の初期から末期までの一連の噴出物が観察できることから、詳細なサンプリングを行うことにより、今後マグマ供給系の時間変化が明らかになる可能性がある。



図 4-1. 露頭全景(白老町森野).

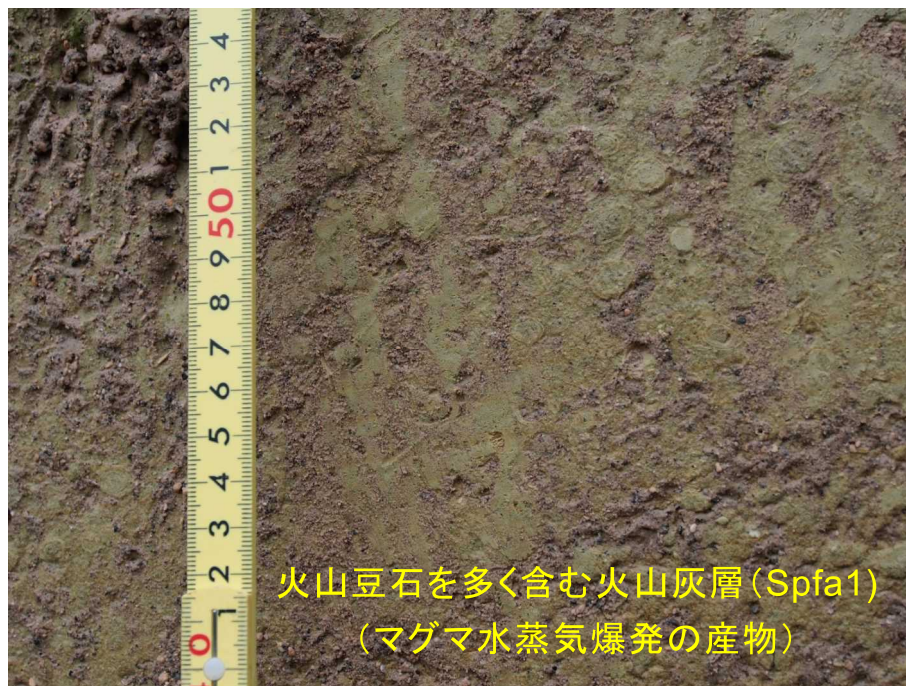


図 4-2. Spfa1 拡大写真 (白老町森野).



图 4-3. Ssfl 拡大写真(白老町森野).



图 4-4. 露頭全景(白老町社台川上流).

4-2. K-Ar 法による年代測定結果

今年度年代測定を行った5試料は、試料番号5の無意根火山をのぞいて、いずれも旧定義による第四紀火山(170 万年より若い)とされてきたものである。しかしながら、札幌岳(試料番号 4)は新定義でも第四紀火山ではなく、より古い鮮新世の火山であることが明らかになった。支笏火山北方の火山は今回の結果で、従来考えられていたよりも活動年代が大幅に古くなる可能性がある。支笏火山の西方に分布する徳峻別ーオロフレ山ー室蘭岳の火山列で南部の室蘭岳が1.9Maと古いが、クッタラ火山周辺の来馬岳や徳峻別岳は0.6~0.5Maの年代値を示した。この結果、支笏火山を含む南西北海道では、来馬岳や徳峻別岳の噴火後に約40 万年の静穏期を経て、13 万年前の洞爺火山の活動から大規模カルデラの活動になった可能性がある。このことを確認するために、更なる年代測定を行う必要がある。

表 4-1. K-Ar 年代測定結果.

試料番号	測定物 (メッシュサイズ)	カリウム含有量 (wt. %)	放射性起源 ⁴⁰ Ar (10 ⁻⁶ cc STP/g)	K-Ar年代 (Ma)	非放射性起源 ⁴⁰ Ar (%)
①	石基 (#60-80)	1.483 ± 0.030	3.56 ± 0.18	0.62 ± 0.03	73.6
②	石基 (#60-80)	0.531 ± 0.011	3.86 ± 0.15	1.87 ± 0.08	65.8
③	石基 (#60-80)	1.349 ± 0.027	2.66 ± 0.14	0.51 ± 0.03	72.3
④	石基 (#60-80)	1.403 ± 0.028	16.24 ± 0.23	2.98 ± 0.07	27.1
⑤	石基 (#60-80)	1.734 ± 0.035	24.22 ± 0.31	3.60 ± 0.09	22.4

4-3. 支笏カルデラ形成噴火のテフラ層序

本研究では、支笏カルデラの南南東約15kmの錦岡(No.1), 東約35kmの美々(No.2), 東北東約25kmの蘭越(No.3)において野外調査を行った(図4-5). その結果, マグマ水蒸気噴火, プリニー式噴火, 大規模火砕流からなる一連の噴出物を確認することができた(図4-6, 長谷, 2014).

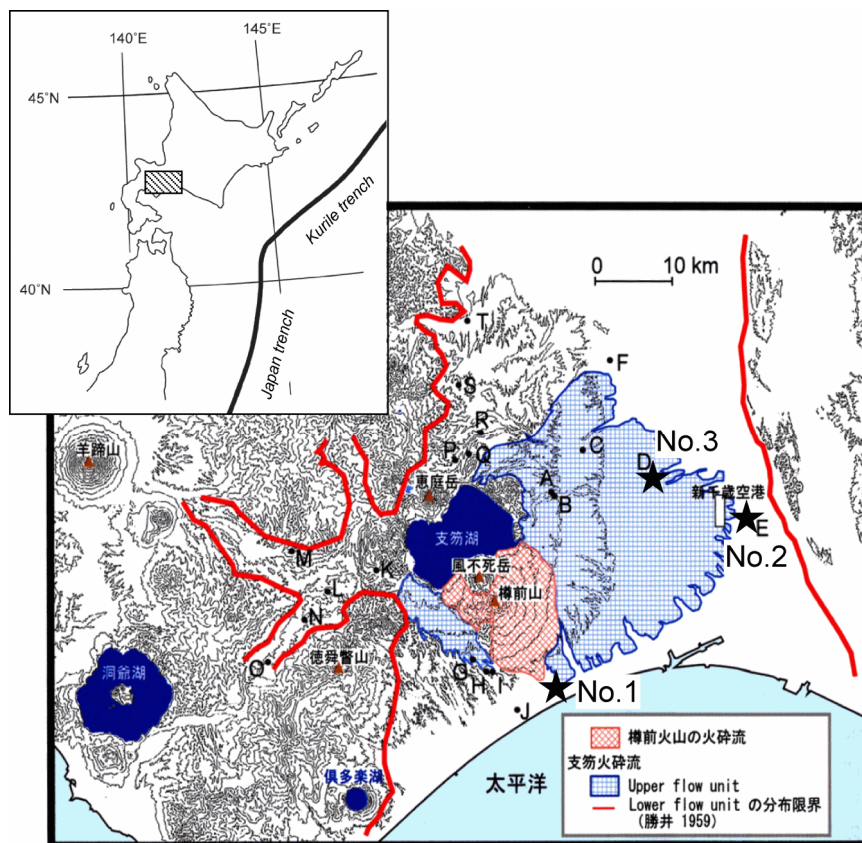


図4-5. 支笏火山の位置図と支笏カルデラ形成噴火噴出物の露頭位置.
北川(2000MS)を加筆・修正. 1-3は本調査, A-Tは北川(2000MS)による露頭位置.

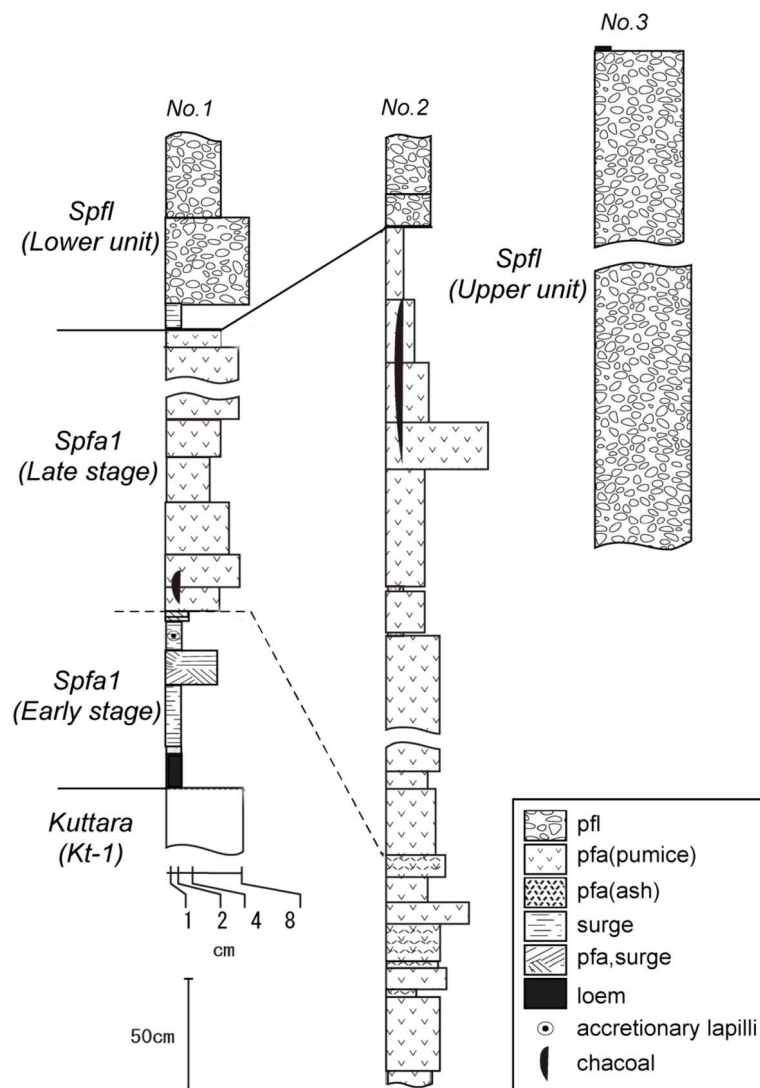


図4-6. 支笏カルデラ形成噴火の柱状図.

露頭位置は図4-5参照.長谷(2014)を一部修正.

4-3-1. 錦岡(No.1)

砂防ダム建設地で新たに露出した露頭である(図 4-5). クッタラ火山起源の降下軽石堆積物(Kt-1)の上位に火山灰土をはさんで(山縣, 1994), マグマ水蒸気噴火によるサージ堆積物とプリニー式噴火による降下軽石堆積物(Spfa1), 火砕流堆積物(Spfl)が認められる(図 4-6, 4-7). Spfa1 の下部ではサージ堆積物と降下軽石堆積物が互層しており(図 4-8), 本研究ではこれらを Spfa1 の初期噴出物として Early ステージ, その上位の降下軽石堆積物のみからなる部分を Late ステージとした.

サージ堆積物には火山豆石・斜交葉理が認められ, 最大粒径 25mm の軽石を含む. これらのサージ堆積物と互層する降下軽石堆積物は火山灰まじりで, 軽石の最大粒径は 60mm である. これらを合わせた Spfa1 Early ステージの層厚は 80cm 程度である. いずれの軽石も白色～黄褐色で全体的に発泡度が低く, 斑晶に乏しい. 色調や軽石の粒径の違いにより 7 層に分類し, 10 箇所からサンプルを採取した.

Spfa1 Late ステージは, 降下軽石堆積物のみからなり, 下部では炭化木が認められた. 層厚は 180cm 程度である. 軽石の最大粒径は 80mm で, 白色で繊維状に発泡しているものが多く, 斑晶量に乏しい. 軽石の粒径の違いにより 7 層に分類し各層からサンプルを採取した.

火砕流堆積物(Spfl)は, 下位に火砕サージ堆積物を伴っている(図 4-9). 軽石の最大粒径は 80mm で, 白色軽石のほか, 灰色軽石, 縞状軽石が認められ, いずれもやや発泡度が低く斑晶量に乏しい. 火砕サージ堆積物 1 層, 火砕流堆積物 2 層の計 3 層に分類し各層からサンプルを採取した. 図 4-5 の火砕流分布図や軽石の斑晶量から, 北川(2000MS)の Lower ユニットに相当すると考えられる.

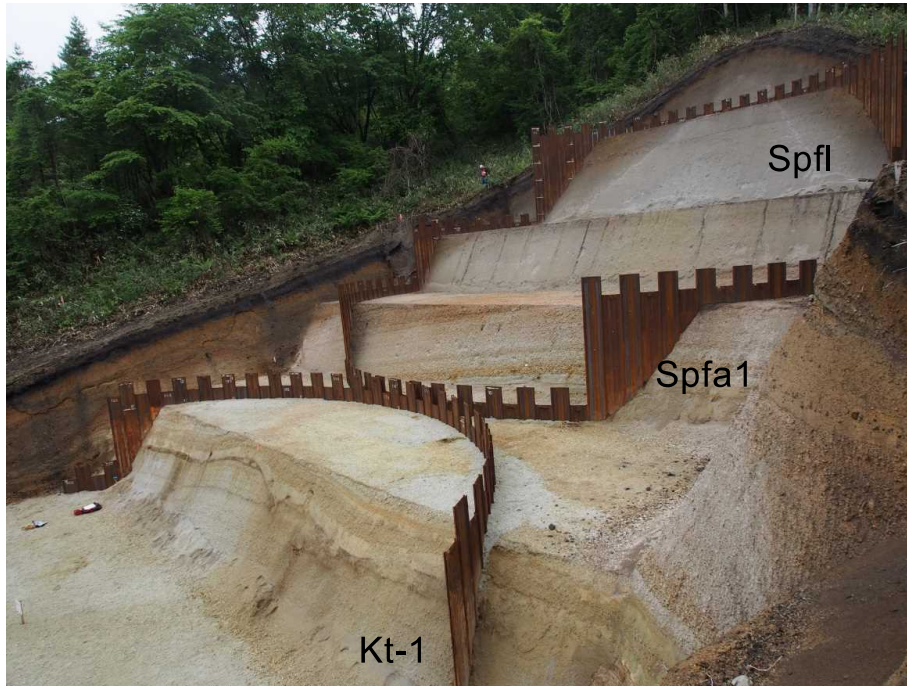


図 4-7. 露頭全景(苫小牧市錦岡).



図 4-8. Spfa1 下部のマグマ水蒸気爆発堆積物 (苫小牧市錦岡).

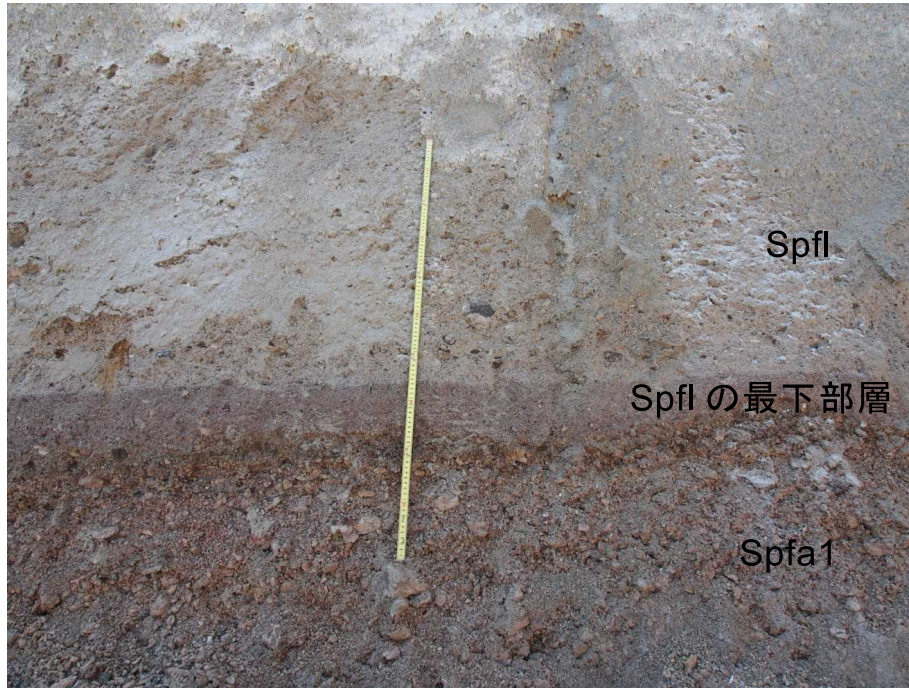


図 4-9. Spfa1 と Spfl との境界部 (苫小牧市錦岡).

4-3-2. 美々(No.2)

北川(2000MS)の E と同じ露頭で、プリニー式噴火による降下軽石堆積物(Spfa1)と火砕流堆積物(Spfl)が認められる(図 4-5, 4-6, 4-10). 降下軽石堆積物の下部は火山灰まじりの層と降下軽石のみからなる層の互層であり, この部分が錦岡(No. 1)の Spfa1 Early ステージに相当する可能性が高い.

Spfa1 Early ステージ堆積物の下限は確認できなかったが(図 4-11), 層厚 100cm 以上である. 軽石の最大粒径は 80mm でオレンジ色ー白色を呈し, 斑晶に乏しく繊維状に発泡しているものが多い. 色調や軽石の粒径の違いにより9層に分類し, 各層からサンプルを採取した.

Spfa1 Late ステージは, 粗粒な降下軽石堆積物からなり層厚は 300cm 程度である. 上部では炭化木が認められた. 軽石の最大粒径は 100mm に達し, いずれも斑晶量に乏しい. 下部の軽石は白色で繊維状に発泡しているものが多いが, 中部ー上部ではピンク色ー灰色を呈するものが多い. 色調や軽石の粒径の違いにより 10層に分類し各層からサンプルを採取した.

火砕流堆積物(Spfl)は層厚 4m 以上で塊状無層理だが, 下部は全体に赤色酸化しており, 次第に白色になっていく. 軽石の最大粒径は 60mm 程度, 褐色または灰色を呈するものが多く, いずれも斑晶量に乏しい. 火砕流堆積物の下部2層からサンプルを採取したが, 上部は採取不可能であったため転石を採取した. この火砕流堆積物は, 北川(2000MS)により Lower ユニットに分類されている.



图 4-10. 露头全景(千歳市美々).

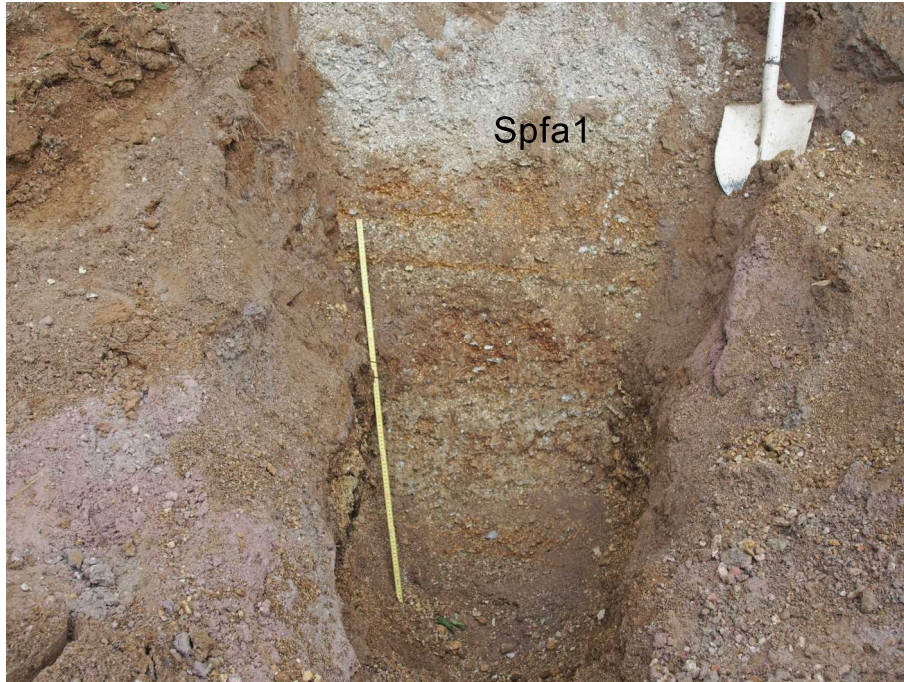


图 4-11. Spfa1 下部(千歳市美々).

4-3-3. 蘭越(No.3)

北川(2000MS)の D と同じ露頭で, Upper ユニットに分類される火砕流堆積物 (Spfl)のみが認められる(図 4-5, 4-6, 4-12). 塊状無層理で, 層厚は 15m 以上である. 露頭における軽石の最大粒径は 80mm 程度であるが, 直径 100mm 以上の転石も認められる. 下部では白色軽石, 灰色軽石のほかにスコリアを含むが, 上部は白色または灰色を呈するものからなる. いずれも斑晶量に乏しいものと富むものが混在している. 露頭の上部と下部2箇所と転石を採取した.



図 4-12. 露頭全景(千歳市蘭越).

5. 室内分析結果

5-1. 本質物質のタイプ

北川(2000MS)では、本質物質である軽石を斑晶量の違いによって、斑晶量5wt%以下のAタイプ軽石と斑晶量20-50wt%程度のPタイプ軽石に分類した。両者は全岩化学組成も異なり、Aタイプは $\text{SiO}_2=73-78\text{wt}\%$ のデイサイト一流紋岩であるのに対して、Pタイプは $\text{SiO}_2=53-70\text{wt}\%$ の玄武岩質安山岩ーデイサイトからなる。さらに、降下軽石堆積物(Spfa1)と火砕流堆積物(Spfl)Lowerユニットの本質物質がすべてAタイプ軽石からなるのに対して、火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニットはAタイプ軽石の他にPタイプ軽石が認められることを明らかにした。

本研究では、マグマ水蒸気噴火、プリニー式噴火、大規模火砕流からなるカルデラ形成噴火の一連の噴出物の時間変化を検討するため、錦岡(No.1)のSpfa1 Earlyステージ噴出物と美々(No.2)のSpfa1 Lateステージ噴出物、錦岡(No.1)・美々(No.2)の火砕流堆積物(Spfl)のLowerユニット、蘭越(No.3)の火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニットについて分析を行った(長谷, 2014)。各噴火ユニットの代表的なサンプルについて斑晶量を測定したところ、 $\text{SiO}_2=74.7-77.6\text{wt}\%$ のデイサイト一流紋岩はすべて斑晶量5wt.%以下、 $\text{SiO}_2=57.6-72.0\text{wt}\%$ の安山岩ーデイサイトは斑晶量7-45wt%となった(図5-1)。斑晶量の差が北川(2000MS)よりも小さいため、本研究においては、軽石タイプの認定は肉眼での斑晶量と全岩化学組成を合わせて行った。噴火ユニットごとの軽石の構成は北川(2000MS)と同様であり、Aタイプ軽石はマグマ水蒸気噴火の噴出物を含む降下軽石堆積物(Spfa)と火砕流堆積物(Spfl)のすべてのユニット中に認められた(図5-2)。一方で、Pタイプ軽石は、蘭越(No.3)の火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニットにのみ認められ、カルデラ形成噴火噴出物中での存在比は非常に低い。

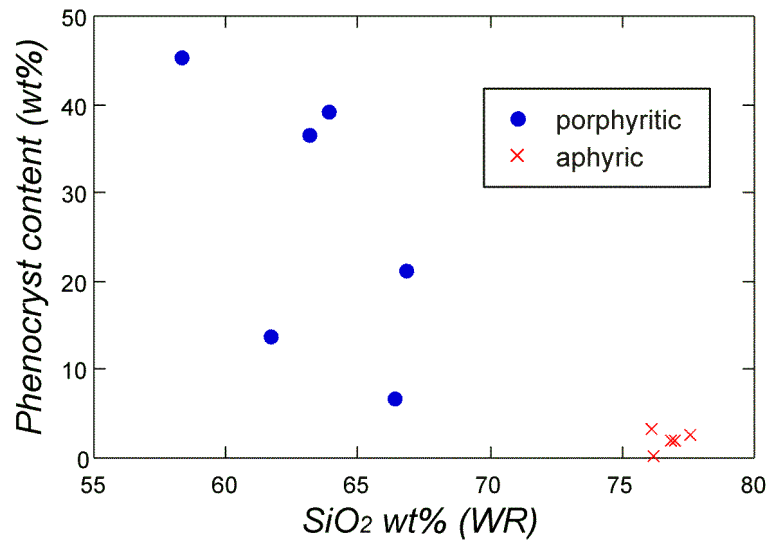


図5-1. 全岩SiO₂量と斑晶量との関係.

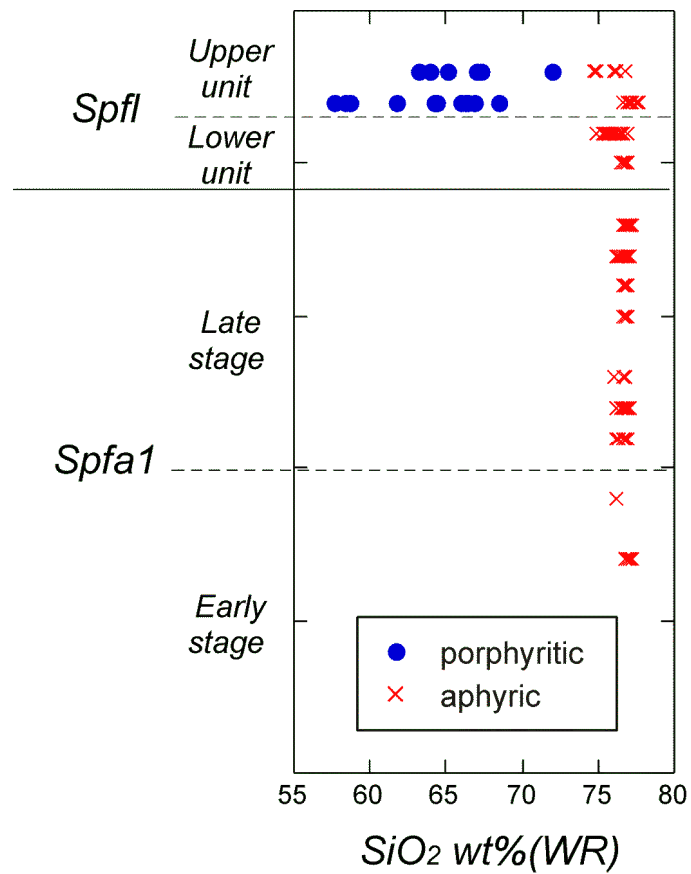


図5-2. 全岩SiO₂量の時間変化.

5-2. 全岩化学組成

全岩化学組成を噴火ユニットごとに示したハーカー図を図5-3に示す。降下軽石堆積物(Spfa1)のEarlyステージについては全岩化学組成分析の可能な大きさの軽石が少なかったため(図5-2), 粗粒な軽石を含む2層でのみ分析を行った(長谷, 2014)。本図ではEarlyステージとLateステージの噴出物を同一のシンボルで示している。一方, 火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニット噴出物は, Aタイプ軽石とPタイプ軽石に分けて示した。

まずAタイプ軽石とPタイプ軽石の違いに注目すると, Aタイプ軽石はPタイプ軽石に比べて SiO_2 , Na_2O , K_2O , Yの含有量が高く, TiO_2 , Al_2O_3 , FeO^* , CaO , Sr の含有量が低い(図5-3)。また, ZrではPタイプ軽石の組成幅が80-290ppmと非常に広く, Aタイプ軽石は150-200ppmの中間的な組成に集中している。さらに, TiO_2 , CaO , K_2O のハーカー図ではすべての噴出物が一本の直線トレンドを形成するように見えるが, Al_2O_3 , Na_2O , Zn , Sr , Zr のハーカー図では, Aタイプ軽石はPタイプ軽石のなすトレンドの延長上にのらないか, あるいはPタイプ軽石とは異なる傾きのトレンドを形成するという特徴が認められる。

次にAタイプ軽石の全岩化学組成に注目する(図5-4)。すると, 降下軽石堆積物(Spfa1)は $\text{SiO}_2=76.0-77.2\text{wt}\%$ の狭い組成範囲に集中しているが, 火砕流堆積物(Spfl)のLowerユニット噴出物は $\text{SiO}_2=74.8-77.0\text{wt}\%$ で降下軽石堆積物(Spfa)よりも SiO_2 に乏しい噴出物が存在する。一方, Upperユニット噴出物は $\text{SiO}_2=74.7-77.6\text{wt}\%$ と最も幅広い。また組成トレンドに注目すると, TiO_2 , K_2O , Y, Zrのハーカー図では噴火ユニットごとの違いは明瞭ではないが, FeO^* , Na_2O , Zn のハーカー図では火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニット噴出物は他の噴出物より含有量が低い組成トレンドを形成する。降下軽石堆積物(Spfa1)と火砕流堆積物(Spfl)のLowerユニット噴出物は, 特に Al_2O_3 , CaO , Zn , Sr のハーカー図で組成トレンドの傾きが異なり, CaO や Sr のハーカー図では両者は $\text{SiO}_2=76.5\text{wt}\%$ 付近で交差する。

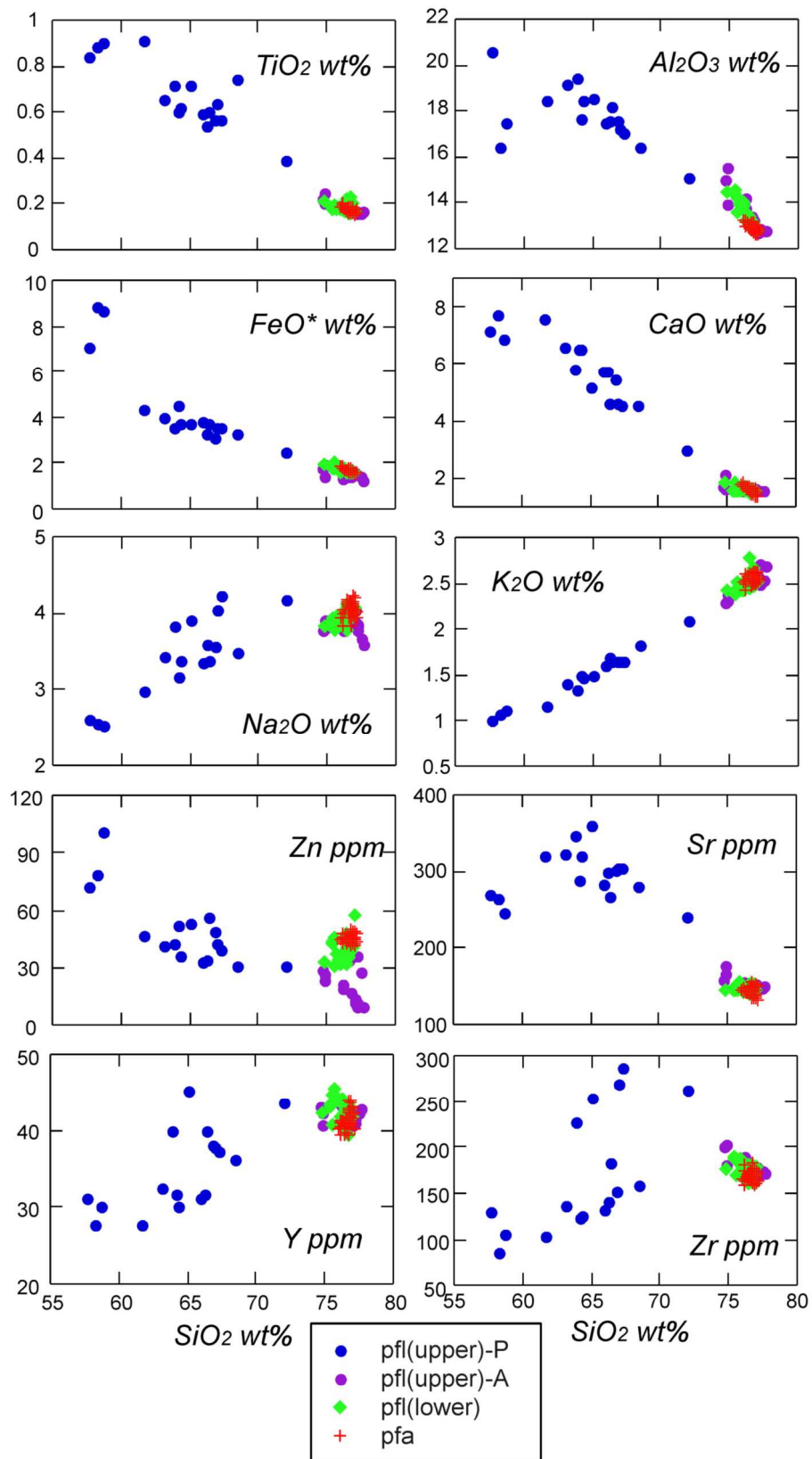


図5-3. 噴火ユニットごとの全岩化学組成のハーカー図。

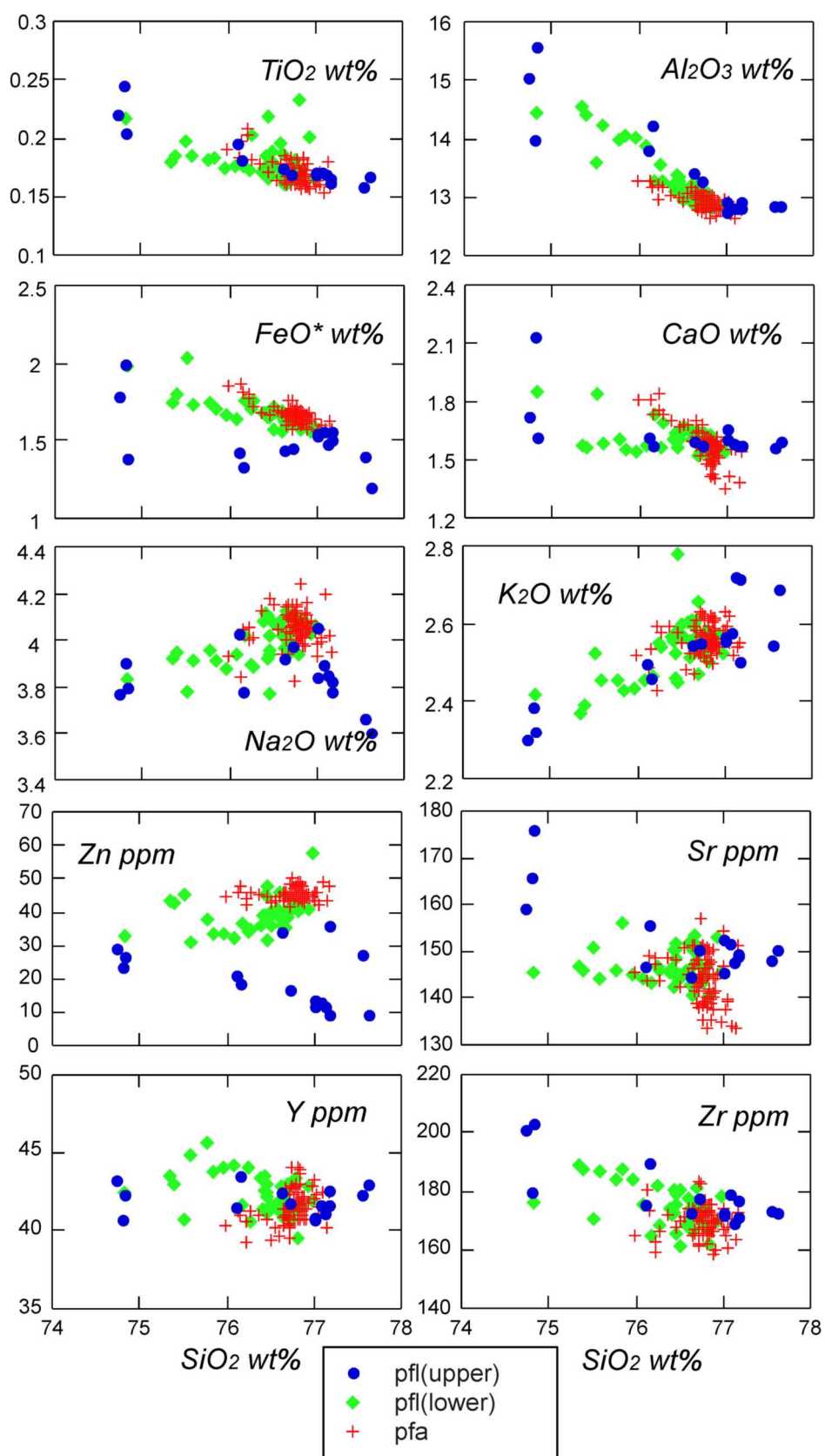


図5-4. Aタイプ軽石の全岩化学組成のハーカー図。

5-3. 石基ガラス組成

石基ガラス組成は降下軽石堆積物(Spfa1)の Early ステージを含むすべての噴火ユニットについて分析を行ったが、図 5-5 では Early ステージと Late ステージをまとめて示す。すると、A タイプ軽石と P タイプ軽石はほぼ連続的な組成トレンドを形成するが、A タイプ軽石の石基ガラス組成は $\text{SiO}_2=77.2-79.0\text{wt}\%$ と SiO_2 に富む狭い範囲に集中するのに対して、P タイプ軽石は $\text{SiO}_2=68.7-78.4\text{wt}\%$ と SiO_2 に乏しい組成に広がっている。同様の傾向は Na_2O を除くすべての元素で認められ、A タイプ軽石は P タイプ軽石に比べて SiO_2 , K_2O の含有量が高く、 TiO_2 , Al_2O_3 , FeO^* , MgO , CaO の含有量が低い。さらに、 Al_2O_3 , K_2O のハーカー図ではすべての噴出物が一本の直線トレンドを形成するように見えるが、 TiO_2 , FeO^* , MgO , CaO , Na_2O のハーカー図では、A タイプ軽石の組成トレンドは P タイプ軽石とは傾きがやや異なるように見える。

次に噴火ユニットごとの A タイプ軽石の石基ガラス組成に注目する(図 5-6)。すると、降下軽石堆積物(Spfa1)の Early ステージ噴出物($\text{SiO}_2=77.5-78.3\text{wt}\%$)、Late ステージ噴出物($\text{SiO}_2=77.2-78.2\text{wt}\%$)、火砕流堆積物(Spfl)の Lower ユニット噴出物($\text{SiO}_2=77.2-78.1\text{wt}\%$)はいずれもほぼ同じ狭い組成範囲で集中している。一方、火砕流堆積物(Spfl)の Upper ユニット噴出物は $\text{SiO}_2=77.5-79.0\text{wt}\%$ と組成幅が広く、また他の噴出物に比べて明らかに SiO_2 に富む。火砕流堆積物(Spfl)の Upper ユニット噴出物はその他の元素でも組成が異なり、 Al_2O_3 , MgO , CaO の組成幅が広く、 $\text{FeO}^*=1\text{wt}\%$ 以下のものが大部分である。またその組成トレンドはその他の噴火ユニットのものと多くのハーカー図で異なっている。火砕流堆積物(Spfl)の Lower ユニット噴出物は、降下軽石堆積物(Spfa1)と組成範囲も組成トレンドも類似しているが、降下軽石堆積物(Spfa1)に比べて FeO^* の低いガラスを含むという特徴がある。

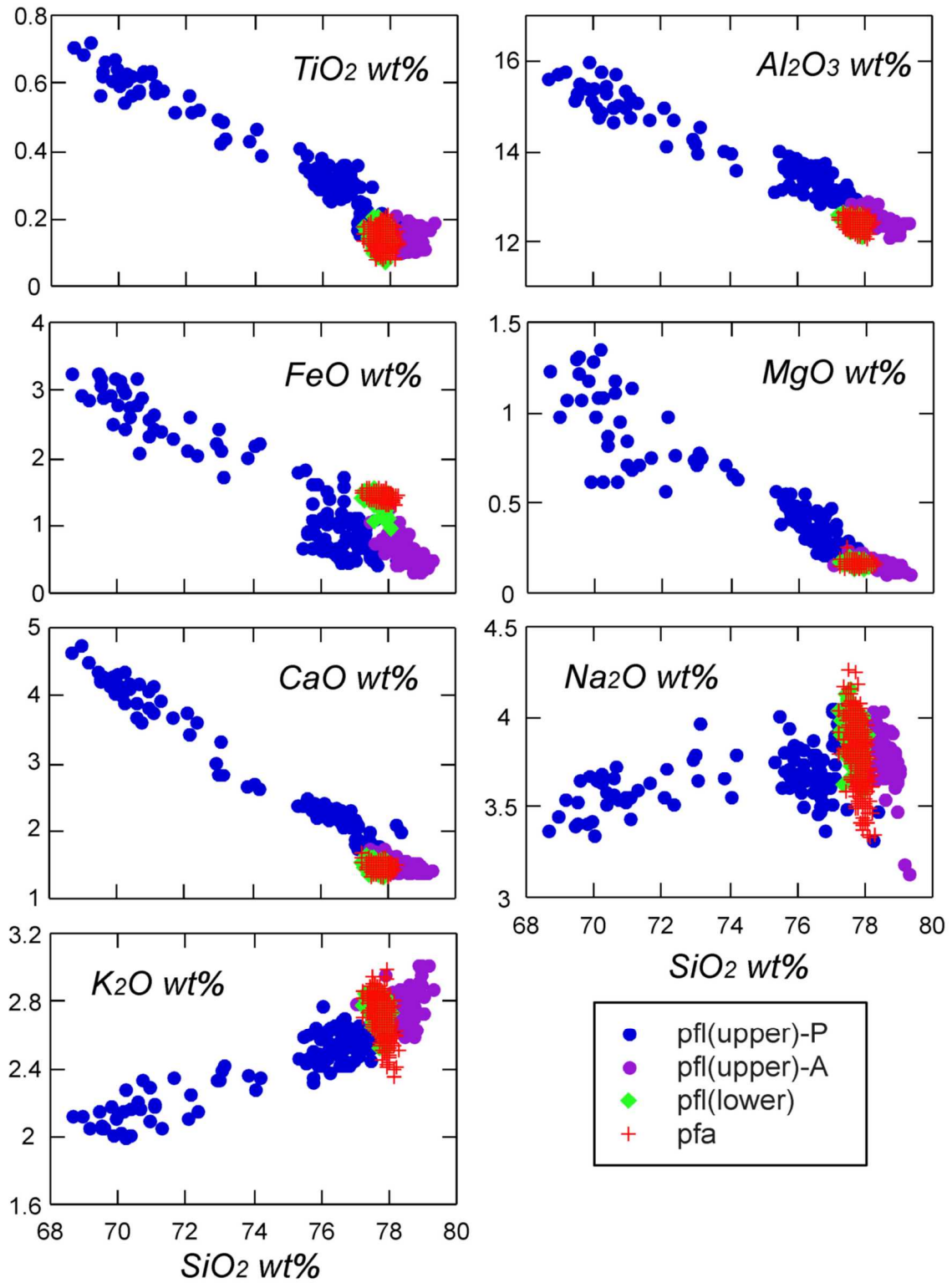


図 5-5. 噴火ユニットごとの石基ガラス組成のハーカー図。

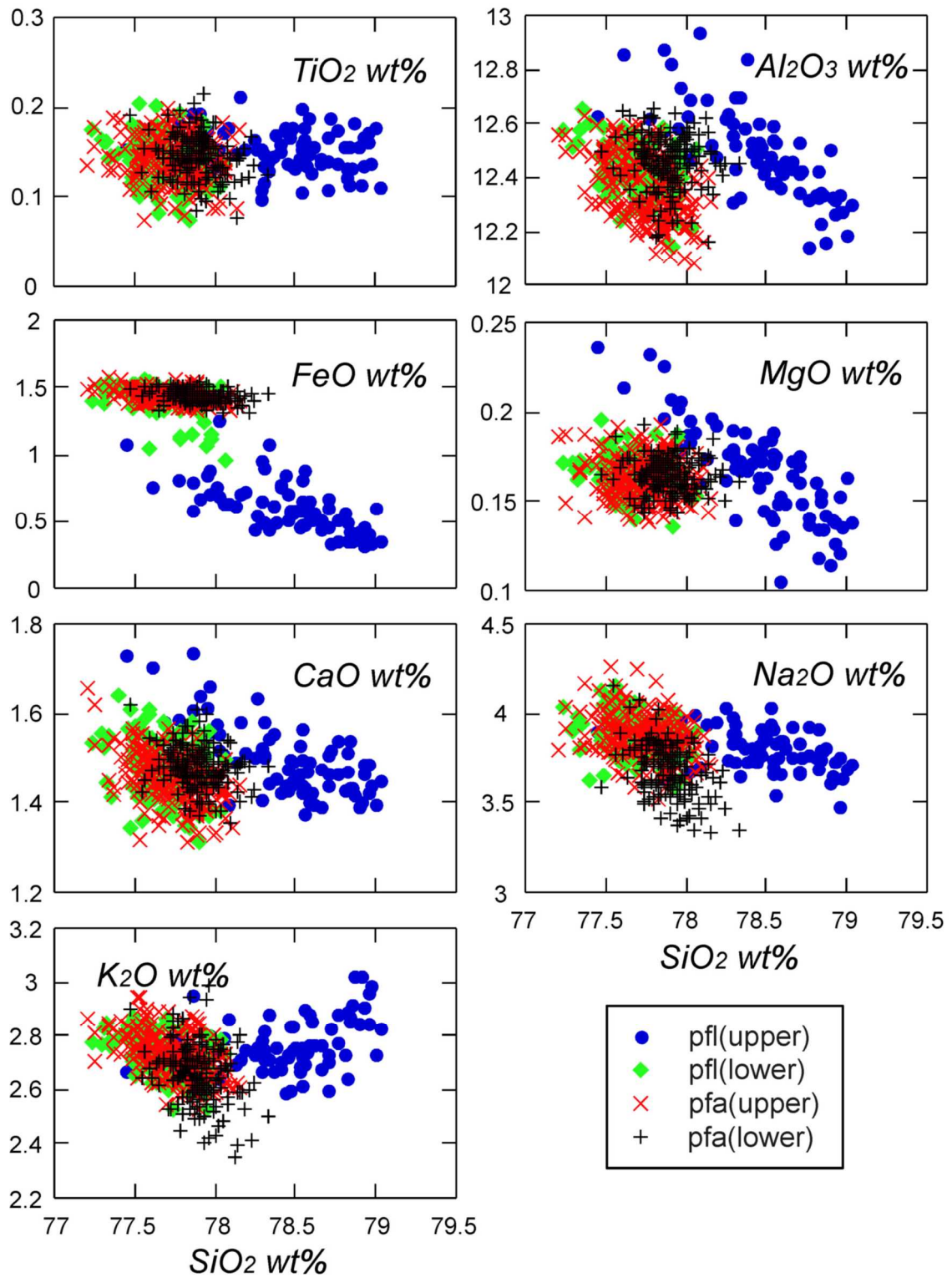


図 5-6. Aタイプ軽石の石基ガラス組成のハーカー図.

6. 議論

6-1. 支笏カルデラ形成噴火・最初期の噴出物について

本研究の目的は、支笏カルデラを例として大規模噴火の最初期から破局噴火、そして噴火の終焉へと至るマグマ供給系の時間変化を地質学的・岩石学的に明らかにすることであるが、今回図4-6の錦岡(No.1)の露頭において、噴火の最初期と考えられるマグマ水蒸気噴火の噴出物(Spfa1 Early unit)を採取することができた。ここまでは支笏カルデラ形成噴火の本質物質である軽石を対象として分析結果を述べてきたが、本章ではクッタラ火山起源の降下軽石堆積物(Kt-1)の上位にある火山灰土(山縣, 1994)がカルデラ形成噴火の噴出物であるかどうかを検討する。火山灰土は錦岡(No.1)では層厚20cm程度であり(図4-6.4-8)、下部(pre-1)、中部(pre-2)、上部(pre-3)の3層でそれぞれ試料を採取した。薄片の鏡下観察によると、いずれの火山灰も大部分が変質した軽石や岩片、遊離結晶からなるが、わずか1vol%以下の割合で新鮮で発泡した無色透明ガラスが認められる(図6-1)。

またその石基ガラス組成を分析し、下位のクッタラカルデラ噴出物(Kt-1)や上位の降下軽石堆積物(Spfa1)中の軽石のものと比較すると、火山灰土上部のpre-3についてはその組成が降下軽石堆積物(Spfa1)のものとほぼ同じであることが明らかになった(図6-2)。一方で、火山灰土の中部・下部から採取したpre-2とpre-1の新鮮なガラスは、pre-3や降下軽石堆積物(Spfa1)のなすトレンドの延長上にプロットされるが、 $\text{SiO}_2=78.2-79.3\text{wt}\%$ と明らかに SiO_2 が高い。クッタラカルデラ噴出物(Kt-1)の組成が支笏カルデラ形成噴火噴出物と非常に似ているためpre-1,2の新鮮なガラスの起源について確かなことは言えないが、一連の堆積物である火山灰土の上部から支笏カルデラ形成噴火由来と考えられるマグマが噴出していることから、pre-1,2についても支笏カルデラ形成噴火の最初期の噴出物である可能性が高い。これが正しいとすると、カルデラ形成噴火では最初期に最も SiO_2 に富む珪長質マグマを噴出していたと考えることができる(図6-3)。

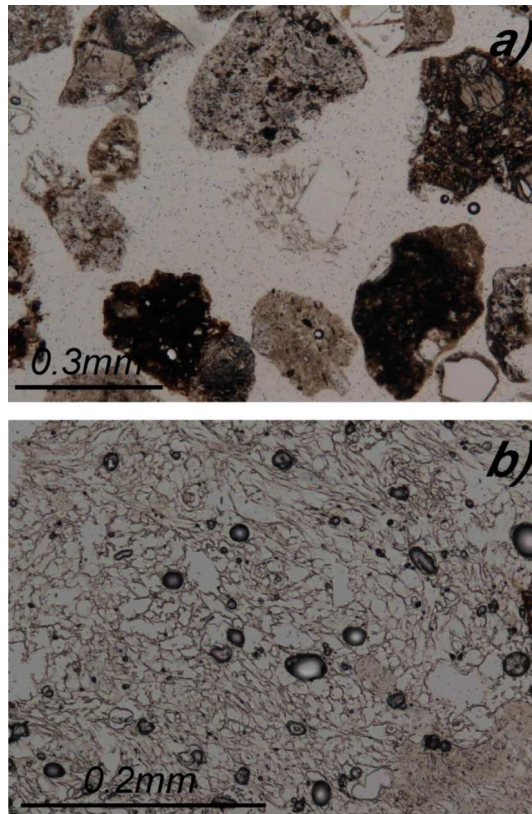


図 6-1. 火山灰の薄片写真(オープンニコル).
a) pre-1 火山灰, b) pre-3 火山灰.

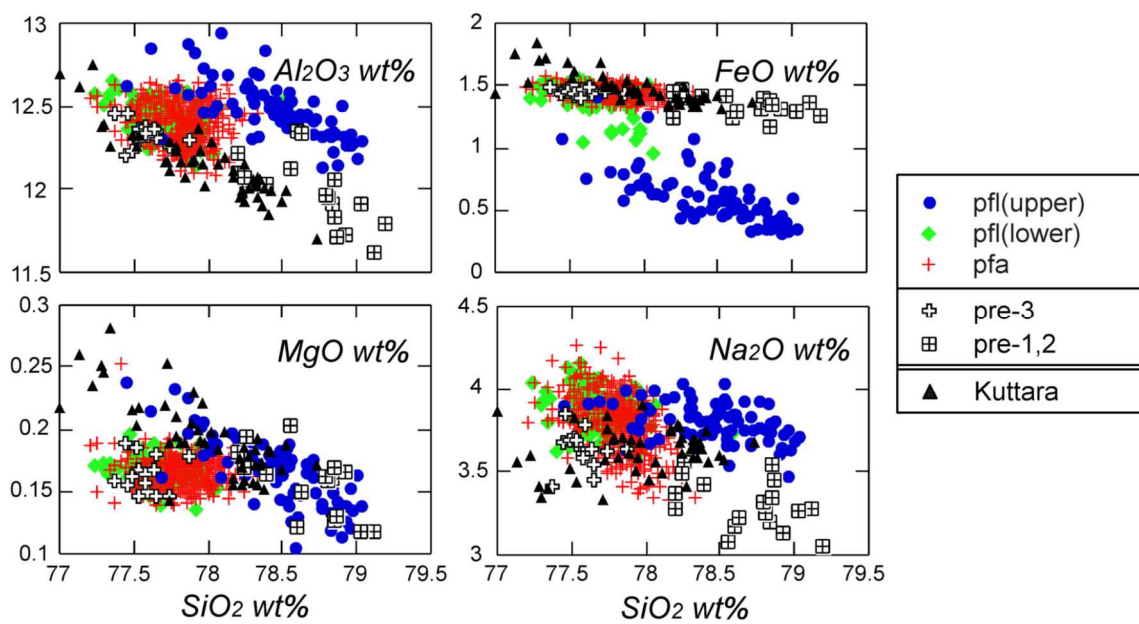


図 6-2. 火山灰試料とクッタラカルデラ・支笏カルデラ A タイプ軽石との
石基ガラス組成の比較.

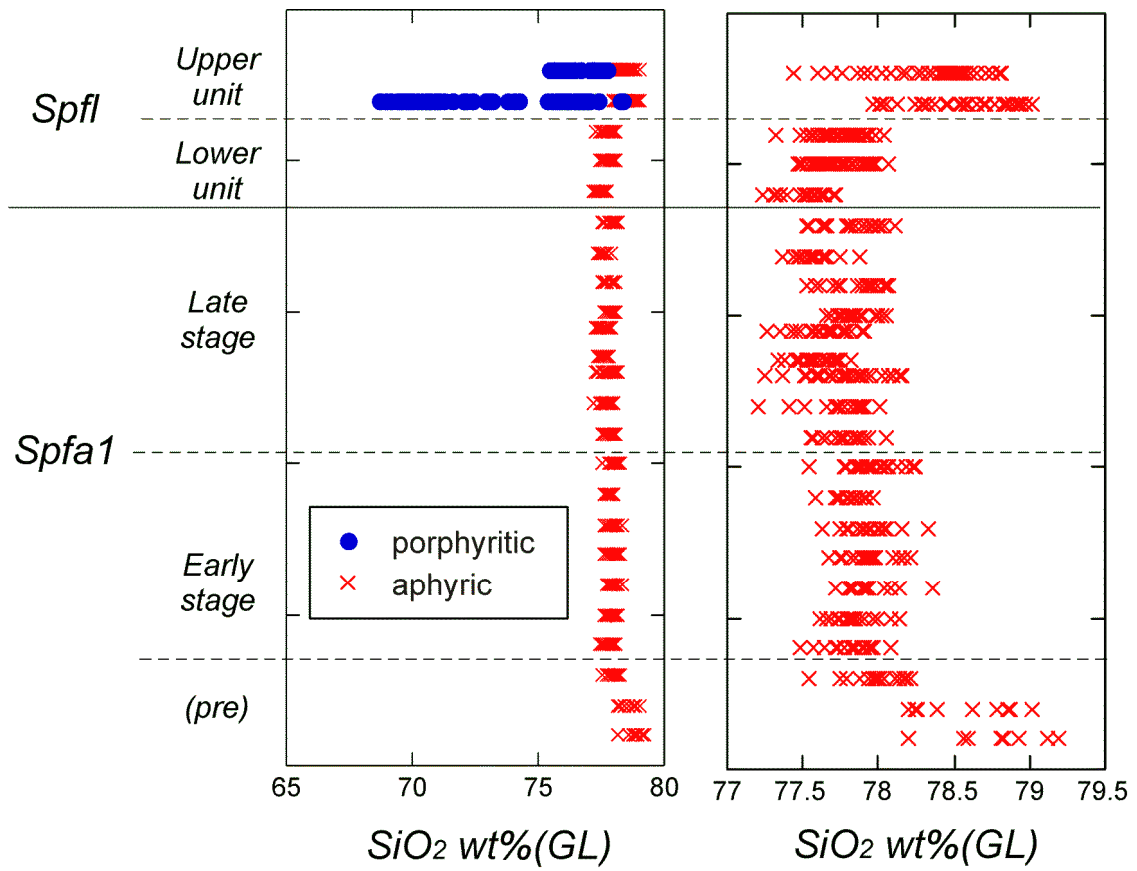


図 6-3. 石基ガラス組成の時間変化.

6-2. デイサイト質一流紋岩質マグマ(Aタイプ軽石)の多様性

支笏カルデラ形成噴火のマグマ水蒸気噴火, プリニー式噴火, 大規模火砕流からなる一連の噴出物について地質学的・岩石学的検討を行った結果, 支笏カルデラ形成噴火では斑晶に乏しい A タイプ軽石が噴火の最初期から末期まで噴出し続け, 噴出物の大部分を占めることが確認された(図 5-2, 6-3). さらに, A タイプ軽石の全岩化学組成および石基ガラス組成を噴火ユニットごとに詳細に調べたところ, 降下軽石堆積物(Spfa1), 火砕流堆積物(Spfl)の Lower ユニット噴出物, 火砕流堆積物(Spfl)の Upper ユニット噴出物とでそれぞれ組成トレンドが異なることが明らかになった(図 5-4, 5-6). 今回は各噴出物中の斑晶鉱物組成を分析していないため確実なことは言えないが, 北川(2000MS)が指摘しているように A タイプ軽石がマグマ混合によって生成されたとすると, それぞれの噴火ユニットで端成分マグマが異なる可能性が考えられる.

具体的には, FeO*のハーカー図において降下軽石堆積物(Spfa1), 火砕流堆積物(Spfl)の Lower ユニット噴出物, 火砕流堆積物(Spfl)の Upper ユニット噴出物は, 苦鉄質側は発散し珪長質側で収束するようなそれぞれ異なる直線トレンドを示す(図 6-4). 一方で, CaO のハーカー図では火砕流堆積物(Spfl)は1つの直線トレンドを形成するが, 降下軽石堆積物(Spfa1)はそれらと $\text{SiO}_2=76.5\text{wt}\%$ 程度で交差しており, 苦鉄質側, 珪長質側ともに組成が異なる. また, Zn のハーカー図では降下軽石堆積物(Spfa1)と火砕流堆積物(Spfl)の Lower ユニット噴出物の組成トレンドは苦鉄質側で発散し珪長質側で収束するが, 火砕流堆積物(Spfl)の Upper ユニット噴出物はそれらと珪長質側で発散するようなトレンドを持つ. これらの証拠を考慮すると, 降下軽石堆積物(Spfa1), 火砕流堆積物(Spfl)の Lower ユニット噴出物, 火砕流堆積物(Spfl)の Upper ユニット噴出物中の A タイプ軽石の端成分マグマは苦鉄質側・珪長質側ともにそれぞれ異なり, 端成分マグマが時間と共に変化したことを示唆している.

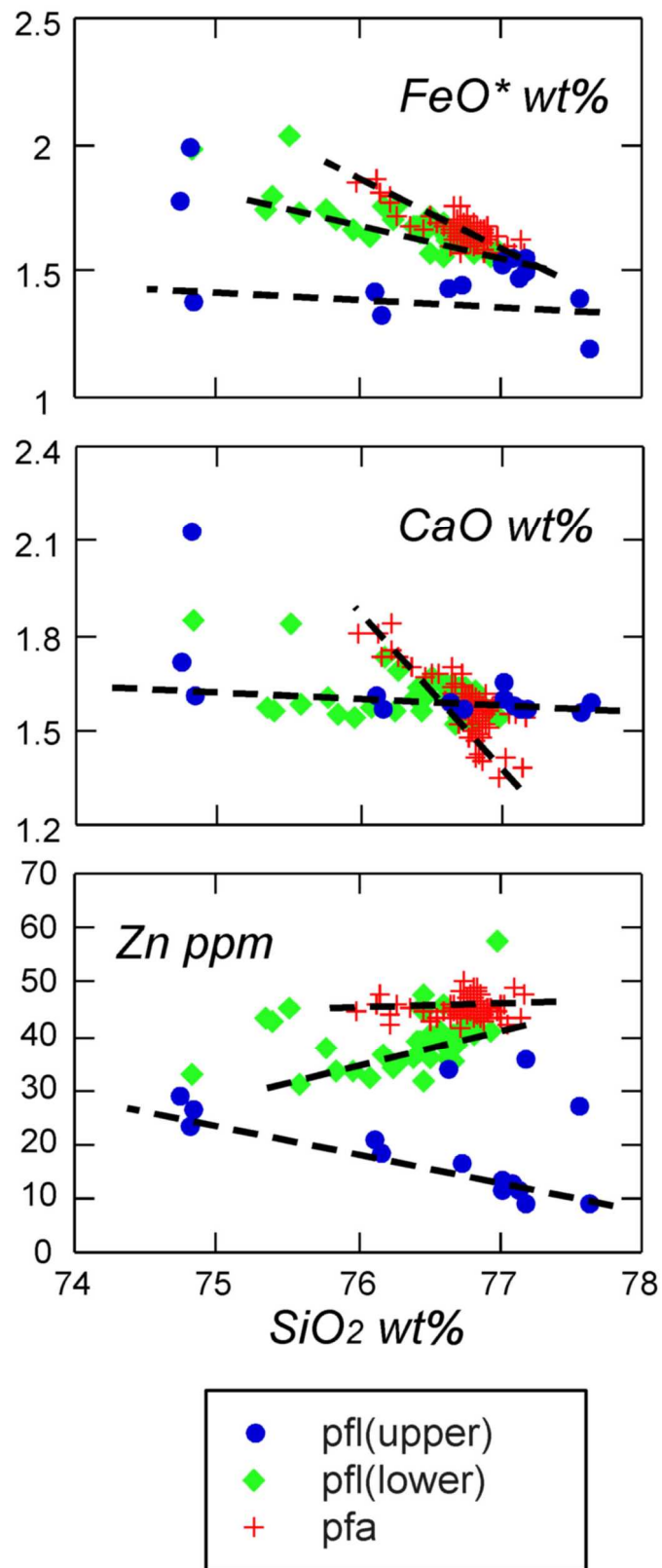


図 6-4. A タイプ軽石の多様性.

6-3. 安山岩質ーデイサイト質マグマ(Pタイプ軽石)の多様性

斑晶に富むPタイプ軽石は火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニット噴出物のみに認められるが、今回図4-6の蘭越(No.2)の塊状無層理な露頭において上部と下部からサンプルを採取したところ、全岩化学組成が有意に異なることが明らかになった。

図6-5は、Pタイプ軽石の組成を火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニット噴出物の上部と下部に分類して示した図である。すると、下部のPタイプ軽石は $\text{SiO}_2=58.3-68.5\text{wt}\%$ で直線性の高いトレンドを形成しているが、上部のPタイプ軽石は $\text{SiO}_2=63.2-72.0\text{wt}\%$ と SiO_2 に富むほか、 Na_2O 、 Zr 、 Ba の濃度も高く、トレンドも異なる。特に下部の $\text{Zr}=80-150\text{ppm}$ に対して上部の $\text{Zr}=220-290\text{ppm}$ (1サンプルを除く)という組成差は非常に大きく、これらが異なるマグマ由来であることを強く示唆している。つまり、Aタイプ軽石だけでなくPタイプ軽石についても、その端成分マグマが時間と共に変化したと考えられる。

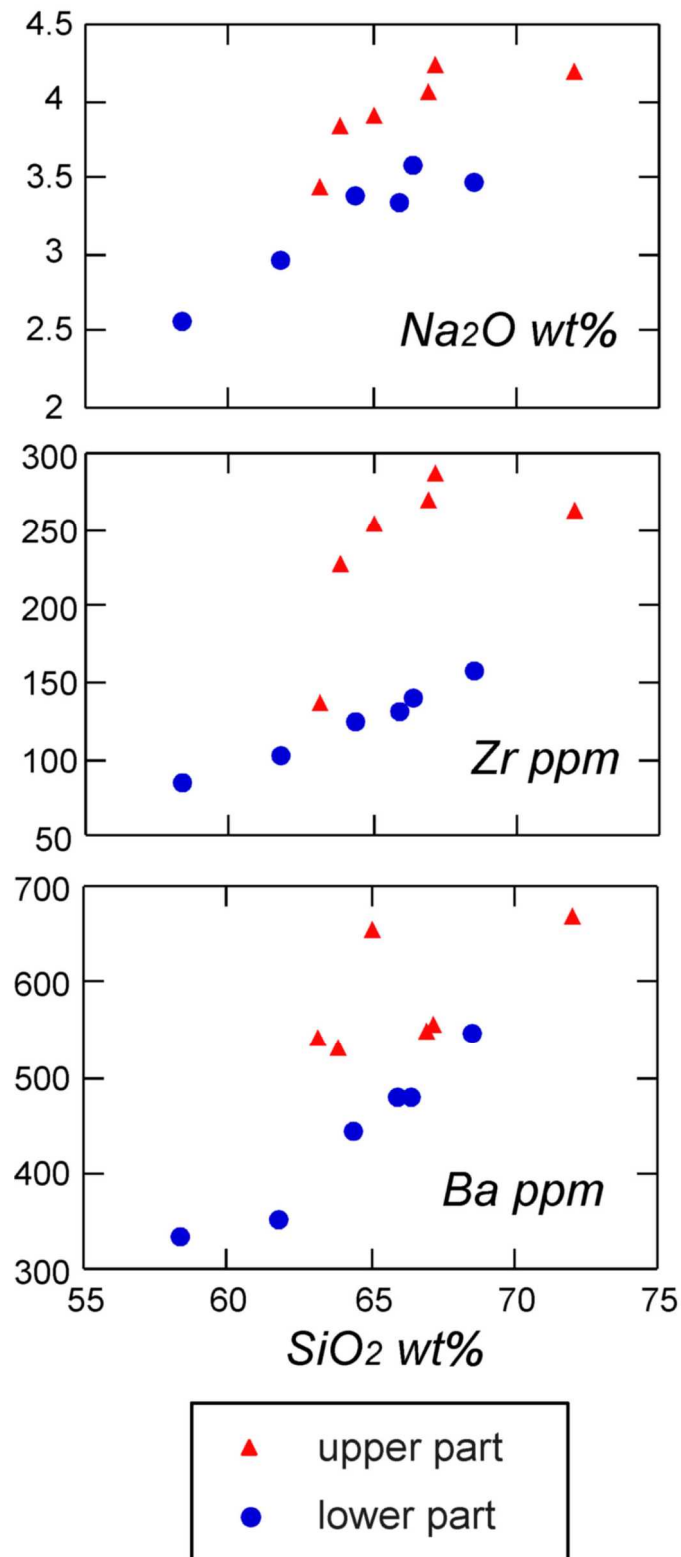


図 6-5. Pタイプ軽石の多様性.

7. まとめ

支笏火山周辺地域の地表踏査およびK-Ar法による年代測定、4万年前のカルデラ形成噴火の一連の噴出物について地質学的・岩石学的検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 現在の支笏湖周辺地域の火山はおよそ3.60-0.51Maに活動しており、約40万年前の静穏期を経て、支笏火山は6万年前頃に活動を開始した。
- 2) 支笏カルデラ形成噴火はマグマ水蒸気噴火(Spfa1 Earlyステージ)で始まり、プリニー式噴火(Spfa1 Lateステージ)から大規模火砕流(Spfl Lowerユニット, Spfl Upperユニット)へと移行した。
- 2) 支笏カルデラ形成噴火の本質物質は、斑晶に乏しいデイサイト質一流紋岩質のAタイプ軽石と斑晶に富む安山岩質―デイサイト質のPタイプ軽石に分類される。また、Aタイプ軽石はカルデラ形成噴火を通して噴出し続けているが、Pタイプ軽石は、噴火の末期に発生した火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニット噴出物にのみ認められることも確認された。
- 3) マグマ水蒸気噴火の噴出物(Spfa1 Earlyステージ)について今回初めて岩石学的検討を行ったところ、その岩石学的特徴はその後のプリニー式噴火による降下軽石堆積物(Spfa1 Lateステージ)とほぼ同じである。
- 4) Aタイプ軽石の組成は、降下軽石堆積物(Spfa1)、火砕流堆積物(Spfl)のLowerユニット噴出物、火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニット噴出物の3つで異なり、これらがマグマ混合によって生成されたとすると、その端成分マグマは苦鉄質側・珪長質側ともにそれぞれ異なる可能性が高い。
- 5) Pタイプ軽石の組成は、火砕流堆積物(Spfl)のUpperユニット噴出物の上部と下部とで異なることから、Pタイプ軽石を生成したマグマも時間とともに変化したと考えられる。

今年度の業務により、支笏火山周辺地域の長期火山活動履歴および4万年前のカルデラ形成噴火の地質学的・岩石学的変化の概要が明らかになったが、カルデラ形成噴火については空間的な変化をさらに検討する必要がある。また、支笏火山は約6万年前から大規模噴火を開始しているが、これらの先行噴火とカルデラ形成噴火との関連も不明である。以上の課題をふまえて、平成26年度以降はさら

に広範囲の地質調査, 年代測定, ボーリング掘削調査を行うとともに, 質量分析装置による Sr・Nd 同位体比分析を加えてマグマ供給系の時間変化を詳細に調査し, 大規模噴火前の休止期から準備期へと至る地質学的・岩石学的変化を検討する.

参考文献

- 板東道子・中川光弘 (2008). 始良カルデラ形成時のマグマ供給系の構造と噴火プロセス. 日本地球惑星科学連合大会予稿集 2008, V231-003.
- Christensen, J. N., Depaolo, D.J. (1993). Time scales of large volume silicic magma systems: Sr isotopic systematics of phenocrysts and glass from the Bishop Tuff, Long Valley, California. *Contributions of Mineralogy and Petrology* 113, 100-114.
- 古川竜太・中川光弘 (2010). 樽前火山地質図. 1:30,000火山地質図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 長谷龍一 (2014). 支笏カルデラ形成噴火のマグマ時間変化の検討. マグマ供給系の構造と噴出プロセスの復元. 北海道大学理学部卒業論文. 64p.
- 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.
- 北川淳一 (2000MS). 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.
- 町田洋・荒井房夫 (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.
- 松本亜希子・長谷川健・中川光弘 (2008). 北海道東部, 屈斜路軽石流堆積物 IV の岩相変化からみるカルデラ形成噴火の噴火推移とマグマ供給系. *月刊地球*, 60, 154-164.
- Nakagawa, M., Kitagawa, J., Wakasa, H., Takeda, K., Amma-Miyasaka, M., Matsumoto, A., Hasegawa, T., Kishimoto, H. (2013). Simultaneous generation of multiple silicic magmas and their zoned magma chamber related to a

caldera-forming eruption: Case studies of Shikotsu and Mashu volcanoes, Japan.
IAVCEI 2013 Scientific Assembly, 139.

Smith, R.L. (1979). Ash-flow magmatism. Geological Society of America, *Special paper* 180, 5-27.

Streck, M.J., Grunder, A.L. (1997). Compositional gradients and gaps in high-silica rhyolites of the Rattlesnake Tuff, Oregon. *Journal of Petrology* 38, 133-163.

山縣耕太郎 (1994). 支笏及びクッタラ火山のテフロクロノロジー. *地学雑誌*, 103, 268-285.