

利尻火山における近年の岩石学的研究

谷内 元*

〒060-0810 北海道札幌市北区北10条西8丁目 北海道大学大学院理学院

Recent Petrological Studies at Rishiri Volcano

Hajime TANIUCHI*

Graduate School of Science, Hokkaido University, N10W8, Sapporo, Hokkaido, 060-0810 Japan

Abstract. Geological and petrological studies at the Rishiri Volcano started in the 1930's and have been carried out up to the present day. In this paper, we review the research history of the Rishiri Volcano and introduce the origin of the volcanic activity and the petrogenesis of the main stratovolcano (Rishiri-san) based on the recent three original papers.

はじめに

利尻島は、白亜紀から新第三紀中新世の基盤岩と、その上に構成される第四紀複成火山からなる火山島 (e.g. 石塚, 1999) であり、学術的には利尻火山 (Rishiri Volcano) と呼ばれている。利尻火山の活動開始時期については議論が続いているが、これまで約40万年前 (植木・近藤, 2011) や約20万年前 (石塚, 1999) といった年代が提案されており、およそ10数万から数10万年前まで遡るものと考えられている。一方、最新の活動に関しては、火山体南部の沼浦マールや側火山において数千年前頃の活動の証拠が捉えられており (石塚, 1999; 近藤ほか, 2015; 佐藤ほか, 2013), 気象庁が指定する全国111の活火山のひとつとして数えられている。

多くの成層火山では、若い噴出物の被覆によって古い時代の噴出物を直接観察・採取することが困難な場合が多い。しかし、利尻火山の火山体は著しい開析を受けていることから、西部の大空沢、東部のヤムナイ沢、アフトロマナイ沢、雄忠志内沢

などで火山体内部構造が良く露出する。そのため成層火山であるにも関わらず、火山体内部を構成する古い時代の噴出物も含めて直接観察・採取することが可能であるという大きな利点がある。このような背景もあり、優れた火山地質学的研究が行われてきた (阿部, 1934; 松井ほか, 1967; 小林, 1987; 石塚, 1999)。また利尻火山は、最も近い活火山から水平距離にして200 km以上離れた場所かつ、約1000万年間に渡る非火山地域において活動を開始したことから、周囲あるいは過去の火山活動からの熱や物質的な影響を考慮せずにマグマの成因について考察可能である類稀な研究対象でもある (石塚・中川, 1999)。このことから、火山地質学的な研究に岩石学的・地球化学的な記載と解析の結果を合わせることにより、火山の中長期的な成長発達史と沈み込み帯火成活動の要因についても議論されてきた (Kobayashi, 1989; 石塚・中川, 1999; Ishizuka, 2000)。さらに近年では、個別の噴出物を対象としたマグマの成因や分化過程に関する研究も精力的に行われている (Kuritani,

*E-mail: hajimetani@frontier.hokudai.ac.jp

1998 ; 1999a ; 1999b ; 1999c ; 2001 ; Kuritani & Nakamura, 2006 ; Kuritani & Nakagawa, 2016 ; Kuritani *et al.*, 2005 ; 2007 ; 2008 ; 2010 ; Taniuchi *et al.*, 2020a ; 2020b).

このように、利尻火山は長年にわたり研究が続けられている火山である。本論ではまず、研究史をまとめた上で、近年の地質学的・岩石学的研究の基礎となっている石塚(1999)および石塚・中川(1999)による利尻火山の活動の変遷に関する結果を簡単に紹介する。その上で、2010年以降に明らかとなった利尻火山の活動の起源と、筆者が「利尻調査研究事業」の補助を受けて一部を実施した“利尻山”を構成する主成層火山体のマグマの成因に関して紹介する。なお本論は「利尻研究」への掲載であるので、岩石学や地質学を専門としない方々が多く読まれるという前提の基、できるだけ平易に記述することを心がけた。それぞれの詳細な内容については、原著論文およびそれらの引用論文を参照されたい。

利尻火山の地質学・岩石学の研究史

利尻火山に関する最初の地質学的研究は1930年代に遡る。当時の北海道帝国大学理学部の学生であった阿部顯氏らによって初めて利尻火山の地質学的調査が行われ、その成果は「北見国利尻火山地質調査報告」という題目の卒業論文(阿部, 1936)にまとめられた。本論文は、利尻火山を対象とした最初の地質学的・岩石学的研究であるばかりでなく、山岳地域も含めた島内全域において地質調査を行い、地質図を完成させた。現在のように交通手段が発達していない当時の状況・研究環境も考慮すれば、特筆すべき成果である。また、本論文には当時の利尻島内を撮影した貴重なモノクロ写真も添付されている。その後1953年には、阿部(1936)が実施した地質学的研究を基礎として、北海道大学理学部の勝井義雄博士が岩石化学的研究を行い、利尻火山の代表的噴出物の化学組成を初めて示した(Katsui, 1953)。この2つの研究が、利尻火山における地質学的・岩石学的研究の黎明期であり、全く手付かずの状態の利尻火山を対象として初めての地質調査や岩石学的・地球化学的特徴の記載が行わ

れた時代と総括できる。

その後の1960年代に入ると、北海道開発庁の委託で工業技術院地質調査所が地質調査を行い、成果は5万分の1地質図幅「利尻島」として出版された(松井ほか, 1967)。解説書の地質調査路線図(調査ルートを地図上の線で示した図)には、主要な沢のほとんど全て、かつ傾斜の大きな標高の高い地点まで線が引かれており、巻頭の緒言に「本図幅地域は地形が極めて峻嶒で、海岸をめぐる道路、山頂に至る登山道を除いては、山腹に至る道に乏しく、調査は困難であった。」と記述されていることから、厳しい調査を経て作成されたことが窺える。その後も利尻火山全体の地質学的・岩石学的研究は1970～80年代に北海道大学(後に鹿児島大学)の小林哲夫博士、そして1990年代には北海道大学の石塚吉浩博士(現在、産業技術総合研究所)によって行われ、地質図の精度が高まったばかりでなく、火山の活動史とマグマの変遷が議論された。小林博士は、利尻火山におけるマグマの多様性を見出し、それらが単一の結晶分化作用では生成されず、マントルで生成した玄武岩質マグマが地殻内で停留し、地殻物質が溶融するか否か、あるいは地殻の部分溶融度の違いによってマグマの化学組成が多様に変化するというモデルを提案し、利尻火山の活動を説明した(小林, 1987a ; 小林, 1987b ; Kobayashi, 1989)。石塚博士は、地質調査などに基づいたステージ区分、噴出率の推定などにとどまらず、岩石学的手法を用いて各ステージにおける地殻由来マグマの温度や、玄武岩マグマの起源マントルの枯渇度(部分溶融度)を求め、火山活動がマントル内部におけるダイヤモンド(熱源)の上昇と冷却によってもたらされるという“マントルダイヤモンドモデル”で利尻火山の活動を説明した(石塚, 1999 ; 石塚・中川, 1999 ; Ishizuka, 2000)。さらに1990年代以降になると、東京大学の栗谷豪博士(現在、北海道大学)らによって西山腹に流下する杓形・種富溶岩流(Kuritani, 1998, 1999a, 1999b, 1999c, 2001 ; Kuritani *et al.*, 2005, 2006, 2007, 2010)、南山麓でみられる沼浦およびアララギ山溶岩流(Kuritani *et al.*, 2008)、そして山頂のローソク岩から北東山麓(野塚岬)へ流下した野塚溶岩流(Kuritani & Nakagawa, 2016)な

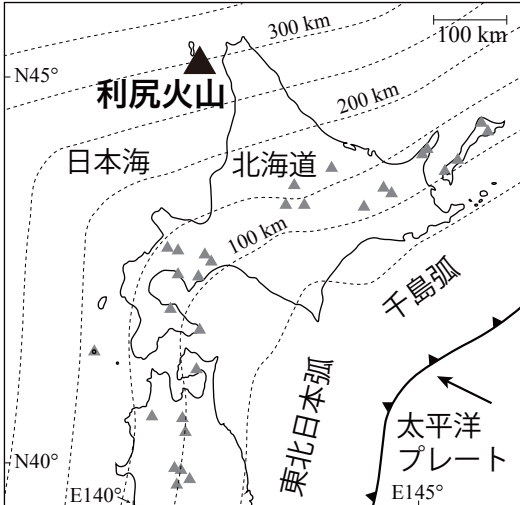


図1. 利尻火山の位置。灰色の三角は活火山の位置を示す。沈み込みスラブの深度および沈み込みの方向は Kita *et al.* (2010) による。利尻火山は千島弧に属する背弧火山である。

ど個々の溶岩流に対する極めて詳細な岩石学的・地球化学的研究が行われ、利尻火山直下の地殻あるいはマントル内におけるマグマプロセスの理解が大きく進歩した。特に杓形・種富溶岩流の分化過程に関する一連の研究は、岩石学を中心とした物質科学的手法のみならず、数理モデルからの検証が行われるなど多様な手法によって解析されており、両者はマグマの分化過程に関して世界で最もよく研究されている溶岩流の一つであると言える。

一方、地形学的視点からの研究も、三浦英樹博士、近藤玲介博士、植木岳雪博士などによって行われてきている。これらの研究の内容については、本論の趣旨から外れるため深入りはしないが、これらの結果の中でも火山地質学的・岩石学的研究と関係の深い噴出物の年代測定結果 (Kuritani *et al.*, 2007; 植木・近藤, 2008, 2010, 2011; 近藤・塚本, 2009; 佐藤ほか, 2013; 近藤, 2015) に関しては、植木・近藤 (2010) や近藤 (2015) において和文で良くまとめられているので、そちらを参照されたい。これらを総括すれば、利尻火山は、日本の数ある火山の中でも極めて活発に研究が行われてきた火山の一つであると言える。

利尻火山概説

利尻火山は、太平洋プレートの沈み込みに伴って形成される千島弧と東北日本弧の島弧会合部付近に位置し、火山直下の沈み込みプレートの深度が300kmに達する背弧火山である (図1)。一般に、沈み込み帯の火山はプレートの沈み込みに関連した弧状の分布を示す一方、利尻火山は最も近い活火山からでも水平距離にして200km以上離れ独立して存在しており、特異な場所に存在していると言える。なぜ現在の利尻島の位置に火山ができたのかについては後ほど触れる。

利尻島の標高約200mよりも低い場所 (特に、湾内地域周辺) には、わずかではあるものの、利尻火山の活動以前の岩石が露出する。これらの岩石の一部は、約1000万年前以前に形成された火砕岩であり、礼文島にみられる岩石と化学組成や年代が類似する (松井ほか, 1967; 小林, 1987; 石塚, 1999)。このことから、現在の利尻島が位置する場所には「古利尻島」とでも言うべき地形的な高まりが存在していたと考えられている (小林, 1987; 石塚, 1999)。しかし、当時においてもその標高は数100m程度だったと考えられており、島のシンボルでもある利尻山を始めとした現在の地形の大部分はその後形作られた火山活動による産物である (図2)。この利尻火山の活動全般に関する最新の地質学および岩石学的研究は、1990年代に行われた石塚吉浩博士による一連の研究である。以下では、石塚 (1999) および石塚・中川 (1999) の一連の結果を簡単に紹介し、利尻火山の活動の概説とする。

石塚 (1999) は詳細な地質調査に基づき、利尻火山の各噴出物の分布を明らかにした上で、噴出場所 (火口位置)、噴出年代、噴出率、火道安定性を推定した。そして、利尻火山の活動を前期 (Early stage)・中期 (Middle stage)・後期活動 (Late stage) の3ステージに大分し、さらに前期をE-1 stageとE-2 stageに、後期をL-1 stageとL-2 stageにそれぞれ細分し、5ステージに区分した (図2)。E-1 stage, E-2 stage, Middle stage, L-1 stage, L-2 stageそれぞれの噴出率は、 $>0.1 \text{ km}^3$

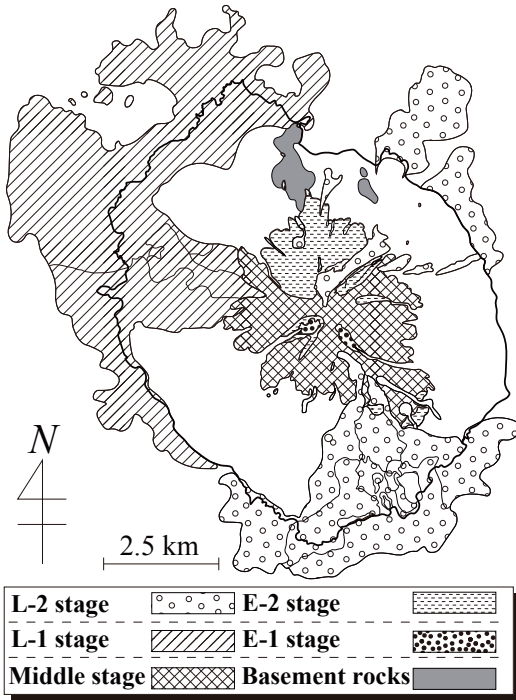


図2. 石塚 (1999) に加筆修正した, 利尻火山の地質図.

ky, $>0.4 \text{ km}^3/\text{kr}$, $>0.4 \text{ km}^3/\text{ky}$, $>0.35 \text{ km}^3/\text{ky}$, $0.09 \text{ km}^3/\text{ky}$ であり, 活動初期の E-1 stage と活動末期の L-2 stage で噴出率が低く, それらの間のステージである E-2 stage, Middle stage, L-1 stage にかけて噴出率が高かったことを明らかにした (図3). さらに石塚・中川 (1999) では, それぞれの活動期における噴出物の岩石学的特徴や化学組成を記載し, マグマの成因を考察した. それらの成果に

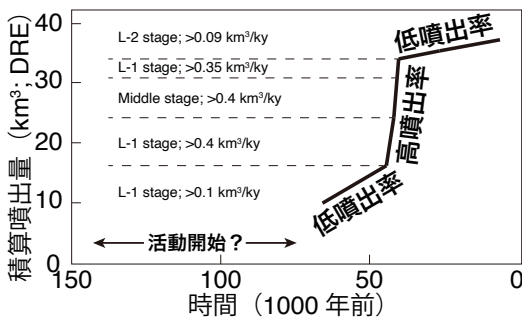


図3. 石塚 (1999) に加筆修正した, 利尻火山の時間-積算噴出量階段図.

よって明らかとなった各活動期の噴出物の特徴は下記の通りである. まず E-1 stage には, 現在の利尻山の山体の下部に位置し, 大空沢など一部の深く侵食された沢の最深部で露出する下部成層火山体と, 北麓を中心とした溶岩ドーム群を形成した. 岩質はカルクアルカリ系列の安山岩からデイサイトである. E-2 stage は, 北東山麓の沢中に露出する豊漁沢溶岩流と, 溶岩流, 降下火砕物, ベースサージ堆積物の互層からなる長官山成層火山体の形成が主要な活動である. 噴出物組成は, 高 Na/K 比の玄武岩およびソレライト系列の安山岩である. 中期活動は, 現在の利尻山を構成する主成層火山体の形成期である. 主成層火山体は, 現在の利尻山山頂付近から噴出したカルクアルカリ系列の安山岩~デイサイト質の溶岩流と降下火砕物の互層から構成される.

その後の E-1 stage は, 杓形溶岩流および種富溶岩流の活動で特徴付けられる. これらの噴出物は, 高 Na/K 比の玄武岩質溶岩とソレライト系列安山岩~デイサイトである. そして活動末期の L-2 stage には, 山頂から北東山麓へ流下する野塚溶岩流・山体南部における溶岩流の活動, スコリア丘の形成, そしてマグマ水蒸気噴火などの活動があった. 大半の噴出物の化学組成は, 低 Na/K 比の玄武岩だが, 例えば野塚溶岩流に伴う降下火砕物中に含まれる軽石など, わずかにデイサイト~流紋岩質噴出物もみられる (図4). そして, 各噴出物の噴出場所, 噴出率の長期変遷, 火道安定性, 噴出物組成, 鉍物化学組成の変化などといった一連のデータから, 利尻火山の活動が単一のマントルダイアピルの上昇と冷却によって説明できる可能性を指摘した (石塚, 1999; 石塚・中川, 1999; Ishizuka, 2000).

利尻火山の活動の起源

概説で述べた通り, 利尻火山の活動以前にも古利尻島とでも呼ぶべき地形の高まりがあったと考えられているものの, その標高はせいぜい数 100 m 程度であり, 現在の利尻島の姿を作った最大の要因は数 10 万年以降に活動を開始した火山活動である. しかし, 古利尻島を形成した約 1000 万年前以降, 長期に渡り火山活動が欠如し, 現在でも周囲に活火

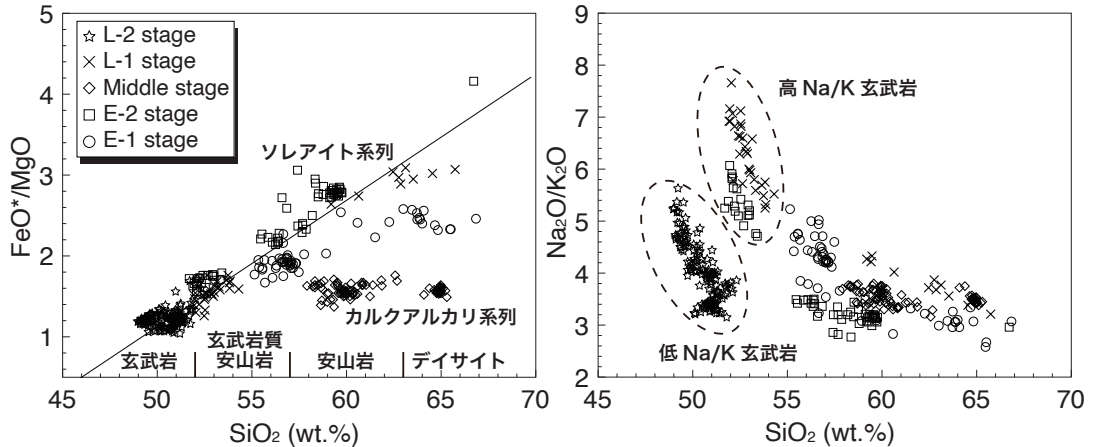


図4. (a) FeO^*/MgO - SiO_2 , (b) $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ - SiO_2 図にプロットした利尻火山噴出物の全岩化学組成。活動期の分類は石塚 (1999) に基づく。データは Ishizuka (2000), Kuritani & Nakagawa (2016), Taniuchi *et al.* (2020a, 2020b) より引用。

山が一切ない場所において、なぜ数10万年前に突如として火山活動が始まったのかという根本的な疑問は、長年に渡り未解であった。

しかし最近になって、北海道大学の栗谷博士らによって、利尻火山の活動の起源に対する一つの仮説が提案された (Kuritani & Nakagawa, 2016)。彼らは、L-2 stage (石塚, 1999) に利尻山頂直下に位置するローソク岩 (マグマ供給岩脈) から北東方向に流下した野塚溶岩流 (図2, 5) を対象とし

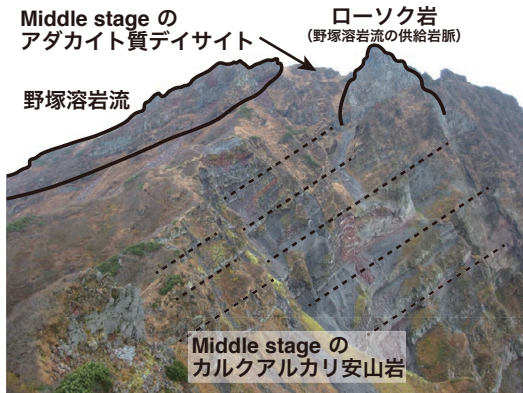


図5: 西側の杵形登山道から撮影した主成層火山体の露出断面。写真内の最下位は Middle stage のカルクアルカリ安山岩で、その上位に Middle stage のアダカイト質デイサイトがみられる。最上位は野塚溶岩流とその供給岩脈であるローソク岩である。

て、岩石学的・地球化学的な分析と解析を行った。その結果、沈み込んだ太平洋プレート (スラブ) から放出された水に富むスラブ由来流体がマントルかんらん岩に付加することによって野塚溶岩流の初生マグマが生成されたことを明らかにした (マントルかんらん岩は、水の付加を受けると融点が低下して溶融する)。さらに、上記で明らかにされたマグマの生成モデルから、野塚溶岩流の生成の起源となったスラブ由来流体がどのような温度条件で放出されたのかを、スラブ由来流体の $\text{H}_2\text{O}/\text{Ce}$ 比から推定した。その結果、流体放出時のスラブの温度として $860\text{--}1040^\circ\text{C}$ という値が得られた。この温度は、数値シミュレーションから推定されるスラブの表面温度よりも 100°C 以上高い。彼らは、このような高い温度がもたらされた原因として、スラブ下部のマントルからスラブ内部へ、高温物質が貫入した可能性を指摘した。利尻火山は、カムチャツカ半島から伸びる千島弧と、東北地方から伸びる東北日本弧との島弧会合部に位置する。このような島弧会合部では、沈み込んだプレートがそれぞれの島弧での沈み込みに引っ張られることによって、正断層系の割れ目が生じ、時には断裂することが一般に知られている。利尻火山の火山活動の起源となった流体放出は、千島弧と東北日本弧に沈み込んだスラブが引っ張られ、スラブへ高温物質の貫入することによって

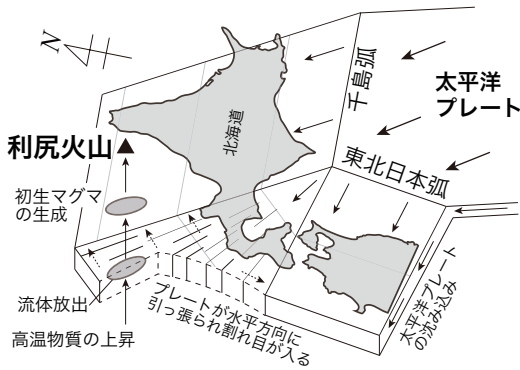


図6. 利尻火山のマグマ活動の起源に関する概念図. Kuritani & Nakagawa (2016) に加筆修正した.

引き起こされた可能性を指摘した (図6; Kuritani & Nakagawa, 2016).

このように、火山活動の要因としては、広域的なテクトニクスに起因する、スラブへ的高温物質の貫入に伴う流体の放出によって引き起こされていることが明らかにされた。しかし、利尻火山の場所や活動開始の時代を説明するには至っていない。この問題の解決には、東北日本～千島弧にかけての広域的なテクトニクスの変遷を詳細に明らかにすることによって、今後、何らかの決着を図ることができないのではないかと考えられる。

利尻山 (主成層火山体) の成因

筆者らの研究グループでは、「利尻調査研究事業」などからの援助を受け、利尻山を構成する主成層火山体を作ったマグマの成因を明らかにするために、2016年から足掛け4年間に渡って野外調査や岩石学的・地球化学的分析とそれらの解析を実施してきた。これらの成果については、2020年に2編の原著論文として公刊されたが、ここで改めてまとめ直し、加筆した上で紹介する。

利尻山の山頂周辺は、Middle stageに噴出したカルクアルカリ系列の安山岩～デイサイト (図4) からなる主成層火山体によって構成される (図2)。このうち、カルクアルカリ安山岩は層序的下位に、デイサイトは層序的上位に見られ、大半の噴出物はカルクアルカリ安山岩の溶岩流と火砕物である (図

5)。最下位の安山岩と最上位のデイサイトの Ar/Ar 年代測定結果は、それぞれ 34.6 ± 3.0 ka と 35.5 ± 1.4 ka (Taniuchi *et al.*, 2020b; ka は 1000 年前を表す) である。これらの年代値は、誤差の範囲内で層序と矛盾はなく、火山体が極めて短期間に急成長したことを示す。先述の通り、この山体の大部分はカルクアルカリ系列の安山岩からなる。一般に、玄武岩に対し、安山岩あるいはデイサイト質マグマは粘性が高いことから、それらが噴出すると高い標高の火山体を形成しやすいと言える。つまり、利尻山において安山岩やデイサイトの成因を明らかにすることは、利尻山が形成された理由を明らかにすることに他ならない。筆者らの研究では、マンテルで生成した初生マグマ (玄武岩) が 2% 程度の低含水量の場合、組成を大幅に変えることなく主に玄武岩質マグマとして噴出する一方、初生マグマが 5% 程度の高含水量である場合、地殻由来の高 SiO₂ 量の珪長質マグマと混合することによって中間的な安山岩質マグマとなることを明らかにした。つまり、利尻山の成長は、マンテル由来マグマの含水量によって決定づけられていたと言える。さらに、安山岩の上位に位置し、利尻山の山頂の一角 (中央峰周辺) も構成するデイサイトを詳細に解析したところ、約 35,000 年前の Middle stage には利尻火山直下のマンテル内部において、カルクアルカリ安山岩の初生マグマである玄武岩質マグマとスラブ由来のデイサイトという、化学組成の大きく異なる 2 種類のマグマが共存していたことを見出した。両者は、沈み込んだプレートに由来する超臨界流体がマンテル内部において水とメルトに分離するというプロセスを経て生成していたと考えられ、同プロセスによるマグマ生成を世界に先駆けて天然試料から実証的に解明するに至った。以下にその詳細を示す。

安山岩の成因：高含水量初生マグマによる地殻の溶融とマグマ混合

カルクアルカリ安山岩を構成する鉱物は、かんらん石、単斜輝石、斜方輝石、斜長石で、全岩の SiO₂ 含有量は 57.9–61.9 wt.% である。斑晶鉱物の量比や化学組成の変化といった岩石学的な観察結果

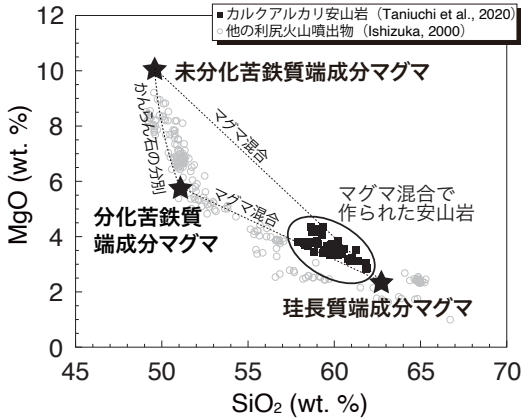


図7. MgO-SiO₂ 図上に示したカルクアルカリ安山岩のマグマ混合トレンドと端成分マグマの化学組成. カルクアルカリ安山岩およびその端成分マグマのデータは Taniuchi *et al.* (2020a), そのほかの噴出物のデータは Ishizuka (2000) より引用.

や, SiO₂ 含有量の変化に伴った化学組成や放射性同位体比 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr・²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb など) の系統的な変化などといった地球化学的な分析・解析結果は, カルクアルカリ安山岩が珪長質端成分マグマ (高 SiO₂, 低 MgO 含有量のデイサイト), 未分化苦鉄質端成分マグマ (低 SiO₂, 高 MgO 含有量の玄武岩), そして分化苦鉄質端成分マグマ (低 SiO₂, 低 MgO 含有量の玄武岩) の3端成分の混合によって形成されたことを示す (図7). そこで, それぞれ

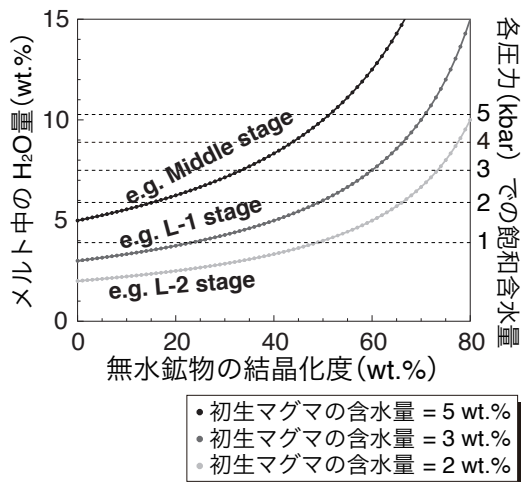


図8. 無水鉱物の結晶化度とメルト中の含水量の関係. Taniuchi *et al.* (2020a) を加筆修正.

のマグマの化学組成を推定し, マグマの成因を考察した. その結果, 珪長質マグマは地殻の部分溶融によって, 未分化マグマはマントルかんらん岩が水流体の付加を受けて溶融することによって, そして分化マグマは未分化マグマからかんらん石が結晶分別することによって生成されたことが明らかとなった.

さらに, カルクアルカリ安山岩に含まれる斜長石斑晶とメルトとの熱力学的な平衡関係から, 混合前の未分化マグマの化学組成と含水量を推定した. その結果, 化学組成は SiO₂ = 49.6 wt.% のアルカリ玄武岩で, その含水量は 5 wt.% 前後であることが明らかとなった. 次に, これらの結果を L-1 stage に噴出した杓形溶岩流および L-2 stage に噴出した野塚溶岩流の同様の情報と比較した. その結果, カルクアルカリ安山岩の苦鉄質端成分において推定された, 5 wt.% というマントル由来未分化マグマの含水量は, L-1 stage の杓形溶岩流 (-3 wt.%; Kuritani, 1999a) や L-2 stage の野塚溶岩流 (-2 wt.%; Kuritani & Nakagawa, 2016) のそれらに比べて有意に高いことがわかった. 未分化マグマ含水量が 3 wt.% と推定されている杓形および種富溶岩流は, マグマ溜まり周囲の地殻を溶融させながら結晶分化する同化分別結晶作用によって組成を変化させており, 玄武岩 (杓形溶岩流) ~ソレアイト系列安山岩 (種富溶岩流) 質のマグマとして噴出している (Kuritani *et al.*, 2005, 2007). そして, 未分化マグマ含水量が 2 wt.% と推定されている野塚溶岩流は, わずかな結晶分化のみを経て玄武岩マグマとして活動している (Kuritani & Nakagawa, 2016). 一方, 未分化マグマの含水量が 5 wt.% であるカルクアルカリ安山岩の未分化端成分マグマは, 地殻由来の珪長質マグマと混合することによって安山岩質マグマとして噴出している. Taniuchi *et al.* (2020a) では, これらのマグマプロセスや噴出物組成の相違をもたらした要因を未分化マグマ含水量であると考えた. マントルで発生した初生マグマが地殻内に位置すると, 温度の低下とともに主にかんらん石, 輝石, 斜長石といった無水鉱物の結晶化が進行する. 無水鉱物の結晶化が進行すると, メルト中の含水量が増加すると予想されるが, その増

加は初生マグマ含水量が高い場合により顕著となる(図8)。最終的に、飽和含水量に達したメルトからは、周囲の地殻へ水が放出されると考えられる。そして放出された水によって、地殻を構成する岩石の融点は低下し、珪長質マグマを生成する。つまり、マントル由来マグマが高含水量である場合、周囲の地殻が溶融することによって珪長質マグマが生成するのに対し、低含水量である場合には地殻由来の珪長質マグマは生成しないと考えられる。珪長質マグマが生成した場合には、最終的に玄武岩質マグマと珪長質マグマが混合することによって、カルクアルカリ安山岩マグマが生成する(Taniuchi *et al.*, 2020a; 図9)。つまり、マントル由来未分化マグマの含水量の違いが、地殻内におけるマグマプロセスと噴出物組成を決定付けており、高含水量である場合にはカルクアルカリ系列の安山岩を生成することが明らかとなった。さらに、噴出物が作り出す地形も考慮するのであれば、利尻山はマントル由来マグマが高含水量であったからこそ生成されたと言える。

デイサイトの成因：超臨界流体の水とメルトへの分離によるマグマの生成

一方のデイサイトは、先述した Middle stage のカルクアルカリ安山岩の活動直後に噴出している。安山岩に比べてその噴出量は極めて少なく、山頂周辺および雄忠志内川右岸においてわずかに露出するのみである。全岩化学組成は $\text{SiO}_2 = 64.1\text{--}65.3$ wt.% で、高 Sr/Y・La/Yb 比のアダカイト的特徴を示し、斜長石の分別や濃集の指標となる Eu 異常を示さない。斑晶鉱物としては単斜輝石、斜方輝石、斜長石が含まれるが、マグマ混合プロセスを経て生成した岩石で特徴的に見られる斜長石斑晶の汚濁帯や斑晶鉱物の逆累帯構造は認められない。さらに、斜長石斑晶の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は全岩の組成範囲内に収まる。これらの岩石学的・地球化学的特徴は、デイサイトが地殻内において結晶分別・結晶集積・マグマ混合といった各マグマプロセスを経験していないことを示す。さらに、利尻火山直下の 25km という厚さの地殻からは、アダカイト的特徴を示すマグマは生成されないことから、デイサイトはマントルあるいは沈み込みスラブにおいて生成したと考えら

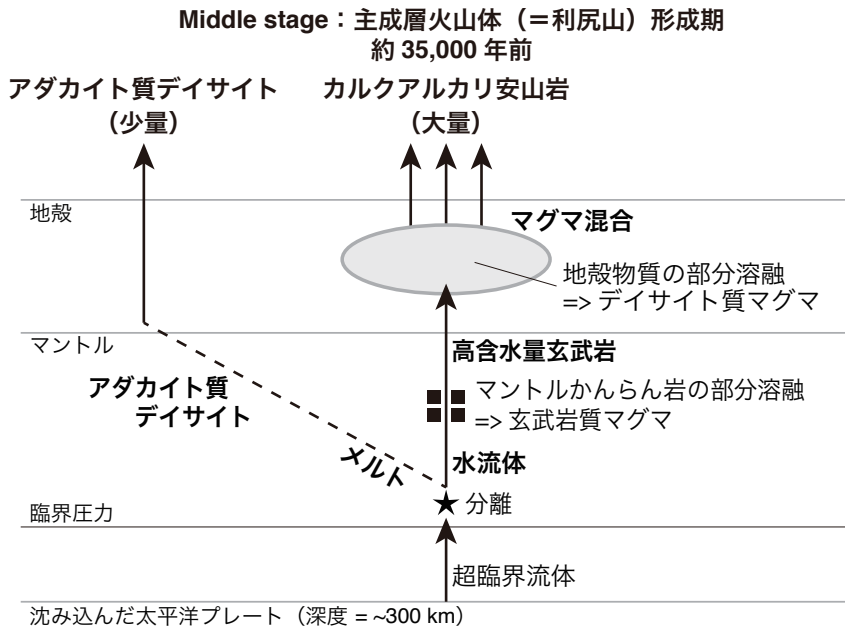


図9. 主成層火山体形成期のマグマ生成・供給モデル。詳細は本文を参照。

れる。アダカイト質デイサイトとカルクアルカリ安山岩は ^{230}Th に富み、類似した ^{238}U - ^{230}Th 放射性同位体比を示す。さらに、Ar/Ar年代から両者の噴出の時間差は3,500年以内と考えられることから、アダカイト質デイサイトとカルクアルカリ安山岩の生成に対し、同一起源のスラブ物質が同時期に関与したことが示唆される。カルクアルカリ安山岩の苦鉄質端成分マグマは、スラブ由来の水流体によるフラックス溶融によって生成した (Taniuchi *et al.*, 2020a) と考えられることから、約35 kaの利尻火山直下にはスラブ由来の水流体とスラブ由来のケイ酸塩メルトが共存していた (図9) と考えられる。水流体とケイ酸塩メルトは同一温度のスラブからは同時に生成されないことから、両者はスラブ由来の超臨界流体が分離することによって生成した可能性が高い。つまり、アダカイト質デイサイトはスラブ由来の超臨界流体が臨界点において水流体とメルト成分に分離したメルト成分から生成した (図9) と考えた。近年の実験岩石学的研究からは、沈み込みスラブから放出された超臨界流体が臨界圧力において水流体とメルト成分に分離し、その分離したメルト成分から中間質 (安山岩質) ないしは珪長質 (デイサイト質) マグマが直接的に生成されている可能性が提案されていた。しかしこれまで、超臨界流体の分離によって生成した珪長質マグマは天然から報告されていなかった。本研究では、利尻火山のデイサイトから、スラブ由来超臨界流体がウェッジメント内の臨界点において水成分とメルト成分に分離し、そのメルト成分から珪長質マグマが生成することを、世界で初めて実証することに成功した (Taniuchi *et al.*, 2020b)。

まとめと今後の展開

本論の後半で紹介したように、筆者らの研究によって利尻山の形成時期やマグマの成因についてはある程度解明することができた。これらの研究では、利尻山を作った要因が、マントル由来初生マグマの含水量が高かったためであると結論づけた。さらにデイサイトについては、スラブ由来超臨界流体の分離したメルト成分から生成されたことを示し

た。このプロセスによるマグマの生成は、利尻火山での研究において世界で初めて実証されたこととなった。また、利尻火山の活動の要因については、本論で紹介した Kuritani & Nakagawa (2016) が、プレートの屈曲部における流体の放出によってもたらされたという新しい仮説を提案した。このように、2010年以降の研究で、利尻火山の理解は一層進んだと考える。

また、利尻火山の山体は侵食によって深く開析されており、通常の成層火山では得難い、火山の活動開始から終了までの噴出物を直接観察できる。そのため、同一の場所で活動したマグマの数万年以上にわたる長期的な変遷を高解像度で捉えることができる。意外なことに、火山の活動開始から終了に至るまでの"火山の一生"を、岩石学や地球化学などといった手法から総合的に明らかにした例は、世界的に見てもほとんどない。利尻火山は、この"火山の一生"を捉えるのに絶好の研究対象でもある。現在筆者らは、活動初期の噴出物を岩石学的・地球化学的に解析しており、利尻火山の10万年以上にわたる火山成長史や活動変遷の詳細が解明されつつある。この点については、またの機会に紹介したい。

謝辞

筆者が利尻火山、とりわけ利尻山 (主成層火山体) を対象として行なった研究の一部は、利尻島調査研究事業 (2018年度採択) の助成を受けている。また、研究の一部にJSPSの科研費 (19J11030, 16H04071, 25120006) と次世代火山研究総合プロジェクトの研究費を使用した。国立公園内および国有地内における調査に際しては、環境省稚内自然保護官事務所、宗谷管林署の各機関にご配慮頂いた。利尻町立博物館の佐藤雅彦学芸員、利尻うみねこゲストハウスの西島徹氏と西島加奈子氏には野外調査に際して様々なご協力を頂いた。本論で紹介した、筆者の関連する成果の一部は、栗谷豪博士 (北海道大学)、中川光弘教授 (北海道大学)、横山哲也教授 (東京工業大学)、中村栄三教授 (岡山大学) との共同研究によるものである。北海道大学岩石学火山学研究グループの方々および産業技術総合研究所の石塚吉浩博士

には日常的に議論していただいている。以上の方々および各関係機関に感謝の意を表する。

参考文献

- 阿部顯, 1935. 北見国利尻火山地質調査報告. 北海道大学理学部卒業論文. 札幌. 62pp.
- 石塚吉浩, 1999. 北海道北部, 利尻火山の形成史. 火山, 1: 23–40.
- 石塚吉浩・中川光弘, 1999. 北海道北部, 利尻火山噴出物の岩石学的進化. 岩鉱, 94: 279–294.
- Ishizuka, Y., 2000. Mantle diaper model for polygenetic volcanoes: Geological and petrological study of Rishiri Volcano, northern Hokkaido, Japan. PhD thesis, Graduate School of Science, Hokkaido University. Sapporo. 177pp.
- Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima & T. Matsuzawa, 2010. Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials. *Earth and Planetary Science Letters*, 290: 415–426.
- 小林哲夫, 1987. 利尻火山の地質. 地質学雑誌, 93(10): 749–760.
- 小林哲夫, 1987. 地殻の部分熔融による火山岩成因論. 火山, 32, 237–257.
- Kobayashi, T., 1989. Geology and Petrology of Rishiri Volcano, Hokkaido, Japan. PhD thesis, Graduate School of Science, Hokkaido University. Sapporo. 139pp.
- 近藤玲介・塚本すみ子, 2009. 北海道北部, 利尻火山西部における OSL 年代測定による古期火山麓扇状地の形成年代. 第四紀研究, 48(4): 243–254.
- 近藤玲介・佐藤雅彦・宮入陽介・松崎浩之, 2015. 利尻島, ギボシ沼割れ目火口における AMS14C 年代. 利尻研究, (34): 61–66.
- 近藤玲介, 2015. OSL 年代測定による北海道北部, 利尻火山における側火山群の形成年代. 駿台史学, 153: 17–36.
- Kuritani, T., 1998. Boundary layer crystallization in a basaltic magma chamber: Evidence from Rishiri Volcano, northern Japan. *Journal of Petrology*, 39(9): 1619–1640.
- Kuritani, T., 1999a. Phenocryst crystallization during ascent of alkali basalt magma at Rishiri Volcano, northern Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 88: 77–97.
- Kuritani, T., 1999b. Thermal and compositional evolution of a cooling magma chamber by boundary layer fractionation: model and its application for primary magma estimation. *Geophysical Research Letters*, 26: 2029–2032.
- Kuritani, T., 1999c. Boundary layer fractionation constrained by differential information from the Kutsugata lava flow, Rishiri Volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104: 401–417.
- Kuritani, T., 2001. Replenishment of a mafic magma in a zoned felsic magma chamber beneath Rishiri Volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 62: 533–548.
- Kuritani, T. & E. Nakamura, 2006. Elemental fractionation in lavas during post-eruptive degassing: evidence from trachytic lavas, Rishiri Volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 149: 124–138.
- Kuritani, T. & M. Nakagawa, 2016. Origin of ultra rear-arc magmatism at Rishiri Volcano, Kuril arc. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17: doi:10.1002/2016GC006594.
- Kuritani, T., H. Kitagawa & E. Nakamura, 2005. Assimilation and fractional crystallization controlled by transport process of crustal melt: Implications from an alkali basalt-dacite suite from Rishiri Volcano, Japan. *Journal of Petrology*, 46: 1421–1442.
- Kuritani, T., T. Yokoyama & E. Nakamura, 2007. Rates of thermal and chemical evolution of mag-

- mas in a cooling magma chamber: A chronological and theoretical study on basaltic and andesitic lavas from Rishiri Volcano, Japan. *Journal of Petrology*, 48: 1295–1319.
- Kuritani, T., T. Yokoyama & E. Nakamura, 2008. Generation of rear-arc magma induced by influx of slab-derived supercritical liquids: Implications from alkali basalt lavas from Rishiri Volcano, Kurile arc. *Journal of Petrology*, 49: 1319–1342.
- Kuritani, T., T. Yoshida & Y. Nagahashi, 2010. Internal differentiation of Kutsugata lava flow from Rishiri Volcano, Japan: processes and timescales of segregation structures formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 195: 57–68.
- 松井和典・一色直紀・秦光雄・山口昇一・吉井守正・小野晃司・佐藤博之・沢村孝之助, 1967. 5万分の1地質図幅「利尻島」および同説明書. 北海道開発庁. 札幌. 25pp.
- 佐藤雅彦・近藤玲介・百原新・西内李佳・紺野美樹・五十嵐八枝子・重野聖之・長井雅史・小杉和樹・遠藤邦彦・入野智久, 2013. 利尻島の湿原の生態系保全と自然教育のための環境史・植生史に関する研究—ボーリング調査で探る南浜湿原の生い立ち—. プロ・ナトゥーラ・ファンド助成第21期助成成果報告書, 101–116.
- Taniuchi, H., T. Kuritani & M. Nakagawa, 2020a. Generation of calc-alkaline andesite magma through crustal melting induced by emplacement of mantle-derived water-rich primary magma: Evidence from Rishiri Volcano, southern Kuril Arc. *Lithos*, 354–355, 105362.
- Taniuchi, H., T. Kuritani & T. Yokoyama, E. Nakamura & M. Nakagawa, 2020b. A new concept for the genesis of felsic magma: the separation of slab-derived supercritical liquid. *Scientific Reports*, 10, 8698.
- 植木岳雪・近藤玲介, 2008. 利尻火山, 杓形溶岩流の噴出年代: 溶岩直下の腐植質シルト層に含まれる炭化木片の AMS¹⁴C 年代に基づいて. 第四紀研究, 47(5): 349–353.
- 植木岳雪・近藤玲介, 2010. 北海道北部, 利尻火山起源の中～後期更新世溶岩の K-Ar 年代. 地質学雑誌, 116(12): 686–689.
- 植木岳雪・近藤玲介, 2011. 北海道北部, 利尻火山起源の鴛泊溶岩の K-Ar 年代と火山活動の開始時期. 地質学雑誌, 117(11): 648–650.