

学 位 論 文 題 名

Formation and Evolution of Silicic Magma Plumbing System:
Petrology of the Historic Activity of Usu Volcano, Japan

(珪長質マグマシステムの形成と進化:
有珠火山歴史時代活動における岩石学的研究)

学位論文内容の要旨

近年、活動的火山に対する岩石学的研究により、マグマ溜りの構造や噴出プロセス、中長期的なマグマシステムの進化等が解明されつつある。しかし、その多くは苦鉄質マグマ主体の火山であり、爆発的噴火をもたらすであろう珪長質マグマ主体の火山についての研究は少ない。本研究では、珪長質マグマ活動を繰り返している有珠火山に注目した。

北海道南西部洞爺カルデラの南端に位置する有珠火山は、長い休止期の後、1663年に歴史時代最大規模の噴火で活動を再開し、現在まで計9回と頻繁に噴火している。本火山に対する岩石学的研究は数多くなされている。その中でも Tomiya and Takahashi (1995)は、歴史時代噴出物中に珪長質な Type A 斑晶、苦鉄質な Type B 斑晶、そして両者の中間的な斑晶が認められることから、歴史時代噴火を通して流紋岩質マグマと玄武岩質安山岩マグマの2端成分マグマ混合が繰り返されたとした。しかし、最近の彼らの研究では、1977年以降は異なるデイサイトマグマの注入があったとされており、端成分マグマの数に揺らぎが見られる。本研究では、有珠火山歴史時代噴出物の岩石学的特徴の時間変化より、マグマ供給系形成時のマグマ溜りの構造と噴出プロセス、そしてマグマ供給系の変遷について再検討を行った。

最近の地質学的研究により1663年噴火の推移が再検討され、最盛期の降下軽石(Us-b 降下軽石)及びベースサージに先立つ小規模な降下軽石及び火砕サージステージが定義された。斑晶鉱物化学組成をみると、従来の研究で指摘されたように、全ての噴出物中に Type A・B 斑晶が認められる。しかし、微量元素量に注目すると、従来の Type A 斑晶が珪長質な Type A₁ 斑晶と中間的な Type A₂ 斑晶に区分され、3タイプの斑晶が共存していることが分かった。全岩化学組成及び斑晶サイズに基づくと、Type A₂ 斑晶は珪長質マグマと苦鉄質マグマの混合マグマ由来であり、噴火の数年前から成長していた、つまりマグマ混合が噴火の数年前に起きたと考えられる。

Type A₂ 斑晶量比に注目すると、混合マグマは噴火最盛期だけでなく、噴火初期にも多く噴出していたことが分かる。このような混合マグマの先行噴出は、一般的な珪長質マグマと苦鉄質マグマの境界層からの噴出では説明可能できない。しかし、高温の苦鉄質マグマが低温の珪長質マグマに貫入することで熱対流が発生し苦鉄質マグマが上昇、マグマ溜り上部において混合マグマが生成する、という熱対流モデルで説明可能である。また、珪

長質マグマと混合マグマは密度的にはほぼ変わらない一方、混合マグマの方が約 80-200℃ 高いと見積もられることから、マグマ溜り上部は熱的にも安定していたと考えられる。よって、1663 年噴火では、成層マグマの上位に混合マグマが存在する逆成層マグマ溜りの上部からの噴出が起きたと結論付けた。

歴史時代噴出物は白色・縞状・灰色軽石及び 4 つの溶岩ドームからなる。これら噴出物は紫蘇輝石流紋岩～デイサイトであり、時間と共に苦鉄質になる傾向がある。本研究では、岩石学的特徴より、歴史時代噴出物を 1663 年・pre-1769 年～1853 年・1943-45 年～2000 年(以下グループ 1・2・3 とする)の 3 つのグループに区分した。

斑晶量はグループ 1 が約 5 vol.%以下、グループ 2 が約 6-20 vol.%, グループ 3 では約 5-10 vol.%である。共通する斑晶鉱物は斜長石・斜方輝石・Fe-Ti 酸化物・単斜輝石である。更に、グループ 1 には角閃石が、グループ 2 には角閃石・石英が存在する。斜長石・斜方輝石コア組成ヒストグラムにおいて、グループ 1 はバイモーダルな組成分布を示す。一方グループ 2 は中間組成の斑晶も多く存在し、非常に幅広い組成分布を示す。グループ 3 は中間組成の斑晶のみで、ユニモーダルな組成分布を示す。全岩化学組成ハーカー図をみると、 $\text{TiO}_2 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 等において、各グループで組成ギャップが認められ、それぞれ異なる直線トレンドを描いている。石基ガラス組成においても、 $\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}^*$ 等のハーカー図では、各グループで組成領域が明瞭に異なる。

噴出物中に組成的に非平衡な斑晶が共存していることから、歴史時代噴火を通してマグマ混合が起きていたと考えられる。全岩化学組成微量元素をみると、特に微量元素比において、異なるかつ平行なマグマ混合トレンドを描き、先駆グループの混合マグマやそれらが分化したものがその後の活動の端成分マグマにはなり得ない。また、石基ガラス組成についても同じ SiO_2 量で比較すると、 $\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}^*$ 等の含有量が明らかに異なっており、グループ間の多様性がマグマ混合や先駆グループからの結晶分化作用では説明できない。よって、有珠火山歴史時代噴火では類似しているが独立した 3 つのマグマ供給系が順次活動したと考えられる。

歴史時代噴出物は Sr 同位体比が類似していることから、起源物質が類似していると考えられる。これら珪長質マグマの多様性をもたらす要因として、結晶分化作用、同化結晶分別作用、そしてマグマ発生時の部分溶融度の違いが挙げられる。これらを検討した結果、マグマ発生時の部分溶融度の違いであれば説明可能であることが分かった。また、熱伝導モデルによると、地殻温度は熱源からの距離に対して対数関数的に変化する。このことを考慮すると、高溶融度のメルトは少量生成され、低溶融度のメルトはより多く生成されることが考えられる。これを有珠火山に対応させると、グループ 1 は最も珪長質で大量、グループ 2・3 はより苦鉄質で少量となり、噴火規模・組成とも調和的である。

マグマ供給系と噴火タイプを比較すると、桁外れに大きい山頂噴火(1663 年)、テフラ噴出量が半分以下程度の山頂噴火の繰り返し(pre-1769 年～1853 年)、そして、テフラ噴出量が更に小さい山麓噴火の繰り返し(1943-45 年～2000 年)、という様に珪長質マグマの変化と共に噴火タイプが変化していることが分かった。また、本質物が噴出していないため未検討であった 1910 年噴火に注目すると、噴火タイプより 20 世紀タイプに区分され、現在のマグマ供給系は 20 世紀に入ってから活動し始めたものであると考えられる。

以上より本研究では、組成的逆成層マグマ溜りが数年間その構造を保ちうること、有珠火山のような小規模な火山でも複数の珪長質マグマが存在すること、そして珪長質マグマの変化により噴火タイプが変化することを指摘することができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 川 光 弘

副 査 教 授 藤 野 清 志

副 査 教 授 茂 木 透

副 査 助 教 授 新 井 田 清 信

副 査 教 授 谷 口 宏 充 (東北大学東北アジア

研究センター)

学 位 論 文 題 名

Formation and Evolution of Silicic Magma Plumbing System: Petrology of the Historic Activity of Usu Volcano, Japan

(珪長質マグマシステムの形成と進化：

有珠火山歴史時代活動における岩石学的研究)

近年、活動的火山に対する岩石学的研究により、マグマシステムの進化等が解明されつつあるが、爆発的噴火をもたらす珪長質マグマ活動についての研究は少ないのが現状であった。本論文では、特に活動的な有珠火山に注目し、珪長質マグマシステムの形成・進化モデルを提示することを目的としたものである。北海道南西部に位置する有珠火山は、長い休止期の後、1663年から現在まで計9回と頻繁に噴火しており、従来数多くの岩石学的研究がなされてきた。その中でも Tomiya and Takahashi (1995, 2005)では、歴史時代噴出物は基本的には流紋岩質マグマと玄武岩質安山岩マグマの2端成分マグマ混合の産物であるとし、1977年以降は異なるデイサイトマグマの注入があった可能性を指摘している。しかしながら、これらの研究は特定の斑晶鉱物に注目しマグマそのものの特徴を捉えていないという問題があり、再検討の必要があった。

本論文では、まず1663年噴出物の岩石学的特徴より、マグマ供給系形成時のマグマ溜りの構造と噴出プロセスについて検討した。従来の研究では、1663年噴出物には珪長質・苦鉄質の2タイプの斑晶が存在するとされていたが、微量元素に注目すると珪長質な斑晶が更に2タイプに区分され、3タイプの斑晶が共存していることを指摘した。また、全岩化学組成及び斑晶サイズより、中間的な斑晶は珪長質マグマと苦鉄質マグマの混合マグマ由来であり、マグマ混合が噴火の数年前に起きたとした。更に斑晶タイプ量比の時間変化より、混合マグマ先行噴出が起きていたと指摘した。このような現象は、一般的な成層マ

グマからの噴出では起こりえないが、貫入した苦鉄質マグマが熱対流により上昇し、マグマ溜り上部で混合マグマを生成した場合であれば可能である。このような逆成層構造は通常不安定であるが、1663年噴火の場合は、混合マグマは珪長質マグマと密度的には変わらない一方、より高温であることから、逆成層マグマは噴火までの数年間安定に存在しうることを示した。以上より本論文は、1663年噴火では噴火数年前に形成された上部に混合マグマが存在する逆成層マグマ溜りの上部からの噴出が起きたと結論付けた。

次に本論文では、歴史時代噴出物の岩石学的特徴の時間変化より、マグマ供給系の変遷を検討した。著者は歴史時代噴出物を岩石記載・鉱物化学組成の特徴より、1663年・pre-1769年~1853年・1943-45年~2000年の3つのグループに区分した。従来の研究では歴史時代噴火を通して2端成分マグマ混合が起きていたとしているが、全岩化学組成の $\text{TiO}_2 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 等のハーカー図において各グループで異なる直線トレンドを描いていること、石基ガラス組成の $\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}^*$ 等のハーカー図では各グループで組成領域が明瞭に異なることから、異なる2端成分マグマ混合が起きていたことを指摘した。また、全岩化学組成微量元素比において、異なるかつ平行なマグマ混合トレンドを描いていること、石基ガラス組成の $\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}^*$ 等の含有量が明らかに異なっていることから、グループ間の多様性がマグマ混合や先駆グループの結晶分化作用では説明できないことを指摘し、有珠火山歴史時代噴火では独立した3つのマグマ供給系が順次活動したと結論付けた。

また本論文では、複数の珪長質マグマの成因について議論した。歴史時代噴出物の同位体比組成の類似性より、珪長質マグマの起源物質は同一であると考えられる。これら珪長質マグマの多様性をもたらすプロセスは、起源物質（地殻物質）の部分熔融度の差であることをモデル計算によって示した。そして単一の熱源からの地殻内の熱伝導モデルにより、高熔融度のメルトは少量生成され、低熔融度のメルトはより多く、かつ同時に生成される可能性を指摘した。これを歴史時代噴火に対応させると、1663年で最も珪長質で大量の、それ以降は時間と共に徐々に苦鉄質で少量となる、珪長質マグマの変化を合理的に説明できる。このモデルは定性的ではあるが、これまでにないユニークな珪長質マグマ生成モデルである。さらに本論文では、マグマ供給系と噴火タイプを比較し、珪長質マグマの変化と共に噴火口の位置や噴火タイプが変化していることを指摘した。そして現在のマグマ供給系は20世紀に入ってから活動し始めたものであることを指摘した。

以上のように本論文は従来解明が困難であった珪長質マグマシステムの形成と進化について、大量・高精度なデータを基にして、多様な議論を行ったものである。その成果は火山学・岩石学的に重要であるだけでなく、火山防災など社会的要請にも貢献でき、活火山研究として高く評価できる。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。