

深部玄武岩質マグマ溜まり中の分別結晶作用により形成
される高温、低 H_2O 珪長質マグマ：
イエローストーンホットスポットの例

西村光史

High-temperature, low- H_2O silicic magmas generated in a deep
basaltic magma chamber by fractional crystallization :
an example from the Yellowstone hotspot, USA

Koshi NISHIMURA

Abstract

High-temperature, low- H_2O rhyolites have been reported from the Bruneau-Jarbidge eruptive center of the Yellowstone hotspot, USA. This paper shows how silicic magmas that produce such rhyolites can be generated by the fractional crystallization of a plume-derived basaltic magma at high pressures, as deduced from output of the rhyolite-MELTS thermodynamic model. A Grande Ronde basalt (which constitutes >80 vol.% of the Columbia River flood basalts) with 0.1 wt.% H_2O is used as the starting composition. Seismic tomography studies of the Yellowstone hotspot indicate the presence of a basaltic magma body in the lower crust with a volume of $46,000 \text{ km}^3$ at depths of 20–50 km. The model results suggest that the basaltic magma body generates ~10 vol.% silicic melt. Multiplying this melt fraction by the volume of the lower-crustal magma body gives ~ $4,600 \text{ km}^3$ of silicic melt, which is larger than the total volume of silicic magma released by three major caldera-forming eruptions ($3,780 \text{ km}^3$).

Keywords : fractional crystallization, magma chamber, rhyolite, basalt, Yellowstone hotspot, Columbia River basalt

1. はじめに

島弧火山下で、苦鉄質マグマと珪長質マグマが同時期に活動している場合、噴出物の鉍物の化学組成を用いた地質温度計により、珪長質マグマは750–850°C程度の温度を示すことが多い。苦鉄質マグマと比較して低温であることから、この場合の珪長質マグマは“低温マグマ”と一般的に呼ばれている。しかし、大陸内のホットスポットであるイエローストーン ホットスポットでは、1000°Cに達する高温の珪長質マグマの活動が見られることがある。例えば、スネークリバー平原の中央部付近で12.8–8.1 Maに活動したBruneau-Jarbridge噴出中心の珪長質マグマ（インディアンバット流紋岩とクーガーポイント・タフ）は、鉍物組み合わせを再現した高温高压実験から、噴火前に、温度:900–1030°C、H₂O量:0.5–1.5 wt.%の条件であったことがわかっている（Almeev et al., 2012）。珪長質マグマのH₂O量は、天然の火山岩や深成岩の鉍物の晶出順序と高温高压実験との比較から一般的に3–5 wt.%（Scaillet et al., 1998）であることを考えあわせると、この珪長質マグマは高温かつ低H₂O量であるといえる。しかし、このような高温、低H₂O量の珪長質マグマがなぜ生じているのかについてはほとんどわかっていない。

本研究では、イエローストーンホットスポットに推定される深度20–50 kmの深部玄武岩質マグマ溜まり（Huang et al., 2015）の結晶分化作用により、高温、低H₂O量の珪長質マグマが生じうるのかについて、熱力学モデルrhyolite-MELTS（Gualda et al., 2012）を用いた検討を行なった。イエローストーンホットスポットのマントルプルーム由来の玄武岩（コロンビアリバー洪水玄武岩の80 vol%以上を構成するグランデロンド玄武岩）の化学組成（Takahashi et al., 1998）を用いた計算の結果、深部玄武岩質マグマ溜まりの結晶分化作用によって高温、低H₂O量の珪長質マグマの生成が可能であることが明らかになったのでここに報告する。

2. イエローストーン ホットスポットの活動

イエローストーン ホットスポットでは、マントルプルームの上を北米プレートが年間2.35 cm南西に移動しているため、火成活動の中心は時間とともに北東に移動し、ホットスポットトラックを形成している。イエローストーン ホットスポットの活動は、プルームヘッドの到達によって16 Maのコロンビアリバー洪水玄武岩の活動から開始したと考えられている（Pierce and Morgan, 1992）。コロンビアリバー洪水玄武岩は、ワシントン州、オレゴン州、アイダホ州にまたがる広大な面積を占めており、その後16–14 Maに同じく広大な面積を占める流紋岩の活動が生じている。火成活動の中心は前述のように時間とともに北東に移動し、現在はイエローストーン カルデラにある。Takahashi et al. (1998)は、高温高压実験に基づき、コロンビアリバー洪水玄武岩は、マントルプルームの中に取り込まれていた古い海洋底地殻（MORB）が、約70 kmの深さで30–50%部分溶融することにより形成されたことを示した。ペリドタイト（マントル物質）と海洋地殻からなる不均質なマントルプルームがあると、融点のより低い海洋地殻が選択的に溶融することになる。

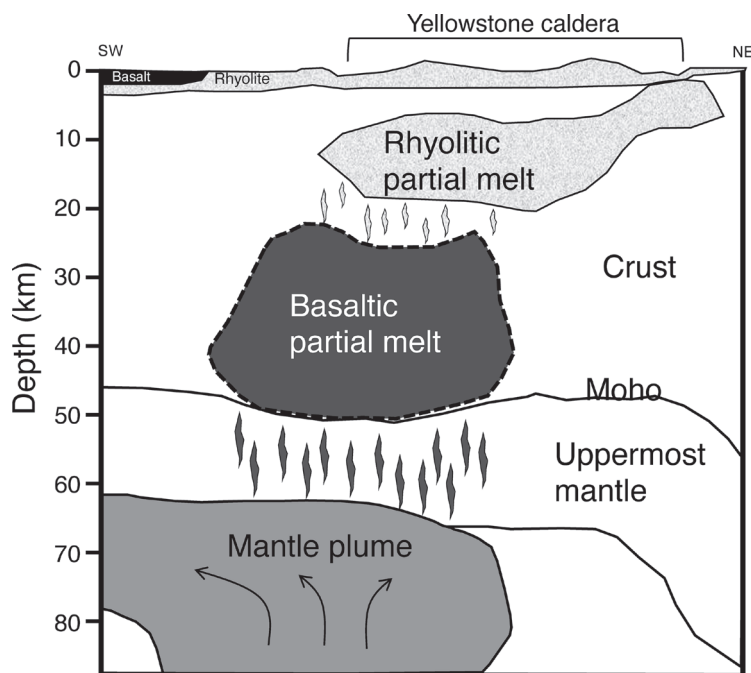


図1. 地震波トモグラフィーから推定されているイエローストーン ホットスポットの地下構造 (Huang et al. 2015を一部簡略化)。深部の玄武岩質マグマ溜まりの体積は約46,000 km³であり、浅部の珪長質マグマ溜まりの体積の4.5倍である。深部の玄武岩質マグマ溜まりのメルトフラクションは~2%と見積もられている。マンテルプルームの部分溶融メルトは玄武岩質マグマ溜まりに移動し、玄武岩質マグマ溜まりの部分溶融メルトは珪長質マグマ溜まりに移動する。

現在のイエローストーン ホットスポットでは、地震波トモグラフィーから、深度4-15 km付近に約1,000 km³の珪長質マグマ溜まりが存在し、さらに深部の深度20-50 km付近に約46,000 km³の玄武岩質マグマ溜まり (Huang et al., 2015) が存在することがわかっている (図1)。近年、マグマが流動性をもつ場合のみ、マグマ溜まりという用語を使用する論文もあるが、ここではメルトが少量でも存在すればマグマ溜まりと呼ぶことにする。P波速度の減衰から、珪長質マグマ溜まりのメルトフラクションは約9%、玄武岩質マグマ溜まりのメルトフラクションは約2%と推定されており、それぞれのメルト体積はどちらも900 km³程度となる (Huang et al., 2015)。玄武岩質マグマ溜まりには、プルームヘッドの部分溶融で生じたマグマが供給され、玄武岩質マグマ溜まりで分化したマグマは上昇し、浅部の珪長質マグマ溜まりに供給されると考えられる (図1)。

イエローストーンカルデラを形成した主要な3つの珪長質マグマの噴火では、約2.1 Maにハックルベリーリッジ・タフ (噴出量2500 km³以上)、約1.3 Maにメサフォールズ・タフ (噴出量約280 km³)、0.62 Maにラバクリーク・タフ (噴出量約1000 km³) が噴出している。これらの噴出物に含まれるジルコンのHf同位体比分析の結果、それぞれの噴出物はマンテル由来 (ここでは玄武岩質マグマ溜まり由来) の分化マグマが、始生代地殻を同化していることを示した (Wotzlaw et al., 2015)。始生代地殻の同化量は15-45%程度であ

り、初期マグマ温度は高温である必要がある。深部の玄武岩質マグマ溜まり由来の分化マグマが、前述のBruneau-Jarbridge噴出中心の珪長質マグマ (12.8–8.1 Ma) のように1000°Cを超えるような高温マグマであるかを以下で検討する。

4. 熱力学モデルrhyolite-MELTSを用いた検討と議論

前述のBruneau-Jarbridge噴出中心の高温 (900–1030°C)、低H₂O量 (0.5–1.5 wt.%) の珪長質マグマ (Almeev et al., 2012) を深部玄武岩質マグマ溜まりの結晶分化作用で再現できるかを、熱力学モデルrhyolite-MELTS (Gualda et al., 2012) を用いて調べた。深部玄武岩質マグマ溜まりには、イエローストーンホットスポットの活動最初期に大量噴出したコロンビアリバー洪水玄武岩と同じマグマが蓄積したと仮定する。計算では、コロンビアリバー洪水玄武岩の80 vol%以上を構成するグランデロンド玄武岩 (玄武岩質安山岩) の化学組成 (SiO₂ 53.80 wt.%; Takahashi et al., 1998) に少量の水 (0.1 wt.%) を加えたものを初期組成とした。グランデロンド玄武岩は無斑晶の溶岩であり、コロンビアリバー洪水玄武岩の活動ピーク時における真のメルト組成を示している。マグマ溜まりの初期条件として、斑晶がないメルトの状態を考えるが、深度20–50 kmの玄武岩質マグマ溜まり (図1) の全体が同時期にメルトに満たされることは、熱・物質収支から考えにくい。より小規模なマグマ溜まりが複数回形成されたと考える方が自然であろう。ここではマグマ溜まりの大きさは問わず、圧力700 MPaの浅部 (深度約23 km) と圧力1.4 GPaの深部 (深度約47 km) での分別結晶作用によるメルトの組成変化を計算する。マグマの初期温度はリキダス温度とし、メルトのSiO₂濃度が70 wt.%に達する温度まで計算する。70 wt.%のSiO₂濃度は、Bruneau-Jarbridge噴出中心のインディアンバット流紋岩のSiO₂濃度 (Almeev et al., 2012) に相当する。酸素分圧はTakahashi et al. (1998) の実験で採用されたNNOとした。

圧力700 MPaと1.4 GPaにおける温度とメルトSiO₂濃度の関係を図2に示す。傾きの変化は晶出し分別される主成分鉱物種の変化に対応している。700 MPaでは、1283°Cでリキダス相として単斜輝石が晶出を始め、1235°Cで斜長石、1139°Cでかんらん石が晶出相に加わり、1055°Cで石英が晶出する。1.4 GPaでは、1388°Cでリキダス相として単斜輝石が晶出を始め、1270°Cでザクロ石、1250°Cで斜長石、1112°Cで石英が晶出する。メルトのSiO₂濃度が70 wt.%に達した時、700 MPaでは950°C、1.4 GPaでは1018°Cの高温を示すことが明らかとなった (図2)。またこの時、メルトのH₂O量は圧力700 MPaで1.1 wt.%程度、1.4 GPaで0.9 wt.%程度となる (図3)。含水鉱物が晶出していない条件では、H₂Oはメルトに一方的に濃集するため、最終的なメルトのH₂O量は初期濃度 (ここでは0.1 wt.%) とメルトフラクションのみに依存する。現時点でこの初期H₂O濃度を制約することはできないが、初期H₂O濃度が0.1 wt.%程度であれば、深部玄武岩質マグマ溜まりの結晶分化作用によって、高温、低H₂O量の珪長質マグマを生成できることが明らかとなった。12.8–8.1 Maに活動したBruneau-Jarbridge噴出中心の高温 (900–1030°C)、低H₂O量 (0.5–1.5 wt.%) の珪長質マグマ (Almeev et al., 2012) は、このような深部玄武岩質マグマ溜まりの結晶分化作用によって生成された可能性がある。今後の地球化学的検証が待たれる。

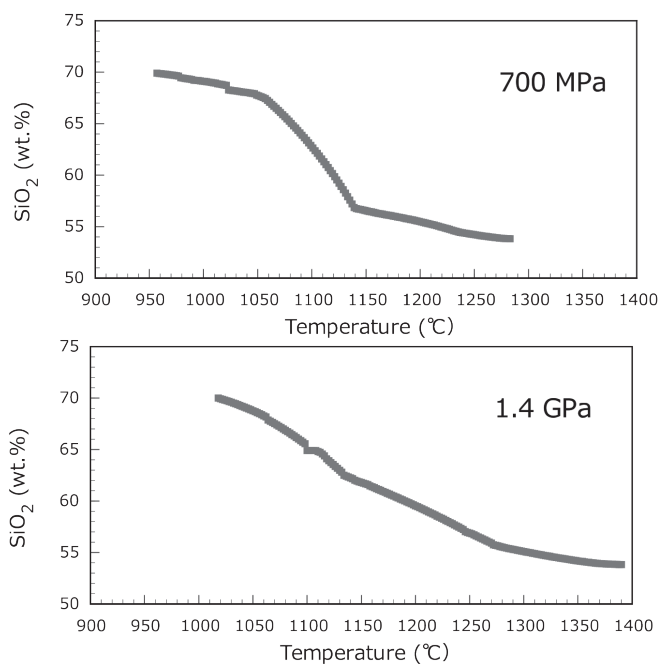


図2. Rhyolite-MELTSを用いて計算した深部玄武岩質マグマ溜まりの分別結晶作用によるメルトのSiO₂濃度変化。メルトのSiO₂濃度が70 wt.%に達する温度まで計算している。

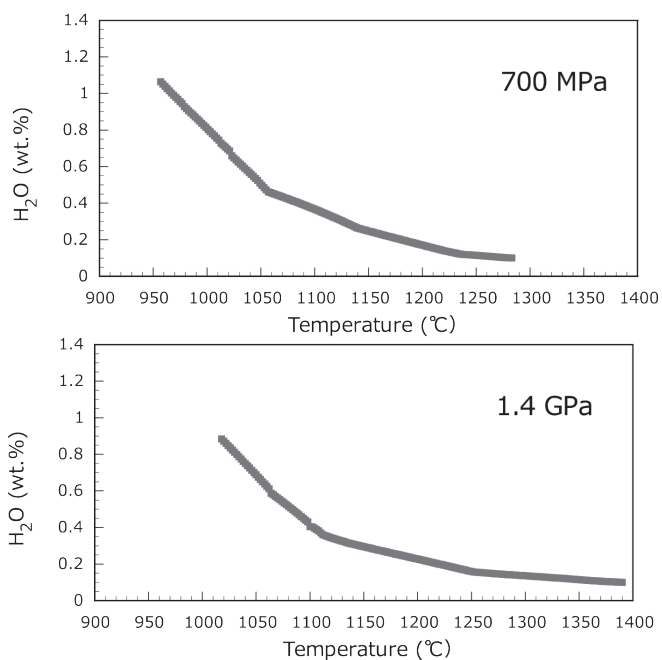


図3. Rhyolite-MELTSを用いて計算した深部玄武岩質マグマ溜まりの分別結晶作用によるメルトのH₂O濃度変化。初期H₂O濃度を0.1 wt.%と仮定している。

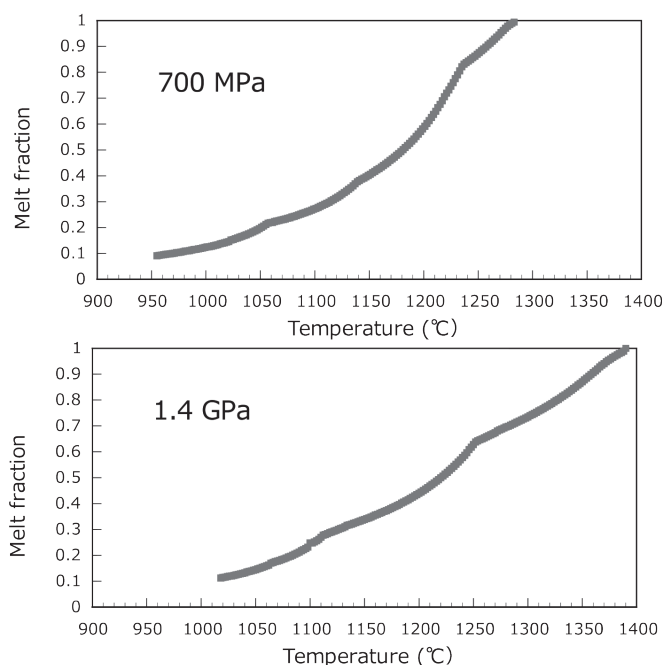


図4. Rhyolite-MELTSを用いて計算した深部玄武岩質マグマ溜まりの分別結晶作用によるメルトフラクションの変化。メルトのSiO₂濃度が70 wt.%に達する温度まで計算している。

深部玄武岩質マグマ溜まりの結晶分化により生成された珪長質マグマのメルトフラクションは700 MPaで約9%、1.4 GPaで約11%である(図4)。深部玄武岩質マグマ溜まりの体積は約46,000 km³ (Huang et al., 2015) であるので、分化で生じた高温の珪長質マグマの体積は約4,600 km³となる。この体積はイエローストーンカルデラを形成した主要な3回の噴火の噴出物の総体積3,780 km³より大きい。現時点で、深部玄武岩質マグマ溜まりの分化で生じた珪長質マグマがどの程度、地殻浅部に上昇しうるのかについてはわかっていないが、これらの分化マグマの体積でカルデラ噴出物の体積が説明できることは、イエローストーンにおけるマグマ供給系の研究に重要な示唆を与えられらる。

参考文献

- Almeev, R. R., Bolte, T., Nash, B. P., Holtz, F., Erdmann, M., Cathealy, H. E. (2012) High-temperature, low-H₂O silicic magmas of the Yellowstone hotspot: an experimental study of rhyolite from the Bruneau-Jarbridge Eruptive Center, Central Snake River Plain, USA. *J. Petrol.* **53** (9), 1837-1866.
- Gualda, G. A. R., Giorso, M. S., Lemons, R. V. and Carley, T. L. (2012) Rhyolite-MELTS: a modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *J. Petrol.* **53**, 875-890.