

マグマ混合過程とビスカスフィンガリング: アナログモデル実験と境界面の幾何学 Magma mixing/mingling and viscous fingering: Analog model experiment and geometry of interfaces

高田 和佳^{1*}, 佐藤 鋭一¹, 山崎 和仁¹

Nodoka Takada^{1*}, Eiichi Sato¹, Kazuhito Yamasaki¹

¹ 神戸大学理学研究科地球惑星科学専攻

¹Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University

マグマミキシングおよびミングリングは、火山・火成活動現象において良く知られた現象であり、その形成過程に関する様々な実験および理論的研究がなされてきた (e.g., Eichelberger, 1980; Koyaguchi, 1985; Wada, 1995)。特に粘性率が異なるマグマの混合過程 (例えば、フェルシックマグマとマフィックマグマの混合過程) における混合境界面は、多様で複雑な幾何学的パターンを示すが、これは、形成下の物理・化学条件の違いを反映していることが現象論的に知られている (e.g., De Rosa et al., 2002; Perugini et al., 2005; Sato and Sato, 2009)。従って、任意の物理・化学条件下での混合過程の複雑な特性を、混合境界面の幾何学的パターンとして一元的に法則化することは重要であり、本研究では、これを境界面の幾何学と呼ぶことにする。

このような境界面の幾何学は、実際の岩石における境界面の形態解析から、当時の混合過程に関する有用な情報を抽出することを可能にし、火山・火成活動現象のモデリングの発展に寄与することが期待される (e.g., Perugini and Poli, 2005; Sato and Yamasaki, 2012)。しかしながら、境界面の幾何学と、より現実的な地球科学的条件との関係に関する基礎研究はまだ十分ではない。特に、非平衡状態にある混合過程の動的情報 (e.g., 境界面の成長速度など) と幾何学的パターンの関係については、ほとんど分かっていない。本研究の目的は、この点を、アナログモデル実験と微分幾何学の観点から明らかにすることにある。

本研究では、フェルシックなマグマだまり / ポケットに侵入するマフィックマグマの混合過程を想定し、二種類の流体 (グリセリンと空気) の混合過程を、Hele-Shaw 装置に基づくアナログモデル実験により解析した。Hele-Shaw 装置で扱うのは、本質的に二次元流体 (ポテンシャル流れ) であるので、数的にはDLA (拡散律速凝集体) モデルが適用可能であり、このモデルから、境界線は不安定性による分岐現象を伴うことが指摘されている (e.g., Nittmann et al., 1985)。実験では、この不安定現象はビスカスフィンガリングと呼ばれる分岐現象として観測されるが、これは、実際のマグマ混合過程で形成された岩石においても報告されている (e.g., Perugini and Poli, 2005)。本研究により以下の点が明らかとなった。

(1) 以下の三種類のフラクタル次元を見積もった: (A) 高粘性流体の占有面積の次元 D_h ; (B) 低粘性流体の占有面積の次元 D_l ; (C) 混合境界の次元 D_i 。 D_i は、流体の粘性比に反比例することが分かった。これは、既存の解析結果と一致する (e.g., Allen and Boger, 1988)。さらに本研究では、 D_h と D_l の和が保存量であり、また、 D_i と D_l が比例関係にあることが示された。この結果は、例えば、混合境界の次元 (= 観測が容易な量) から、フェルシックあるいはマフィックマグマの面積に関する次元 (= 現在では観測が難しい量) を見積もれる可能性を示唆する。

(2) 枝分かれするビスカスフィンガリングにおいて、先端部分の曲率半径は、混合境界線の成長速度に依存することが示された。これは、分岐に伴い曲率半径が減少する場合 (つまり、成長速度が負の場合) においても成立する。この結果は既存の実験結果 (e.g., Matsushita and Yamada, 1990) を拡張し、また、理論との対応としては、微分幾何学に基づく曲率の発展方程式の結果 (e.g., Nakamura and Wadati, 1993) と一致する。この結果の応用として、マフィック岩に観測されるビスカスフィンガリングの曲率半径の測定から、形成当時の成長速度が見積もれる可能性を示唆される。

キーワード: マグマ混合, ビスカスフィンガリング, フラクタル次元, Hele-Shaw 装置, 曲率, DLA

Keywords: magma mixing, viscous fingering, fractal dimension, Hele-Shaw cell, curvature, DLA