

結晶作用に伴うマグマの粘性係数変化 Viscosity change of magmas during crystallization: a summary

佐藤 博明^{1*}, 石橋 秀巳², ヴェーテレ, フランチェスコ³, 中村 秀明⁴, 斉藤 将孝⁴
Hiroaki Sato^{1*}, Hidemi Ishibashi², Francesco Vetere³, Hideaki Nakamura⁴, Masataka Saito⁴

¹ 静岡大学防災総合センター, ² 東京大学地殻化学実験施設, ³ イタリア, カラブリア大, ⁴ 神戸大学地球惑星科学
¹CIREN, Shizuoka Univ, ²Geochem Res Centr, Univ Tokyo, ³Univ. Calabria, Italy, ⁴Dept Earth Plan Sci., Kobe Univ

この発表では結晶を含む系の粘性係数に関する研究を振り返り、近年著者らが行ってきた1気圧下のサブリキダスでの粘性測定実験の結果と問題点をまとめる。久野先生は、ご自分では粘性係数に直接関係する仕事はされなかったが、野外での火山岩の産状やマグマの生成過程を理解する上で粘性係数の重要性を強く認識しておられたと思われる。

結晶を含む系の粘性について、Einstein(1906)により導かれた式： $u=(1+2.5p)u_0$ (u はバルク粘性係数, u_0 は液の粘性係数, p は結晶分率) は球について p が十分小さい場合について求められたもので、Roscoe は固体どうしの干渉がないとして $u=u_0*(1-p/pm)^{-2.5}$ (pm は最大充填結晶分率) という Einstein-Roscoe の式を導いた。Marsh(1981) は天然の火山岩の斑晶量から pm が 0.6 であることを提唱し、 $u=(1-p/0.6)^{-2.5}$ (以下 ERM 式と呼ぶ) を得た。この式は Lejuene & Richet(1995) 等によって実験的にも裏付けられた。化学工学の分野で行われた実験や経験式については、Pinkerton & Stevenson(1992) によりレビューされている。一方、結晶度の大きい条件での粘性については部分溶融系のバルク粘性として検討が行われてきた (例えば、Vigneresse et al. 1996)。2005 年頃から急速に結晶を含む系の粘性係数に関する実験的論文が発表されるようになり (例えば、Sato, 2005; Carrichi et al., 2007; Ishibashi & Sato, 2007; Arbaret et al, 2007) 半経験的な理論的検討も行われている (例えば、Costa, 2005; Mueller et al. 2010)。これらの結果によると、従来の ERM 式が基本的な式として使用されているが、結晶の形態が球から外れる場合や結晶量が多くなった場合相対粘性係数が ERM 式より 5 倍以上の大きなずれが生じたり、また非ニュートン的な応力依存性が出る場合があり、また異なる形態を持つ結晶の存在や結晶サイズ分布が広がった場合の理論的予測については桁ではともかく精度がまだ不十分であると思われる。

従来、粘性係数に関する実験的検討は主に地球物理学分野で行われてきたが、天然の溶岩のように結晶を含む場合については岩石学的な知識が必要となるためか、結晶を含む系での粘性測定は殆ど行われて来なかった。我々は岩石学をベースにしたサブリキダスでの粘性係数測定実験を行うために雰囲気制御炉を製作し、それを用いて幾つかの結果を得てきた。これまでに用いた試料は、富士火山高アルミナ玄武岩、北西九州アルカリ玄武岩、ブルカノ島シヨシヨナイト、海嶺玄武岩、ハワイソレアイト、伊豆大島島弧ソレアイトである。実験の雰囲気は海嶺玄武岩とハワイソレアイトについては FMQ、そのほかは NNO の条件で行い、リキダスより 50 度程度高温からステップ状に温度を下げながら粘性係数測定とサンプリングを行った。リキダス相は、富士玄武岩、伊豆大島玄武岩、海嶺玄武岩は斜長石、北西九州アルカリ玄武岩とハワイソレアイトはかんらん石、ブルカノ火山シヨシヨナイトは単斜輝石であった。結晶量が 14-30% に達すると現在の実験装置では粘性測定・試料採取が困難になり実験を打ち切った。大半の試料について複数回の実験を行ったが、粘性係数の誤差としては 20 - 30% 程度と判断される。今回得られた実験結果から見ると、液に対する相対粘度は球状に近いカンラン石がリキダスの系ではほぼ ERM 式に近い値が得られたのに対し、平板状の斜長石と長柱状の単斜輝石がリキダスの系では ERM 式よりも 3-8 倍大きな値が得られた。ただ、多くの実験で得られた斜長石や単斜輝石のアスペクト比は 10 以上のものが多く、天然のそれらの相のアスペクト比よりも大きい。Mueller et al.(2010) でも指摘されているように、アスペクト比が大きくなるとその相互作用により相対粘度が大きくなるため、今回の実験結果はそのまま天然へ適用するにはまだ問題がある。また今回の実験でリキダスよりも高温での測定結果を従来のモデルと比較したところ非アレニアンモデルの Giordano et al.(2008) よりもアレニアンモデルの Shaw(1972) の方に近い結果になった。Giordano et al.(2008) のデータベースはソレアイト質マグマのデータが欠けており、また測定方法の制約から中間温度での実験が殆ど行われていないので、メルトの粘性係数モデルもさらに検討が必要と考えられる。

キーワード: マグマ, 粘性係数, 結晶作用, アインシュタイン-ロスコ-式, 結晶形態, 非ニュートン流体

Keywords: magma, viscosity, crystallization, Einstein-Roscoe equation, crystal morphology, non-Newtonian fluid