

火道上昇中のマグマの破碎に対する粘弾性の影響

Viscoelastic effects on magma fragmentation in conduit flows

小屋口 剛博[1], 三谷 典子[2], 井田 喜明[3]

Takehiro Koyaguchi[1], Noriko Mitani[2], Yoshiaki Ida[3]

[1] 東大・新領域, [2] 東大・震研, [3] 姫路工大・理

[1] Frontier Sciences, Univ Tokyo, [2] Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, [3] School of Sci., himeji Inst. of Technology

火道上昇中にマグマの流動様式が気泡流から噴霧流に変化する過程を「マグマの破碎過程」と呼ぶ。マグマが破碎し多量の火砕物を生成することは、爆発的な噴火をもたらす主要因となる。これまで、火道上昇モデルにおいて、大局的に2つのマグマの破碎機構が提唱されてきた。第一の破碎機構は、マグマ中の気相の体積分率が増加するにつれて薄くなった気泡間の液体フィルムが流体力学的不安定を起こし、液滴を生成する機構である(ここではこれを「膨張破碎」とよぶ)。この場合、マグマ中の気相の体積分率が閾値を越えることが、破碎する条件となる。第二の破碎機構としては、気泡周辺の応力あるいは歪速度が閾値を超えたときに気泡の回りの液体が破碎する機構が挙げられる(ここでは、これを「応力破碎」とよぶ)。最近、これらのマグマの破碎機構において、マグマの粘弾性が重要な役割を果たすことが指摘されている。つまり、マグマの歪速度が十分大きくなりガラス転移の条件を満たすと、マグマは弾性体として振る舞い、脆性破壊すると考えられている。しかしながら、これまでの噴火モデルにおいてはマグマの粘弾性が考慮されていなかったため、歪速度の値からガラス転移の条件を満たすかどうかを判断することが原理的に不可能であった。そのため、マグマの破碎に関する多くの研究で、「脆性破壊」という概念が「応力破碎」と混同して用いられてきた。

本研究では、粘弾性を考慮にいれた1次元定常火道流・気泡の成長モデルを用いて、マグマが火道を上昇する際の気泡の膨張およびマグマの破碎過程について数値的に調べた。各気泡中のガスの過剰圧および気泡周辺の応力については、気泡流を非圧縮性粘弾性体の殻に囲まれた「セル」の集合体で近似するモデル(セルモデル)によって計算した。粘弾性については、マグマがマックスウェル粘弾性体に近似できるものと仮定した。このようなセルモデルを1次元定常火道と連立させた方程式系を用いることによって、巨視的なダイナミクスと微視的な気泡成長過程を同時に解くことができる。なお、マグマ中の気相の体積分率が閾値を超えるという条件(膨張破碎条件)または気泡周辺の応力が閾値を超えるという条件(応力破碎条件)のいずれかを満たしたときに、マグマが破碎し、流動様式が気泡流から噴霧流に変化すると考えた。

数値計算の結果およびスケール則に関する考察から、2つの無次元パラメータが火道中を定常的に上昇する粘弾性マグマの破碎過程を支配することが明らかになった。ここでは、それらをAおよびBと呼ぶことにする。パラメータAは、壁からの摩擦による粘性応力とマグマの破壊強度の比という物理的意味をもつ。このパラメータは主にマグマの粘性に依存する。壁からの粘性応力が破壊強度に比べて十分大きくなると(Aが1よりも十分大きくなると)、上昇とともに気泡の周辺に応力が蓄積する。パラメータBは、マグマの破壊強度と剛性率の比にパラメータAの2乗を掛けたものとして定義される。Bの値が破壊強度で規格化した応力よりも大きいときに、マックスウェル粘弾性体の構成方程式の中で弾性変形を表す項が支配的になる(ガラス転移の条件を満たす)、という物理的意味をもつ。今、脆性破壊を「ガラス転移した条件で起こる破壊」と考えると、破壊条件に達したときに同時にBの値が1を超えることが、脆性破壊が起こる条件であると定義付けることができる。マグマの破壊強度の値が剛性率の値にくらべて2から3桁ほど小さい値をもつという実験結果から、この条件はAの値が10よりも十分大きいときに満たされることが分かる。

これらのパラメータを用いることによって、粘弾性マグマの破碎の挙動を以下の3つのタイプに分類することができる。Aの値が1以下の時には、マグマは膨張破碎する。Aの値が1以上の場合、マグマは応力破碎する。脆性破壊は、Aの値が10よりも十分大きい場合に限って起こる。注意すべきことは、Aが1から10程度の条件での破壊(応力破碎)は、粘性変形を伴う破壊であり、「延性破壊」と呼ぶべきものであるということである。以上のように、粘弾性を考慮にいれたモデルを用いることによって、応力が破壊強度を超える条件とガラス転移条件を明確に分離することができるようになった。固体の破壊力学で用いられている概念や用語をそのままマグマの破碎に適用することには注意を要するが、これら2つの条件を分離することによって、破壊力学の概念と整合的な破壊基準をマグマの破碎に対しても導入することが可能となる。