

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04130

研究課題名(和文) 安山岩マグマへの水の溶解度の実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study of water solubility in andesitic magmas

研究代表者

山下 茂 (Yamashita, Shigeru)

岡山大学・惑星物質研究所・准教授

研究者番号：30260665

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：マグマにどのくらいの水が溶け込めるのか(溶解度)についての実験データが玄武岩や流紋岩といった極端な組成のマグマに偏っており、中間的な組成である安山岩マグマの実験データがほとんどないことに問題意識を持ち、そのデータギャップを埋めるべくこの研究を始めた。新たに行った実験により、既存のポピュラーな溶解度モデルは、安山岩マグマへの水の溶解度を2割程度過小に見積もってしまうこと、安山岩マグマへの水の溶解度は同じ圧力温度条件の流紋岩マグマに対して2割程度大きいことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本邦の大規模な噴火を見ると、例えば桜島大正噴火のクライマックス、プリニー式噴火で大量に放出されたマグマは安山岩組成であった。2013年に始まり現在も続く西之島噴火で放出されているマグマも安山岩組成である。このように、本邦のようなプレート沈み込み帯の火山弧では安山岩マグマが大量に噴火している。こうした安山岩マグマ噴火のメカニズムを理解するのに必要な安山岩マグマへの水の溶解度データを、この研究は新たに提供することができた。この成果は、安山岩マグマ噴火が事象としてどのように時間発展するかの予測や噴火災害の減災に役立つものであり、特に本邦のような沈み込み帯の火山弧における社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：How much water can be dissolved in magmas? Previous studies on the solubility of water in magmas are biased towards magmas with several extreme compositions such as basalt and rhyolite, and there are almost no experimental data on andesitic magmas. To fill this data gap, a series of new high-pressure and high-temperature experiments were performed on typical arc andesitic magmas. The results of the experiments have shown that an existing popular solubility model underestimates the solubility of water in andesitic magmas by about 20%, and that the solubility of water in andesitic magmas is about 20% greater than that in rhyolite magmas at any given pressure and temperature conditions.

研究分野：岩石学

キーワード：岩石・鉱物・鉱床学 マグマ 水 高温高圧実験 噴火

## 1. 研究開始当初の背景

マグマに水はどのくらい溶け込むのだろうか？マグマに溶解する水は発泡することで噴火の様式に大きく影響するため、マグマへの水の溶解度は噴火現象を理解する上で欠かすことのできない情報である。マグマへの水の溶解度については、Burnham and Jahns の先駆的な研究[1]以降たくさんの実験的研究があり、私の知る限り、国際誌に掲載された論文が 20 報、実験の数では 443 ランにのぼる。そのうち、噴火現象に関わるマグマ溜まり～火道に相当する圧力温度条件 (20~200MPa、800~1200 ) で行われた実験は 148 ランあるが、そのほぼ全てが玄武岩、流紋岩、強アルカリ岩といった極端な組成のマグマについて行われていて、それらのあいだの中間的な組成である安山岩マグマ[2] については、Moore ら[3] がひとつの組成について、しかもリキダス温度よりも 100 以上高温の条件で行ったきりであった(図 1)。Moore ら[3] はいろいろな組成のマグマへの水の溶解度を予測する熱力学的モデルを提唱して、その取り扱いの簡便さによってマグマ研究でよく使われている。しかしながら、彼らのモデルが立脚するデータセットもまた、玄武岩と流紋岩マグマへの水の溶解度データがほとんどで、安山岩マグマのデータは上記の 1 件のみである。このため、彼らのモデルは安山岩マグマへの水の溶解度について十分な予測精度を持たないことが予想された。

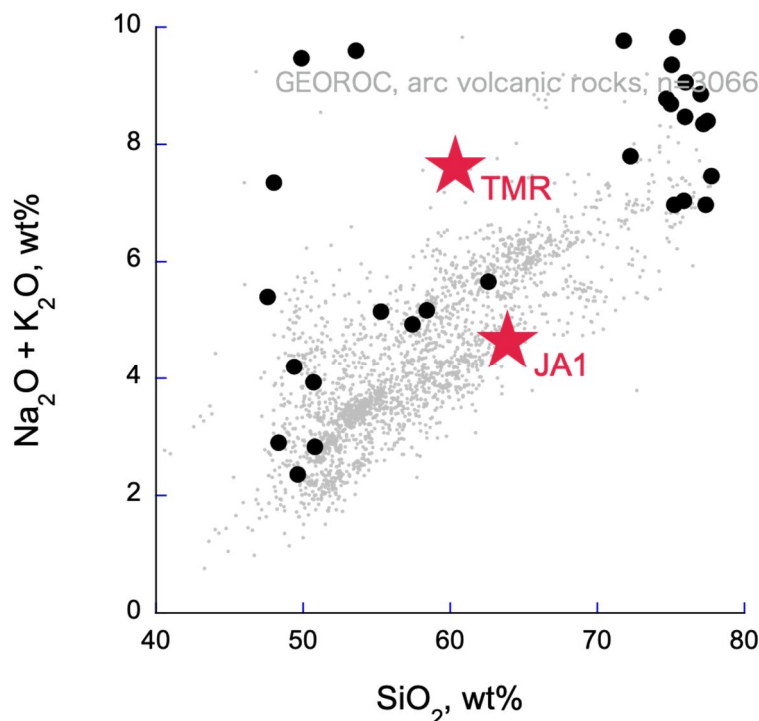




図 1. 1962 年以降、水の溶解度実験が行われた天然マグマの組成 (黒丸、圧力 < 200MPa)。比較のために、プレート沈み込み帯に噴出したマグマの組成 (灰色点、GEOROC データベース、n=3066)。この研究の出発物質として用いた安山岩の組成 (星印、JA1:箱根本小松安山岩、TMR:阿蘇火山玉来川安山岩) も示した。

## 2. 研究の目的



この研究では、安山岩マグマへの水の溶解度データを高温高压実験により拡充すること、および、安山岩マグマを含む天然マグマの水の溶解度モデルの精度を上げることを目指した。本邦の最近の大規模な噴火を見ると、例えば桜島大正噴火のクライマックス、プリニー式噴火で大量に放出されたマグマは安山岩組成であった[4]。2013 年に始まり現在も続く西之島噴火で放出されているマグマも安山岩組成である[5]。このように、本邦のようなプレート沈み込み帯の火山弧では安山岩マグマが大量に噴火している。しかしながら、安山岩マグマへの水の溶解度データがないために、安山岩マグマ噴火のメカニズムについて正確に理解することが難しいのが現状である。この研究は、安山岩マグマ噴火の事象がどのように進展するかの予測や噴火災害の減災に役立つものであり、特に本邦のような沈み込み帯の火山弧における社会的意義は大きい。


### 3. 研究の方法


高温高压実験： 出発物質には、箱根火山の本小松安山岩溶岩(産総研の頒布する標準物質 JA1、 $\text{SiO}_2$ 含有量 = 64wt%、)から合成した無水安山岩ガラスを用いた。この無水安山岩ガラスを円柱状に整形し、純水、酸素雰囲気緩衝剤(Ni または Co)とともに Pt カプセルに封入、内熱式ガス圧装置により加圧・加熱してガラスをメルト状態にした。カプセル内では水がメルトへ拡散浸透する。溶解度に達すればそれ以上は浸透することなく、含水量勾配のない均質な含水メルトが形成される。このとき含水メルトと水のあいだには化学平衡が成立している。この含水メルトを急冷ガラス化して回収し、顕微赤外分光分析により含水量を求め溶解度とみなした。このようにして、マグマ溜まり～火道の条件をカバーするように 50～200MPa、1000～1200 の圧力温度条件、天然のマグマに想定される  $10^{-8}$ ～ $10^{-11}$  bar の酸素フュガシティーで安山岩マグマへの水の溶解度を決定した。なお比較のために、やや組成の異なる安山岩である阿蘇火山の玉来川安山岩溶岩( $\text{SiO}_2$ 含有量 = 60wt%、) および安山岩ではないが、ニュージーランド・タウポ火山帯の流紋岩( $\text{SiO}_2$ 含有量 = 77wt%)についても、同様の条件で実験を行った。

顕微赤外分光分析： 水はマグマに分子状  $\text{H}_2\text{O}$ 、OH 基の 2 つの化学種として溶解する [溶解種間平衡,6]。急冷ガラス化したマグマ試料をウェハー状に研磨し、分子状  $\text{H}_2\text{O}$  の基準伸縮 + 基準偏角振動の結合バンド(波数  $5200\text{cm}^{-1}$ )と OH 基の Si-O-H 基準伸縮結合バンド(波数  $4500\text{cm}^{-1}$ )の吸収強度を顕微赤外光学系で観察して含水量を決定した。この際、共存していた水流体との界面に鉛直方向の含水量プロファイルを取得することで、ガラスの含水量が界面からの距離によらず均一であること、すなわち水流体とのあいだに化学平衡が成立していたことを確認した。なお、顕微赤外分光分析の確度は上記 2 つのバンドの吸収係数の確からしさに依存する。吸収係数には文献値[7]を用いたが、同じ安山岩の組成をもつ含水量既知の標準ガラスを別に用意しておき、それらを内部標準として分析することで、少なくとも含水量 3wt%まではこの吸収係数が有効である(分析誤差の範囲内で標準ガラスの含水量を再現する)ことを確かめた。

### 4. 研究成果

マグマ溜まり～火道に相当する 50MPa から 200MPa の圧力条件、リキダス温度直上の 1000 から過加熱状態の 1200 までの温度条件で、安山岩マグマへの水の溶解度を精度良く決定することができた()。箱根火山の本小松溶岩の組成を持つ安山岩マグマと阿蘇火山玉来川溶岩の組成を持つ安山岩マグマのあいだでは水の溶解度に違いは見られなかった。これら 2 種類の安山岩マグマのあいだで最も大きな組成の違いはアルカリ成分含有量であり、阿蘇火山の安山岩マグマは箱根火山の安山岩マグマの 1.6 倍のアルカリ成分を含む。この変化は、プレート沈み込み帯火山弧に噴出する安山岩マグマのアルカリ成分含有量レンジをカバーしており() 今回の実験結果はプレート沈み込み帯火山弧の安山岩マグマへの水の溶解度を代表しているとみなせるだろう。

Moore らの溶解度モデル[3] は、安山岩マグマへの水の溶解度を約 20% (相対) 過小に見積もってしまう()。これは小さいようであるが、マグマの発泡による体積増加を 5% 過大に見積もることに相当する。これは 500 ぶんもの熱膨張に相当し、おおよそ等エントロピーで進行する噴火事象ではマグマの浮力獲得や体積仕事(エネルギー保存)を大きく左右することになる。安山岩マグマへの水の溶解度を精度良く予測するには、アドホックには今回の実験結果を内挿的に用いることもできるが、安山岩マグマを含むいろいろな組成のマグマへの水の溶解度モデルを新しく構築する必要がある。この研究は最終的にはそこを目指したが、マグマと水のあいだの平衡反応のキャラクタリゼーション(最後のパラグラフを参照)に苦しみ、モデル構築には至っていない。

安山岩マグマへの水の溶解度は流紋岩マグマへの水の溶解度に比べて 20% (相対) ほど大きいこともわかった()。これは、現在一般に受け入れられているマグマ混合にトリガーされる安山岩マグマ噴火のイメージ「玄武岩マグマの貫入による流紋岩マグマの過加熱 流紋岩マグマへの水の溶解度減少と発泡 火道の開通・マグマ混合による安山岩マグマの生成・噴火」[例えば 8] と矛盾するように見える。すなわち、マグマ混合でメルト均質化が進んで全体が安山岩組成になると水の溶解度が増えて発泡が抑制される。これでは噴火に至らない。もしこのシナリオに現実性があるなら、安山岩質マグマの噴火モデルを根底から改める必要があるかもしれない。

なお、安山岩マグマと流紋岩マグマのあいだで水の溶解度の違いが生じる原因について手がかりを得るために、マグマ中の水の溶解種間平衡(マグマに溶け込んだ分子状  $\text{H}_2\text{O}$  の一部がマグマの構造を作っている酸素と反応して OH 基になる)を、赤外分光分析の結果に基づいて安山岩マ

グマと流紋岩マグマのあいだで比較した。マグマの構造緩和理論[9]に基づけば、この溶解種間平衡は急冷時のガラス転移温度で凍結されるとみなすことができる。そこで、既存のマグマ粘性率モデルを利用して、この研究で用いた内熱式ガス圧装置固有の急冷速度 10 /sec オーダーに対応するガラス転移温度をそれぞれのマグマについて求め、水の溶解種間平衡を温度の関数として整理した。その結果、安山岩マグマ中の水の溶解種間平衡の平衡定数は、同じ温度条件の流紋岩マグマと測定誤差の範囲内で一致することが明らかになった。このことは、溶解度の違いが溶解種間平衡ではなく、水流体の分子状 H<sub>2</sub>O とマグマに溶け込んだ分子状 H<sub>2</sub>O のあいだの不均一系平衡に駆動されていることを示唆している。この研究を始めたときは、溶解種間平衡を通じてマグマへの水の溶解度をモデル化することを企てていたのだが、実験の結果はその期待を裏切るものとなった。組成によって異なるマグマへの水の溶解度を理解するには、共存する水流体とマグマのあいだの分子状 H<sub>2</sub>O の不均一系平衡定数を決めているものはなにか、というふうに問題を捉え直す必要があるだろう。

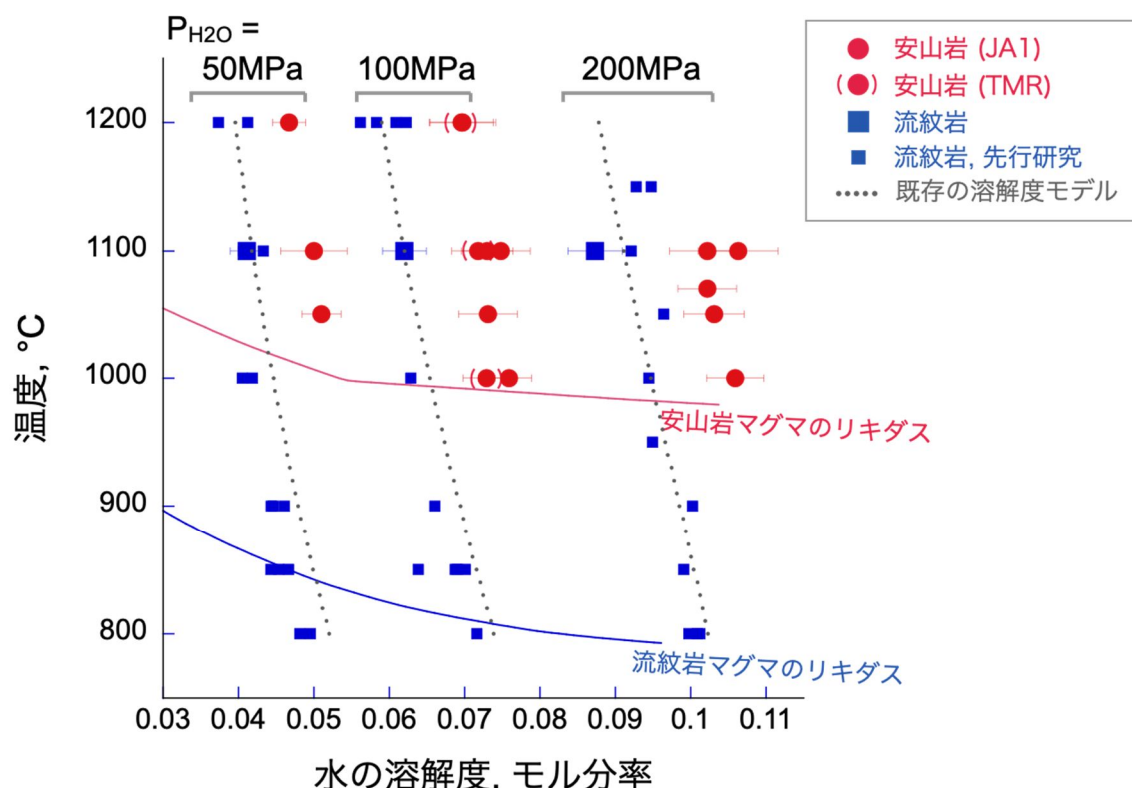


図 2. この研究で求めた安山岩マグマ (JA1: 箱根火山本小松安山岩, TMR: 阿蘇火山玉来川安山岩) と流紋岩マグマへの水の溶解度。比較のために、既存のモデル [2] を用いて箱根火山本小松安山岩マグマについて計算した溶解度も示した (点線)。先行研究の流紋岩マグマへの水の溶解度 [10, 11, 12]、rhyolite-MELTS プログラム [13] で計算したリキダス温度もあわせて示した。

引用文献等 [1] Burnham & Jahns, American Journal of Science 260, 721-745, 1962; [2] ここでは SiO<sub>2</sub> 含有量が 60~70wt% かつアルカリ成分に極端に富まないマグマを「安山岩マグマ」と定義する。この組成範囲にはいわゆるデイサイトマグマも含まれるが、簡単のためにまとめて安山岩マグマと呼称する; [3] Moore et al., American Mineralogist 83, 36-42, 1998; [4] Araya et al., Scientific Reports 9, 1979, 2019; [5] 前野ほか, 海洋理工学会誌 24, 35-44, 2018; [6] 例えば Stolper, Geochimica Cosmochimica Acta 46, 2609-2620, 1982; [7] Ohlhorst et al., Chemical Geology 174, 5-20, 2001; [8] 藤井, 富士火山, 山梨県環境科学研究所, 233-244, 2007; [9] Dingwell & Webb, European Journal of Mineralogy, 427-449, 1990; [10] Silver et al., Contributions to Mineralogy and Petrology 104, 142-162, 1990; [11] Holtz et al., American Mineralogist 80, 94-108, 1995; [12] Yamashita, Journal of Petrology 40, 1497-1507, 1999; [13] Gualda et al., Journal of Petrology 53, 875-890, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Shigeru Yamashita
2. 発表標題 Pressure dependence of water speciation in albitic melts determined in-situ at high pressures and high temperatures.
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shigeru Yamashita
2. 発表標題 Pressure insensitive speciation of water in albitic melts determined in-situ at high pressures and high temperatures
3. 学会等名 Bjorn Mysen 's Retirement Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------