

富士火山の下でのマグマと H₂O フルイドの間の超臨界現象

Supercritical Behaviors Between Fuji 1707 Magmas and H₂O fluids

研究代表者 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 助手 川本 竜彦
Institute for Geothermal Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University
Assistant Research Professor, Tatsuhiko Kawamoto

和文要旨

火山の下でのマグマとフルイドに関する実験的研究を行ない、以下のことを解明した：(1) マグマとフルイドの区別がつかなくなる第2臨界点の位置がほぼ明らかになった。かんらん岩-水系では、3.8GPa、玄武岩-水系では3GPa、高Mg安山岩-水系では約3GPaが第2臨界点であろうと考える。(2) スラブ中の含水鉱物は地球深部に水を運び、火山弧の下でマントルに水を供給する。(3) それら含水鉱物の安定領域と濡れ角を重ね合わせてみると、脱水分解したフルイドが浸透流として粒間を上昇しうることがわかる。(4) フルイドに溶け込むシリケート成分の化学組成の圧力変化は濡れ角の変化を説明する。スラブから放出される火山の下の水にとむフルイドの姿は、近年の高温高圧実験によって明らかになりつつある。

Abstract

This report reviews our recent understandings on the chemical characteristics of aqueous fluids from subducting slabs beneath the volcanoes through high-pressure and high-temperature experiments: (1) hydrous minerals in slab materials deliver water beneath volcanic arcs. (2) PT conditions of the wetting angles and the stability of hydrous minerals allow us to know about the mobile fluid in the slab and the mantle wedge. (3) Chemistry of silicates dissolved in to aqueous fluids explains the variation of wetting angles as functions of PT. (4) Critical conditions between fluids and magmas. The locations of the second critical end point between magmas and fluids tell us about the chemical nature of fluids from the slab and has an important role in the magma generation beneath the volcanic arcs.

1. 研究目的

地球のマントルには、おもにマグマと水を主成分とするフルイドの2種類の流体が存在する。これらの流体は低圧条件においては、マグマとフル

イドとして独立に存在するが、地下深部の高温高圧条件下ではマグマ中に溶解する水の量が増加し、それと同時にフルイド中に溶存するマグマ成分も増加するため、両者の性質は近づく。マグマ

とフルイドの臨界点と通常呼ばれる点は Figure 1 の左の T_c であるが、第 2 臨界点とは、臨界温度が融解開始温度(ソリダス)とぶつかる温度圧力条件を指し、それよりも高压では、マグマと水の区別がつかず超臨界流体になっている(Figure 1 の右)。つまり、第 2 臨界点よりも高压条件では、ある化学組成のマグマとフルイドは連続的に変化する。第 2 臨界点はマグマの組成によって異なる。本研究では、かんらん岩、玄武岩、と高 Mg 安山岩マグマなどとフルイドが完全に混和する温度圧力条件を決定することを目指した。私は、初年度に外熱式ダイヤモンドアンビルセルを用いて、富士火山の安山岩とデイサイトと水との間の臨界現象をその場観察した。それは Figure 1 の左の状態であった。次年度以降助成を延長していただき、より融点が高くダイヤモンドアンビルセルでは実験できないより重要なマグマであるかんらん岩、玄武岩、および高 Mg 安山岩と水との間の第 2 臨界点を、マルチアンビル型高压高温発生装置を用いて決定することを目的とし、実験的研究を行った。

2. 研究経過

大型放射光実験設備である SPring-8 のビームライン 04B1 に設置されているマルチアンビル型高压発生装置 SPEED1500 を用いた。高压発生装置の中心に試料を置き、高压高温条件におき、試料周りの WC 製アンビルの隙間から、高温高压状態下にある試料に放射光を通過させ、その透過像を X 線カメラによりリアルタイムで観察する。試料には、かんらん岩、玄武岩、および高 Mg 安山岩マグマ組成をもつ水和物とガラス

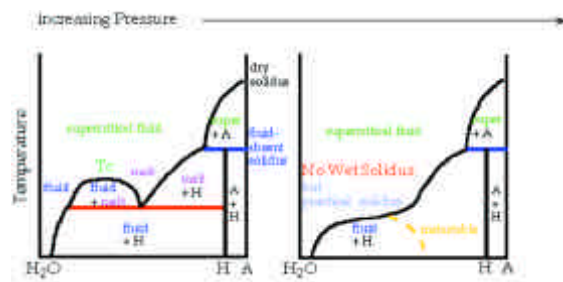


Figure 1. Phase diagrams in the system of mineral A and H_2O . In lower pressures, magma and fluids are separated. After the second critical end-point, there is no distinct difference between them.

の混合物に、蒸留水を加えたものを用いた。試料は共同研究者の三部賢治東京大学助手と神崎正美岡山大学助教授が中心となって開発したセルに封入した。これは金パラジウムの円筒の上下に単結晶ダイヤモンドを用いてふたをしたカプセルで、X線はダイヤモンド結晶を通して通過する。最初に圧力を上げ、目的圧力に到達した後に温度を上げる。マグマのソリダス温度以上に昇温するとメルトが生じ、メルトとフルイドでは X 線吸収係数が異なるため、透過像において 2 相は区別できる (Figure 2)。



Figure 2 Snap-shot of X-ray radiographic images showing high-Mg andesitic melt globule (dark grey) in a matrix of aqueous fluids (light grey) at 1 GPa. The width is 1.5 mm.

3. 研究成果

圧力が第2臨界圧力よりも高くなると、温度上昇にともなって、2相を観察することはもはや出来なくなる。これまでの結果、かんらん岩-水系では3.8GPa、玄武岩-水系では3GPa、高Mg安山岩-水系では約3GPaが第2臨界点であろうと考える。これらの圧力条件は、従来想像されていた圧力条件よりもたいへん低いものである。例えば、かんらん岩については、12-13GPa、玄武岩については5-6GPaと考えられていた。

4. 今後の課題と展望

本研究で解明した第2臨界点の条件の意味を理解するために、私達の研究によって明らかになりつつある最新の火山の下のフルイドの研究を概観する。(1)かんらん岩中に存在しうる含水鉱物の安定領域は以下のことを示している。低圧で安定な緑泥石や角閃石の安定領域と、高圧で安定なコンドロダイト、クライノヒューマイト、A相、E相の安定領域に間に、含水鉱物の存在できない領域が存在する。スラブがこのPT領域を通過する際に、含水鉱物は安定でなくなり、脱水分解する。ただし、玄武岩相中のローソン石とかんらん岩中のアンティゴライト(蛇紋石)は、低圧で安定な含水鉱物からの水を高圧で安定な含水鉱物に橋渡しする可能性がある。(2)フルイドと鉱物の濡れ角は次のことを示している。かんらん岩中のフルイドは角閃石や緑泥石が脱水分解して生成されるフルイドを保持できない。つまりは、このようなフルイドは粒の間を浸透して上昇することができる。同様に、ローソン石が脱水分解して生成されるフルイドも玄武岩中(ガーネット中を)粒の間を浸透して上昇することができる。

つまり、脱水分解して生成されたフルイドは上昇することができるようである。(3)フルイドに含まれるケイ酸塩の化学組成が3GPa付近で急激に変化にしている。水に溶け込むケイ酸塩成分のMg/Si比は低圧では0.1と小さいのに、圧力が3GPa付近になると急激に変化し、3GPaよりも高圧では1よりも高くなる。その結果、水に溶け込むケイ酸塩の組成は、かんらん石と輝石の間になり、化学組成が似ているので、水とマントル鉱物との間の2面角は小さくなると理解することができる。(4)マグマとフルイドの第2臨界点は、かんらん岩と水、玄武岩と水、および高Mg安山岩と水で、それぞれ3.8GPa、3GPa、および約3GPaにある。

以上の実験成果をまとめると、島弧火山の下のスラブ上面の深さである3?4GPa付近では、(1)含水鉱物が不安定になり脱水し、(2)それらは鉱物粒間を濡らして上昇する。なぜなら、(3)それらのフルイドに溶け込むシリケート成分はその温度圧力条件では増加して濡れやすくなっているからで、そのことは(4)第2臨界点が近くにあることと関係する。

島弧の直下のスラブ上面付近で第2臨界点があるということは、以下のことを意味する(Figure 3)。(1)暖かい条件ではスラブから出るフルイドはメルト的で、冷たい条件ではフルイド的である。(2)暖かい条件で出て来たメルト的なフルイド(超臨界流体)は、上昇とともに、ひょっとするとフルイド的なものよりもメルト的なものに分かれるかもしれない。そのような条件では2種類のマグマが生成される可能

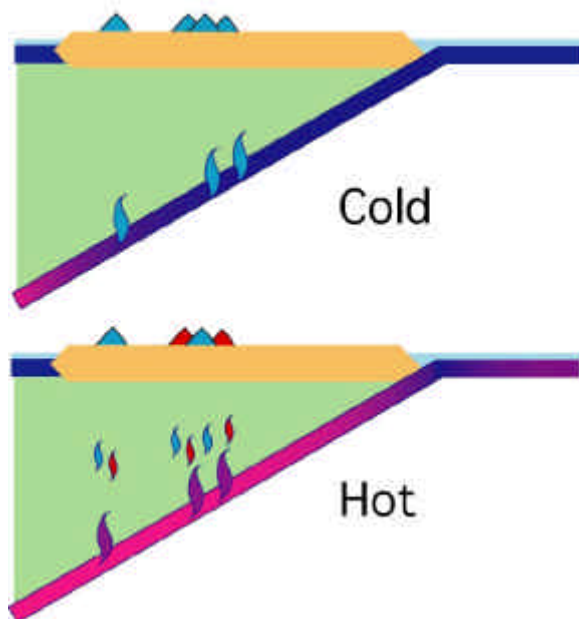


Figure 3 Schematic picture of cold and hot subduction zone.

In hot subduction zones, the melt-like supercritical fluids can be separated into fluid-like and more melt-like materials during its ascent.

性が考えられる。高 Mg 安山岩と玄武岩の両方が噴出している火山や、アダカイトマグマと通常のカルクアルカリマグマが共存している火山の下でのマグマ発生を議論する上で重要なヒントになるのではないかと考えている。

5 論文リスト

Kawamoto, T., Hydrous phases and water transport in the subducting slab. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, "Water in Nominally Anhydrous Minerals" edited by H. Keppler and J. R. Smyth (Geochemical Society and Mineralogical Society of America). Published in October 2006.

Nishimura, K., Kawamoto, T., Kobayashi, T., Sugimoto, T., Yamashita, S., Melt inclusion analysis of the Unzen 1991–1995 dacite: implications for crystallization processes of dacite magma. *Bulletin of Volcanology*, 67,

648 – 662 (2005)

Okada, T., Komatsu, K., Kawamoto, T., Yamanaka T., and Kagi, H., Pressure response of Raman spectra of water and its implication to the change in hydrogen bond interaction, *Spectrochim. Acta A*, 61, 2423-2427 (2005)

Smyth, J. R., Holl, C. M., Langenhorst, F., Laustsen, H. M. S., Rossman, G. R., Kleppe, A., McCammon, C. A., Kawamoto, T., and van Aken, P. A. Crystal chemistry of wadsleyite II and water in the Earth's interior. *Physics and Chemistry of Minerals*, 31, 691 - 705 (2005)

Mibe, K., Kanzaki, M., Kawamoto, T., Matsukage, K. N., Fei, Y., Ono, S., Determination of the second critical endpoint in silicate-H₂O systems using high-pressure and high-temperature X-ray radiography. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 68, 5189-5195 (2004)

Kawamoto, T., Matsukage, K. N., Mibe, K., Isshiki, M., Nishimura, K., Ishimatsu, N., Ono, S., Mg/Si ratios of aqueous fluids coexisting with forsterite and enstatite based on the phase relations in the Mg₂SiO₄-SiO₂-H₂O system. *American Mineralogist*. 89,1433-1437 (2004)

川本竜彦 マグマと水の間の臨界現象、高圧力の科学と技術、14, 235-241 (2004)

Kawamoto T., Matsukage, K., Nagai, T., Nishimura, K., Mataka, T., Ochiai, S., Taniguchi, T., Raman spectroscopy of cubic boron nitride under high temperature and pressure conditions: a new optical pressure marker. *Review of Scientific Instruments*, 75, 2451-2454 (2004)

Kawamoto, T., Ochiai, S., Kagi, H., Changes in the structure of water deduced from the pressure dependence of the Raman OH frequency. *Journal of Chemical Physics (Communications section)*. 120, 5867-5870 (2004)

Kawamoto, T., Hydrous phase stability and partial melt chemistry of H₂O-saturated KLB-1 peridotite up to the uppermost lower mantle conditions. *Physics of Earth and Planetary Interior*, 143-144, 387-395 (2004)