

A02 班「マグマ内揮発性物質による火道内部の増圧過程の解明」

A02 班代表者：西村太志（東北大学・大学院理学研究科・地球物理学専攻）

1. 平成15年度の活動経緯

火道内部の増圧過程は、メルト中からの脱水、気泡核形成、発泡成長、脱ガス、マグマ上昇、マグマと周辺岩体との熱力学的相互作用など多くのプロセスの複合によって生じる。A02 班は、まず、この複雑な火道増圧過程を鍵となる重要な素過程に分解し、それぞれの素過程を実験的・理論的なアプローチにより解明する。本年は、基本的には、各研究分担者が担当分野について、実験機器の立ち上げと基礎実験の実施、基礎モデルの構築と数値実験の実行を行った。具体的には、本年度導入した実験機器（下記参照）を立ち上げることにより、メルト中からの脱水現象を測定する機器の開発、雰囲気制御下および高圧下における揮発性物質の発泡現象のその場観察、熱水流動と岩体の相互作用に関する実験・測定を開始した。また、発泡とマグマ減圧過程の関連性、気泡・高温メルト・岩体の相互作用に関するモデリングと数値実験を実施した。さらに、地質学的、地震学的手法によって、後期新生代における、巨大噴火を起こした大規模カルデラを含む東北本州弧火山フロント火山のマグマ供給系について、その構造と進化過程を明らかにした。次節に、各テーマに関する概要を簡潔にまとめた。より詳しい内容は、本報告書のメンバー毎のレポートを参照されたい。

< 本年導入した大型設備機器 >

1. 顕微赤外分光用近接場顕微鏡
2. 顕微可視分光用検出器システム
3. 雰囲気制御可能透過照明型加熱ステージシステム
4. 高速ビデオカメラシステム
5. マグマ内揮発性物質による増圧過程解明装置（熱水流動実験装置）
6. 水素酸素同位体質量分析計
7. 含水火山ガラス分析用試料冷却ステージ特注品
8. 高圧下発泡その場観察装置 岩石溶融観察装置特注

2. 平成15年度の成果の概要

< 脱水過程・他 >

火山噴火において火道内外での揮発性物質（主に水）の挙動を定量的に把握するため、まず、高温顕微赤外分光法によるガラスからの脱水速度その場観測の基礎となるモル吸光係数を決定し（Okumura et al., 2003）、地球深部物質中の含水量の定量にも用いた（Katayama et al., 2003）。また、微小領域水測定法（近接場顕微赤外分光法）の開発を行った。

< 発泡その場観察 >

マグマ発泡現象をその場観察するための加熱ステージシステムの開発を行った。本装置は、水素・二酸化炭素混合ガスを用いることにより、雰囲気制御ができる事が特徴である。また、高速度カメラや長時間モニタカメラ付顕微鏡を装備し、さらに様々な測定装置を後から追加できるよう、

信号線が装備されている。炉心部分は実験内容にあわせて、大学研究室内で細かな設計変更ができるようにした。具体的には耐熱素材製の炉心を、CAD ソフトでデザインした通りに3D研削装置で加工する作業工程を確立した。その他、発泡画像の画像処理を行うための形状解析ソフトの開発を一部行った。

< 熱水流動と岩体の相互作用 >

マグマから分離した直後の流体、あるいは、水蒸気爆発に關与するエネルギーの主体である流体の条件を再現し、その流動により岩体との間で起こる相互作用を解明するための、「マグマ内揮発性物質による火道内部の増圧過程解明装置」を製作した。この装置は、直径 9mm または 25mm、全長約 60cm の試料バスケットに、最高温度 600℃、最高圧力 80MPa で 0.01ml/min から 30ml/min の熱水を流通させることが出来る。本年度は、温度設定と試料部の温度分布について確認した後、黒曜石粉末を用いて、火山ガラスの水和、変質過程が熱水流路の変化に与える影響を解明するための実験を開始した。450℃、50MPa、0.2ml/min の条件で 120 時間反応させたところ、火山ガラス粉末は試料バスケット内で固結していた。しかし、試料上下流部の圧力には、有意な差は現れなかった。

サファイヤ単結晶の窓を用いた高温高压(最高 300MPa, 800℃)・剪断変形(0.5 - 2 rpm @50MPa) その場観察装置を開発し、マグマ溜り相当の高圧下でのその場観察を可能とした。さらに、この装置は、ダイヤモンドアンビル等、従来の類似装置と比較し 10 倍以上の大容量(5mm³)を有するため、発泡や気泡の変形・合体など表面張力の關与する現象の解析に適している。

< 発泡とマグマ減圧(上昇)過程 >

最近発表された発泡実験(Mourtada-Bonnefoi and Laporte, EPSL, 218(2004), 521-537)の結果とモデル(Toramaru, JGR, 1995)を用いて気泡数密度減圧速度計を開発した。それは、

$$|dP/dt| = aD\sigma^2 P_0^{-1/3} T^{-1/2} N^{2/3}$$

と表される。ここで、 $|dP/dt|$ は減圧速度 (Pa/s)、 a はヘンリー定数、ボルツマン定数やシリケイトメルト中のH₂O分子の体積などから決まる定数でおおよそ 4×10^{14} である。また、 D はメルト中のH₂O分子の拡散係数、 σ は界面張力 (N/m)、 P_0 は初期飽和圧力 (Pa)、 T は温度 (K)、 N は気泡数密度(個数/m³)である。この式を用いると、気泡数密度の観測値 (N) から減圧速度 ($|dP/dt|$) を見積もることが出来る。また、噴出物の色変化から時間スケールを推定するため、顕微可視分光法の開発にも着手した。

< マグマと周辺岩体の相互作用 >

弾性体中に囲まれたマグマ溜まりの揮発性成分の気泡成長による圧力回復量を推定した。マグマ溜まりは、クラックの伸展やマグマの流出、近傍での地震発生により、急減圧を受けると考えられる。従来取り入れられていなかった周辺岩体の弾性効果を加味すると、気泡成長によりマグマ溜まりが受けた減圧量とほぼ等しい、あるいは、それ以上にマグマは圧力を回復することがわかった。

熱応力を考慮したマグマき裂進展挙動の数値シミュレーションを有限要素法によって実施した。また、マグマの粘性の温度依存性を考慮した計算と、温度によらず粘性を一定にした計算を行って両者を比較した。これにより、圧力一定の注入点からき裂が進展する挙動を調べたところ、き裂の

長さによってき裂の進展速度が変化し、伸び始めは非常に遅く、次第に早くなってほぼ一定となる傾向を示すことがわかった。また、伸び始めの挙動には熱応力が支配的であり、後半の挙動ではマグマの粘性が支配的となることがわかった。

< マグマ溜りの脱ガスと増圧機構 >

マグマ溜りの冷却結晶化による発泡現象は圧力変化を引き起こし、噴火の周期やトリガーを支配する可能性がある。結晶化しつつあるマグマからの脱ガスメカニズムを調べるため、気泡を含むクリスタルマッシュの微細構造を再現する高圧実験を行った。その結果、気泡の分布は斑晶鉱物との接触角に依存する（接触角の小さい鉱物に付着する）こと、接触角は雲母類では90度より小さいが、それ以外の主要な鉱物では90度より大きいことがわかった。超高分解能X線CTによる三次元構造の解析によって、マッシュの発泡度が数十%程度でも気泡の三次元的なネットワーク構造は形成されないことが明らかとなった。これは、浸透流的な脱ガスは固結直前まで起こらないことを示唆している。従って、初期含水量が高く低圧のマグマ溜りでは冷却結晶化によって圧力上昇が起こり、繰り返し噴火に至る可能性が高いことがわかった。

火道内外物質のガスの透過率測定器を試作したほか、X線CTスキャン法による流体流れのその場観測法を開発した（Hirono et al., 2003a,b）。

< 島弧マグマ供給系の進化と大規模カルデラの形成 >

巨大噴火を伴うピストンシリンダー型カルデラの形成は、環状割れ目の形成とそれに沿った大量の火砕物の噴出、そして環状割れ目に沿った内側地塊の陥没を伴っている。このことは、この種の巨大噴火の予測にはテクトニックな場の理解と、マグマ供給系の構造とその進化過程を理解することが不可欠であることを意味している。今年度の研究によって、東北本州弧火山フロント域でのマグマ供給系の構造進化が明らかとなった。中期中新世から第四紀にかけてこの変化は、引張場から圧縮場への変遷に伴うもので、地殻全体を切る苦鉄質岩脈の発達に始まり、地殻浅所でのラコリスとピストンシリンダー型カルデラの形成、地殻中部のマグマ溜りによるじょうご型カルデラの形成、そして地殻下部のマグマ溜りに由来する安山岩質成層火山の活動へと経時変化したことが明らかとなった。

3. 来年度の計画

本年度の実験結果と研究成果を元に、各素過程の解明のための実験・研究を精密化することを中心に実施する。また、各々の素過程をつなぐプロセスについても予備的な実験、試行実験を開始し、次年度以降の研究実行のための基礎的な資料とする。

< 脱水過程 > に関しては、ガラスの脱水速度高温顕微赤外その場測定により、火道下から破碎レベルまでの脱水の時間スケールを推定し、また、微小領域水測定法（近接場顕微赤外分光法 + 顕微ラマン分光法）により天然噴出物に残された脱水プロファイルの検出に取り組む。

< 熱水流道と岩体の相互作用 > に関しては、高圧流体が流動する系での熱水流路の変化様式を観察することを主眼とした実験を行う。特に、流体の保持能力に直接影響を与える、試料組織と空隙率の時間変化について解明を試みる。

< 発泡過程 > に関しては、完成した加熱炉を使用して、マグマ中の結晶成長によって起こる発泡現

象をその場観察し、定量的な発泡モデルの作成を試みる。さらに音響モニター装置、振動伝達装置の組み込みを行い、振動と発泡の関係を検証する。また、本年度導入した水素・酸素同位体質量分析計を用いて、脱ガス速度と同位体分別係数の関係を調べ、噴火様式の支配要因を究明するための基礎的方法論を確立する。高圧発泡実験において用いる貴金属カプセルの水素の透過性を明らかにし、また段階加熱実験によって天然の火山ガラスにおける水の存在状態と焼き出し温度との関係を調べる。WDS 用試料冷却ステージを用いて、脱ガスにおけるハロゲン元素 (Cl・F) の挙動を明らかにする。

< マグマ上昇と発泡 > アナログ物質としてのポリマー - CO₂系の減圧発泡実験の結果とモデル (Toramaru, 1995)の一致しない点を、気泡のサイズ分布の時間発展CIP法を用いて直接数値的に解き、これまでの発泡モデルについて再検討を加える。また、噴出物の色変化の顕微可視その場観測法を開発し、破碎から急冷までの時間スケールを推定する。

< 脱ガス過程 > 火道内外物質のガスの透過率測定器を改良し、異なる発泡度の軽石等の透気係数を測定する。これらをもとに、火山爆発における火道周辺での諸過程の時間スケールを見積もる。

< マグマと岩体の相互作用 > に関しては、気泡成長の時間スケールをモデルに組み入れ、マグマ溜まりの増圧にかかる時間を定量的に明らかにする。また、有限要素解析によるマグマ貫入の数値実験を継続し、マグマ噴出の周期性とき裂進展挙動の関係や、帯水層中のき裂進展挙動を明らかにする。また、流体と岩体の温度差によるき裂開口挙動の変化を調べる室内実験を実施する。

< 島弧マグマ供給系の進化と大規模カルデラの形成 > に関しては、巨大噴火の時間的変遷を野外調査から得られる噴出物の観察から明らかにし、それとマグマ供給系の構造進化との関係について調べる。

< その他 > , 火山噴火と極めて類似点の多い間欠泉において集中的に物理的計測を行う。この模擬的な噴火をその場観察し、上記の発泡に関する実験結果と比較することにより、マグマ発泡と火道内増圧過程の理解を深める。

発表論文

- Hirono, T., Takahashi, M. and Nakashima, S. (2003a) In-situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT. *Engineering Geology*, 2162, 1-10.
- Hirono, T., Takahashi, M. and Nakashima, S. (2003b) Direct imaging of fluid flow in geomaterials by X-ray CT. *Geological Society of London Special Publication*, 215, 107-115. SP215: "Applications of X-Ray Computed Tomography in the Geosciences"
- Katayama, I., Hirose, K. Yurimoto, H and Nakashima, S. (2003) Water solubility in majoritic garnet in subducting oceanic crust. *Geophysical Research Letters*, 30(22), 2155; SDE 5-1-5-4.
- Nakamichi, H., H. Hamaguchi, S. Tanaka, S. Ueki, T. Nishimura and A. Hasegawa (2003) Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, 154, 811-828.
- Namiki, A., T. Hatakeyama, A. Toramaru, K. Kurita, and I. Sumita (2003) Bubble size distributions in a convecting layer, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1784, SDE 2-1-4.
- Nishikawa, O., K. Saiki, and H. Wenk (2004) Intra-granular strains and grain boundary morphologies of dynamically recrystallized quartz aggregates in a mylonite, *J. Struct. Geol.* Vol.26, pp.127-141.
- Okumura, S., Nakamura, M. and Nakashima, S. (2003) Determination of molar absorptivity of IR fundamental OH stretching vibration in rhyolitic glasses. *American Mineralogist*, 88, 1657-1662.
- Saiki, K., D.Laporte, D.Vielzeuf, S.Nakashima, and P.Boivin (2003) Morphological analysis of olivine grains annealed in an iron-nickel matrix: Experimental constraints on the origin of pallasites and on the thermal history of their parent bodies, *Meteoritics Planet. Sci.*, Vol.38, pp.427-444.

- Toramaru, A., and T. Matsumoto (2004) Columnar joint morphology and cooling rate: a starch-water mixture experiment, *J. Geophys. Res.* 109, B02205, doi:10.1029/2003JB002686.
- Toramaru, A., T. Harada and T. Okamura (2003) Experimental pattern transitions in a Liesegang system, *Physica D*, 183, 133-140.
- 星 博幸, 岩野英樹, 壇原 徹, 吉田武義 (2003) 紀伊半島, 潮岬火成複合岩類のフィッシュン・トラック年代測定. *地質学雑誌*, 109(3), 139-150
- 星 博幸, 石井六夢, 吉田武義 (2003) 青森県西津軽にみられる中新世火山岩類の K-Ar 年代. *石油技術協会誌*, 68(2・3), 191-199.
- 久利美和 (2003) 十和田火山二の倉スコリア群の層所区分の再検討 -二の倉スコリア期の噴火活動の推移-, *火山*, 48, pp249-258.
- 長橋良隆, 吉田武義, 中井聡子, 奥平敬元 (2003) XRF 分析との比較によるテフラガラス片の EDS 分析結果の評価と補正. *第四紀研究*, 42(4), 265-277.
- 佐藤比呂志, 吉田武義, 岩崎貴哉, 佐藤時幸, 池田安隆, 海野徳仁 (2004) 後期新生代における東北日本中部背弧域の地殻構造発達 -最近の地殻構造探査を中心として. *石油技術協会誌* (印刷中)
- 山田亮一, 吉田武義 (2003) 北鹿地域新第三紀火山活動と黒鉛鉱床鉱化期との関連・火山岩類の主要化学組成の変換. *資源地質*, 53(1), 69-80.

紀要

- Kimura, J., Tateno, M., Kunikiyo, T., Osaka, I., Iizumi, S. and Yoshida, T. (2003) Geochemistry of Quaternary alkali basalt and adakitic dacite lavas in southwest Japan arc. *Proceedings of the State of The Arc 2003 (SOTA2003) Oregon.*
- Nakamura, M., T. Ouchi, E. Nakata, T. Nakano, K. Uesugi, and A. Tsuchiyama (2003) A X-ray microtomographic study on the three-dimensional fluid distribution in silicate polycrystalline aggregates: Role of super-critical water on liquid phase sintering, *SPring-8 User Experimental Report No.10 (2002B)*, 224, Japan Synchrotron Radiation Research Institute.
- Prima, O. D. A., Yokoyama, R. and Yoshida, T. (2003) Classification of topographic terrains using thematic maps derived from DEMs. *Proceeding of the ISPRS WG VII/6.*
- Yoshida, T., Nakajima, J., Hasegawa, A., Umino, N., Sato, H., Nagahashi, Y., Aizawa, K. and Kimura, J.-I. (2003) Evolution of arc magmatism and mantle-crust thermal structures in the Northeastern Honshu arc, Japan. *Proceedings of the State of The Arc 2003 (SOTA2003).*
- 中嶋 悟(2003) 岩石・土の色を測る. 深田研ライブラリーNo.57, 52p. 財団法人深田地質研究所
- 高橋友啓, 長橋良隆, 柳沢幸夫, 吉田武義, 黒川勝己 (2004) 福島県太平洋岸に分布する鮮新統大年寺層のテフラ層 - その2. 記載岩石学的特徴 - . *地質調査研究報告* (印刷中).
- 柳沢幸夫, 高橋友啓, 長橋良隆, 吉田武義, 黒川勝己 (2004) 福島県太平洋岸に分布する鮮新統大年寺層のテフラ層 - その1. 年代層序 - . *地質調査研究報告* (印刷中).

学会発表

<国際学会>

- Aizawa, K. and Yoshida, T., The control factor of variety in caldera forming eruption in Innai caldera complex, NE Honshu arc - The reflection of magma chamber and vent condition-. *IUGG2003*, A.533, 2003.
- Hirono, T., S. Nakashima and C.J.Spiers, Reduction of Ionic Diffusivity through Thin-Film and Nano Pore Water in Geomaterials. *Goldschmidt Conference*, Kurashiki, Japan, Sept. 2003.
- Isobe, H. and Y. Nishida, Diffusion and dissociation behavior of H₂O and OH species in a volcanic glass at super-critical conditions, *10th Annual V.M. Goldschmidt Conference*, Kurashiki, Japan, Sept. 2003.
- Iwahashi, A., Yoshida, T., Chiyonobu, S., Sato, T., Aizawa, K., Nakamura, M. and Yokoyama, R., Arcute pyroclastic conduit at Nibetsu cauldron, NE Honshu, Japan. *IUGG2003*, A.532, July 2003.
- Kimura, J., Yoshida, T. and Iizumi, S., Contributions of slab fluids, depleted asthenosphere, and enriched lithosphere to the origin of Quaternary basalt magma in the NE Japan arc. *IUGG2003*, A.508, July 2003.
- Masuda, T., S. Nakashima, V. Famin and H. Kaneda, Properties of fluids up to 200C by ATR-IR spectroscopy. *Goldschmidt Conference*, Kurashiki, Japan, Sept. 2003.
- Nagahashi, Y., Yoshikawa, S. and Yoshida, T., Significance of the stratigraphic positions of ignimbrite eruptions: Case study of the high resolution tephra record using sediment cores from Lake Biwa and the Osaka plains. *IUGG2003*, A530, July 2003.
- Nakata, E. and M. Nakamura, Formation of vapor channels in crystal mush: implications for degassing and material transport from solidifying granites, *5th Hutton Symposium: The origin of Granites and Related Rocks*, Toyohashi,

Japan, Sept. 2003.

Nishimura, T., H. Hashino and H. Hamaguchi, Source mechanism of very long period seismic events associated with the 2000-2002 volcanic unrest of Mount Bandai, Japan, IUGG 2003 General Assembly, Sapporo, Japan, July 2003.

Nishimura, T., Pressure Changes Associated with Dike Intrusion: Effect of Vesiculation in Magma-, AGU fall meeting, San Francisco, USA, Dec. 2003.

Okumura, S. and S. Nakashima, In-situ dehydration of hydrous glasses at high temperature. Goldschmidt Conference, Kurashiki, Japan, Sept. 2003.

Yagi, M., Ohguchi, T., Yoshida, T. and Akiba, F., Late Miocene submarine volcanoes in the back-arc basin of NE Honshu, Japan - The case of Fukuyama andesite knoll. IUGG2003 A.517, July 2003.

Yamanoi, Y., S. Nakashima, S. Okumura and S. Takeuchi, Color change of a scoria and simulation heating experiments by spectro-colorimetry. Goldschmidt Conference, Kurashiki, Japan, Sept. 2003.

Yokoyama, T. and Nakashima, S., Behavior of iron during rhyolite weathering over 52,000 years by spectro-colorimetry. 13th Goldschmidt Conference, Kurashiki, Japan, Sept. 2003.

Yoshida, T., Nakajima, J., Hasegawa, A., Umino, N., Sato, H., Nagahashi, Y. and Aizawa, K., Crustal structure beneath the large collapse calderas in the NE Honshu arc, Japan. IUGG2003, A532, July 2003.

<国内学会>

竹内晋吾, 奥村聡, 山野井勇太, ブルカノ式噴火の発生メカニズムの解明に向けて - 桜島火山ブルカノ式噴火の噴出物解析 -, 日本火山学会秋季大会, 福岡, 2003年10月.

山野井勇太, 中嶋悟, 奥村聡, 竹内晋吾, Color change of scoria at Takatsukayama in the Higashi-Izu Monogenetic volcano group, 地球惑星科学関連学会合同大会, 千葉, 2003年5月.

奥村聡・中嶋悟, 赤外分光法を用いた高温脱水その場観察, 地球惑星科学関連学会合同大会, 千葉, 2003年5月.

寅丸敦志, 松本健, 澱粉を用いた柱状節理形成の模擬実験, 地球惑星科学合同大会, 千葉, 2003年5月.

津根明, 寅丸敦志, 斜長石累帯構造の多様性とその成因, 日本火山学会秋季大会, 福岡, 2003年10月.

寅丸敦志, 大葎原しのぶ, マイクロライト減圧速度計の提案 - 伊豆大島1986年B噴火への応用 -, 日本火山学会秋季大会, 福岡, 2003年10月.

火山地震データ編集グループ(西村太志, 井口正人, 他), 日本で観測された火山性地震・微動のデータベース, 地球惑星科学合同大会, 千葉, 2003年5月.

西田雄一郎, 磯部博志, 超臨界条件下における火山ガラスの水和過程, 地球惑星科学関連学会合同大会, 千葉, 2003年5月.

西村太志, ダイク貫入に伴うマグマの減圧と圧力回復, 日本火山学会秋季大会, 福岡, 2003年10月.

西村太志, マグマ性流体の発泡効果とクラックの伸展, 日本地震学会秋季大会, 京都, 2003年10月.

中田笑美子, 中村美千彦, 流紋岩質マグマ固結過程における流体相の分布: 結晶・メルト・流体の三相共存状態, 地球惑星科学関連学会合同大会, 東京, 2003年5月.

中村美千彦, 中田笑美子, 中野司, 土山明, 上杉健太郎, 大内智博, 気泡を含む珪長質マグマの濡れと微細構造, 日本火山学会秋季大会, 福岡, 2003年10月.

中田笑美子, 中村美千彦, 珪長質マグマ溜り固結過程における流体移動機構-脱ガスと物質移動への寄与 日本火山学会秋季大会, 福岡, 2003年10月.

久利美和, ガラス包有物微量元素組成からみた十和田火山マグマ, 火山学会秋季大会, 福岡, 2003年9月.

久利美和, 十和田火山新郷軽石のみかけ密度変化, 地球惑星科学関連学会, 千葉, 2003年5月.-

西本壮志, 石川正弘, 有馬 眞, 吉田武義, 高温高压条件下における一の目瀉超塩基性下部地殻岩のP波速度測定. 日本岩石鉱物鉱床学会, 学術講演会, 仙台, 2003年9月.

山田亮一, 吉田武義, 北鹿地域新第三紀火山活動と黒鉱鉱化期との関連. 日本岩石鉱物鉱床学会, 学術講演会, 仙台, 2003年9月.

高橋友啓, 長橋良隆, 柳沢幸夫, 吉田武義, 黒川勝己, 東北日本, 鮮新統仙台層群大年寺層に挟在するテフラ層の岩石学的特徴. 日本岩石鉱物鉱床学会, 学術講演会, 仙台, 2003年9月.