

稲田花崗岩の破碎実験による空隙率・浸透率変化 高温岩体発電の予備実験として
Porosity and permeability changes during fracture experiments of Inada granite as a pilot study of Hot Dry Rock geotherm

片山 郁夫^{1*}, 山口歌織¹
KATAYAMA, Ikuo^{1*}, Kaori Yamaguchi¹

¹ 広島大学地球惑星システム学

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

地球内部に蓄えられている熱エネルギーを利用する地熱発電は、半永久的に資源が枯渇しない点や二酸化炭素の排出量が少ない点など、今後のエネルギー資源としてのポテンシャルが非常に高い。しかしながら、従来の地熱発電では、天然に局在する地熱貯留層（地下流体）を利用するため、開発可能な地域が限定されるという問題がある。それに対し、高温岩体発電は人工的に水を地下深部に注入し、水圧破碎により貯留層を造成するものであり、利用可能地域は格段に広がることを期待される。高温岩体発電では、水圧破碎による基盤岩の空隙率と流体の移動速度が重要な要素となるため、本研究では花崗岩を用いた破碎実験による空隙率・浸透率の変化を検証した。

実験試料は代表的な基盤岩である稲田花崗岩を用い、一軸圧縮試験により破壊実験を行った。水理特性については広島大学設置の圧力容器内変形透水試験機を用い、破壊前後の試料の空隙率・浸透率を測定した。本実験システムでは、圧力容器内の油を加圧することにより、最大 500MPa までの圧力発生が可能である。高温岩体発電では通常 1000m 以深に注入井を掘ることから、空隙率・浸透率への圧力効果も検証した。なお、圧力媒体として油を用いるため、実験は室温で行った（今後はガス圧試験機を用いた高温高压下での実験を予定している）。空隙率の測定では気相置換法により岩石中の空隙体積を求め、浸透率の測定では定差圧流量法により破壊前後の岩石試料の浸透率を求めた。どちらの測定でも窒素を間隙流体として用い、浸透率についてはクリンケンベルグ効果により固有浸透率に補正した。

破壊前の花崗岩試料は非常に緻密であり、封圧 10MPa における空隙率は 0.8-0.9 %、浸透率は $1.0 \times 10^{-18} \text{m}^2$ と見積もられた。この値は、先行研究で報告されている稲田花崗岩の水理特性とほぼ同程度のものである（竹田ほか 2000）。空隙率・浸透率は圧力の増加に従い減少し、封圧 100MPa では空隙率 0.5 %、浸透率 $5.0 \times 10^{-20} \text{m}^2$ に達した。これは、封圧の増加により岩石試料中の微小クラックが閉じたことと粒界の幅が減少したためと考えられる。一軸圧縮試験により破壊された試料では、空隙率・浸透率は系統的に上昇し、封圧 10MPa では空隙率 7.0 %、浸透率 $2.0 \times 10^{-15} \text{m}^2$ への増加がみられた。また、高封圧下でも空隙率ならびに浸透率の増加は維持され、封圧 100MPa で空隙率 4.0 %、浸透率 $1.0 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を示した。

これら破壊後の稲田花崗岩の水理特性を用いて、地下 1000m 条件での流体速度を計算した。雄勝地域での高温岩体テストサイトでは、流体の注入圧が 16MPa であることから、流体の移動速度は $3.3 \times 10^{-5} \text{m/s}$ と見積もられる。雄勝地域での注入井と生産井の距離はほぼ 80m であるため、今回の実験結果からは流体の滞留時間が約 670 時間と予想される。しかしながら、雄勝サイトではトレーサーテストにより流体滞留時間が約 70 時間と報告されており（電中研報告書 2003）、我々の実験結果とは約 1 桁の違いがみられる。その原因としては、室内での岩石破壊実験が水圧破壊ではなく一軸圧縮破壊であるため、破碎形状が異なることなどが挙げられる。今後は、より現実的な環境を実験室で再現し、高温岩体発電の発展に寄与することができれば幸いである。

キーワード: 空隙率, 浸透率, 花崗岩, 破碎実験, 高温岩体発電

Keywords: porosity, permeability, granite, fracture experiments, Hot Dry Rock geothermal system

堆積物に覆われた浅海熱水系の未固結堆積層内における微量元素分布の放射化分析による解明 Distribution of minor elements within the unconsolidated sediments covered active shallow-seafloor hydrothermal system

古澤 祉子¹, 山中 寿朗^{1*}, 石橋 純一郎², 三好 陽子², 大城 光洋², 野口 拓郎³, 高宮 幸一⁴, 奥村 良⁴
Yoshiko Furuzawa¹, YAMANAKA, Toshiro^{1*}, ISHIBASHI, Jun-ichiro², MIYOSHI, Youko², OOKI, Mitsuhiro², Kakuro Noguchi³, Koichi Takamiya⁴, Ryo Okumura⁴

¹ 岡山大学理学部, ² 九州大学理学部, ³ 高知大学海洋コア総合研究センター, ⁴ 京都大学原子炉実験所

¹Fac. Sci., Okayama Univ., ²Fac. Sci., Kyushu Univ., ³KCC, Kochi Univ., ⁴Kyoto University Research Reactor Institute

鹿児島湾湾奥部、桜島の北東海底には活火山「若尊」があり、活発な噴気活動が知られている。若尊火山は鹿児島湾奥部を占める始良カルデラの今なお活動中の火口と考えられ、カルデラ底よりさらに一段掘り下げたような水深 200m の凹地地形を成している。この凹地地形内では活発な熱水活動があり、少なくとも3つの熱水噴出孔から、最高 200 の熱水が噴出している。熱水噴出孔以外にも火口内の複数箇所でも熱水の湧出があり、変色した海底の分布が無人潜水艇や水中ロボットによって明らかにされつつある。

この火口凹地は、内湾に位置することもあり、周辺の火山噴出物などを中心に多くの砕屑粒子が供給され、未固結の現世堆積物だけでも 80m 程度堆積していると音響探査から推定されている。熱水はこの堆積層を貫いて海底面から噴出もしくは湧出しており、その過程でアンチモンなどのレアメタルが沈殿し、鉱床を形成しつつあると期待されている。実際、アンチモンの硫化物である輝安鉱はピストンコアラーで採取された 5, 6m 程度の長さのコア中でも脈状に沈殿、濃集している様子が度々観察されている。しかしながら、現在活動中の熱水から未固結堆積物中に沈殿する鉱物の粒子は小さく、結晶化度も高くないことから、採取した堆積物中に肉眼で必ずしも確認することが出来ず、また、XRD による分析でもピークが現れないことがある。そこで、本海域からピストンコアラーにて採取され、熱水の影響が明らかなコア試料から分取したバルク堆積物を用いて、中性子放射化分析による各種微量元素の分布の把握を試みた。

使用した堆積物試料は、2008 年に海洋研究開発機構所属の淡青丸により実施された KT08-9 次航海中に採取されたピストンコア試料である。このコア試料は採取後、船上で 5cm 間隔に切り分け、間隙水を抽出し、その主成分分析と、堆積物の粘土鉱物組成の解析が行われており、間隙水中に熱水成分が明らかに認められることを確認している。このコア試料から 20cm 間隔で堆積物を分取し、凍結乾燥を後、30 から 40mg をポリエチレン袋に封入し京都大学原子炉実験所にて中性子照射およびガンマ線測定を行った。

分析の結果、これまで濃集が知られていた、ヒ素、アンチモン、水銀の他に、インジウム、セレン、バナジウム、マンガン、金などが検出された。これらの分布の特徴として、間隙水中の熱水成分が多く、現場での温度が 60 を超えていたと考えられる部分では、ヒ素、アンチモン、水銀、金の濃度が高く、熱水の寄与があまり明瞭ではない海底面から 50cm 程度の深度にマンガン、バナジウム、インジウムの濃集が認められた。

アンチモンなどは堆積層中を上昇してくる熱水から直接沈殿したことが推察されるが、マンガンやインジウムは濃集行きに必ずしも熱水が達した証拠がないことから、熱水から直接沈殿したものではないかも知れない。2 本のコアで同じような深度に濃集層が認められることから、熱水によって一旦海水中に噴出したこれら元素が、海水の物理化学条件により海底に沈積する形で濃集したことも考えられる。今後さらに詳細な解析を進める予定である。

キーワード: 浅海熱水系, 若尊火口, 中性子放射化分析, レアメタル, 未固結堆積層

Keywords: shallow-seafloor hydrothermal system, Wakamiko crater, neutron activation analysis, rare metals, unconsolidated sediments

2011年におけるカメルーン、ニオス・マヌーン湖の水質について Water chemistry of lakes Nyos and Monoun, Cameroon in 2011

佐々木 由香^{1*}, 大場 武¹, 日下部 実², 吉田 裕³, 上田 晃², 穴澤 活郎⁴, 金子 克哉⁵, 宮縁 育夫⁶, Issa Issa¹, F.T. Aka⁷, W. Fantong⁷

SASAKI, Yuka^{1*}, OHBA, Takeshi¹, KUSAKABE, Minoru², YOSHIDA, Yutaka³, UEDA, Akira², ANAZAWA, Katsuro⁴, KANEKO, Katsuya⁵, MIYABUCHI, Yasuo⁶, ISSA, Issa¹, F.T. Aka⁷, W. Fantong⁷

¹ 東海大学, ² 富山大学, ³ 吉田技術士事務所, ⁴ 東京大学, ⁵ 京都大学, ⁶ 熊本大学, ⁷ カメルーン国立地質調査所

¹Tokai Univ., ²Toyama Univ., ³Yoshida Consulting Engineer Office, ⁴Univ. Tokyo, ⁵Kyoto Univ., ⁶Kumamoto Univ., ⁷IRGM Cameroon

1. 序

1980年代の半ばにカメルーンのニオス湖とマヌーン湖で起きたCO₂ガスの突発的な放出(=湖水爆発)は約1800名の犠牲者をもたらした。湖水爆発の直接的な原因は、湖水に蓄積したマグマ起源のCO₂であった(Kusakabe et al., 1989; Kling et al., 1989; Sigvaldason, 1989; Evans, et al., 1994)。この蓄積は、湖底でCO₂に富む温泉水が湧出し、湖水の密度成層のため上昇が阻害されるために起きる。湖水の溶存成分を詳細に調べ、成層構造の形成過程を解明することは将来の湖水爆発を予測する上で重要である。

2. 観測

本研究では、2011年1月にニオス・マヌーン湖で深度別に湖水を採取し、陰イオン組成と水の安定同位体比を、それぞれ、イオンクロマトグラフ、レーザー光吸収法で定量した。溶存CO₂とHCO₃⁻(以下、炭酸成分)の総濃度は、Kusakabe (2001)が開発したアルカリ溶液による現場固定法と微量拡散分析法を組み合わせ定量した。

2. ニオス湖

湖水の主要な成分である炭酸成分は湖底(約-210m)から-200mの層で濃度が高く、最高値は372mmol/Lに達する。-200mから-80mに向けて濃度は緩やかに低下し、-60mより浅くなると、6mmol/L以下に下がる。Cl⁻とSO₄²⁻の最高濃度はそれぞれ1mg/L、0.5mg/Lと低いが、炭酸成分濃度とおおよそ比例関係にある。湖水のdD値は、水面から-80mの層は均一に近く-8permil (to SMOW)であった。-80mから深くなると-10permilへ急に低下しそこからは-200mまで変化に乏しく、-200mから湖底に向けて低下し最深の-210mで-11.2permilとなった。NO₂⁻とNO₃⁻の総濃度は、水面から-50mの層で0.3mg/Lと高く、-80mから-170mの層では最高が0.02mg/Lと低かった。NO₂⁻とNO₃⁻は-175m以深では検出されなかった。

3. マヌーン湖

炭酸成分濃度は-98mから-86mの深度で73~93mmol/Lと高いが、浅くなるにつれて急激に低下し、-70mで6mmol/Lまで低下する。ニオス湖の場合と同様に、Cl⁻とSO₄²⁻の最高濃度はそれぞれ2.6、1.9mg/Lと低いが、炭酸成分濃度とおおよそ比例関係にある。dD値は、水面から-70mの層は-18~-17permilで、-80mから深くなると-21~-20permilと相対的に低い値を示した。NO₂⁻とNO₃⁻の総濃度は、-98mと-40mの層で2.6mg/Lと高い値が観測されたが、それ以外の深度では0.1mg/L以下であった。ニオス湖と違い、湖底付近でもNO₂⁻が検出された。

4. 成層構造

ニオス・マヌーン両湖とも水面から-80~-70mの浅層で同位体比が相対的に深層よりも高いことから、蒸発の効果が示唆される。深層にみられる低い同位体比は、湖底で湧出する温泉水の水が局地天水起源であることを示唆する。浅層と深層の間領域は、蒸発効果を受けた湖水と深層水の混合領域に相当する。ニオス湖周辺地域では牧畜が営まれおり、家畜のし尿成分は地表水に運ばれニオス湖に流入するだろう。NO₂はこのような生物活動に由来すると考えられ、-170mより浅い深度で検出されたNO₂は表面水が湖水に及ぼす影響の限界を示している。マヌーン湖では深層でNO₂が検出されるので、ガス抜きを進捗に伴って地表水の影響が湖底近くまで及んでいることを示している。

5. マグマ成分

ニオス・マヌーン湖の深層湖水には微量のCl⁻、SO₄²⁻イオンが含まれ、Cl/CO₂モル比は、それぞれ、5.08E-5、5.31E-4、SO₄/CO₂比は、それぞれ、5.31E-6、6.41E-5と推定される。この値は、玄武岩質マグマのCO₂、S、Cl濃度を東太平洋海嶺の海底溶岩の濃度(Byers et al., 1986)で代表させ、Giggenbach (1996)の提唱する分配係数を用いて計算した平衡気相の値(Cl/CO₂=1.5E-6~1E-5、S/CO₂=4.7E-4~1.3E-3)と比較すると、とくにS/CO₂比で差が大きく、マグマと平衡にある気体が両湖に注入されていると考えた場合、極端にSに欠乏したマグマを想定する必要が出てくる。一方で、マグマの揮発性成分組成は東太平洋海嶺の海底溶岩のそれに近いと考えた場合、マグマと湖の間に熱水系が存在し、そこで何らかの化学的分別作用でマグマ成分がSに乏しい流体に変質した後、両湖に注入している可能性がある。

キーワード: ニオス, カメルーン, 二酸化炭素, 湖水爆発

Keywords: Nyos, Cameroon, CO₂, Limnic eruption

台湾・大屯火山群における AMT 観測 Audio frequency Magneto-Telluric Survey on Tatun Volcanic Group, Taiwan.

宇津木 充^{1*}, 鍵山 恒臣¹, 陳中華², 神田 径³, 吉村 令慧⁴, 浅野 剛¹, 徳本 直明¹, 井上 寛之¹, 吉川 慎¹
UTSUGI, Mitsuru^{1*}, KAGIYAMA, Tsuneomi¹, China Chen², KANDA, Wataru³, YOSHIMURA, Ryokei⁴, ASANO, Tsuyoshi¹,
TOKUMOTO, Naoaki¹, Hiroyuki Inoue¹, Shin Yoshikawa¹

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 台湾中央研究院, ³ 東京工業大学, ⁴ 京都大学防災研究所

¹Kyouto Univ., ²Academia Sinica, Taiwan, ³Tokyo Inst. Tec., ⁴D.P.R.I., Kyoto Univ.

我々は2011年10月に、台湾・陽明山(ようめいさん:ヤンミンシャン)国立公園内に位置する大屯火山群の地下比抵抗構造を求める事を目的にMT観測を行った。観測は大屯火山群の一つ、七星山周辺の10点で行い、Phenix Geophysics社製MTU-5A、2セットを用いたAMT観測を行った。観測は2班に分かれて行い、昼間5?6時間のAMT観測を2地点で同時に行い、それらのデータのリモトリファレンス処理により地下構造解析を行った。なお、本観測は台湾中央研究院・地球科学研究所の協力の元、文部科学省科学研究費補助金・海外学術調査(B)の資金で行われた。

陽明山国立公園は台湾台北市郊外に位置する国立公園で、現在は風景区・温泉として観光開発が進められている。陽明山公園内の大屯火山群は、北側の金山断層と南側の脚断層に挟まれた領域の内部及び周辺に生成された20以上の火山からなる。火山群周辺では活発な噴気孔活動が見られ、最も規模の大きなものとして七星火山麓の小油坑が上げられる。他にも国立公園西端の北投から東側の金山を結ぶ断層沿いには温泉の湧出も見られる。この火山群での活発な火山活動は30万年前頃まで続いたが、その後の活動度は低調な状態が続いている(Wang and Chen, 1990)。一方で、この地域には優勢な地熱・温泉活動があり、噴気ガスにはマグマに起因する成分も含まれていることが報告されており、依然この地域のマグマ活動は衰えていないとする研究もある(Yang et al., 1999)。しかし、最近の大屯火山群の活動はマグマ噴火を起こすことはまれで、日本の九州・別府地域のように地熱活動が活発な火山であるという特徴を持つ。こうした事から、両地域の地下比抵抗構造を求め地下熱水系分布の特徴を比較研究することで、地下のどのような要因が地熱活動卓越型の活動を励起するかを明らかにすることが出来ると期待される。本年度は、七星山周辺域の浅部比抵抗構造を求めることを目的に、2011年10月18日から22日の5日間に渡ってAMT観測を行なった。本発表では、今回の観測概要を示し今回得られたデータから得られた七星山周辺の浅部比抵抗構造の特徴を示す。

キーワード: AMT 観測, 大屯火山群

Keywords: Audio frequency Magneto-Telluric survey, Tatun volcanic group

地表面温度および自然電位分布からみた口永良部島火山の熱水系 Hydrothermal system at Kuchi-erabu-jima volcano, inferred from surface temperature and self-potential distribution

松島 喜雄^{1*}

MATSUSHIMA, Nobuo^{1*}

¹ 産業技術総合研究所 地質調査総合センター

¹ Geological survey of Japan, AIST

1. はじめに

口永良部島は九州の南方、およそ 80km に位置する火山島である。歴史的に水蒸気爆発を頻発する火山として知られ、最近では 1980 年に噴火をしている。1999 年以降地震活動が活発化し、その後現在に至るまで、噴気、熱活動の活発化、地磁気の消磁、地殻変動の圧力源の移動等、噴火へ至る準備過程とみなされるような現象が生じている（例えば井口、2007）。水蒸気爆発の発生メカニズムはよく分かっていないが、これらの現象は火山体内で発達した熱水系の存在を示唆している。本研究では口永良部火山をテストフィールドとして、地表面温度分布および自然電位分布の測定結果をもとに山体内の熱水系の考察を行う。

2. 地表面温度分布

測定は 2008 年 3 月 11 日に、測量用に床に穴の開いたセスナを利用して行った。赤外カメラを鉛直下方に向け、火山の上空を一定高度で飛行しながら撮影した複数枚の画像を合成し、地表面温度分布図を得た。得られた温度異常域は新岳火口から古岳火口にいたる、およそ 500m × 1500m の領域で局所的に見られ、最大で 40 程度である。同じ南西諸島の火山である薩摩硫黄島火山と比較を行った。薩摩硫黄島では硫黄岳山頂火口より大量の高温火山ガスを放出しており SO₂ にして日量 1300 トンに達する。これは口永良部火山に比べ桁大きい。硫黄岳山頂火口を中心に半径 500 m の範囲を覆うように同心円状に温度異常域が広がり、中心部の最高温度は 100 以上である。

これと比較して、口永良部島火山では 10 以上の温度異常を示す領域の面積はかなり小さく相対的に熱活動度は低いといえる。

3. 自然電位分布

測定は 2009 年 11 月 26 日から 29 日にかけて行った。測線は口永良部島火山西側、山頂部、東側からなる。測定結果をみると、山腹の両側で異なった分布を示し、既に行われている観測結果と矛盾しない（神田、私信）。東斜面では平坦な自然電位を示し、これは電磁探査から推定されるように極端な低比抵抗を示す変質帯（Kanda et al., 2009）が東側の地表下に分布しているためと考えられる。一方、西側は地形効果に反して、標高が高くなるにつれて自然電位も増加している。その増加の割合は顕著で、山頂部で 300mV 程度の高異常となる。この異常は比抵抗構造によって説明することはできない。また、山頂付近の噴気活動に対して異常の拡がり大きい。地表面温度分布や火山ガス放出量で比較できるように薩摩硫黄島火山に匹敵するような熱活動を示していない。しかしながら自然電位の分布を説明するためには、山体内に隠れた熱水系が発達していると考えられ、今後、数値シミュレーションによって、その実態を明らかにしていく予定である。

謝辞 観測に際しては神田径博士（東京工業大学）横尾亮彦博士（京都大学）のご協力を賜りました。また京都大学防災研究所付属火山活動センターに便宜を図っていただきました。深く感謝いたします。

キーワード: 地表面温度, 自然電位, 熱水系, 数値シミュレーション

Keywords: surface temperature, self potential, hydrothermal system, numerical simulation

火山体の電気伝導度構造を利用した揮発性物質フラックスの推定—活動様式の異なる火山間の比較

Evaluation of the mass flux of volcanic fluids using the electrical conductivity structure

小森 省吾^{1*}, 鍵山 恒臣¹, ジェリー フェアリー²

KOMORI, Shogo^{1*}, KAGIYAMA, Tsuneomi¹, Jerry Fairley²

¹京大・理, ²アイダホ大

¹Graduate School of Science, Kyoto Univ., ²University of Idaho

マグマ中の揮発性物質が効率よく抜けるかどうかは、火山噴火の爆発性・非爆発性や、マグマ噴火卓越型・地熱活動卓越型といった火山活動の多様性を左右する重要な要素の1つである (Eichelberger et al., 1986; 鍵山, 2008)。それゆえ、火山における揮発性物質の散逸フラックスを推定することは、上記に制約条件を与えられる可能性があるという点で重要である。揮発性物質は、一部は火口から直接大気中へ放出され、残りは山体中の帯水層内地下水流動により、山体外部へと輸送されると考えられる。後者は未だ正確に定量化がなされていない。マグマから抜けた揮発性物質は、帯水層内の地下水に溶解することで間隙水の電気伝導度を高める (Keller and Rapolla, 1974)。また、揮発性物質が溶解した高温・高塩濃度の間隙水により母岩が熱水変質作用を受けるので、それにより母岩の表面伝導度が大きく変化する (Revil et al., 1998; 2002)。鍵山 (1998) は、霧島硫黄山における帯水層の電気伝導度分布を検討し、火山の中心部で電気伝導度が高く、中心から離れるに従い導電性が急激に失われることを示した。このことは、中心部で付加された揮発性物質が外部に向かい散逸していることを示唆する。それゆえ、火山体の電気伝導度構造は、帯水層内地下水流動による揮発性物質のフラックスの多寡に対応している可能性がある。

本研究では、シンプルな形状・物性値を持つ帯水層を仮定し、火山中心部から揮発性物質が付加・散逸するモデルを構築し、数値シミュレーションによって揮発性物質フラックスと帯水層の電気伝導度構造との対応関係を検討する。数値シミュレーションでは、ある初期温度・溶存成分濃度を持った揮発性物質 (ここでは H₂O+NaCl を考える) のフラックスに対して帯水層の温度・溶存成分濃度の空間分布を計算する (小森・鍵山, 2008, 2009; 小森・他, 2010)。計算された2者の分布を用い、間隙水伝導度・母岩の表面伝導度の空間分布を求める [小森・他 (2011) の方法による]。求められた2成分の伝導度は Revil の式 (Revil et al., 1998; 2002) を用いてバルク伝導度に合成される。以上の過程を経ることで、バルク伝導度分布と揮発性物質フラックスとを定量的に結びつけることが可能となる。

本発表では、上記の手法を噴火活動様式の異なる雲仙火山・阿蘇火山に適用し、MT 観測で得られているバルク電気伝導度構造 (Komori et al., submitted; 宇津木・他, 2009) から揮発性物質フラックスを推定する。さらに、推定された揮発性物質フラックスと岩石学的・測地学的手法で得られるマグマ生成率とを比較し、マグマの脱ガスが火山活動様式に与える影響について定量的な議論を行う。

キーワード: 電気伝導度構造, 揮発性物質, マグマ脱ガス, 火山活動様式

Keywords: electrical conductivity structure, volcanic fluids, magma degassing, eruption style