

## マグマ冷却過程における応力蓄積と準火山性深部低周波地震 Semi-Volcanic Low-Frequency Earthquakes and Stress Accumulation during Magma Cooling

麻生 尚文<sup>1\*</sup>, 井出 哲<sup>1</sup>, Tsai, Victor C.<sup>2</sup>  
Naofumi Aso<sup>1\*</sup>, Satoshi Ide<sup>1</sup>, Victor C. Tsai<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学 大学院理学系研究科, <sup>2</sup> カリフォルニア工科大学

<sup>1</sup>Graduate School of Science, The University of Tokyo, <sup>2</sup>Seismological Laboratory, California Institute of Technology

深部低周波地震 (LFE) は低周波の地震波を放出する比較的小さな地震である。プレート境界で発生する Tectonic LFE は低角逆断層であると考えられているが、活火山直下のモホ面付近で発生する Volcanic LFE のメカニズムは未だによく分かっていない。我々は最近、活火山から離れた地域でも Volcanic LFE と似た LFE が発生していることを発見した [Aso et al., 2011; 2013]。この 'Semi-Volcanic LFE' は、LFE が発生する条件について考えるためのキーポイントとなるだろう。

我々は、ノイズの少ない地域で活発な活動をもつ島根県東部の Semi-Volcanic LFE に対し、震源メカニズムを推定するため、波形インバージョンを行った。震源メカニズムと震源時間関数はグリッドサーチと線形インバージョンでそれぞれ求めた。その結果、振動する震源時間関数を得た。また、震源メカニズムは多くの地震で CLVD 成分が卓越し、その主対称軸は線状に並ぶ震源分布の向きと平行であった。

これらの観測事実に基づき、Semi-Volcanic LFE の物理的な震源モデルについて考えた。我々は、これらの LFE の根本的な原動力として、マグマ冷却過程における急激な密度変化の効果を提案する。我々のモデルは、応力蓄積、応力解放、振動励起の 3 ステップからなる。はじめに、蓄積される応力の量を見積もり、その蓄積速度を応力拡散の速度と比較した。次に、脆性破壊が断層運動ではなく CLVD タイプの変形をする理由を考えた。最後に、その後引き起こされる振動の基本周波数と減衰定数を見積もった。

キーワード: 準火山性深部低周波地震, CLVD, マグマ冷却

Keywords: Semi-Volcanic Low-Frequency Earthquakes, CLVD, Cooling Magma

## 月周回衛星 SELENE が明かす月面最大の火山複合体“ Marius Hills Plateau ”の形成史

### SELENE lunar mission reveals the formation history of the Marius Hills Plateau, the largest lunar volcanic complexes

今枝 隆之介<sup>1\*</sup>, 春山 純一<sup>2</sup>, 大竹 真紀子<sup>2</sup>, 岩田 隆浩<sup>2</sup>, 長谷中 利昭<sup>3</sup>, 白尾 元理<sup>4</sup>

Ryunosuke Imaeda<sup>1\*</sup>, Junichi Haruyama<sup>2</sup>, Makiko Ohtake<sup>2</sup>, Takahiro Iwata<sup>2</sup>, Toshiaki Hasenaka<sup>3</sup>, Motomaro Shirao<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科, <sup>2</sup>JAXA 宇宙科学研究所, <sup>3</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科, <sup>4</sup> 惑星地質研究所

<sup>1</sup>Dept. of Solar System Sci., Univ. of Tokyo, <sup>2</sup>JAXA / ISAS, <sup>3</sup>Dept. Earth Sci. Kumamoto Univ., <sup>4</sup>Planetary Geological Institute

Lunar volcanic activity played a significant role in the geological evolution of the Moon. The Marius Hills Plateau (13.5N, 306E) of the Oceanus Procellarum is one of the largest volcanic complexes on the nearside of the Moon, presenting records of igneous activities such as numerous dome-like structures, rilles, cones, and lava flows [1]. To estimate the precise formation ages of the Marius Hills Plateau and understand the past lunar volcanism, we used the data from the Terrain Camera (TC) and the Multiband Imager (MI) installed on the Selenological and Engineering Explorer (SELENE).

The TC is a push-broom stereo-camera with two slant telescopes, +15 degrees forward looking and -15 degrees backward looking. It acquired 10 m spatial resolution image data from the SELENE nominal altitude of 100 km. The stereo pair images are used to produce digital terrain models (DTMs) with an elevational resolution of 20 m or better [2]. The MI is a multi-spectral imager with four and five color bands with 20 m (visible) and 62 m (near-infrared) spatial resolutions from the SELENE nominal altitude. The band assignments are 415 nm, 750 nm, 900 nm, 950 nm, and 1000 nm in the visible range and 1000 nm, 1050 nm, 1250 nm, and 1550 nm in the near-infrared range [2]. Based on the TC and MI data, we first morphologically and spectrally classified distinct basaltic lava flows on the Marius Hills Plateau as different geological units. We then estimated the crater retention ages of each geological unit using the TC data.

Crater counting is a well-established technique for deriving the model ages of planetary surfaces. We can infer the relative and absolute ages by measuring the Crater Size-Frequency Distribution (CSFD) with image data based on the simple idea that older surfaces accumulate more craters [3]. We counted craters and measured their diameters using the TC data and estimated the age based on CSFD measurements for each unit on the Marius Hills Plateau. We used the polynomial production function and the cratering chronology model proposed by Neukum and Ivanov (1994) [4] to obtain the absolute model age from the CSFD measurement [5]. Volcanic craters such as the top of the dome-like structures or cones may affect the counting results, so we eliminated what can be clearly distinguished from impact craters in the TC data.

The Marius Hills Plateau can be classified into about sixty geological units based on the MI color-composite maps. There are twice as many geological units on the Marius Hills Plateau than previously proposed by [6].

The measured crater retention age of each unit indicated that the youngest Marius Hills Plateau formation is ~3.3 Ga, corresponding to the Early Imbrian Model Age, while some geological units exhibit greatest ages of ~3.8 Ga. The Marius Hills Plateau is thus older than previously estimated. In our study, no classified geological unit exhibited young ages of 0.7~1.5 Ga, corresponding to the Late Eratosthenian Model Age and the Early Copernican Model Age reported by [7].

We found that almost all geological units of the high-calcium pyroxene plateau are significantly older than those of the olivine-rich basaltic lava areas, consistent with [8]. However, we note that some geological units of the high-calcium pyroxene plateau are apparently younger than those of the olivine-rich basaltic lava areas. The Marius Hills Plateau formation history is thus complex [9].

References: [1] Greeley R. (1971) *The Moon*, 3, 289-314. [2] Haruyama et al. (2008) *EPS*, 60, 243-255. [3] Morota T. et al. (2009) *GRL*, 36, L21202. [4] Neukum G. and Ivanov B. A. (1994) Univ. of Arizona Press, 359-416. [5] Cho Y. et al. (2012) *GRL*, 39, L11203. [6] Heather D. J. et al. (2003) *JGR*, 108, 5017. [7] Huang J. et al. (2011) *JES*, 22, 601-609. [8] Besse S. et al. (2011) *JGR*, 116, E00G13. [9] Imaeda R. et al. (2013) *LPSC XLIII*, Abstract #1503.

キーワード: 月周回衛星かぐや (SELENE), 地形カメラ (TC), マルチバンドイメージャ (MI), 火山複合体, マリウス丘 (Marius Hills Plateau), クレーター年代学

Keywords: KAGUYA (SELENE), Terrain camera (TC), Multiband Imager (MI), Volcanic complexes, Marius Hills Plateau, Crater-counting

## SELENEの地形カメラによる月ドームの形態と計測 Morphometry and morphology of lunar mare domes from SELENE terrain camera

白尾 元理<sup>1\*</sup>, 春山 純一<sup>2</sup>, 今枝隆之介<sup>3</sup>  
Motomaro Shirao<sup>1\*</sup>, Junichi Haruyama<sup>2</sup>, Ryunosuke Imaeda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 惑星地質研究所, <sup>2</sup>JAXA/ISAS, <sup>3</sup> 東京大学理学系研究科地球惑星科学

<sup>1</sup>Planetary Geological Institute, Japan, <sup>2</sup>JAXA/ISAS, <sup>3</sup>Dept. of Solar System Sci., Univ. of Tokyo

月の海には、緩やか膨らんだ地形が多数見られる。これらは海のドームと呼ばれ、平らな月の海にある特異な地形として多くの人の興味を引いてきた。海のドームはほぼ円形の平面形をもち、斜度は $10^\circ$ 以下、基底の直径は数kmから30km、高さは数百m以下である。山頂にクレーターをもつドームもある。海のドームは18世紀以来、地球からの望遠鏡観測によってその存在が認められていた。実際には非常に偏平な地形であるが、明暗境界線付近にあるときに望遠鏡で観測すると膨らみの大きいドーム状に見えることから、海のドームと呼ばれるようになった。

探査機の時代になると、海のドームはLunar Orbiter, Apollo, Clementine, Lunar Reconnaissance Orbiterなどで調べられるようになり、その成因は火山起源であることが明らかになった。しかし詳細な地形データの不足、低太陽高度の画像の不足、撮像地域の不足などの理由で、十分には研究されていない。

本研究では、SELENEに搭載された地形カメラ(TC)のデータを用いた。地形カメラはパンクロマチックのプッシュブルーム方式の撮像システムで、TC1とTC2の2つの同一の光学系をもち、TC1とTC2の光軸は、SELENEの進行方向に対してそれぞれ直下方向から前方・後方に $15^\circ$ ずつ傾いて配置されている。太陽高度が $30^\circ$ 以上の時にはステレオ画像を取得した。それぞれの受光部には4096画素のリニアCCDが配置され、高度100kmからは水平・垂直方向の分解能はいずれも約10mである。また太陽高度が $30^\circ$ 以下で撮像した単眼視画像は、偏平な海のドームの詳細な地形解析に役立つ。

本研究ではSELENEの地形カメラによって得られたHortensius, Milichius, Cauchy, Arago地域のドームのデータを使って、地球上のハワイ、メキシコ、アイスランド、アメリカ北西部の小型盾状火山と比較し、その成因を論ずる。

キーワード: セレーネ(かぐや), 月, 盾状火山, 地形カメラ(TC), ドーム

Keywords: SELENE (KAGUYA), Moon, Shield volcanoes, Terrain camera, Mare domes

## 月の巨大な縦孔：溶岩チューブの天窗？

### Lunar gigantic vertical holes: Possible skylights of lava tubes of the Moon?

春山 純一<sup>1\*</sup>, 長谷中 利昭<sup>2</sup>, 白尾 元理<sup>3</sup>, 佐伯 和人<sup>4</sup>, 宮本 英昭<sup>5</sup>, 道上 達広<sup>6</sup>, 諸田 智克<sup>7</sup>, 押上 祥子<sup>8</sup>, 今枝 隆之介<sup>9</sup>, 岩田 隆浩<sup>1</sup>

Junichi Haruyama<sup>1\*</sup>, Toshiaki Hasenaka<sup>2</sup>, Motomaro Shirao<sup>3</sup>, Kazuto Saiki<sup>4</sup>, Hideaki Miyamoto<sup>5</sup>, Tatsuhiro Michikami<sup>6</sup>, Tomokatsu Morota<sup>7</sup>, Shoko Oshigami<sup>8</sup>, Ryunosuke Imaeda<sup>9</sup>, Takahiro Iwata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 熊本大学大学院自然科学研究科理学専攻地球環境科学講座, <sup>3</sup> なし, <sup>4</sup> 大阪大学大学院理学研究科, <sup>5</sup> 東京大学総合研究博物館, <sup>6</sup> 近畿大学, <sup>7</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科, <sup>8</sup> 国立天文台, <sup>9</sup> 東京大学大学院理学系研究科  
<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>Department of Earth Sciences, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, <sup>3</sup>None, <sup>4</sup>Graduate School of Science, Osaka University, <sup>5</sup>The University Museum, The University of Tokyo, <sup>6</sup>Kinki University, <sup>7</sup>Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, <sup>8</sup>National Astronomical Observatory of Japan, <sup>9</sup>School of Science the University of Tokyo

2007年に我が国が打ち上げた月探査機 SELENE (かぐや) は、月に、直径、深さともに、50~100 mに及ぶ巨大な縦孔構造を発見した。これらは、月地下に存在する更に大きな空洞構造の上に開いたものと考えられる。こうした地下の空洞構造は、地球からの類推で、溶岩チューブや、マグマ溜まり、或いは断層起源の空洞などが考えられる。いずれにしても、これら縦孔は、月の火成活動と密接に関係していると考えられる。本講演では、月の縦孔構造を紹介し、その月の火山学における意味について議論をする予定である。

月に最初に見つかった縦孔は、直径、深さ共に 50 m程度のもので、月の表側、嵐の大洋の西側に位置するマリウス丘群の中のリル (溶岩谷) の中に、SELENE に搭載された 10 m解像度の地形カメラデータ (Haruyama et al., 2008) の中で見つけられ、「マリウス丘 (ヒル) の縦孔 Marius Hills Hole」と名付けられている (Haruyama et al. 2009)。その後、地形カメラデータによって取得されたデータのうち、太陽高度が 40°以上のデータについて調査した結果、他に静の海、裏側の賢者の海に、一つずつ発見された (Haruyama et al., 2010; 2012)。いずれも、マリウス丘のそれより、更に大きく、径、深さともに、100 mにも及ぶものであった。調査データの被覆域は、月の海領域の 95%以上であり、50 m以上にも及ぶものは、ほぼ、この三つしか無いと考えられる。実際、SELENE による発見後、アメリカの探査機による捜査でも、これらほど大きく深いものは、見つかっていない。他に見つかった縦孔或いは陥没は、すべてクレータ底に存在し、衝突の際のメルトの流れにおいて形成され、残存している小規模な空隙構造に開いたものと考えられる (例えば、Ohman and Kring, 2012)。

これらの月の縦孔の内壁には 1 mオーダの層構造が見えており (Ashley et al., 2010)、縦孔は月の過去の火成活動の推移に関する情報を得る極めて貴重な露頭といえる。薄い溶岩流をもたらす火成活動が頻繁に起きたのか、溶岩流層の間に火山灰層のようなものが堆積しているのか、隕石衝突による砕屑層 (レゴリス層) の形成を伴っているのか、などの研究が待たれる。

また、縦孔の形成メカニズムもまだ不明なことが多く興味深い。縦孔は、地球との類推から溶岩チューブの上に開いたもの (天窗) (Haruyama et al., 2009) と考える他に、地球との類推から、マグマ溜まり (Robinson et al., 2012)、或いは、断層起源なども考えられる。

【参考文献】 Ashley et al., 42nd LPSC abst#2771; Haruyama et al., (2008), EPS 60, 243; Haruyama et al., (2009), GRL 36, L21206, doi:10.1029/2009GL040635; Haruyama, et al. (2010), 41st LPSC, abst#1285; Haruyama et al., (2012), "Moon: Prospective Energy and Material Resources", ed. by V. Badescu, Springer Heidelberg New York Dordrecht London, Cp.6, 139; Ohmn and Kring (2012), JGR 117, E00H08, doi:10.1029/2011JE003918; Robinson et al., (2012), PSS 69, 18.

キーワード: 溶岩チューブ, 縦孔, 月, 火山, セレーネ, かぐや

Keywords: lava tube, vertical hole, moon, volcano, SELENE, Kaguya



## Aso-2 火砕流噴火の直前に噴出した異常に高温の安山岩質マグマ Unusually high-temperature andesitic magma erupted shortly before the Aso-2 pyroclastic flow from Aso caldera, Japan

小林 哲夫<sup>1\*</sup>Tetsuo Kobayashi<sup>1\*</sup><sup>1</sup> 鹿児島大学<sup>1</sup>Kagoshima University

### 1. はじめに

阿蘇カルデラの東西両斜面には Aso-2 火砕流堆積物の直下に産状がよく似た溶岩が産出する。東斜面には玉来川溶岩、西斜面には岩戸・秋田・瀬田裏溶岩および砥川溶岩などである。これらの溶岩は非常に緻密で丸い気泡に富み、パホイホイ溶岩と構造が酷似するが、異常な高温で噴出した安山岩溶岩であることを報告する。

### 2. 産状

西側のカルデラ縁付近に分布する岩戸溶岩の全体像は把握しきれていないが、基底付近は黒色・緻密なガラス質で無斑晶にちかい岩石であり、大小の球形気泡に富む。基底面には甲羅状の亀裂が存在するが、破碎部分は認められない。全体として下位の岩体の凹凸を埋めるようにへばりついており、パホイホイ溶岩と似た産状を示す。瀬田裏溶岩は基底部のみしか観察できていないが、岩戸溶岩と酷似しており、ガラス質の基底部が下位の風化ローム層と直接接している。

秋田溶岩の表面は発泡したアアクリンカー状となっているが、まだ高温状態の時に Aso-2 に覆われたため、Aso-2 火砕流堆積物の基底部は強溶結の岩体となり、クリンカー状の溶岩表面に密着するようにへばりついている。溶岩の基底部は観察できない。

さらに下流側に分布する砥川溶岩は、その大半は熊本平野の地下に埋積されている。Aso-1 と Aso-2 の間の層準に位置し、水田・他 (1990) のボーリングコアの記載では、上記溶岩類と非常によく似た産状を示す。

一方、カルデラ東側の玉来川溶岩は Aso-2 噴出物 (降下軽石・火砕流堆積物) の直下に存在し、全般的に黒色・緻密で斑晶に乏しい岩石である。基底付近に自破碎構造がなく、黒色・緻密なガラス質の岩体であるが、表層はアアクリンカー状となっている。層準にもよるが、気泡にとみ、直径 10 cm に達する大きな気泡も存在する。層厚は約 10 m、分布は東西 10 km に及び低粘性の溶岩と推定されるが、噴火地点は不明である (小野・他, 1977)。

Aso-2 との関係が直接観察できるのは秋田溶岩と玉来川溶岩のみである。前者は Aso-2 の直前に噴出したが、後者は Aso-2 噴出時には冷却しており、前者よりやや早い時期に噴出している。西側と東側では多少の時間差が存在していたことになるが、西側の溶岩すべてが同一時期の噴出物かどうかの結論は得られていない。

### 3. 岩石学的な特徴

東側の玉来川溶岩、西側の岩戸・秋田・砥川溶岩の化学組成とマグマの温度について示す。岩石は斑晶に非常に乏しい輝石安山岩であり、SiO<sub>2</sub> は約 61 wt% である。ただし砥川溶岩のみ SiO<sub>2</sub> = 58 wt% (松本, 1974) である。

マグマの温度はペアで産する単斜・斜方輝石を分析し、Anderson et al. (1993) で計算した。5~7 試料の平均値は、東側の玉来川溶岩 (1123 ± 23 °C)、西側の岩戸溶岩 (1081 ± 17 °C)、秋田溶岩 (1061 ± 18 °C)、砥川溶岩 (1045 ± 24 °C) であった。分析値を輝石の組成図にプロットすると、微妙にずれた別の領域にプロットされるが、秋田溶岩と砥川溶岩はほぼ同じ領域にプロットされる。

また Shaw (1972) のモデルを使い、玉来川溶岩の主成分組成で 1123°C (輝石温度) のメルトの粘性を計算した。その結果、無水でも 10<sup>3.9</sup> Pa s と低粘性であった。水が少し加わると、粘性はさらに低下する。

通常の安山岩の温度は 900-1000 °C、粘性は 10<sup>8-9</sup> Pa s 程度なので、今回紹介した溶岩類は安山岩質溶岩としては異常に高温であり、玄武岩質溶岩とほぼ同じ温度と粘性を保持していたものと推定される。これらのデータは、安山岩質溶岩ではあるがパホイホイ溶岩と似た産状を示すこととも矛盾しない。

### 4. 噴火地点と噴火様式

西側山麓に分布する砥川溶岩の噴火地点は赤井火山 (松本, 1974) と推定されているが、岩戸・瀬田裏溶岩の噴火口は現在のカルデラ地形の内側であったと推定される。また岩戸溶岩と秋田溶岩の輝石組成が微妙に異なっているため、異なる火道 (割れ目火道) からの噴出であったかもしれない。なお東側の玉来川溶岩の噴火地点を特定できるデータは得られていない。この噴火に伴うテフラは発見されていない。高温で低粘性のマグマであり、噴火様式も爆発的ではなく、主に流出的であったのかもしれない。

上記した溶岩はすべてカルデラを東西に切る断層系に沿うように分布しており、Aso-2 火砕流噴火の始まるまでの短期間に、いくつかの割れ目火道から相次いで噴出したものかもしれない。

### 5. まとめ

今回報告した溶岩類は、カルデラ噴火の先駆現象の 1 例であるが、安山岩質溶岩としては異常に高温・低粘性である。多様な先駆現象を総括すれば、カルデラ噴火直前のマグマの存在形態、噴火の機構を考察するうえで貴重なデータを提

# Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SVC51-05

会場:201A

時間:5月20日 17:15-17:30

供するものと考えている .

キーワード: 阿蘇カルデラ, 先駆的現象, 高温な安山岩質溶岩, パホイホイ溶岩

Keywords: Aso caldera, presursory event, high-temperature andesitic magma, paahoehoe lava

## 山形県酒田市周辺出羽山地における中期中新世火山活動の復元 Reconstruction of Middle Miocene volcanism in Dewa Mountains in Sakata city, Yamagata Prefecture, northeast Japan

細井 淳<sup>1\*</sup>, 天野 一男<sup>2</sup>

Jun Hosoi<sup>1\*</sup>, Kazuo Amano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 茨城大学大学院理工学研究科, <sup>2</sup> 茨城大学理学部

<sup>1</sup>Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, <sup>2</sup>Faculty of Science, Ibaraki University

東北日本には新第三紀の日本海拡大に伴った海底火山噴出物が広く分布している。日本海側には大量の玄武岩類が分布しており、その成因は日本海拡大に伴う背弧リフティングに関連したものであるとされた (Sato and Amano, 1991 など)。土谷 (1988) や Yagi et al. (2001) は岩石学的観点からこれら玄武岩のマグマ組成やその変遷を明らかにし、吉田 (2009) はテクトニクスと共に議論した。しかし詳細な堆積学的観点に基づいた研究は行われておらず、古火山体や火山噴火様式の実態は不明であった。本研究は日本海側に分布する玄武岩の代表的分布地域である山形県酒田市周辺の出羽山地を対象とし、堆積相解析に基づいた具体的な古火山活動の解明を行った。堆積相分布に基づき、直径数 km、高さ約 1500m の薄く平坦な火山体を復元した。この古火山体は一部にアメーバ状火山礫を含む再堆積ハイアロクラスタイトを主体としており、塊状溶岩や枕状溶岩はほとんど認められない。海底火山活動がアメーバ状火山礫を形成する要因は、1) 火山噴火そのもの、2) 枕状溶岩の破碎、3) ペペライト、4) 給源岩脈、が考えられる。古火山体は枕状溶岩をほとんど含まず、さらにアメーバ状火山礫が重力流堆積物中に含まれていることから、本火山体のアメーバ状火山礫は噴火そのものによって形成されたと考えられる。本火山体を構成する岩相は水中ハワイ式噴火による堆積物と一致する (Fujibayashi and Sakai, 2003; Head and Wilson, 2003; Simpson and McPhie, 2001)。ハワイ式噴火は多くが割れ目にそって噴火することが知られている (Macdonald, 1972; Wilson and Head, 1981)。地層中に同時期同起源の岩脈や岩床が無数に形成されていること、当時の古応力場が引張応力場であったことなどを考慮すると、日本海拡大に伴った割れ目噴火に伴って形成された火山体の可能性が高い。本火山体に認められるアメーバ状火山礫を含む岩相は他にも報告されている (Cas et al., 2003; Fujibayashi and Sakai, 2003)。日本海拡大時、本地域の復元できたものと同様の火山体や火山活動が背弧全域で行われていた可能性が高い。

### 【引用文献】

- Cas et al., 2003, Explosive Subaqueous Volcanism, AGU, 299-316.  
Fujibayashi and Sakai, 2003, Explosive Subaqueous Volcanism, AGU, 259-272.  
Head and Wilson, 2003, Jour. Volcano. Geotherm. Res., 203, 155-193.  
Macdonald, 1972, Prentice Hall, New Jersey, pp. 1-510.  
土谷, 1988, 地質雑, 94, 591-608.  
Sato and Amano, 1991, Sedimentary Geology, 74, 323-343.  
Simpson and McPhie, 2001, Jour. Volcano. Geotherm. Res., 109, 339-355.  
Wilson and Head, 1981, Geophys. J. Int, 121, 215-225.  
八木ほか, 2001, 岩鉱, 30, 265-287.  
吉田ほか, 2005, 第四紀研究, 44, 195-216.

キーワード: グリーンタフ, 海底火山活動, 溶岩噴泉, 割れ目噴火, 出羽山地, 中新世

Keywords: greentuff, subaqueous volcanism, fire-fountain, fissure-eruption, Dewa Mountains, Miocene