

男鹿半島戸賀火山，戸賀軽石層中のサニディン斑晶の  
レーザー融解<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代

宇都浩三\*\*\*・鹿野和彦\*・石塚 治\*

(2010年1月7日受付，2010年7月13日受理)

Laser-fusion <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Dating on Sanidine Phenocrysts from Toga Pumice,  
Toga Volcano, Oga Peninsula, Northeast Japan

Kozo UTO\*\*\*, Kazuhiko KANO\* and Osamu ISHIZUKA\*

Toga volcano is a tuff ring, located at Toga Bay of Oga Peninsula, NE Japan. The crater is 2.0 km by 2.4 km in dimension, filled with K-rich rhyolite pumice-bearing tephra (Toga Pumice). The crater rim deposit has been almost entirely lost and Late Pliocene shallow marine terrace deposits overlie the crater infillings. In order to determine the eruption age of Toga volcano, a laser-fusion <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating was successfully applied to sanidine phenocrysts extracted from pumice lapilli of the Toga Pumice. Measurement was made 7 times by fusion of single, 2 or 4 grains, resulting in mutually consistent dates with a weighted average <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age of  $0.42 \pm 0.01$  Ma. This result coincides with  $0.42 \pm 0.04$  Ma, the fission-track age of zircon crystals from the same sample.

**Key words:** laser-fusion <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating, sanidine, pumice, Quaternary, Toga volcano

## 1. はじめに

火山活動の時間空間分布を知る上で，時代未詳の火山噴出物の正確な年代測定は必須である。しかし，<sup>14</sup>C年代測定法が適用可能な最近数万年間の噴出物を除き，火砕噴出物の正確な放射年代測定は困難であった。その主な理由として，適用可能な放射性核種や測定対象が限られていることが挙げられる。第四紀火山噴出物についていえば，K-Ar法が主な年代測定手段となるが，測定試料中のKの量が少ない場合が多く，また，岩石の変質などによる試料中のAr保持の問題などがあるため，測定できる材料は限られている。

大陸地域の珪長質アルカリ岩のように，Kに富むサニディンなどが斑晶鉱物として含まれる場合は，K-Ar年代測定が盛んに行われてきた（例えば Spell *et al.*, 1993）。しかし，日本においては，Kに富み，比較的頻繁に産出する黒雲母などを対象とした測定は行われているものの，サニディンについては，斑晶として含まれていることが殆ど無いため，測定例はごく僅かである。また，仮

にKに富む斑晶が含有されている場合でも，融点が高く，融解してもメルトが高粘性となるサニディンなどでは，Arの脱ガスが不完全となり，噴出年代より有意に若い年代を与えることが知られており（宇都・他，1994），K-Ar法で地質学的に意味のある年代を得ることは難しい場合が多い。

斑晶を対象としたこのような技術的問題は，連続レーザーを用いた<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代測定法（Uto *et al.*, 1997）で解消できる。脱ガスが不完全であっても連続レーザー加熱によって十分量のArを得て，その同位体比を測定することができれば精度の高い年代値が求まる。宇都・石塚（1999）は，この方法に従って，長径1 mm大の斜長石斑晶を数粒子ずつ融解することで，耶馬溪火砕流堆積物について $0.92 \pm 0.09$  Maの加重平均値を得た。この値は同じ堆積物の黒曜石マトリックスの<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代値 $0.98 \pm 0.02$  Maと比べて多少誤差が大きいながらも大差なく，100万年前の火砕流堆積物の年代測定が可能であることを示している。斜長石よりもKに富むサニディン斑晶

\* 〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1  
産業技術総合研究所地質情報研究部門  
Institute of Geology and Geo-information, Geological  
Survey of Japan, AIST, 1-1, Higashi 1-chome, Tsukuba  
305-8567, Japan.

\*\* 現所属：産業技術総合研究所九州センター  
Present address: Kyushu Center, AIST

Corresponding author: Kozo Uto  
e-mail: k.uto@aist.go.jp

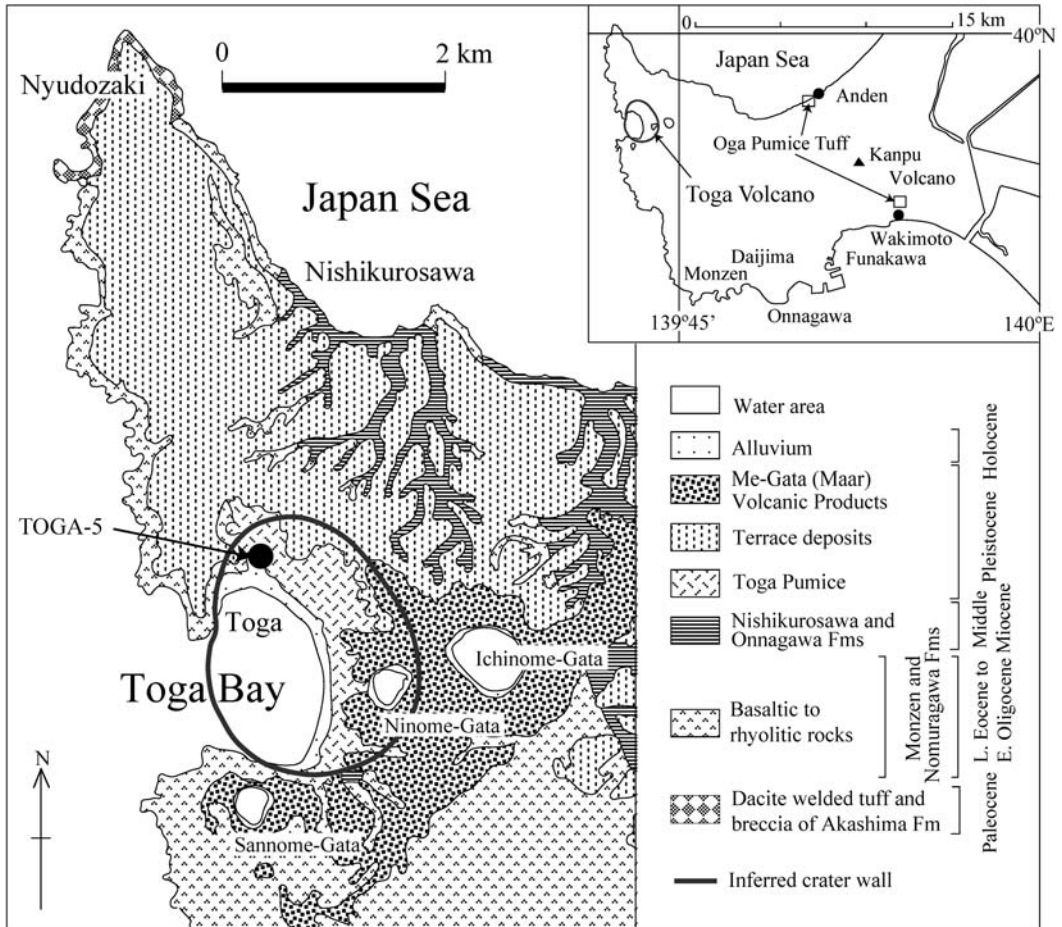


Fig. 1. Geologic map of the western part of Oga Peninsula and the locality of dating sample TOGA-5 (modified after Kano *et al.*, 2002). The inset shows the location of the Toga Bay and exposures of the Oga Pumice Tuff.

を含む火山噴出物であれば、サニディン斑晶を対象とすることで100万年より若くても正確な年代測定を行うことができるはずである。

本報告では、サニディン斑晶のレーザ加熱 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定を試みた本邦で初めての例として男鹿半島西端の戸賀火山(鹿野・他, 2002)を構成する戸賀軽石層軽石火山礫中のサニディン斑晶について測定した結果を報告し、同手法の有用性を議論する。

## 2. 戸賀軽石層と戸賀火山

秋田県男鹿半島には、一ノ目潟、二ノ目潟および三ノ目潟という第四紀後半に活動した3つのマールがあり、スコリアなどの噴出物がマールの周辺に分布している(Fig. 1)。二ノ目潟西側の戸賀湾も楕円形を呈し、かつ周辺に“戸賀浮石層”が分布することから爆裂火口と考え

られていた(大橋, 1930, 1938)が、火山としての詳しい記載がなされたのは最近のことである。鹿野・他(2002)は、戸賀湾の周辺に厚く分布する戸賀軽石層の分布、構造、堆積相、構成物、基盤との関係などを調べ、戸賀軽石層が、戸賀湾とその沿岸一帯をその噴出源とするタフリリングを構成していることを認め、これを戸賀火山と命名した。さらに、戸賀軽石層と、戸賀軽石層に対比される男鹿半島東部安田海岸の男鹿バミスタフ(Oga Pumice Tuff; Fig. 1)について、軽石火山礫のみを選んでジルコン結晶を抽出し、それぞれ $0.42 \pm 0.04 \text{ Ma}$ と $0.39 \pm 0.04 \text{ Ma}$ のFT年代値を得た。鹿野・他(2002)は、この年代を踏まえ、戸賀火山を42万年前、中期更新世の単成火山と考えた。しかし、男鹿バミスタフに直接重なる亜炭層中の白頭山男鹿テフラ(町田・新井, 1992)については、白井・他(1997)が白頭山男鹿テフラを挟む日本海のODP

コアと標準的酸素同位体曲線 (Bassinot *et al.*, 1994) から推定される酸素同位体ステージ (Shackleton and Opdyke, 1973) との対比に基づいて, 448 ka と推定している。この年代は下位の男鹿バミスタフの放射年代よりも古く, 両者の層位関係に矛盾する。そこで, 戸賀軽石層と男鹿バミスタフに多数含まれていて, やや細かいながらも自形を呈するサニディン斑晶に着目して, レーザ融解<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代測定法により正確な年代を求め, このような差が何に起因するかを考察することにした。

なお, 鹿野・他 (2002) では戸賀軽石層の軽石の組成をアルカリ流紋岩としているが, サニディンは生じているものの, IUGS (国際地質科学連合) が勧告しているシリカ-アルカリ図上での分類ではアルカリ成分が多く, K に富む非アルカリ流紋岩である (鹿野・大口, 2005)。また, 戸賀軽石層の軽石火山礫には円磨されたものが多いため, 戸賀軽石層自体を再堆積物と考える向きもある (大口・佐々木, 1984) が, 軽石火山礫は火口湖内に堆積した噴出物がマグマ水蒸気爆発で繰り返し吹き上げられては再び火口湖内に堆積することを繰り返す過程で円磨されたもので (Kano and Ohguchi, 2009), したがって, その放射年代は戸賀軽石層の噴出年代と考えて良い。

### 3. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代測定

測定試料は, 戸賀タフリングの火口縁内側, 戸賀の集落北方の沢沿い (Fig. 1, TOGA-5 地点: 39°57'51" N, 139°42'46" E) において幅 2 m, 高さ 1.5 m の露頭下部から採取した黒雲母含有流紋岩軽石細粒火山礫凝灰岩である。この岩石は, タービダイト類似の堆積構造を示し, 軽石火山礫自体もやや円磨されているが, 軽石火山礫と火山ガラス片や結晶片で構成され, しかも, 異質な構成物で構成される堆積層を間に挟まない一連の岩相を構成することから, 噴火に直接由来する堆積物である可能性が高い (鹿野・他, 2002)。層理面はほぼ水平で, 岩相・構造とも周辺に分布する戸賀軽石層に連続すると考えられる。

試料 TOGA-5 は, 軽石火山礫のみを拾い上げて水で洗浄し, 乾燥させた後に粉砕し, サニディン結晶を抽出した。次に, 鉍物分離されたサニディン斑晶のうち比較的粗粒な 0.25–0.5 mm の結晶を約 20 粒子, 双眼顕微鏡下で選り分け, 室温下で約 1 N のフッ酸および塩酸溶液にそれぞれ数分間ずつ浸し, 表面の付着物を溶かした後, 純水を用いて繰り返し超音波で洗浄した。このようにして得られた試料は, 乾燥させた後, アルミフォイルに包み, フラックスモニター試料 (年代標準鉍物試料) や他の未知試料と一緒に, 内径 11 mm, 長さ 40 mm のアルミニウム製キャプセルに封入し, 原子炉内で中性子を照射

した。

中性子照射は, 茨城県大洗町にある東北大学の材料試験炉 JMTR の水カラビット照射施設において 24 時間行った。同炉においては, 照射試料キャプセル内の横断方向の中性子フラックス勾配が約 6% もあるため (Ishizuka, 1998), キャプセル内を十字型仕切り板で 4 分割して, 幅 2 mm の間に全ての試料が並ぶように配列した (宇都・石塚, 1999)。これにより中性子フラックス勾配に起因する測定誤差を 0.5% 以下とすることが可能となった (宇都・石塚, 1999)。

フラックスモニターの年代標準鉍物試料には, フィッシュキャニオンタフ (FCT) のサニディンを用いた。FCT の年代としては, その黒雲母 K-Ar 年代の繰り返し測定値の平均 27.5 Ma (Uto *et al.*, 1997; 宇都・石塚, 1999) を用いた。この年代値は, USGS (米国地質調査所) が推奨する値 27.55 Ma (Lanphere *et al.*, 1990; Lanphere and Baadsgaard, 2001) とは極めて良く一致しているが, 他の測定機関で用いられている値 27.95–28.02 Ma とは 1% 以上異なっている (宇都・石塚, 1999)。このため, 得られる未知試料の<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代には 1% 以上の不確実性が残る。

原子炉から返ってきた試料は, アルミフォイルをとり, 直径 70 mm の銅製試料フォルダー上に開けた直径 2 mm の穴の中に 1–数粒子ずつマウントし, 超高真空試料チェンバーに取り付け, 超高真空中で約 250°C で 48 時間程度焼きだしを行った。その後, 試料を光学顕微鏡のステージの上に取り付け, 対物レンズを通してチェンバー内に垂直に入射する連続レーザにより試料の加熱融解を行った。用いたレーザは, 定格出力 10 W のアルゴンイオン連続レーザ発振装置 (COHERENT 社 INNOVA300 型) であり, 装置と顕微鏡の間は, 光ファイバーで繋ぎ, ファイバー内でレーザのエネルギー分布が均質となるようにした。

融解した試料から放出されたガスは, 3 個の Al-Zr ゲッター (SAES Getters 社 AP-10) を用いて精製した。ゲッターのうち 2 個は 400°C に保ち, 主に炭化水素, 窒素, 二酸化炭素などを分解吸着させ, 1 個は常温に保ち主に水素を吸着させた。試料加熱時間を含め 10 分間ガスを精製したのち, アルゴンガスを希ガス質量分析計 (VG Isotech 社製 VG3600 型) に導入し, 質量数 36–40 の 5 つのアルゴン同位体を合計 8 サイクル測定し, ガスを導入したときの試料強度に外挿して各同位体比を計算した。以上の測定の手順と測定条件は, Uto *et al.* (1997) に詳しい。

測定は, サニディン斑晶について, 合計 7 回繰り返し行った。そのうち, 5 回は斑晶 1 粒子ずつを測定し, 1 回

Table 1. Total-fusion  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of sanidine phenocrysts from the Toga Pumice.

Analytical No	No of grain	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ( $\times 10^{-3}$ )	$^{40}\text{Ar}^*$ (%)	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_k$	Age ( $\pm 1\sigma$ ) (Ma)
99147	1	58.2 $\pm$ 0.8	2 $\pm$ 28	0.024 $\pm$ 0.021	87.6	0.048 $\pm$ 0.007	0.38 $\pm$ 0.05
99148	1	59.2 $\pm$ 1.0	4 $\pm$ 46	0.027 $\pm$ 0.033	86.3	0.048 $\pm$ 0.011	0.38 $\pm$ 0.09
99149	2	191.6 $\pm$ 3.2	186 $\pm$ 96	0.483 $\pm$ 0.039	35.0	0.066 $\pm$ 0.016	0.51 $\pm$ 0.12
99150	1	64.5 $\pm$ 0.2	1 $\pm$ 15	0.009 $\pm$ 0.011	95.6	0.058 $\pm$ 0.004	0.46 $\pm$ 0.03
99151	1	59.8 $\pm$ 0.4	7 $\pm$ 43	0.039 $\pm$ 0.023	80.9	0.046 $\pm$ 0.008	0.36 $\pm$ 0.07
99152	1	79.2 $\pm$ 0.5	4 $\pm$ 64	0.109 $\pm$ 0.029	58.1	0.044 $\pm$ 0.011	0.34 $\pm$ 0.09
99153	4	59.4 $\pm$ 0.2	0.4 $\pm$ 9	0.006 $\pm$ 0.005	96.7	0.054 $\pm$ 0.002	0.42 $\pm$ 0.02
Weighted average							0.42 $\pm$ 0.01

$$J=0.00433\pm 0.00001$$

$$(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_k=0.0034\pm 0.0012; (^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_k=0.0615\pm 0.0001$$

$$(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=0.000831\pm 0.000004; (^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=0.000371\pm 0.000004$$

は2粒子を、最後の1回はまとめて4粒子を融解させて測定した。その結果をTable 1に示す。

結晶1粒子では、大きさが0.25–0.5 mmと小さく、十分な $^{36}\text{Ar}$ の信号強度が得られないため、大気起源アルゴンの補正誤差が比較的大きくなった (Table 1のNo. 99147, No. 99148, No. 99150, No. 99151, No. 99152)。そこで、4粒子をまとめて融解してアルゴン測定を行ったところ、 $^{36}\text{Ar}$ についても大きな信号強度が得られ、最も測定誤差の小さな年代を得ることができた (Table 1のNo. 99153)。

小さめの結晶を2粒子融解して測定した結果 (Table 1のNo. 99149)は、上記6回の測定に比べ、明らかにCa起源の $^{37}\text{Ar}$ とK起源の $^{39}\text{K}$ の比が大きい。これは、測定粒子のどちらかが斜長石であったことを示している。また放射起源 $^{40}\text{Ar}$  ( $^{40}\text{Ar}^*$ )の割合も小さいので、得られた年代値の誤差も大きくなった。しかし、この年代値は $2\sigma$ の範囲内でサニディンのみの試料について得られた値と重なっており、これを特に除外する理由は見当たらない。

以上のことから、7回の測定で得られた年代値のうち、最も信頼できるのは、4つの結晶粒子をまとめて融解して得られた $0.42\pm 0.02\text{ Ma}$  (Table 1のNo. 99153)である。また、7回の測定で得られた年代値を同一集団と見なして加重平均値と平均値の標準誤差をTaylor (1982)に従って計算すると、4粒子をまとめて融解して測定した値と同一で、かつ標準偏差がそれよりも小さい値 $0.42\pm 0.01\text{ Ma}$ が得られる。このことは、誤差が大きいとはいえ、結晶粒子がやや小さい粒子1個の測定であっても、複数個について測定すればサニディンの $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代としてより信頼性の高い年代を求めることができることを示唆する。

#### 4. 議 論

このようにして得られた年代 $0.42\pm 0.01\text{ Ma}$ は、先に

述べた同一試料のジルコンFT年代 (鹿野・他, 2002)に極めて良く一致するが、男鹿バミスタフ直上にある白頭山男鹿テフラの推定年代値448 ka (白井・他, 1997)よりもやや若い。

前章で触れたように、現在 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代値は、用いる標準試料の年代をいくつにするかで1–2%の違いが生じる。我々の実験室で得られる年代は、世界の分析機関の中では、USGSの値とともに最も若い年代を示すグループに属する (宇都, 1995; 宇都・石塚, 1999)。仮に、Renne *et al.* (1994, 1998)がFCTに採用している28.02 Maの値 *et al.*を用いて計算すれば、戸賀軽石層の年代は $0.43\pm 0.01\text{ Ma}$ となり、白頭山男鹿テフラの推定年代値448 kaに近づく。また、Kuiper *et al.* (2008)が最近提案したFCTサニディンの年代 $28.201\pm 0.046\text{ Ma}$ を用いて計算すると、この年代値は、わずかながら更に近づくが、有効桁数の範囲内では変わらない。

Renne *et al.* (1998)やKuiper *et al.* (2008)のFCTの年代は、ミランコビッチサイクルを基に決定された天文学的地磁気年代尺度APTS (Astronomical Polarity Time Scale: Shackleton *et al.*, 1990)に調和的するように求めた年代である。白頭山男鹿テフラの推定年代は、標準的酸素同位体曲線との間接的対比によって求めたものであり (白井・他, 1997)、その年代はAPTSに依っている。したがって、本実験で得られた戸賀軽石層の年代をこれと比較する場合は、APTSと矛盾のない標準試料の年代を採用して算出した値と比較する必要がある。

ここで我々がAPTSを採用しないのは、当然のことながらAPTSが放射年代により求められたのではなく、いくつもの仮定を経て計算上求められた年代軸であるという理由による。仮定が入ることをできるだけ避けるには、白頭山男鹿テフラの年代も、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法あるいは他の手法を用いた年代層序学的研究に基づいて決定すること

が望ましい。

前章で述べたように、我々は、FCT から同時に分離した黒雲母の K-Ar 年代を独自に繰り返し測定して FCT の年代を決めている。しかも、その値は同じやり方で FCT の年代を求めた USGS の値と極めて良く一致している (宇都・石塚, 1999)。

現在、放射年代であれ、微化石年代であれ、また酸素同位体ステージを元にした相対年代であれ、見かけ上精度の高い年代が多数生産されている。異なる時間尺度を基に異なる手法により得られた年代を比較する場合は、その年代が得られるに至った背景を正確に知ることが重要である。

## 5. ま と め

男鹿半島, 戸賀火山起源の戸賀軽石層からサニディン斑晶を分離し、レーザ融解<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代測定法を用いて1-4粒子について繰り返し7回測定したところ、いずれも誤差の範囲で一致する結果が得られ、 $0.42 \pm 0.01$  Ma の加重平均年代値を得た。この年代は、同試料から分離したジルコン FT 年代  $0.42 \pm 0.04$  Ma (鹿野・他, 2002) と良い一致を示す。また、本測定による年代を天文学的地磁気年代尺度に換算すると  $0.43 \pm 0.01$  Ma となり、戸賀軽石層の同時異相である男鹿パミスタフの上位を占める白頭山男鹿テフラの酸素同位体ステージ年代 448 ka とは  $2\sigma$  の範囲内で重なる。本研究の結果、若い火山噴出物であっても、サニディン斑晶があれば、レーザ加熱<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代測定によってその年代を求めることができることが示された。

## 謝 辞

産業技術総合研究所地球科学情報部門 (現地質情報研究部門) の内海 茂主任研究官 (退職) には実験準備を手伝って頂いた。東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センターの鳴井 実助手、東京大学地震研究所兼岡一郎名誉教授および関東学園大学瀧上 豊教授には原子炉での中性子照射に際してお世話になった。試料採取は、鹿野が秋田大学工学資源学部大口健志名誉教授とともに行った。また、試料の鉱物分離は、京都フィッシュン・トラック (株) の檀原 徹氏にお願いした。以上の方々に記してお礼申し上げます。

## 引用文献

Bassinot, F.C., Labeyrie, L.D., Vincent, E., Quidelleur, X., Shackleton, N.J. and Lancelot, Y. (1994) The astronomical theory of climate and the age of the Brunhes-Matsuyama magnetic reversal. *Earth Planet. Sci. Lett.*,

126, 91-108.

Ishizuka, O. (1998) Vertical and horizontal variations of the fast neutron flux in a single irradiation capsule and their significance in the laser-heating <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar analysis: Case study for the hydraulic rabbit facility of the JMTR reactor, Japan. *Geochem. J.*, **32**, 243-252.

鹿野和彦・大口健志 (2005) 戸賀火山. 日本の地質増補版編集委員会 (編), 日本の地質 [増補版], 共立出版, p. 72-73.

Kano, K. and Ohguchi, T. (2009) Intra-crater deposits of the Toga tuff ring, Oga Peninsula, NE Japan. *Sediment. Geol.*, **220**, 204-217; doi: 10.1016/j.sedgeo.2009.04.013.

鹿野和彦・大口健志・林 信太郎・宇都浩三・檀原 徹 (2002) 戸賀火山: 東北日本, 男鹿半島西端のアルカリ流紋岩質タフリング. *火山*, **47**, 373-396.

Kuiper, K.F., Deino, A., Hilgen, F.J., Krijgsman, W., Renne, P.R., Wijbrans, J.R. (2008) Synchronizing Rock Clocks of Earth History. *Science*, **320**, 500-504; doi: 10.1126/science.1154339.

Lanphere, M.A., Dalrymple, G.B., Fleck, R.J. and Pringle, M.S. (1990) Intercalibration of mineral standards for K-Ar and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar measurements. *EOS*, **71**, 1658.

Lanphere, M.A. and Baadsgaard, H. (2001) Precise K-Ar, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, Rb-Sr and U/Pb mineral ages from the 27.5 Ma Fish Canyon Tuff reference standard. *Chem. Geol.*, **175**, 653-671.

町田 洋・新井房夫 (1992) 火山灰アトラス [日本とその周辺]. 東京大学出版会, 276 p.

大口健志・佐々木清隆 (1984) 軽石堆積物にみられる堆積構造. 日本地質学会東北支部報, no. 14, 17-18.

大橋良一 (1930) 男鹿半島の地質. *地質雑*, **37**, 740-750.

大橋良一 (1938) 男鹿嶋の火山. *地理学*, **6**, 221-232.

Renne, P.R., Deino, A.L., Walter, R.C., Turrin, B.D., Swisher III, C.C., Becker, T.A., Curtis, G.H., Sharp, W. D. and Japuni, A.-R. (1994) Intercalibration of astronomical and radioisotopic time. *Geology*, **22**, 783-786.

Renne, P.R., Swisher, C.C., Deino, A.L., Karner, D.B., Owens, T.L. and DePaolo, D.J. (1998) Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties of <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating. *Chem. Geol.*, **145**, 117-152.

Shackleton, N.J. and Opdyke, N.D. (1973) Oxygen isotope and paleomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific Core V28-238: oxygen isotope temperatures and ice volume on a 10<sup>5</sup> year and 10<sup>6</sup> year scale. *Quaternary Res.*, **3**, 39-55.

Shackleton, N.J., Berger, A. and Peltier, W.R. (1990) An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene time scale based on ODP site 677. *Trans. Royal Soc. Edinburgh, Earth Sciences*, **81**, 251-261.

Spell, T.L. and Harrison, T.M. (1993) <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of post-Valles Caldera rhyolites, Jemez Mountains volcanic field, New Mexico. *J. Geophys. Res.*, **98**, 8031-8051.

Taylor, J.R. (1982) *An Introduction to Error Analysis*. Univ. Sci. Books, Mill Valley, CA, 279 p.

白井正明・多田隆治・藤岡換太郎 (1997) ODP 日本海試料との対比に基づく男鹿半島安田海岸更新世中一後期

テフラの同定と年代. 第四紀研究, **36**, 183-196.  
宇都浩三 (1995) 火山と年代測定: K-Ar,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代測定の現状と将来. 火山, **40**, S27-S46.  
宇都浩三・石塚 治 (1996) レーザ融解法による極微量  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代測定法の開発. 地質ニュース, no. 504, 7-18.  
宇都浩三・石塚 治 (1999) レーザ加熱  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代測定による火山活動史の解明. 地球化学, **33**, 141-154.  
Uto, K., Ishizuka, O., Matsumoto, A., Kamioka, H. and

Togashi, S. (1997) Laser-fusion  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating system of the Geological Survey of Japan: System outline and preliminary results. *Bull. Geol. Surv., Japan*, **46**, 23-46.  
宇都浩三・田上高広・内海 茂 (1994) 山陰地方東部, 鮮新統照来層群火山岩類の K-Ar およびフィッシュントラック年代. 地質雑, **100**, 787-798.

(編集担当 三浦大助)