

地質技術, 創刊準備号 (蒜山地質年代学研究所創立 10 周年記念特集), 35-41, 2006 年 9 月  
 Engineering Geology of Japan, No. 0, 'The special issue of 10th anniversary of Hiruzen Institute for Geology and Chronology', 35-41, September 2006

## $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定の紹介と最近の応用例

### Introduction to procedures and recent advances on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating

郷津知太郎

Chitaro Gouzu

岡山理科大学オープンリサーチセンター

Open Research Center, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005, Japan

gouzu@rins.ous.ac.jp

株式会社蒜山地質年代学研究所

Hiruzen Institute for Geology and Chronology, Co. Ltd., 161-1 Sai, Okayama 703-8248, Japan

gouzu@geohiruzen.co.jp

### 1. はじめに

私見であるが、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代測定法（以下  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法）は知名度程には分析の実体が知られていない様に感じられる。そこで、本稿では  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法をどの様に用い、どの様な結果を得ているかを紹介する。その後、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法を使って頂く上でユーザーに知っておいて頂きたい話題を 2 つ紹介する。1 つは K-Ar 系年代測定の初生値の問題である。現在この初生値の問題は注意深く手法を選定する事によってある程度は解決できると考えられるので、その具体的な方法を整理した。いま 1 つは堆積学に応用される  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法の紹介である。火山性物質の年代測定は世界中で広く行われており、日本でも特にフィッショントラック法で数多くの結果が報告されている。近年  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法を用いる事によってより迅速に同程度の精度、確度を持った年代を得る事ができるようになってきた。この分野については経験に基づいた紹介ではないが、今後業務および研究として積極的に用いるべき応用法であると考えたために触れた。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法の詳細な原理および解釈については省略した。本誌の兵藤氏による「レーザー加熱による  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法：拡散実験とアイソクロム分析」および専門書（例えば、McDougall and Harrison, 1999；兼岡, 1998）を参考にして頂きたい。

筆者が年代学を自分の研究の一部分とすることになるきっかけは北海道大学の学部時代にある。当時学部の授業を受ける中で、歴史科学の側面を持つ地質学において「年代

を数値として与えることができる放射年代学」に興味を持った。学部から修士課程にかけて師事した故渡辺暉夫先生から年代測定を含めた変成岩の研究をご指導頂き、修士課程からは岡山理科大学の板谷徹丸先生の研究室に頻繁に入りさせて頂く様になった。博士課程からは板谷先生が併任教授を務められている神戸大学に籍を変え  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法および K-Ar 年代測定法（以下 K-Ar 法）を用いた研究を行った。対象地域、試料はヨーロッパアルプスおよびインドヒマラヤに産する超高压～高圧変成岩である。その後、2004 年に株式会社蒜山地質年代学研究所に入社し、それまで研究で用いていた  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法を業務として立ち上げた。業務としての年代測定においては、求められる分析を機械的にこなし、データを報告すれば事足りる様にも思われる。しかし弊社では業務上の分析でも流れを持った地質学的研究の一部であることを意識することが求められている。自分が担当している  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法についても、これまでの経験を生かしながら常に最良の結果を得ることができる手順や処理法を模索しながら測定して行きたいと考えている。

本稿によって  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法をこれから使おうと考えている方々に測定の具体像を少しでもイメージして頂くことができれば幸いである。

### 2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定における三つの手法

他の年代測定法と比較した時に  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法が持つ特徴は、・一種類の元素 (Ar) のみを測定して年代を測定できるこ

と、

- ・測定元素がガスであること、

である。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法の基本原理は K-Ar 法と同じであるが、K の定量分析（湿式分析）の必要がないことが K-Ar 法とは異なる。この特徴のために極微量の試料で年代測定が可能である。また分析する元素が常温でガスであることから、段階的に加熱して各温度で抽出されたガスを用いた年代測定が可能である（段階加熱法）。特に試料の加熱にレーザー（連続レーザーおよびパルスレーザー）が使用される様になってからは鉱物粒子 1 粒を用いた年代測定が可能になった。鉱物粒子の直径が 0.5mm 程度あれば、鉱物粒子 1 粒を段階加熱法に供する事が可能である。またパルスレーザー（Nd-YAG）を用いる事によって薄片中の鉱物の年代を分解能約 0.1mm またはそれ以下で測定できる（伊藤ほか、1990；兵藤・板谷、2004）。以下に株式会社蒜山地質年代学研究所が業務として実施している  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法の 3 手法とそれぞれ得られる結果について紹介する。

## 2-1. 段階加熱法

段階加熱法では、試料を 500°C 前後から 50~100°C 刻みで鉱物粒子が溶けるまで加熱と冷却（室温まで）とを繰り返す。その際、各温度で抽出されたガス試料を用いて年代を算出する。微少量の Ar ガスを分析するために測定できる年代には制約があり、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法ではおおよそ 10Ma あるいはそれより古い試料が対象である。通常、分析の結果は年代スペクトルとして表示される（図 1a）。年代スペクトルの縦軸には年代値をとり、横軸には各温度における  $^{39}\text{Ar}$  の量をとる。横軸の  $^{39}\text{Ar}$  の量は、一般に最低温から最高温に至るまでの全  $^{39}\text{Ar}$  ガスを 1.0 としたときの相対量比で表す。段階加熱法の結果には年代スペクトルと並べて  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_k$  のスペクトルを表示することも多い。横軸にはやはり  $^{39}\text{Ar}$  の相対量比をとるが、縦軸には  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_k$  比をとる。 $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}$  とは中性子照射によって  $^{40}\text{Ca}$  から生じる  $^{37}\text{Ar}$  の量である。また  $^{39}\text{Ar}_k$  とは  $^{39}\text{K}$  から中性子照射によって生じる  $^{39}\text{Ar}$  の量である。 $^{37}\text{Ar}$  は放射性の Ar で半減期は 35.1 日のため、天然には存在しない。また中性子照射時にそのほとんどすべてが  $^{40}\text{Ca}$  から生じることから、 $^{37}\text{Ar}$  の量と K 起源の  $^{39}\text{Ar}$  との比の変化に着目することによって、各温度において Ar ガスを供給する領域の Ca/K 比をモニターすることができる（図 1b）。

二次的な加熱や、変質による放射壊変起源の  $^{40}\text{Ar}$  の逸散、過剰  $^{40}\text{Ar}$  の影響などが存在しない場合、各温度における年代は一定になると考えられる（図 2a）。一方、放射壊変起源の  $^{40}\text{Ar}$  の一部が逸散している場合は低温側で若い年代を示し（図 2b），過剰  $^{40}\text{Ar}$  が存在する場合は一般的に低温側、または低温側と高温側のフラクションが古くなる（図 2c, 2d）という傾向を示すことが多い。従って、年代スペクトルを検討することによって、測定試料が持つ熱史の解明が期待できる。また  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_k$  比のスペクトルから測定試料が持つ組成累帯構造や包有物の存在を検知できる場合がある。

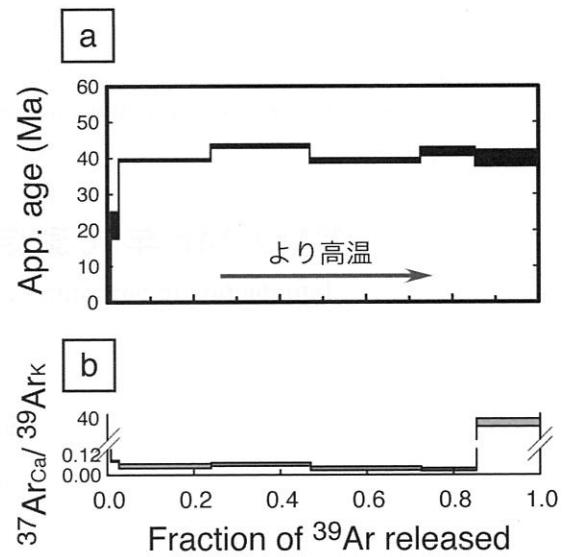


図 1. 段階加熱法を用いた  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代測定の結果の例。a :  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代スペクトル。縦軸 (App. age (Ma)) は各温度段階における年代値、横軸 (Fraction of  $^{39}\text{Ar}$  released) は各温度における  $^{39}\text{Ar}$  の量をそれぞれ示している。なお横軸は最低温から最高温に至るまでの全  $^{39}\text{Ar}$  ガスを 1.0 としたときの相対量比で表す。b :  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_k$  のスペクトル。縦軸 ( $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_k$ ) は各温度段階における  $^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}}/^{39}\text{Ar}_k$  比である。横軸 (Fraction of  $^{39}\text{Ar}$  released) は a と同じく各温度における  $^{39}\text{Ar}$  の量を示している。

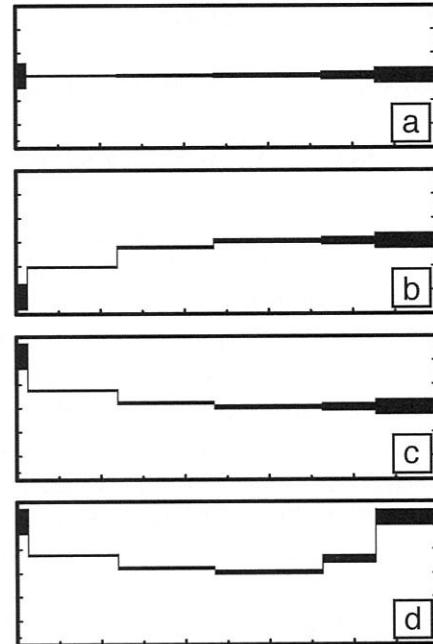


図 2. 模式的な  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代スペクトルの例。a : 二次的な加熱や、変質による放射壊変起源の  $^{40}\text{Ar}$  の逸散、過剰  $^{40}\text{Ar}$  の影響などが存在しない試料が示す年代スペクトルの模式的な例。b : 二次的な加熱等により放射壊変起源の  $^{40}\text{Ar}$  の一部が逸散した試料が示す年代スペクトルの模式的な例。c, d : 過剰  $^{40}\text{Ar}$  が存在する試料から得られる年代スペクトルの模式的な例。

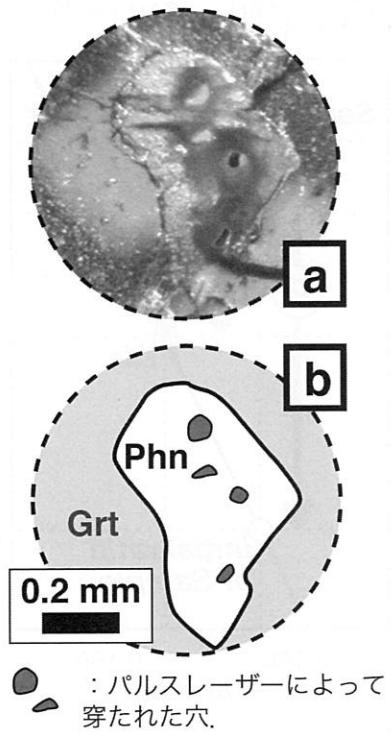


図 3. スポット年代測定法の実施した薄片試料の例。a : スポット年代測定を実施した後の薄片試料の写真。測定対象鉱物はザクロ石 (Grt : 図 3b) 中に含まれるフェンジヤイト (Phn : 図 3b) である。B : 図 3a の写真を簡略化した図。レーザーによって溶かされる領域は直径 0.1mm, またはそれ以下である。

段階加熱法の結果からアイソクロン年代を計算する事もできる。また段階加熱法の結果を拡散実験として用いる事により測定した各鉱物の閉鎖温度を計算することもできる。これらについては本特集の兵藤氏による「レーザー加熱による  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法 : 拡散実験とアイソクロン分析」に詳しい。

## 2-2. スポット年代測定法

スポット年代測定法では測定に厚さ約 0.05mm 前後の薄片を用いることが特徴である。薄片を用いることによって岩石の組織を観察しながら、目的の鉱物の年代を測定する事が可能になる。ただし、中性子照射時および年代測定時にはスライドガラスや接着剤等は不純物となるため、薄片にした試料はスライドガラスから取り外しアセトンやキシレンなどの有機溶媒で洗浄する必要がある。このため低変成度の片岩などは強度が足りず試料の調整が困難なことが多い。ビーム径は通常約 0.05mm~0.10mm である(図 3)。

スポット年代測定法でも微少量のガスを分析するために分析が可能な年代には段階加熱法と同様の制約がある。現在、パルスレーザーで 1 地点を融解し、抽出された Ar ガスで年代値を計算する場合には 30~40Ma の白雲母で 10% 程度の誤差を生じる(例えば, Gouzu *et al.*, 2006b)。ただしこの場合でも 1 つの年代を算出するために複数箇所融解さ

ることによって誤差を小さくする事ができる。前述の白雲母において異なる 3 地点を融解させ、それぞれから抽出されたガスを混ぜ合わせて年代値を算出する事により、誤差は年代値の 5% 以下となる(Gouzu *et al.*, 2006b)。

一つの岩石試料中の異なる鉱物について年代測定を行うことにより、例えば深成岩の冷却史を組織を検討しながら検証することができる。また堆積岩や変成岩において例えば同種の鉱物が異なる複数の組織を示す様な試料でも、個々の粒子について年代測定を行うことができる。

## 2-3. 全融法

全融法は鉱物一粒を一度に溶かし、抽出したガスで年代を測定する方法である。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法の利点を最大限に生かすには段階加熱法を用いる事が望ましいが、碎屑物中の大量の粒子について個々の年代の評価が必要な場合で、鉱物が組成累帯構造や変質部分などを持たないと確認できた際には全融法も有効である。代表的な粒子については段階加熱法を試みればなお良い(例えば, Hodges *et al.*, 2005)。

段階加熱法に供するには予想される年代が若すぎる(<10Ma) 試料について全融法で年代値を評価する事も考えられる。この時にも年代測定に先立って鉱物の化学組成について予め検討する必要がある。測定数を増やして年代をヒストグラムで表示し、堆積年代の推定や碎屑物の供給源がいつ地表へ露出したかを推定することも行われている(3-2. を参照)。

## 3. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法の応用例

### 3-1. 初生値の異常に対する工夫

#### 3-1-1. 初生値の仮定

K-Ar 法および  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法では通常、初生値(初生  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比=295.5) を仮定して年代値を計算する。この比は現在の大気中における  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比であり、この比が過去においても一定であったとすることがこれらの手法における重要な仮定である。しかし天然においてはこの初生値が 295.5 ではない場合がしばしばあり、その具体例および年代測定例を以下に紹介する。

初生値に関係する二つの Ar 同位体のうち、 $^{36}\text{Ar}$  は安定同位体であるために一般に増減することはほとんどないとみなすことができる。一方で  $^{40}\text{Ar}$  は  $^{40}\text{K}$  の崩壊によって新たに生じ、増加する。開放系において初生値はほとんど変化しないと考えられるが、閉鎖系、例えば鉱物の中では  $^{40}\text{Ar}$  が蓄積していくために初生値とは異なる  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比を持つことになる。初生値が仮定された 295.5 とは異なる例は実際に天然で存在するため、年代測定を実施する際には留意する必要がある。

#### 3-1-2. 初生値が仮定より小さい場合の例

初生値が仮定よりも小さい例は歴史溶岩(人類の歴史に記録される様な最近の火山噴火による溶岩)に認められる(例えば, Krummenacher, 1970; Kaneoka, 1980; 松本ほか, 1989)。この例では  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  が 295.5 よりも小さくなる他、 $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比も現在の大気中の比(0.1869)よりも小

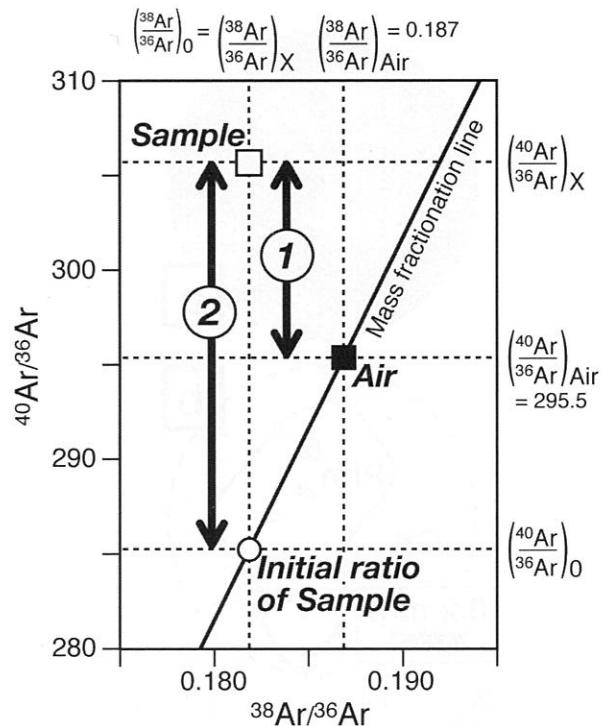
さくなる。K-Ar 法を用いた松本ほか (1989) の例では噴出した年代の判っている溶岩、火山碎屑物を合わせて 27 試料の分析を行った結果、大気中の Ar 同位体比と同じ試料が 4 試料、過剰  $^{40}\text{Ar}$  を持つと見られる試料が 1 試料あった他は、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  および  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  がいずれも現在の大気中ににおける比からいざれも小さくなる様な線上に規則的にプロットされる。この様な現象が起こる理由は質量分別作用によるものであると考えられている (図 4)。例えばマグマ溜まり最頂部で火山岩が大気起源の Ar を獲得するときに、この Ar がマグマ溜まり周辺の地下水または地殻物質中より熱拡散によって移動するために分別作用を起こすと考えられている (例えば、Matsumoto and Kobayashi, 1995)。この様な試料を分析すると、初生値を 295.5 とした場合、初生値を大きく見積りすぎることになる。従って試料中の放射起源  $^{40}\text{Ar}$  は実際よりも少なく見積もられ (図 4)、実際よりも若い年代が得られる。

この問題を定量的に解決するには  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比の正確な初生値を見積もれば良い。もちろん岩石中には閉鎖系になった後の放射起源  $^{40}\text{Ar}$  が蓄積しているために初生  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比を直接測定することはできない。一方で、松本ほか (1989) が若い火山岩に K-Ar 法を適用する上で示した様に、初生値の異常は質量分別作用で起こっているとみなすと  $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  の同位体比を測定することによって初生  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比を見積もることができる。これは  $^{38}\text{Ar}$  も  $^{36}\text{Ar}$  も安定同位体でかつ閉鎖系になった後の増減はないとみなせるためである。例えば Matsumoto and Kobayashi (1995) はこの様な補正を行った上で年代測定を実施している。その結果、層準に良く対応した約 2 万年～9 万年の年代値を得ている。

一方で、この様に Ar 同位体の質量分別作用が年代に影響を与えるのは非常に若い岩石 (ほとんどは火山岩) に限られ、それ以外では質量分別作用による初生値の異常は年代値に大きな影響を与えないと考えられる。

### 3-1-3. 初生値が仮定より大きい場合の例

初生値が仮定よりも大きくなる例も天然の岩石から報告されている。この現象を引き起こす要素は一般に「過剰  $^{40}\text{Ar}$  (しばしば過剰 Ar、過剰アルゴン、excess Ar)」と呼ばれる。過剰  $^{40}\text{Ar}$  を持つ例は、例えば海中に噴出した玄武岩質溶岩 (例えば、Funkhouser et al., 1968; Honda et al., 1993) や火山岩中の斑晶等の Ar 同位体測定 (例えば、板谷・長尾, 1988; 高岡, 1989; Patterson et al., 1994) で、それぞれ報告されている。海底の玄武岩の最外殻部はガラス質で急冷しており、マグマと海水とが相互作用を行わないうちに固結したとみなすことができる。この玄武岩マグマは過剰の  $^{40}\text{Ar}$  を持っていたが、これが急冷によってそのまま玄武岩中に固定されたと考えられる。同様に火山岩中の斑晶も、噴出後の脱ガスが不十分でマグマ中に存在していた時の過剰  $^{40}\text{Ar}$  を保持したままになる場合があると考えられる。先ほど例を挙げた、「初生値が仮定よりも小さい場合」はその影響がある程度限定的である。しかし過剰  $^{40}\text{Ar}$  の量は必ずしも少ないとは限らない。一般に地殻の深部以深では放射性  $^{40}\text{Ar}$  が蓄積し続け、常に  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  比が 295.5 よりも大きいと予想できる。



- ① 見かけ上蓄積した  $^{40}\text{Ar}$  の量
- ② 実際に蓄積した  $^{40}\text{Ar}$  の量

図 4. 質量分別作用による  $^{36}\text{Ar}$ 、 $^{38}\text{Ar}$  および  $^{40}\text{Ar}$  の関係。  
 $(^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_0$ : 初生 ( $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) 比、 $(^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_X$ : 試料中の ( $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) 比、 $(^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{Air}}$ : 大気中の ( $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) 比、 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_0$ : 初生 ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) 比、 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_X$ : 試料中の ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) 比、 $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{Air}}$ : 大気中の ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) 比 (=295.5)。板谷・長尾 (1988) および Matsumoto and Kobayashi (1995) を一部改変。

一方で、過剰  $^{40}\text{Ar}$  の存在が指摘されてから火山岩中の斑晶は年代測定前に除去される事が常識となり、火山岩の K-Ar 年代測定などでは過剰  $^{40}\text{Ar}$  はほとんど問題にならない。また  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法の段階加熱法を用いた年代測定が広く行われる様になり、スペクトルから過剰  $^{40}\text{Ar}$  の存在が推察される事や、逆アイソクロンプロットを用いる事で試料毎に初生値を決定できる様になったことから今日では過剰  $^{40}\text{Ar}$  の影響は注意をしていなければ避けられ得る問題である。

例外的に過剰  $^{40}\text{Ar}$  の存在が年代値に重要な問題を与えると考えられている試料は高圧～超高压変成岩である。1990 年代前半までこれらの変成岩の年代学は K-Ar 法および  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法に大きく依存していた。しかしその後、天然の超高压変成岩が初めて見つかったイタリアのドラマイラ岩体で、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法で得られた年代値が他の U-Pb 法、Sm-Nd 法、Rb-Sr 法から得られる年代値と比較してばらつき、かつ古い年代を示すことが報告される様になった (例えば、Arnaud and Kelley, 1995; Scaillet, 1996)。同じ様な傾向はイタリアの他の地域や中国、パキスタン、マリ、トルコ、スペインからも報告された。そしてその年代値の特徴

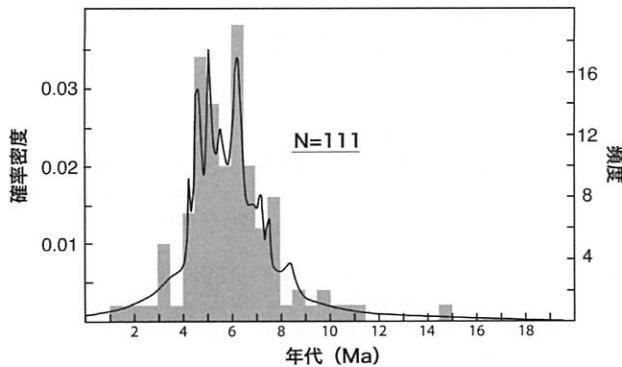


図 5. 堆積物中の碎屑粒子を年代測定した例. Hodges *et al.* (2005) の Fig. 1 を一部改変. 111 試料の年代測定結果がヒストグラム（右縦軸：頻度）として表示されている. またこの結果について計算で求められた確率密度関数（左縦軸：確率密度）が曲線で表されている.

から高圧～超高压変成岩は一般的に過剰  $^{40}\text{Ar}$  を持つためにこの様な年代が得られると考えられる様になった.

一方で Gouzu (2004), Gouzu *et al.* (2006a), Gouzu *et al.* (2006b) は超高压変成岩の  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代測定および K-Ar 年代測定に際し、必ずしも過剰  $^{40}\text{Ar}$  の問題が障壁とはならないことを示した. 例えばヨーロッパアルプスの超高压変成岩中の白雲母について  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法を試みたところ、他の手法と調和的な年代 (37~42 Ma) が得られることがわかつた (Gouzu, 2004; Gouzu *et al.*, 2006b). 彼らは年代がばらつく超高压変成岩の源岩が大陸地殻物質起源であるのに対し、調和的な年代が得られる超高压変成岩の源岩が海洋性堆積物起源であることを指摘した. そして大陸地殻物質起源の変成岩は超高压変成作用が起こる時に過剰  $^{40}\text{Ar}$  霧団気で鉱物が再結晶するのに対して海洋性堆積物起源の変成岩は過剰  $^{40}\text{Ar}$  がほとんどない環境で再結晶すると考えた. インドヒマラヤの高圧～超高压変成岩では他の手法で得られた結果 (~50 Ma) に対し、泥質片岩中のフェンジャイトとパラゴナイトを用いた K-Ar 年代によるアイソクロン年代が  $91 \pm 13$  Ma, エクロジャイト中のフェンジャイトとパラゴナイトを用いた  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法によるアイソクロン年代が  $130 \pm 39$  Ma を示した (Gouzu, 2004; Gouzu *et al.*, 2006a). これらの相対的に古い年代はアイソクロン法で求められていることから過剰  $^{40}\text{Ar}$  の影響によるものではないことが明らかである. この様に他の手法で得られた年代よりも古い年代であるにも関わらず過剰  $^{40}\text{Ar}$  による影響が認められない年代が得られたことは、この地域における超高压変成岩の上昇メカニズムの解釈に影響を与えるだけでなく、これまで特にヨーロッパアルプスの高圧～超高压変成岩に対して与えられて来た  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代値の評価についても再考を促すものである.

上記の様に、源岩の吟味やアイソクロン法を用いる等、分析方法を工夫することにより高圧～超高压変成岩においても過剰  $^{40}\text{Ar}$  に左右されない放射年代値を得ることができる.

### 3-2 堆積物に対する適用

堆積物（堆積岩）中の碎屑粒子の年代値推定には K-Ar 法や U-Pb 法、フィッシュショントラック法が用いられてきた. また近年広範に適用される様になってきた (U-Th) /He 法も有効な手段である.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法もこの用途に用いることができる. レーザーを用いた  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法が確立した後は鉱物が 1 粒でもその年代測定を行うことができるようになった. その利点を生かして堆積物中の鉱物を測定することが試みられてきた. 手法は一般的に特定の鉱物粒子 1 粒を一度に融解し、そこから抽出された Ar ガスから年代を求めるものである. 同様の分析を例えば数 10 点～100 点分析した後、その結果をヒストグラム表示を行うか、またはさらにそのヒストグラムに対して統計的な理論曲線による近似を行う（図 5). この結果を検討する事により、年代値がどこでピークを持つか、また、どの年代ピークにより多くの粒子が属するかを検討する事ができる. また再現性の良い年代値が得られた場合、複数のデータを統計処理することによって誤差を小さくする事も可能である.

原理的に  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法を用いた場合、堆積年代を直接測定することは困難である. しかし、堆積物が火山灰など火山性である場合は本質物質を測定することによって間接的に堆積年代を測定することができる. 堆積物が火山性である場合、原理的には凝灰岩中に本質物質を 1 粒でも見いだせれば火山噴火の年代および火山灰の堆積年代を決定することができる. Deino and Potts (1990) および Deino and Potts (1992) はケニアの Olorgesailie Formation 中の火山灰中のカリ長石を複数個分析した. 結果を統計的に処理することによって  $754 \pm 3$  Ka という年代を得ている (Deino and Potts, 1992). また Swisher *et al.* (1993) は P-T 境界と隣り合う火山灰層の火山物質起源の長石を分析することによって再現性の良い 65 Ma の年代を報告している.

堆積物中の碎屑粒子の年代を測定した場合、堆積年代として考えられる最も古い年代値を決定する事ができる. また碎屑粒子の供給源がある程度推定できる場合は、供給源の岩体の年代をまず測定し、同じ特徴を持つ碎屑粒子が出現する層準を特定することによって、例えば供給源となる岩体が地表に露出した年代を推定することができる. こうした一般的な碎屑粒子を測定対象とする場合は、測定鉱物が K をある程度含んでいることの他に、碎屑粒子が供給源から離れた後長距離の運搬される際に機械的な強度があることや化学的風化にある程度抵抗性があることが必要である. この理由から分析対象鉱物としては長石、白雲母、黒雲母が選ばれることが多い (Kowalewski and Rimstidt, 2003). この中で長石は変質にやや弱いことや複雑な累帯構造を示す事があるため、また黒雲母は変質して緑泥石を生じる事やしばしば過剰  $^{40}\text{Ar}$  を持ち易いと考えられている事から、白雲母が最も適するとされている (例えば、Hodges *et al.*, 2005). 堆積物の年代測定による間接的な堆積年代の推定には例えば Najman *et al.* (1997) や Carrapa *et al.* (2004) がある. また供給源の露出の時期を推定する研究としては Copeland and Harrison (1990), Harrison *et al.* (1993), Najman *et al.* (2001), Najman *et al.* (2002),

Najman *et al.* (1997), Grimmer *et al.* (2003), Barbieri *et al.* (2003) などがある。

### 謝 辞

蒜山地質年代学研究所を 10 年間維持された竹下浩征所長には本稿執筆の機会を与えて頂いたのみならず、筆者が学生の時分から試料の提供や参考文献の紹介など研究に対して常にご支援を頂きました。このご支援が無ければ、会社が地質業界不遇の時代遮二無二支えられていなければ、そして本稿の執筆についてのハッパがなければ本稿が完成する事はありませんでした。ここに記して感謝致します。岡山理科大学の板谷徹丸先生には大学院の 6 年間、年代学に限らず地質学一般から研究の姿勢に至るまで常に変わらぬご指導を頂きました。岡山理科大学の兵藤博信先生には  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法の理論から実際の測定までご指導頂きました。北海道大学の故渡辺暉夫先生には変成岩岩石学をゼロから指導頂いた他、筆者が年代学の研究を行える様尽力して頂きました。株式会社蒜山地質年代学研究所の同僚所員には小生意気な後輩を温かく見守って頂き数多くのサポートをして頂いています。同僚所員である八木公史博士には本稿を査読して頂きました。本稿を執筆するにあたり以上の方々に深く謝意を表します。

### 文 献

- Arnaud, N. O. and Kelly, S. (1995) Evidence for excess Ar during high pressure metamorphism in the Dora Maira (western Alps, Italy), using a Ultra-Violet Laser Ablation Microprobe  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  technique. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **121**, 1–11.
- Barbieri, C., Carrapa, B., Di Giulio, A., Wijbrans, J. and Murrell, G. R. (2003) Provenance of Oligocene synorogenic sediments of the Ligurian Alps (NW Italy): Inferences on belt age and cooling history. *International Journal of Earth Sciences*, **92**, 758–778.
- Carrapa, B., Di Giulio, A. and Wijbrans, J. (2004) The early stages of the Alpine collision: an image derived from the upper Eocene–lower Oligocene record in the Alps–Apennines junction area. *Sedimentary Geology*, **171**, 181–203.
- Copeland, P. and Harrison, T. M. (1990) Episodic rapid uplift in the Himalaya revealed by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis of detrital K-feldspar and muscovite, Bengal Fan. *Geology*, **18**, 354–357.
- Deino, A. and Potts, R. (1990) Single-crystal  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Ologesalie Formation, southern Kenya rift. *Journal of Geophysical Research*, **95**, 8453–8470.
- Deino, A. and Potts, R. (1992) Age-probability spectra for examination of single-crystal  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating results: Examples from Ologesailie, Southern Kenya Rift. *Quaternary International*, **13/14**, 47–53.
- Funkhouser, J. G., Fisher, D. E. and Bonatti, E. (1968) Excess argon in deep-sea rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, **5**, 98–100.
- Gouzu, C. (2004) Petrology and geochronology of UHP metamorphic rocks in Alpine and Himalayan orogenic belts. PhD Thesis, Kobe University.
- Gouzu, C., Itaya, T., Hyodo, H. and Ahmad, T. (2006a) Cretaceous isochron ages from K-Ar and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of eclogitic rocks in the Tso Morari Complex, western Himalaya, India. *Gondwana Research*, **9**, 426–440.
- Gouzu, C., Itaya, T., Hyodo, H. and Matsuda, T. (2006b) Excess  $^{40}\text{Ar}$ -free phengite in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Lago di Cignana area, Western Alps. *Lithos*, in press.
- Grimmer, J. C., Ratschbacher, L., McWilliams, M., Franz, L., Gaitzsch, I., Tichomirowa, M., Hacker, B. R., Zhang, Y. (2003) When did the ultrahigh-pressure rocks reach the surface? A 207Pb/206Pb zircon,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  white mica, Si-in-white mica, single-grain provenance study of Dabie Shan synorogenic foreland sediments. *Chemical Geology*, **197**, 87–110.
- Harrison, T. M., Copeland, P., Hall, S. A., Quade, J., Burner, S., Ojha, T. P. and Kidd, W. S. F. (1993) Isotopic preservation of Himalayan/Tibetan uplift, denudation, and climatic histories of two molasse deposits. *Journal of Geology*, **101**, 157–175.
- Hodges, K. V., Ruhl, K. W., Wobus, C. W. and Pringle, M. S. (2005)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Thermochronology of Detrital Minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **58**, 239–257.
- 兵藤博信・板谷徹丸・松田高明 (1995) レーザー加熱法における微小鉱物の温度測定とその精度. 岡山理科大学自然科学研究報告, **21**, 3–6.
- 兵藤博信・板谷徹丸 (2004) パルスレーザーを用いた岩石薄片微細組織のアルゴン同位体分析と測定限界. 岡山理科大学自然科学研究報告, **30**, 25–30.
- 兵藤博信・松田高明・福井志郎・板谷徹丸 (1994) レーザー一段階加熱による単結晶鉱物  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代測定. 岡山理科大学自然科学研究報告, **20**, 63–67.
- Honda, M., McDougall, I., Patterson, D. B., Doulgeris, A. and Clague, D. (1993) Noble gases in submarine pillow basalt glasses from Loihi and Kilauea, Hawaii: A solar component in the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**, 859–874.
- Hyodo, H., Kim, S., Itaya, T. and Matsuda, T. (1999) Homogeneity of neutron flux during irradiation for  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age dating in the research reactor at Kyoto University. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **94**, 329–337.
- Itaya, T., Nagao, K., Inoue, K., Honjou, Y., Okada, T. and Ogata, A. (1991) Argon isotope analysis by a newly developed mass spectrometric system for K-Ar dating. *Mineralogical Journal*, **15**, 203–221.
- 板谷徹丸・長尾敬介 (1988) 100 万年より若い火山岩の K-Ar 年代測定. 地質学論集, **29**, 143–161.
- 伊藤秀人・光保 剛・兵藤博信・板谷徹丸 (1990) レーザーによる地質試料の微小部からのアルゴン同位体の検出. 岡山理科大学蒜山研究所研究報告, **16**, 57–66.
- Kaneoka, I. (1980)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating on volcanic rocks of the Deccan traps, India. *Earth and Planetary Science Letters*, **46**, 233–243.
- 兼岡一郎 (1998) 年代測定概論. 東京大学出版会, 315p.
- Kowalewski, M. and Rimstidt, J. D. (2003) Average lifetime and age spectra of detrital grains: Toward a unifying theory of sedimentary particles. *Journal of Geology*, **111**, 427–439.
- Krummenacher, D. (1970) Isotopic composition of argon in modern surface volcanic rocks. *Earth Planetary Science Letters*, **8**, 109–117.
- 松本哲一・宇都浩三・柴田賢 (1989) 歴史溶岩のアルゴン同位体比 -若い火山岩の K-Ar 年代測定における初生値補正の重要性- 質量分析, **37**, 353–363.
- Matsumoto, A. and Kobayashi, T. (1995) K-Ar age determination of late Quaternary volcanic rocks using the “mass

- fractionation correction procedure": application to the Younger Ontake Volcano, central Japan. *Chemical Geology* (Isotope Geoscience Section), **125**, 123–135.
- McDougall, I. and Harrison, T. M. (1999) *Geochronology and Thermochronology by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  method* (2nd ed.). Oxford University Press, 269p.
- 長尾敬介・板谷徹丸 (1988) K-Ar 法による年代測定. 地質学論集, **29**, 5–21.
- 長尾敬介, 西戸裕嗣, 板谷徹丸, 緒方惟一 (1984) K-Ar 法による年代測定. 岡山理科大学蒜山研究所研究報告, **9**, 19–38.
- Najman, Y., Pringle, M., Godin, L. and Oliver, G. (2001) Dating of the oldest continental sediments from the Himalayan foreland basin. *Nature*, **4170**, 194–197.
- Najman, Y., Pringle, M., Godin, L. and Oliver, G. (2002) A reinterpretation of the Balakot Formation: Implications for the tectonics of the NW Himalaya, Pakistan. *Tectonics*, **21**, 1045, doi10.1029/2001TC001337.
- Najman, Y. M. R., Pringle, M. S., Johnson, M. R. W., Robertson, A. H. F. and Wijbrans, J. R. (1997) Laser Ar-40/Ar-39 dating of single detrital muscovite grains from early foreland-basin sedimentary deposits in India: Implications for early Himalayan evolution. *Geology*, **25**, 535–538.
- Patterson, D. B., Honda, M. and McDougall, I. (1994) Noble gases in mafic phenocrysts and xenoliths from New Zealand. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 4411–4427.
- Roddick, J. C. (1983) High precision intercalibration of  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  standards. *Geochimica et cosmochimica acta*, **47**, 887–898.
- Scaillet, S. (1996) Excess  $^{40}\text{Ar}$  transport scale and mechanism in high-pressure phengites; A case study from an eclogitized metabasite of the Dora-Maira nappe, western Alps. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, 1075–1090.
- Steiger, R. and Jäger, E. (1977) Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, **36**, 359–362.
- Swisher III, C. C., Dingus, L. and Butler, R. F. (1993)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating and magnetostratigraphic correlation of the terrestrial Cretaceous–ppaleogene boundary and puerca Mammal Age, Hell Creek – Tullock formations, eastern Montana. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **30**, 1981–1996.
- 高岡宣雄 (1989) 百万年より若い火山岩の K-Ar 年代測定における問題点. 質量分析, **37**, 343–351.

