フィッション・トラック　ニュースレター　第24号　1 - 8　2011年

研究ノート

マルチクロノロジー時代のAr-Ar年代測定法の評価法について

佐藤佳子*・熊谷英憲*・兵藤博信**

What criteria should be used for Ar-Ar dating in multi-chronology?

Keiko Sato*, Hidenori Kumagai* and Hironobu Hyodo**

* 独立行政法人海洋研究開発機構地球内部ダイナミクス領域，Japan agency for Marine-Earth Science and Technology, Institute for Research on Earth Evolution
** 岡山理科大学自然科学研究所，Research Institute of Natural Sciences, Okayama University of Science

Abstract

Recent advances in Ar-Ar dating utilizes “plateau ages” derived from multiple Ar extraction steps as a simple standard. Regardless of the strict “plateau age” criteria, it intrinsically includes serious problems. Potential problems arise from 1) misjudgment of age spectra as pseudo plateau due to secondary geological disturbances or 2) poor evaluation of ages without regard to inherent uncertainties (e.g., those of derived from calibrations). Detailed analyses by isochron and/or Ca/K ratio spectra should be taken into account for precise evaluation of ages.

Keywords: Ar-Ar dating, plateau age, Isochron, Ca/K ratio

1．はじめに

K-Ar（カリウム－アルゴン）年代測定の発展型であるAr-Ar（アルゴン－アルゴン）年代測定は，試料の放射化を行い試料中に含まれるカリウム（K）をアルゴン（Ar）に変換することで，Ar同位体比測定のみで年代を決定できる方法である．原子炉で^{39}Kを^{39}Arに変換することでAr同位体のみの測定で実施できるため，Kの定量に試料を別に用意する必要がない．これにより，同時にKとArの定量がなされるので，K-Ar法での大きな問題点として認識される試料内での存在サイトの違いには影響を受けにくく，試料の不均一性に起因する不確実性を考慮する必要が少ない．Ar-Ar法では，試料が全脱ガスをしなくても温度毎のフラクションそれぞれで年代を決めることができるため，一つの試料に対して熱履歴を含めた脱ガス履歴を年代スペクトラムとして表すことができる．これを利用し，地質体の脱ガス履歴に関するプロファイリングが1970年代より盛んに行われてきた（e.g. Kaneoka, 1974, McDougall and Harrison, 1988）．そこで得られたデータを解釈するために，脱ガス履歴を表すプラトー年代，アイソクロン法，Ca/K（カルシウム／カリウム）比の利用などの工夫が複数考え出されてきた（e.g. McDougall and Harrison, 1999）が，それらを適用する一般的基準は今日に至るまで統一的なものはない．また，単粒子鉱物によるAr-Ar年代測定とこれまで行われきた数十–数百mgでのAr-Ar年代測定との段階加熱やAr拡散の考え方の違いや年代そのものの取扱の違いにより，複雑な解釈が必要となっている．このような複雑な複数の解釈基準の存在とともに，日本では歴史的経緯により放射化物への法的規制が厳しい．Ar-Ar年代測定法の実施には，放射化物を扱える実験室が必要となることから，年代学を専門としないユーザーにとって近寄りがたい印象があることも否定できない．

1990年以降，レーザー照射によるAr抽出の自動化が世界的に普及した．そのため，鉱物の単粒子を対象に数十（20-30）ステップに及ぶ詳細な温度履歴スペクトラムをグラフとして表すAr-Ar年代測定が主流となった．それまで行われてきた誘導加熱炉（または抵抗加熱炉）によるAr抽出では，数十ミリグラムから数グラム（即ち，数百～数千粒子以上）の試料を用いて20時間以上もの連続抽出・測定を必要とする段階加熱に比

表1. Ar-Ar年代測定のプラトー年代の判定法.

これまで言われてきている望ましいPlateauの条件．（e.g. McDougall and Harrison, 1999）	
	3つ以上の連続した温度区間（フラクション）で構成 その範囲で50%以上の^{39}Arが得られており，年代値が重なりあっていること
Baksi, 1999; 2006; 2007a; b,でさらに主張されている定量的な扱い	
I:	^{40}Ar/^{36}Ar比が大気同位体比295.5に矛盾がない(誤差の範囲で一致をもとめるものか)
p:	MSWDに自由度(n)を乗じた値をχ^2乗分布に照らし合わせて，生起確率（probability of occurrence）< 0.05ならプラトーとしては認めない（プラトーとして認めるにはχ^2 検定的に扱って95%信頼限界で棄却されないこと）
f:	MSWDの値の大きさ 2.5以下(ただし、7ステップ以上では2.5未満)
	※I、p、fは、グラフ中で使用 （e.g. Baksi, 1999,2006;2007a;b, McDougall and Harrison, 1999）

べて大きな飛躍になった．これにより，測定される熱履歴とそれに内包される年代値の意味合いが異なってきたため，脱ガスメカニズムの理解についても抽出温度のみに依存して構成された多数のサイズ分布をかかえる鉱物粒の統計的プロファイルから，単結晶の鉱物形状とレーザー吸収率を組み合わせた温度プロファイルへ基づくものへと移行しつつある．

一方で，測定の自動化によるAr-Ar測定の迅速化は，ユーザーが年代測定データを簡便に評価できるよう，測定ソフトウェアに信頼性の評価をゆだねる傾向を加速させている(e.g. Baksi, 1999; 2006)．即ち，それまで研究室毎に得られた年代値の評価基準が設けられていたのに対し，ユーザーが誰でも可能になるように一定の評価基準にまとめようという動きが広まった（e.g. Baksi, 1999; 2006; 2007a;b, McDougall and Harrison, 1999）．これは，Baksi (1999) の方法に見られる様に1970年代の段階加熱数の少ないデータへも統計的に評価できる反面，現在のように多くの段階加熱の年代スペクトラムと同様に扱っても良いかどうか問題を含んでいる．しかし，このような一定の評価基準に基づけば，プラトー年代が得られた温度プロファイルを特に対象に，Ar-Ar年代測定データについて年代学を専門としないユーザーが簡便に評価できるという利点がある．

これら評価にあたっては，測定によりプラトー年代（plateau age）が与えられたかどうかを判定するために，統計評価の一つの方法であるカイ二乗（χ^2）検定が専ら適用されてきた．χ^2検定という単純明瞭な判断基準の導入は，研究室ごとに異なる評価基準を統一する反面，基準を通過しないデータの放棄もしくは選択的排除をも産むこととなった．しかも限られた試料数を対象とするため，統計的に有意な母集団の数に達していないデータにまで適用されることがしばしば起きている．今までは，得られた温度プロファイルがプラトーを示さないものであっても，なぜそのようなプロファイルが得られたかを総合的に解釈する努力がなされてきた．しかしながら，Ca/K比(Arに変換すると^{37}Ar/^{39}Ar比)で表されるアルゴン放出鉱物相の変化と，それによって得られる地質学・岩石鉱物学的な変質・変成履歴情報，初生比の判定や熱履歴の判定に用いる段階加熱全体のアイソクロン(Isochron)・インバースアイソクロン(Inverse Isochron)なども当然のごとく用いられることがない．結果として重要な地質学的情報とその評価，物理現象としてのデータの評価（例えば，統計的重み“weight”）を軽んじる傾向がみられる．そのため，Baksiの基準に含まれるこれらの危険性を理解しないまま無批判的に適用することは，場合によっては誤った結論を導く事もあり得る．

今回，これらの評価基準に対し実際のデータ，特にAr抽出温度ステップが少ない場合のデータが，例えば，Baksi (2006, 2007a;b)の提唱している評価基準だけで正しく評価されるものかどうかについて論ずる．一方，Baksiらによって顧みられることは少ないが，Ar-Ar年代測定データを活用するに必要な量，表現としてCa/K，およびアイソクロンについて取り上げる．Ca/K比はK含有量の多い鉱物において変質の程度を評価する目安として，アイソクロンは火山岩の石基にAr-Ar年代測定を適用する際など初生Ar同位体比による評価不可欠な場合に用いられるためである．

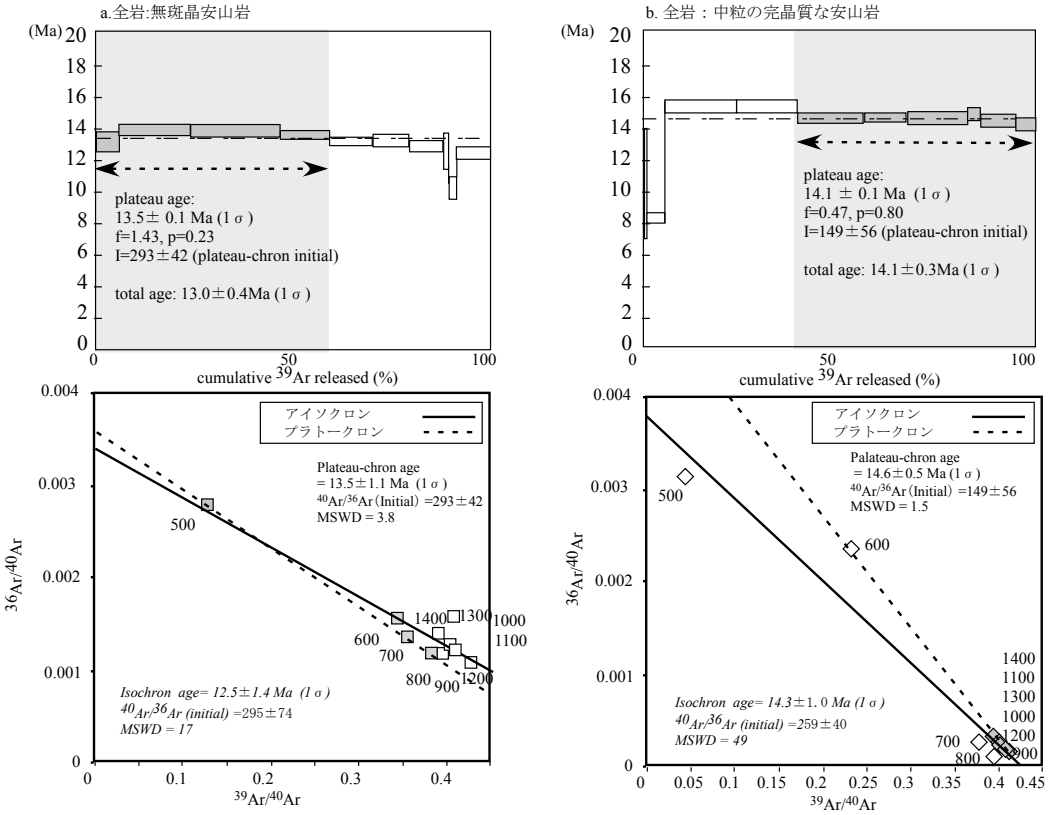

図1. カイ二乗検定に通ったプラトー年代とアイソクロン (Sato et al., 2009; 佐藤,未公表データ;佐藤).
a,b　上図:Ar-Ar年代スペクトラム.表1に準じた値．a,b下図:インバースアイソクロン.アイソクロンの周りの数字は,温度を表す.アイソクロンの評価に用いたMSWDは,年代スペクトラムとは別に計算されているため,区別のためMSWDとした.
a.低温部分のプラトー年代.インバースアイソクロンに比較的よくのっている場合で,細かく見るとプラトークロンの成分と分かれる.このとき計算された初生比(I)の値が大気の$^{40}Ar/^{36}Ar$比=295.5と誤差の範囲で一致するため,母岩の年代に近い値とは言えるが,高温部分のプラトー年代ではないため, 参考値としての扱いになる.
b.高温部分のプラトー年代.インバースアイソクロンにあまりよくのらない場合で,複数の成分がみえ，そのうちの一つの成分がプラトークロンになる．このとき計算された初生比(I)の値が大気の$^{40}Ar/^{36}Ar$比=295.5とかけ離れているので,母岩の年代としては棄却される.

２．アルゴン－アルゴン法の年代評価

２.1．プラトー年代の評価

Baksi (2006)のそもそもの問題意識は，Ar-Ar年代測定法における測定データの評価基準がユーザーに解りにくく，統計的評価がなされていても研究室毎に解釈に差異があり，一定には評価されていないことに基づいている．このため，ユーザーの立場からは，異なる研究室で測定された年代値について，１つ１つの新旧の比較ならまだしも，データの分散の程度の比較や地質イベントの同定，編年などに使いづらいという率直な印象があったことは容易に想像できる．そこで，Baksiらは，段階加熱のステップ数，あるステップで抽出された^{39}Arの全体に対する割合を考慮して，各段階加熱ステップで得られる年代値にχ^2検定を施し，検定を通った同一の年代値を示す加熱ステップデータのみで構成されるものとして年代スペクトラムにおけるプラトー年代を定義した．このプラトーに随伴する誤差と，プラトー部分だけで形作られるアイソクロン；Isochron（プラトークロン; plateau-chron）から計算されるMSWD (mean square weighted deviation) とアルゴン初生比とをもって，年代を評価することを提案している（表１，適用例として図１；図２）．注意すべき点は，このプラトークロンをから計算される初生比（i）については評価情報としての算出にとどめていることである（アイソクロン年代については，原理的にアイソクロンの直線だけから年代が求められ，切片は初生比を示している）．これは，通常のAr-Ar年代測定法でも，初生比（i）として現在の大気$^{40}Ar/^{36}Ar$同位体比(295.5)を仮定して計算したほ

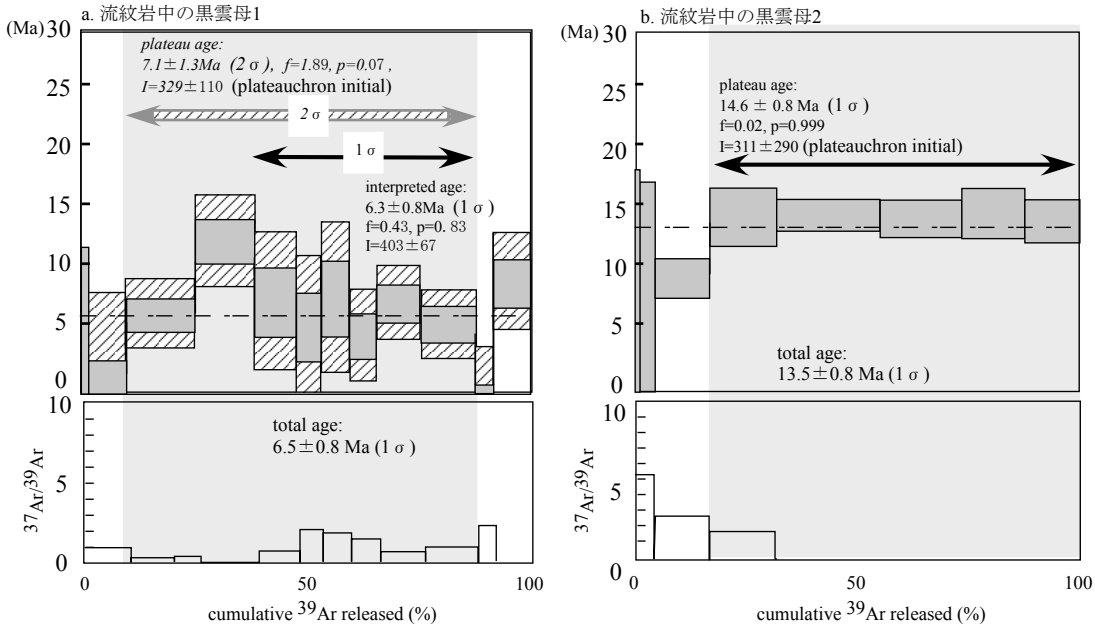

図2. $^{37}Ar/^{39}Ar$比※とカイ二乗検定に通った同一の流紋岩中の黒雲母のプラトー年代 (未公表データ; 佐藤).
a,b 上図：Ar-Ar年代スペクトラム.表1に準じた値. a,b下図：$^{37}Ar/^{39}Ar$ (Ca/K)の量.
a. 二次的変質の影響でプラトーになった黒雲母年代.Caが増加したことによる変動が年代の幅に影響している(実際的に鏡下で，緑泥石化が一部見られた).
b. オリジナルの年代と考えられる黒雲母のプラトー年代.変質によってCaが増加していない.
※ ^{40}Caは中性子照射で^{37}Arに,^{39}Kは中性子照射で^{39}Arに変換されるため,Ca/K比を$^{37}Ar/^{39}Ar$の同位体比として表すことが出来る.

うが見かけ上，誤差が小さく計算されるために広く行われているのと同様である（兼岡，1998）．すなわち，計算された初生比を使っての年代の再計算は特に断りがない以外には行われていない.

これらの評価基準は，実効的な規準となることを意図して，全世界的に公開されているマルチ年代計算ソフトウェアの”Isoplot“（Ludwig，2008）や，Ar-Ar年代測定専用ソフトウェアの”Ar-ArCalc“（Koppers，2002）などに，基本的な設計思想が反映されている．これらのソフトウェアには，先に述べた鉱物相の変化を，情報を含むK/Ca比の統計的評価は含まれていない．一方で，視覚的形状での判断の定式化とも言うべき，年代スペクトラムの性質にあくまでも基づく．このため，初生比情報に含まれることのある，より後の時代の地質現象の影響の有無は判断しない．一見整ったプラトー年代が求められたかに見える場合でも，周囲の岩石から同化(assimilation)としてアルゴンを取り込んだために，大気とはかけ離れた初生$^{40}Ar/^{36}Ar$比が求まる場合があり，図１にそのような例を示す.（図１aは対象試料固結後，同時期に噴出した多量の溶岩により，低温部から選択的な大気由来の^{36}Ar損失（Ar loss）が起こり，その部分で年代が見かけ上わずかに古くなった例．図１bは同時代の溶岩噴出により変成作用を被り，その際に中温部に示される過剰アルゴンを取り込んだ可能性がある例）．また，このような二次的にあるいは偶然に形作られるプラトーや本来初生的情報を反映するべき高温部分を含まずに低温部分だけで構成されるプラトーも数値的には等しくプラトー年代として表されることになっている（図２は同一岩石中の黒雲母で，図２aは変質された年代；図２bは本来の年代）．また，図２aで表されるように，誤差1σ（シグマ）か2σであるかでもプラトーの区間が変わってくることがある．このことからも，今までの全ステップでの抽出Arを活かして定められるアイソクロンやインバースアイソクロンに基づく評価とは異なる意味を示すことは明白である.

２.２. アイソクロンの評価

プラトーを形作るべきとして定められた一定の統計基準を通過した部分だけで構成されるプラトークロンを使ったデータ評価を検討する．Baksi（2006）らの規準によるMSWDの例を図１に示す．各温度フラクションで求められた年

代の一致度が高いので（MSWDの評価が良ければアルゴン同位体比の線形性が保たれるため），データの信頼性が上がる．しかし，MSWDの値（以下f値と表記，式はBaksi，2006参照）については重みをどうつけるか，すなわちフラクションサイズをどのように年代値にとりいれるか，または，年代スペクトラム図の誤差を表すボックスの大きさを１σか２σにするかにより，通常１に近づくのが最適とされるf値の大きさをある程度自在に変えることも出来るので，数値処理の場合に十分な注意が必要である（図2b；e.g. 兵藤，2009）．また，MSWDを利用してχ^2検定的に，プラトーとして扱えるかを検討している範囲の年代誤差と含まれる個々の温度フラクションの年代誤差とが一致しているかを評価しているようにもみえるが，測定値分散の一致を評価するχ^2検定では母分散であるところが標本分散の和となっているところにも注意が必要であろう．

このようなプラトークロンは，試料に含まれる総体としてのArによる，いわゆる全体のアイソクロンではないために，Ar初生比，即ち，Ar-Ar年代測定が本来前提とするような，試料閉鎖系に移行した際のArが大気と平衡に達した保証をしないので，求まるAr初生比が明らかに大気の値と異なってくる場合も当然ある．試料に含まれる総体のArで描かれる全体のアイソクロンが一本に収束しない場合には，一般に複数の地質現象を反映しているとみなすことができ，試料もしくは地質体の履歴の推定に用いることができる．また，本来$^{40}Ar/^{36}Ar$比が大気の同位体比である295.5に近いかどうかの判定の際にも役立つ．

一方，プラトークロンはプラトー年代部分が過剰アルゴンを持った初生比あるいは極端に大気と異なる初生比であった場合など，その温度範囲のみでの諸現象の履歴を偏って検出されるおそれもあり，解釈にあたっては充分な注意が必要であることは論をまたない．初生比が明らかに大気と異なる場合には，原子炉で照射していない試料を用いてのAr初生比の再検討が本来ならば必要である．

2.3. Ca/K比のプラトー年代との対応

試料の受けた地質現象に伴う脱ガス履歴の検討のためには，Ca/K比の検討も必要である（図2）．Ca/K比は測定データにおいて，$^{37}Ar/^{39}Ar$比として表現される（^{40}Caは中性子照射で^{37}Arに，^{39}Kは中性子照射で^{39}Arに変換されるため，Ca/K比を$^{37}Ar/^{39}Ar$の同位体比として表すことが出来る）．様々な地質現象によって試料が変質した場合や変成を受けた履歴が，Ca/K比となって現れるからである．一般にAr-Ar年代測定に用いられる鉱物である黒雲母などのKに富んだ鉱物においては，Caは一般的に変質などの影響で二次的に増加する傾向があるため^{40}Caが中性子照射で変換された^{37}Arが増加する．また，その場合には，相対的にKは変質により抜けやすいため中性子照射で変換された^{39}Arが母岩に比べ減少する．高温変成の場合に年代が完全にリセットされたならば，本質的プラトー年代とは区別がつかず，二次的なCaの増加があっても年代への影響は少なくみえる．低温変成（例えば黒雲母の緑泥石化）の場合などには年代のリセットは不完全であり，そうではない場合には，二次的とはいえ見かけ上プラトーが得られた場合でもKがCaに置換している場合も少なくないので，Ca/K比にはあきらかな変化が見られる．従って，見かけ上プラトーが得られたとしても，その年代がオリジナルな現象を正しく反映したものか，二次的な現象を経由したものかの判定ができることから，このCa/K比の検討はプラトー年代の信頼性をあげるためには是非ともなされるべきものである．ただし，Ca/K比の段階加熱による変化は，K，Caの結晶格子中の構成位置によるので，複数鉱物が存在している場合（見かけ上，単粒子であっても，流体包有物（inclusion）としての異なった鉱物が存在している場合を含む），斜長石のようにKが不純物として含まれ結晶格子内のきちんとした位置を占めていない場合にも生じる．これに注意すれば，Ca/K比はプラトー年代の信頼性を判断するための指標として，カリウムを多く含む雲母鉱物類・カリ長石類などの場合に特に有効であるといえる．

３．実際のデータの評価

現在，世界ではAr-Ar年代スペクトラムの20-30ステップのデータを使って評価する方向に動いている（e.g. McDougall and Harrison, 1999; Min et al., 2000）．これならば，段階加熱のステップ数が多いため，統計的にも十分に吟味することができると考えられる．利用するユーザーの多い”Isoplot”や“ArArcalc”などのような測定ソフトウェアも，本来はこのような立場に立ってこそ威力を発揮し，他の年代測定法の統計評価ともある程度同列に扱うこともできよう．しかし，異なる研究室間で数値年代を比較し，

地質現象の同時性等を論ずるためには，ラボ毎に使用される年代標準試料に起因する誤差が慣習的に省略されていることは小さすぎる誤差にもとづいての誤った判断をくだすおそれを常にはらんでいる．

単純な拡散現象を仮定すれば，試料粒子の幾何学的形状が立方体もしくは球体の場合に抽出された^{39}Arが全体のほぼ90%以上を占めていれば，高温部でのプラトー年代は真の年代と見なすことができる（e.g. Turner, 1968; McDougall and Harrison, 1999; 兵藤, 2009）．しかし実際には採取試料自体が限定されるためそのような理想的な試料の年代測定を行う機会は必ずしも多くは無く，Ar-Ar年代測定への広汎な要請から，K濃度１％程度でも，予想される年代が１Ma程度までは，測定せざるを得ない現状がある．理想的なデータが期待できる試料ばかりの測定では済まないため，むしろ個々の年代値の持つ意味をプラトー年代に限らず，評価していく姿勢が必要だと考えられる．統計的な処理にのみ頼ってプラトー以外のデータを排除していくとサンプリングの段階で偏りがあるにも関わらず，単にデータが多いということだけで選別を行ってしまう危険性もはらんでいる．しかし，これらについては一般的評価基準が確立していないので，なるべく単純な方法・条件で基準を統一していく必要があろう．

４．Ar-Ar年代測定データの評価とマルチ年代測定

プラトー年代にならない場合についての評価基準はIwata and Kaneoka (2000)に詳しく報告されている．火山岩の場合，斑晶組織により脱ガスの温度履歴が異なることが分かっている．これらは数十ミリグラムの量の試料に対するAr-Ar年代の結果であり，鉱物単粒子での脱ガス履歴と異なる可能性が高い．しかし，組織が変質の特徴を呈する場合の脱ガス履歴のパターンとして，プラトーにならなかった場合にも年代値の獲得履歴を含むため重要である．

一方，プラトー年代の判定も含め“Isoplot”に代表される年代測定ソフトウェアには，様々な年代測定に対する統計的評価プロトコルが組み込まれている．この便利な年代計算ソフトウェアをブラックボックス化したまま使用してしまいがちであるが，ユーザーが正しくこれらを用いれば複数手法の年代測定結果を誤差の範囲内で比較検討することが出来るため非常に有用である．すなわち，ユーザーがあらゆる年代測定法をすべて熟知する，あるいは，そのソフトウェアに引用されている論文と統計処理の基本を理解しているとするならば，それらは正しく使用され，信頼性の高い年代の判定が可能かもしれない．そうした例としては，Min et al. (2000)がU-Pb年代とAr-Ar年代の差を議論している．

放射年代測定法の中でも，フィッショントラック年代測定法などのように，歴史的に統計学を重んじた評価法を一般化していれば，多方面からの解析が問題なく利用されることになろう．例えば，χ^2 検定，ゼータ法などのようにトラック長の統計的特徴からのみ求められる年代に基づく以外の統計検定の方法についても，多数の分析結果から，評価していく手法が一般化している．一方，同位体比に基づく年代測定は，統計的に十分な数を扱い数値統計処理を適用できる様な，多数のデータを解析しようとすると，データの獲得の手間が障害となり統計学的厳密さにおいて遙かに及ばない．加えて統計分布の評価の前提となるデータの同質性の観点でも，誤差の意味するところの違いや，壊変定数の決定に起因する不確定性からも，形式的に統計評価を適用して良いかどうかの疑問が残る．即ち，個々の年代値の評価に用いるか多数の測定年代値の評価に用いるかでも，評価の意味が違ってくるため，注意が必要である．

今後はこうした問題点をふまえて，放射年代値を扱っていく必要があろう．装置の測定精度が良くなり誤差が小さくなっていけばいくほど，誤差の意味するところにも深い注意が払われるべきである．あるいは誤差範囲が狭まるために，放射年代測定の手法毎の特有の年代差が露わになり，地質現象のいかなる時点をもって，時計の動き始めとみなすか，その意味するところの違いが測定誤差を超えて顕在化する可能性もある．

５．まとめ

今回，プラトー年代だけでAr-Ar年代測定の結論と位置づけて良いかどうか，特に評価基準について，検討を行った．

（１）単粒子年代でステップ数を多くとれる場合は，大量に分析結果を評価するといった方法も意味がある．

（２）K/Ca比のバリエーションやアイソクロンによる初生比の推定などを組み合わせることにより，試料の熱履歴や変質履歴などを通じて地質学的イベントを検出することが出来，鏡下で観

察される鉱物組織からの情報との比較を行うことで，マグマ固化時にさかのぼる岩石鉱物本来の年代か二次的変質や変成などの地質学的イベントを被った年代かの判定も出来る．

（３）プラトー年代の統計基準が良いだけでは，地質学的に年代値が正しいかどうかの評価に問題が残る．

（４）他の年代値と合わせて議論する場合には，地質学的に矛盾がないかどうか，脱ガスなどのマグマの物理現象も含め検討が必要である．

以上のように，一定の評価基準を得るという意味では近年盛んになった統計的評価の機械的適用もそれなりに意味があるが，他の年代測定と併せて議論するためには地質学的現象との比較や鉱物相の変化に伴う脱ガス履歴などの評価を行わなければいけない場合も多い．評価基準をパスしたプラトー年代というものについてもプロファイルの意味を吟味するだけではなく，得られたデータを再検討し，プラトー年代の認定に際して棄却されたデータに包含される岩石鉱物学的情報も活かした上で真の年代を得るべく様々な角度からの考察を避けてはならないだろう．これらは統計的定量化・手順や条件の一般化が困難な部分であるが, 避けて通れないプロセスでもある．

6. 謝辞

本研究で分析測定を進めるにあたり，岡山理科大学，山形大学のRI利用枠を使用させて頂いた．試料の中性子照射にあたっては日本原子力開発機構東海研究開発センター研究炉のJRR3，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JMTR，京都大学原子炉を利用させて頂いた．測定にあたっては，東京大学アイソトープ総合センターと岡山理科大学自然科学研究所の装置を使用させて頂いた．Ar-Ar年代測定をするにあたりご協力頂いた平野直人博士，岩田尚能博士，角野浩史博士，瀧上豊教授，長尾敬介教授，齋藤和男教授に感謝の意を表する．また，兼岡一郎東京大学名誉教授による詳細かつ建設的な査読により本稿は飛躍的に改善された．本研究を進めるにあたり，京都FTの檀原徹博士，JAMSTECの地球内部ダイナミクス領域の方々，特に，田村肇氏，羽生毅博士，M.L. Tejada博士，鈴木勝彦博士，巽好幸博士よりいただいたご助力に感謝の意を表する．

文献

Baksi, A.K., 1999, Reevaluation of Plate Motion Models Based on Hotspot Tracks in the Atlantic and Indian Oceans, Journal of Geology, 1999, volume 107, 13–26.

Baksi, A.K., 2006, Guidelines for assessing the reliability of $^{40}Ar/^{39}Ar$ plateau ages: Application to ages relevant to hotspot tracks. http://www.mantleplumes.org/ArAr.html

Baksi, A.K., 2007a, A quantitative tool for detecting alteration in undisturbed rocks and minerals – I: water, chemical weathering and atmospheric argon, Ed. Gillian R. Foulger, Donna M. Jurdy, Geological Society of America, 285-304, In. Presents a collection of papers discussing various hypotheses and models of planetary plumes.

Baksi, A.K., 2007b, A quantitative tool for detecting alteration in undisturbed rocks and minerals – II: application to argon ages related to hotspots, Ed. Gillian R. Foulger, Donna M. Jurdy, Geological Society of America, 305-334, In. Presents a collection of papers discussing various hypotheses and models of planetary plumes.

兵藤博信, 2009, $^{40}Ar/^{39}Ar$年代測定法におけるプラトー年代について，Bull. Res. Inst. Nat. Sci., Okayama Univ. of Sci., 35, 21-25.

Iwata, N., Kaneoka, I., 2000, On the relationships between the ^{40}Ar-^{39}Ar dating results and the conditions of basaltic samples, Geochemical Journal, 34, 271-281.

Kaneoka, I., 1974, Investigation of excess argon in ultramafic rocks from the Kola Peninsula by the $^{40}Ar/^{39}Ar$ method, Earth Planet. Sci. Lett., 22, 145-156.

兼岡一郎，1998，年代測定概論，東大出版会，315pp.

Koppers, A.A.P., 2002, ArArCALC software for $^{40}Ar/^{39}Ar$ age calculations, Computers & Geosciences, 28, 605–619.

Ludwig, K.R., 2008, Isoplot ver.3.6, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Berkeley Geochronology Center,

Special Publication, No. 4, 2008.
McDougall, I. and Harrison, T.M., 1988, Geochronology and thermochronology by the $^{40}Ar/^{39}Ar$ method, Oxford Univ. Press, 212 pp.
McDougall, I. and Harrison, T.M., 1999, Geochronology and thermochronology by the $^{40}Ar/^{39}Ar$ method, 2nd ed., Oxford Univ. Press, 269 pp.
Min, K., Mundil, R., Renne, P.R. and Ludwig, K.R., 2000, A test for systematic errors in $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology through comparison with U/Pb analysis of a 1.1-Ga rhyolite, Geochimica et Cosmochimica Acta, 64, 1, 73–98.
Sato, K., Kumagai, H., Tamura, H., Hirano, H., Danhara, T., 2008, K-Ar, Ar-Ar, FT ages and degassing process of two type of andesitic magma, GRA, 10, EGU.
Turner, G. 1968, The distribution of potassium and argon in chondrites. In Origin and distribution of the elements (ed. L.H. Ahrens), Pergamon, London, 387-398.