

微量 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定にむけて —斜長石一粒の精密年代測定を目指す—

宇都浩三¹⁾

1. K-Ar 年代測定のこれまで

K-Ar 年代測定が、実用化されて約40年、日本への技術導入がなされてから30年余りが過ぎた昨今、商業的測定機関での測定値も含め急速な勢いで測定年代値が公表されつつあり、毎月国内の学会誌のいずれか1つには必ず年代測定に関する論文が掲載されるほどになった。年代値の報告量ばかりでなく、質においても昔に比べ精度も向上し、十万年より若い火山岩のように極めて若い地質試料についても測定されるようになった。その背景には、地熱開発というナショナルプロジェクトがあり、熱源評価のためにも精度の高い大量の放射年代値が必要とされたということがひとつある。その過程で商業的測定機関が充実し、またその存在が広く知られるようになり、広く地質学研究者一般に利用されるようになった。また、アカデミックな研究室としても、1960年代東京大学、東北大学、地質調査所の3ヶ所だけであったのが、東北大学の活動停止にも関わらず、岡山理科大学、山形大学、岡山大学で行われるようになり、近く京都大学でも開始の予定と、着実に増えてきている。加えて、活動的島弧変動帯という日本の地質状況に対し、欧米の年代研究者の関心が高まり、欧米の研究室において日本の地質試料を対象とする ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代年代研究が幾つかこなされるまでとなった。

我が地質調査所においては、1960年代初め柴田賢により開始されて以来、これまで1000を超す年代を花こう岩および変成岩を中心に測定し、日本の地質学の発展に大きく寄与してきた。一方、第四紀火山岩類の年代測定については、地熱資源探査、火山噴火予知、原子力安全研究などの観点で重要性が高まってきつつあり、近年積極的に対応してきた。

その中で、十万年より新しい火山岩類の正確な年代測定について最近力を注いできたが、溶岩について十分信頼性の高い年代を生産できるようになり(松本ほか, 1989)、現在は2台のアルゴン専用質量分析計を、1台は若い火山岩専用、もう1台はそれ以外の岩石・鉱物試料にと使い分け幅広い地質試料に対応できる体制が整ってきた。

このように質・量の両面で充実してきた K-Ar 法だが、全ての地質試料に対して適用できるわけではなく、重要な課題に対して力を発揮できない場合が多い。しかし、この K-Ar 年代測定法の変形である ^{40}Ar - ^{39}Ar 法は、同じ放射壊変現象、つまり同じ物理時計を用いた年代測定法であるにもかかわらず、様々な点で K-Ar 法の持たない優れた特質を有しており、欧米では K-Ar 法よりも一般的な年代測定法となりつつある。しかし、日本においては、放射線管理に関する厳しい法律に阻まれ、僅かに東京大学と山形大学においてのみ行われている。地質調査所でも、技術的には十分対応可能な状況にあり早期にその導入が望まれている。特に、最近さかんになりつつあるレーザー利用による微小領域の年代測定は、K-Ar 法では原理的に不可能であり ^{40}Ar - ^{39}Ar 法の導入が必須である。以下には、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法の持つ様々の特徴におよび今後期待される応用例について、ごく一部ではあるが紹介したい。細かい技術的なレビューは、稿を改めて行う予定である。

2. ^{40}Ar - ^{39}Ar 法の原理および特徴

^{40}Ar - ^{39}Ar 法の詳しい原理、および特徴については McDougall and Harrison (1988) や Faure (1986) の教科書や兼岡(1988a, b)の解説に詳しいのでそれ

1) 地質調査所 地殻化学部

キーワード: ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定, 微量化学分析



写真1 極微量 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定のためのレーザー試料融解精製装置(アメリカ合衆国地質調査所メノパーク支所)。台の上の横長の筒がアルゴン連続レーザー発振装置。その右側に赤外温度測定センサー付きの顕微鏡および CCD カメラ付きの双眼顕微鏡装置が並んでいる。レーザー発振装置の後ろ側のラックに、赤外温度測定装置、画像収録用ビデオ、レーザーコントローラーが収まっている。写真右端が、超高感度アルゴン専用質量分析計の試料導入部。

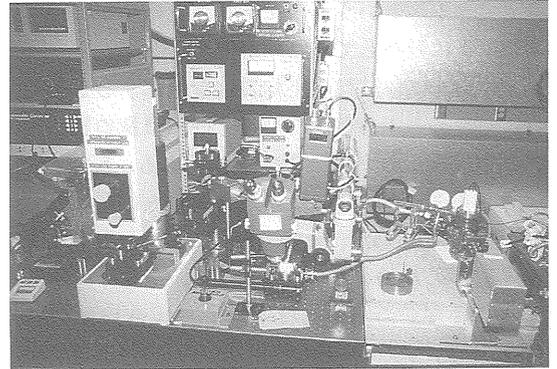


写真2 レーザー試料融解精製装置の岩石・鉱物試料加熱ステージおよびガス精製部付近のクローズアップ。左側の角形の顕微鏡は、レーザー照射時の岩石試料の温度が測定できるように赤外温度センサーが備え付けられている。中央部には CCD カメラを搭載した双眼顕微鏡があり、その下に円形の試料ステージが取り付けられており、冷光照明装置により光が当てられている。試料ステージの左側に置いてあるジョイスティックは、モーター駆動でレーザーの焦点上に試料を移動させるためのものである。レーザー照射による加熱で試料から発生したガスは金属性の蛇腹チューブを通してガス精製部に拡散し、2本のガラス製ゲッターにより活性ガスの吸着精製が行なわれる。精製後、アルゴンは右端のインレットバルブを通して、質量分析計に送られる。右端に「1」と書かれた角形の箱は、トルクモーターで、コンピュータ制御によりバルブの開閉を行なうためのものである。

に譲ることとし、以下には簡単に ^{40}Ar - ^{39}Ar 法の原理を述べ、更に K-Ar 法では不可能もしくは困難であった点で、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法が逆に得意とする分野について簡単に述べてみたい。

岩石・鉱物中に含まれるカリウムのうち 0.01167% が放射性同位体の ^{40}K である。この ^{40}K のうち約 89.5% はカルシウム 40 (^{40}Ca) へと β 壊変する(壊変定数 $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10}$ /年)が、残りの 10.5% は ^{40}Ar へと電子捕獲壊変する(壊変定数 $\lambda_e = 0.581 \times 10^{-10}$ /年)。従って、岩石・鉱物中の ^{40}K に対する放射起源の ^{40}Ar ($^{40}\text{Ar}^*$) の割合を知ることによりそれらの形成年代 T を次式を用いて求めることができる。

$$T = 1/(\lambda_\beta + \lambda_e) \times \ln[^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K} \times (\lambda_\beta + \lambda_e)/\lambda_e + 1] \quad (\text{I})$$

K-Ar 法においては、前述のごとく ^{40}K と $^{40}\text{Ar}^*$ を別々の方法で定量して、年代を求めている。Merrihuhe (1965) および Merrihuhe and Turner (1966) は、 ^{39}K に速中性子を照射すると ^{39}Ar が形成されることを利用し、アルゴンの同位体比測定のみにより上に示す年代計算を行えることに気がついた。天然において ^{40}K と ^{39}K の存在比は 0.01 : 93.26 であるので、速中性子によってどれくらいの割合で ^{39}K から ^{39}Ar が形成されたかを正確に知る

ことが出来れば、間接的に試料中の $^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K}$ を知ることが出来るというわけである。年代は次式によって求められる。

$$T = 1/\lambda \times \ln(1 + J \times ^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}_K) \quad (\text{II})$$

但し $J = ^{39}\text{K}/^{40}\text{K} \times \lambda/\lambda_e \Delta \phi(E) \sigma(E) dE$

$^{39}\text{Ar}_K$: 中性子により ^{39}K から生じた ^{39}Ar

Δ : 中性子照射時間

$\phi(E)$: エネルギー E での中性子線束

$\sigma(E)$: エネルギー E での中性子捕獲断面積

カリウムを直接定量する代りに、 ^{39}Ar から間接的に ^{40}K を知るという点だけを考えれば、それまでの K-Ar 法と原理的になんら代るところのないただの 1 変形といえるかもしれない。しかし、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法は、K-Ar 法ではなし得ない無数の可能性を秘めた年代測定法であるということが、その後の約 25 年での研究で鮮やかに示されてきている。それらは、ひとつの重要な特徴から派生するものである。即ち、“同一試料中の親核種と娘核種を同時に

測定できる”ということである。そのことの持つ意味を以下に列挙してみたいと思う。

まず第一は、試料の不均質性を気にする必要がないということである。このことは極微量の岩石・鉱物の年代測定の上で非常に重要である。K-Ar法では、カリウムとアルゴンの定量を別々に行うので、試料の不均質性は年代の信頼性に大きな影響を与える。岩石の粉碎に伴うアルゴンの散逸を避けるため、アルゴンの測定には通常ある程度以上の粒径(>数十 μ)の試料を用いる。従って測定重量を少なくすると、試料の均質性が極めて重要な問題となる。ましてや、単結晶の正確なK-Ar年代を得ることは不可能である。その点で、レーザープローブを用いた微小領域の年代測定は ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定でなければ意味を持たない。

次に、岩石・鉱物試料中の放射起源アルゴンを一部分だけとりだして年代測定することが可能である。K-Ar法においては、試料中の全てのアルゴンを取り出して定量しなければ有意の年代を得ることが出来ない。何故ならば、カリウムの定量も試料中の全量を測るからである。即ち、試料内のアルゴンの一部取り出したとき、それに対応するカリウムを測定することが出来ないからである。しかし、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法においては、カリウムは速中性子照射によりアルゴンに置き替っている。結晶内において同じサイトに存在する放射起源 ^{40}Ar と中性子照射起源 ^{39}Ar は常に同じ割合で脱ガスするので、試料の一部分だけを脱ガスさせても当然意味のある年代を求めることが出来る。このことこそが、K-Ar法にない ^{40}Ar - ^{39}Ar 法の最大のメリットであり、段階加熱法という形で様々な年代学的な応用が試みられている。段階加熱法においては、試料を幾つかの温度ステップに分けて段階的に加熱し、各温度部分で回収したアルゴンについて年代を求めるもので、1試料について温度ステップの数だけ年代を求めることが可能である。これらの年代が全て一致するのか、それとも加熱温度変化に伴い年代がどう変化するかを吟味することにより、測定試料の過去の履歴をある程度推定することが可能となり、得られる年代の吟味が可能となった(第1図)。

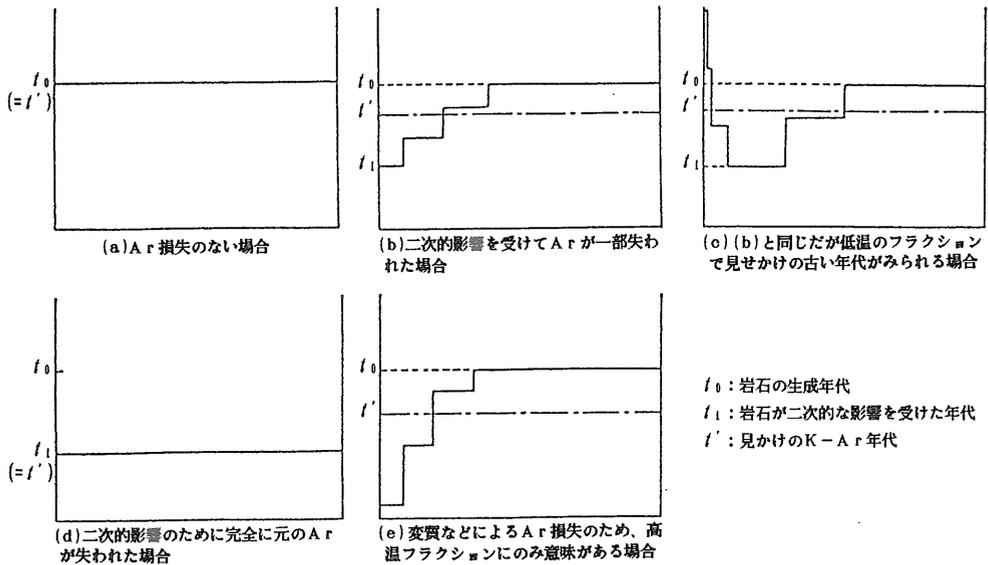
さらには、年代測定の精度の飛躍的な向上である。K-Ar法においては、試料中のカリウムと放射起源アルゴンの濃度を別々の方法で定量することにより

年代を求める。両定量法の誤差の相乗平均が得られる年代の誤差となるため、誤差を小さくすることは容易ではなく、誤差が1%以下になることはほとんどない。一方、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法においては、(II)式において $^{40}\text{Ar}^*$ と $^{39}\text{Ar}_K$ の比を求めることで、即ち質量分析計によるアルゴン同位体比測定だけで年代が得られる。質量分析計におけるアルゴン同位体比分析は、機器の性能向上により4桁ないし5桁、即ち10-100 ppmの精度で測定できるようになった。従って、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法では、極めて精度高く年代測定をすることが可能である。加えて、レーザー融解極微量年代測定は以下のようなメリットを有しており、測定年代の精度の向上をもたらしている。ひとつは、レーザーは試料およびそのごく近傍だけを加熱するため、ホットブランク(高温になった抽出装置壁からのアルゴンの脱ガス)が他の試料融解法に比べ極めて小さいことである。そのため、非放射起源(いわゆる大気)アルゴンの混入率を小さくすることができ、その結果年代測定誤差を小さくすることができる。もうひとつは、試料から出てくるガスの量がごく少量であり、抽出精製ラインおよび質量分析計を汚さないということ、加えてレーザー加熱は数分以内の短時間でできるということである。測定装置内の真空が悪くなる程度が小さくかつその時間が短いため、短時間の排気で次の測定が可能になる。そのため、約30分に1回の割合で測定できる。従って、1日に10測定以上行うのはそれほど難しくない。そのため、同一試料から分離した結晶を多数測定し、それを統計処理できるので誤差が小さく信頼性の高い年代を得ることができるようになった。年代測定精度の飛躍的向上により、数億年前の地質事象を数十万年、つまり約0.1%の分解能で測定されるようにまでなった。

K-Ar法は、1試料について1つの年代が得られるという大きなメリットをもつが、しかし得られる年代に対する客観的妥当性を自分自身が示せないというデメリットも合わせ持つ。それに対し、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法は前述のように段階加熱法という手法でそれを示すことに成功した(第1図)。以下に、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法の得意とする適用例の一部を簡単に述べる。

(1) 変質した岩石の形成年代：

アルゴンは不活性の気体元素であるため、放射性カリウムから放射壊変により生成され岩石内のカリ



第1図 段階加熱法による ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代パターンの模式例と、その形成の要因例(兼岡, 1988a).

ウムのサイトに留まっても、風化や変質作用により結晶構造が緩んだり壊れたりすると、簡単に大気中に逃げてしまう。一般に岩石や鉱物には低温の環境で不安定な部分と高温まで安定な部分があるので、それらを分けて年代測定すること(段階加熱法)により、岩石の形成以降乱されていない部分の年代、即ち形成年代を知ることが出来る。

(2) 変質した岩石の変質年代:

上とは逆に、低温でアルゴンを逃してしまう部分の年代を求めることにより、変質作用があった年代を推定することが可能となる。

(3) 過剰 ^{40}Ar の検出:

K-Ar 法においては、一般的には岩石中の放射起源 ^{40}Ar は、全 ^{40}Ar からいわゆる大気 ^{40}Ar を差し引いて求める。大気 ^{40}Ar とは岩石中の ^{36}Ar の 295.5 倍の量であるという仮定のもとに与えられる。しかし、この仮定が常に正しいとは限らない。例外には 2 種類あるが、一般的に良く知られているのは過剰 ^{40}Ar である。過剰 ^{40}Ar は、地下深部起源の鉱物や急冷した岩石に含まれることが多い。K-Ar 法においては、直接的に過剰 ^{40}Ar を検知することは不可能である。しかし、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法においては、段階加熱法による年代パターンおよびアイソクロン法の検討により検知することが可能であり、海底火山岩などの年代測定では必須となっている。

(4) 深成岩の冷却年代および堆積岩の続成年代:

花こう岩などに一般的に含まれる低温型のカリ長石(微斜長石および正長石)は、カリウムを 10 wt% 以上も含みながら、放射起源 ^{40}Ar を保持し得ない鉱物として、K-Ar 年代測定には不向きな鉱物とされてきた(Dalrymple and Lanphere, 1969)。しかし、最近の精密な段階加熱法を用いた ^{40}Ar - ^{39}Ar 法により、これらは放射性 ^{40}Ar を保持できないのではなく、低温までアルゴンの結晶内拡散速度が早い、即ちアルゴンに対する閉鎖温度(アルゴンの結晶内移動速度が実質的にゼロになる温度)が黒雲母等の鉱物に比べ低く、 150°C 程度であることが判明した。このことは、カリ長石がごく低温領域の熱的な出来事のあった年代を記憶していることを意味している。つまり、花こう岩など深成岩類の貫入冷却の歴史を知るに当り、閉鎖温度約 300°C の黒雲母 K-Ar, ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代とカリ長石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代を求めることで 300°C から 150°C までの冷却速度を知ることができ、これまで明確でなかった深成岩類の冷却速度が低下する時期の冷却史を正確に知ることが可能となった。一方、花こう岩類等を起源とする砕削性堆積物が徐々に埋没していくと、地温上昇により続成作用を被る。従って、堆積岩中のカリ長石の ^{40}Ar - ^{39}Ar 段階加熱年代測定により放射起源 ^{40}Ar の拡散過程を推定でき、堆積盆の温度構造および熱履歴等を知ることが可能となった。ボーリングコアを用いた堆積盆の熱史の解明などにより、石油堆積

盆の石油熟成度等に関する重要な情報を与えつつある (McDougall and Harrison, 1988).

(5) 変成岩の複雑な熱史の解明:

複雑な熱史を経ている変成岩の中の鉱物の K-Ar 年代測定においては、得られる年代がその鉱物が記憶している熱史の平均の年代なのか、最も最近の出来事の年代なのか、あるいはその間の曖昧な年代なのか不明である。しかし、段階加熱法により低温部から順次脱ガスさせて年代を求めていくことで、ある程度それらについての解を求めることが可能である。変成岩の熱史解明には、閉鎖温度の異なる複数の鉱物を用いたり、Rb-Sr 法など他の年代測定法を併用したりしなければ明確な解が得られないことが多い。 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法による段階加熱年代パターンは、それらの解釈に有用な情報を提供してくれる。

(6) 地球外物質の年代測定:

地球外物質、月の岩石および隕石の年代測定の場合、測定に使用できる試料の量は極めて限られている。上述のごとく、K-Ar 法の場合、カリウムとアルゴンの分析を別々に行うので、極微量の試料では均質性を保つことが困難となり正しい年代が得られにくい。一方、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法は、極微量の試料でも正確な年代を求めることが可能であり、地球外物質の年代測定に大いに威力を発揮している。 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法の開発は、もともと地球外物質に対し行われ、その有用性が知られるようになった (McDougall and Harrison, 1988; 兼岡, 1988a) という歴史的経緯もある。

3. 新生代火山活動史解明にむけて

日本において新生代、特に中新世以降の火山活動史を詳細に解明することは、さまざまな理由で要望されており、今後ますます重要となってくると考えられる。K-Ar 法は、変質していない新鮮な結晶質の地上噴出溶岩類の年代測定に大いに貢献してきた。しかし、変質した火山岩、海底火山岩などに対し、測定原理上の限界から適用できない。世界の最先端の研究成果に接すると、火山活動史の詳細な解明に ^{40}Ar - ^{39}Ar 法が今後重要な役割を担うことは疑いのない事実である。それでは、新生代火山活動史の解明という命題のもとに、具体的にどのよう

な戦略で研究を行うのか。

基本戦略としては、火山岩の中で最もありふれた斑晶鉱物、斜長石を極微量 (100 mg 以下、出来れば単結晶) 用いて精密な噴出年代を知る、ということである。斜長石は、0.1-0.5% 程度とある程度 K_2O を含んでおり、大半の火山岩中に少なくとも数% 程度は斑晶として含まれているので、その測定技術が確立すれば殆どの岩石が測定対象と成り得る。アメリカ合衆国地質調査所メソパーク支所の Pringle を中心とする最近の研究は (Pringle et al, 1991, 1992), 数十万年のテフラ中の斜長石斑晶を数十 mg 用いて誤差 10% の精度で年代を求めることが可能であることを明らかにした。我が国においては、具体的には以下に列挙したような課題に対し有効に機能すると考えられる。

(1) 中新世“グリーンタフ”の火山活動史の解明

東北日本の西半分を中心に広く分布するこれらの中新世火山岩類は、一般に変質著しく K-Ar 年代測定では正確な噴出年代を知ることは不可能であった。日本列島の現在の骨格の形成の歴史や機構を詳細に知るためにはこれらの火山活動に信頼性の高い時間軸を入れることが必要である。これに対し、極微量 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定で正確な噴出年代を知ることが可能になると期待される。まずは、なるべく変質を被っていない斜長石斑晶を極少量 (50 mg 以下) 用いるだけで精密な年代を得られるようになるので、K-Ar 法では適用できなかった酸性凝灰岩類を含めて測定対象が大きく広がることは間違いないであろう。次には、段階加熱法の適用である。風化や変質による放射性 ^{40}Ar の散逸の影響を知る上で、段階的脱ガスの年代パターンの吟味は不可欠である。

(2) 海底構造発達史の解明

日本は、いうまでもなく四方海に囲まれているのであるから、周囲の海底がどのような歴史を経て今日に至ったのかを知ることは、日本列島の構造発達を語る上で重要な鍵となる。これらに関する精密な年代データは、未だ十分ではない。兼岡の日本海の火山岩類についての K-Ar, ^{40}Ar - ^{39}Ar 両法を用いた研究 (兼岡, 1991 のまとめに詳しい) を見ても明らかのように、日本海形成時期の詳細な解明は ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代値によってもたらされ、K-Ar 年代はサポートデータにしか成り得ていない。ここで重要なこ

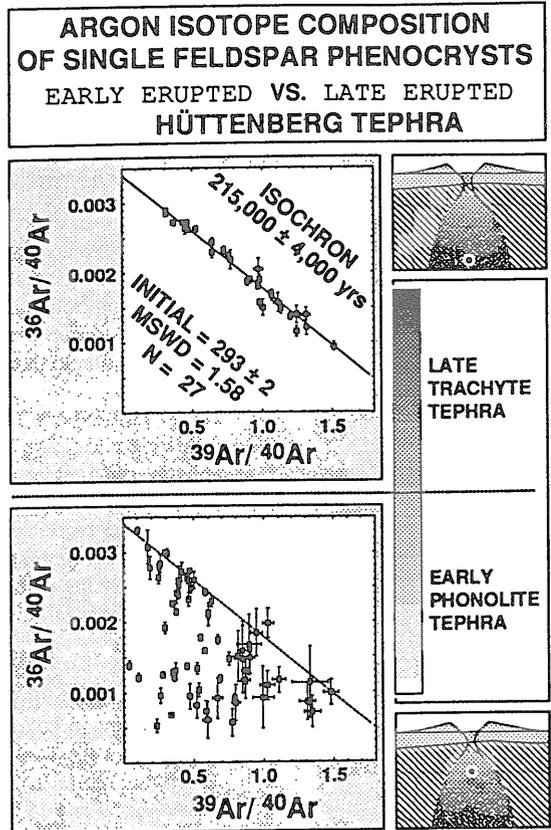
とは、高い水圧下で噴出した火山岩に特有の過剰 ^{40}Ar の除去、海底での変質作用による放射起源 ^{40}Ar 散逸の影響の除去であり、当然段階加熱法が有用である(兼岡, 1991). 加えて, Pringle et al. (1991)が数百万年前の海山についての年代測定で示したように、斜長石斑晶の年代測定は重要である。特に、水冷破碎された火砕岩の年代測定には期待が持たれる。加えて、深海底から試料を回収する場合、測定に適した岩石の量が限られていることが多いので、微量測定技術が必須となってくる。

(3) 第四紀テフラの直接年代測定

第四紀の大規模火山噴火で広域に降下堆積した広域テフラ層は、広範な地域に対し同時間間を提供するため、火山噴火活動史の解明という観点だけではなく、第四紀の地殻変動史、海水準変動史の解明等に広く用いられる。従って、火山噴火予知、地震予知、地球環境変動等の重要な研究課題の中で、テフラの堆積年代を正確に知ることは重要である。

地質調査所は、テフラの上下に流下堆積した溶岩流の精密年代測定により、十万年より若い重要な指準広域テフラの間接的年代決定を可能とした(松本ほか, 1991). しかし、兼岡の指摘にあるように、テフラそのものの直接年代測定は K-Ar 法では原理的に困難である。 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法の適用は、火山ガラスおよび斜長石斑晶の直接測定を可能にし、特に渴望されている十万年から数十万年前の広域テフラの年代決定に大きく貢献すると期待される。

段階加熱法による過剰 ^{40}Ar や放射性 ^{40}Ar 散逸の検出も当然重要であるが、(1), (2)の場合と異なり、以下の2つのことがテフラの精密な年代測定の上で重要である。1つは、異質結晶の混入の影響を除去することである。テフラが噴出・堆積する過程で、噴出マグマに由来しない様々な異質結晶が混入する可能性がある。極微量の年代測定により、これらの異質結晶などの混入の影響を除去することが容易となった。特に、レーザーを用いた1個ないし数個の結晶の年代測定において、その効果は大きい(第2図)。次に大事なことは、大気アルゴンの混入の程度をなるべく少なくし、年代測定精度を向上させることである。岩石・鉱物を段階加熱する際、低温においては、結晶内のカリウムに発生する放射起源 ^{40}Ar は鉱物内からあまり逃げないが、結晶表面に付着したり格子欠陥などにトラップされ



第2図 第四紀テフラ中のカリ長石斑晶のレーザー単結晶 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代測定例(Boggard et al., 1989のデータをもとにした図: Schmincke et al., 1990). 最初に噴出したフォノライトには多数の異質結晶(下側のアイソクロン図で線の左下にプロットされるもの)が混入しているのに対し、後から噴出したトラカイト中の斑晶はすべて本質結晶であり215,000±4,000年のアイソクロン年代を与える。噴火開始時には、火道を形成する過程で多くの異質結晶を取り込むが、安定な火道が形成された後は、異質結晶を殆ど取り込まなかったと解釈される。

ている大気アルゴンは抜け易い。従って、800-1000°C程度の温度で試料を予備加熱しその間脱ガスする気体を真空ポンプ側に排気させることで、少々の放射起源 ^{40}Ar の散逸を犠牲にしても大気アルゴン成分の大半を捨ててしまうことが可能である。そのため、実際に試料を融解させて放射起源 ^{40}Ar の大半を回収する際、大気アルゴンの混入量を低く押えることが出来、その結果大気混入率が低く精度の高い年代を得ることが可能である(第3図)。Pringle et al. (1992)は、この方法で約25万年前のテフ

対比—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.

松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳(1991): 阿蘇火山岩類の K-Ar 年代測定—火山層序との整合性と火砕流試料への適応—. 日本火山学会予稿集, 1991 No 2, 73.

McDougall, I. and Harrison, T. M. (1988): Geochronology and thermochronology by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method. Oxford Univ. Press, Oxford, 212p.

Pringle, M. S., McWilliams, M., Houghton, B. F., Lanphere, M. A. and Wilson, C. J. N. (1992): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Quaternary feldspar: example from the Taupo Volcanic Zone, New

Zealand. Geol., 20, 531-534.

Pringle, M. S., Staudigel, H. and Gee, J. (1991): Jasper Seamount: seven million years of volcanism. Geol., 19, 364-368.

Schmincke, H.-U., Bogaard, P. v. d. and Freundt, A. (1990): Quaternary Eifel Volcanism. Excursion 1AI, International Volcanological Congress Mainz (FRG), 188p.

UTO Kōzō (1993): ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of a very small amount of samples. —Toward precise age analyses of a single plagioclase grain—

地学と切手



地質調査を主題とした切手

P.Q.

地質調査を鉱床探査まで意味を拡げるとすれば、1898年オマハで開かれたトランス・ミシシッピー博覧会で発行された Western Mining Prospector と題する50セント切手が最初であるが、それ以後はさっぱりお目にかかれない。むしろ戦後になってアジアで発行されたものが4種ある。

中国では調査を勘察というらしく、1954年発行の勘察地下資源と題する3200円切手は、カタログには Hupe 地方の Tayeh 地域と地名が入っているが、残念ながらよくわからない。次の8分切手は1956年8発行第1次5ヵ年建設計画記念18種のう

ちであり地質勘察と題され、測量を伴った地質調査で、すでに女性の地質屋さんが登場している。

次のヴェトナム切手は1961年地下資源調査らしいが、北ヴェトナム当時のもので、データはさだかでない。

最後の20セント切手は当時の英領ソロモン諸島で1968年に発行された地質調査と題された切手で、図案は近代的な航空機による物理探査である。英領ソロモン諸島は1975年にコンモンウェルスの一員となって独立した。首都はガダルカナル島のホニアアである。