

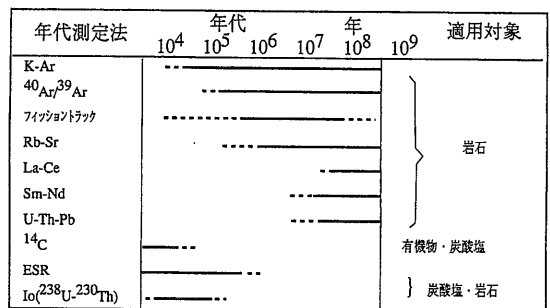
最近の年代測定法の進歩の概要 ：イントロダクション

富 樫 茂 子¹⁾

46億年前に地球が誕生, 約400万年前には人類の祖先が出現し, 20世紀後半には地球環境に影響を及ぼすまで文明を発展させました。人類が将来にわたって地球と共存していくために, 過去の地球の歴史を解明することの重要性が増しています。地球の歴史で起きた様々な地質現象に時間の目盛をいれるために, 様々な年代測定法が開発され適用されてきました。特に最近, 測定法の技術開発がめざましく, 鉱物一粒子単位の年代測定法の開発, 具体的な地質現象に直接関連した年代測定法の開発が行われつつあります(第1図, 第2図)。1995年の第9回地質調査所東京講演会では, 年代測定法とその応用について最近の進歩と地質調査所の取り組みについて, 6人の講演が行われました。その講演者を中心に, これから地質ニュースの何号かにわたって年代測定について連載をする予定です。本文はそのイントロダクションに相当します。

ており, 親核種が半分になる速さ(半減期)は10億年をこえる長いものから, 1秒以下の短いものまであります。年代測定は岩石や鉱物中の親核種と娘核種の量を正確に測ることによって実現します。

砂時計をひっくり返すことによって, 時計がスタートします。岩石や鉱物では, ある地質事象によって, 親核種と娘核種が岩石に閉じ込められた時, たとえばマグマが噴出して急冷された時が時計のスタートになります。

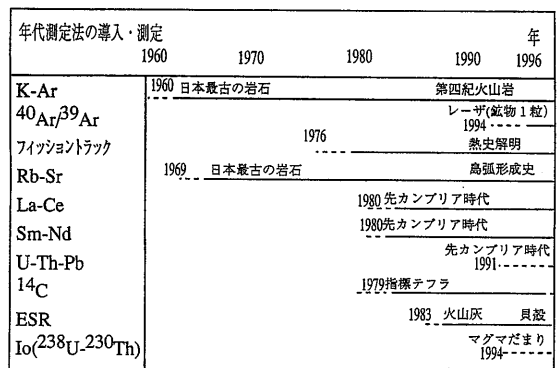


第1図 地質調査所が取り組んでいる年代測定法の測定範囲

1. 年代測定の最近の進歩

従来より盛んに行なわれてきた地質試料の年代測定は, 今新たな段階にあります。一つ目は, これまでは岩石の塊について得られてきた年代が, 鉱物単位, さらに鉱物の成長に伴う各ステップの年代まで測定できるようになりつつあること, 二つ目は, 様々な時計(年代測定法)を組み合わせることにより, 時計を動かしはじめた地質現象の具体的な姿が見え始めたことです。

年代測定の原理は砂時計に例えられます(第3図a)。上にある砂が親核種に相当し, 下の砂が娘核種に相当します。砂の落ちるスピードは, 親核種が娘核種に放射壊変する速さ(壊変定数)によって決まっ



第2図 地質調査所における年代測定法の導入と測定の歴史

1) 地質調査所 地殻化学部

キーワード: K-Ar dating, Laser Ar-Ar dating, U-Th series, Fissiontrack, ESR, SIMS

カリウム-アルゴン法の場合、親核種 ^{40}K は、13億年たつと、半分の量に減少し、娘核種の ^{40}Ar が生成されます。時間が経過するほど、たくさんの ^{40}Ar ができますので、古い岩石ほど測定はしやすくなります(第3図a)。

1) K-Ar法による若い火山岩の年代測定

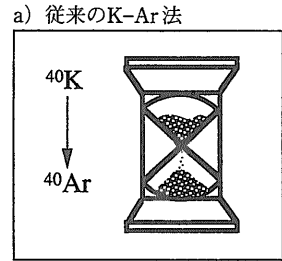
若い火山岩の場合には、噴出して以来、極く僅かしか ^{40}Ar が生成していないので、それを測定するためには分析機器の測定感度をあげなくてはなりません(第3図b)。装置の技術革新により測定感度があがると、次の課題として、それまでは影響の小さかったバックグラウンドや、大気からなどの非放射起源の ^{40}Ar の影響が大きくなり、これをどう除くかという新たな課題を克服しなければなりません。本号で松本哲一氏が述べる若い火山岩の年代測定は、この課題に挑戦し、同位体分別補正法という方法を用いて実現したものです。

従来法では、放射起源 ^{40}Ar を定量するために、 ^{38}Ar をスパイクとして加えて同位体比を測定したのですが、同位体分別補正法ではこのスパイクを加えないで、岩石本来の $^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ を測定することにより、 ^{40}K 起源ではないArの影響を補正することができます。この方法により、 K_2O が2%ならば、2万年前程度までの年代測定が可能となりました。その結果、これまでは適当な測定法がなかった年代の空白域を埋め、 ^{14}C 法との比較が可能なるほどの若い年代が得られるようになりました。

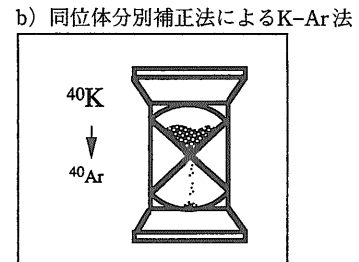
2) 極微量 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定法

カリウム-アルゴン法のもう一つの課題は、鉱物1粒子単位の年代測定です。これを実現するためには、極微量の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法の確立が不可欠です(第3図c)。レーザーを用いた $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法は年代測定の革命ともいわれ、脚光を浴びています。この方法は、異質粒子の混入による誤差を避けることができるだけでなく、段階加熱により、鉱物が被ってきた熱履歴を評価でき、さらに、低ブランクのために精度が良いといういくつもの利点をもっています。現在、世界の多くのラボがこの方法を開発しつつあります(最近ではBogaard, 1995)。

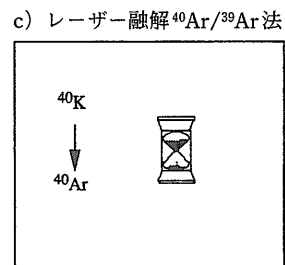
本法の適用の例として、6千5百万年前の恐竜の絶滅の原因として有力な隕石衝突説があります。ユカタン半島の隕石クレーター形成時に溶融したガラスの極微量の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法年代測定結果が10万年以下



古い岩石の年代測定



若い火山の年代測定



鉱物一粒の年代測定

第3図 年代測定法の原理

の精度で求められたことが、隕石衝突説の大きな論拠となっています。

石塚 治・宇都浩三氏は地質調査所で黒雲母1粒子についての年代測定が実現している現在の状況と、本法を用いて解明しようとしている課題として、新生代火成作用とテクトニクスについての展望を講演しました。特に海底に噴出した火山岩は、高水圧による過剰アルゴンや海水による変質のため、従来のカリウム-アルゴン法では正確な年代は得られませんでした。極微量 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定法は、四方を海に囲まれているだけでなく、地層として多くの海底噴出火山岩を産する日本列島の地質の解明に多くの光をあてられると期待されます。

3) SIMSによる年代測定

最近の年代測定法の進歩によって、もう一つの革命といえるのが、超高感度超高精度の二次イオン質量分析計の活躍です。オーストラリア国立大学の開発したSHRIMPと呼ばれる装置により、ジルコンの結晶内部の様々な位置でのU-Pb年代測定が可能となったことが端緒となりました。この測定法の確立には、超高感度超高精度の二次イオン質量分析の実現と共に、標準試料となるU/Pb比が均一なジルコンの発見が不可欠でした。最近ではSHRIMPの他に、それぞれの特徴をもった装置が開発され、ジルコン以外の鉱物、例えばモナザイトによる年代測定が行なわれ、アルプス造山運動の議論など若い年代の測定などが試みられています。

地質調査所に1995年に導入された二次イオン質量分析計(カメカims-1270)は、投影型のイメージング機能と、珪酸塩などの絶縁物のチャージ補償機能を持ち、微小領域の微量元素測定や、同位体比測定をめざしていますが、年代測定も重要な課題の一つです。

地質調査所におけるSIMSによる研究は、緒に付いたばかりですが、今後が期待されています。

2. 地質学への応用

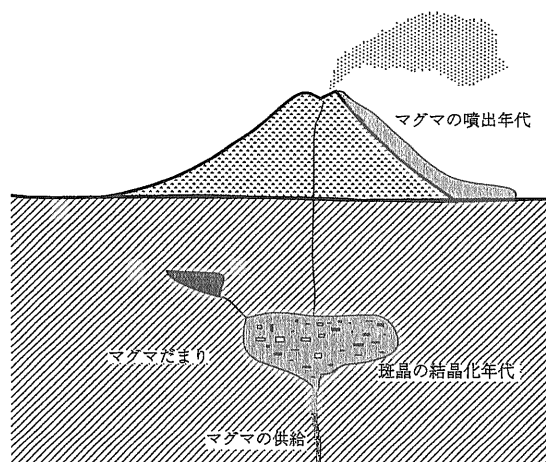
最近の年代学の進歩の特徴は、様々な時計(年代測定法)を組み合わせることにより、時計を動かしはじめた地質現象の具体的な姿が見え始めたことです。

その例をいくつか見てみることにしましょう。

1) 火山岩のウラン系列年代測定

学習院大学の福岡孝昭氏は ^{230}Th を用いた火山岩の年代測定法の草分けの一人です。福岡氏は、火山岩のウラン系列の年代測定により、火山の下にマグマだまりはどのくらいの期間存在し、どのように斑晶鉱物が成長していくのかを明らかにしました(第4図)。

ウラン系列の核種は、半減期が様々であり、親核種と娘核種を選ぶことにより、いろいろなタイムスケールの時計を利用できます。中でも ^{230}Th (半減期が75,000年)、 ^{226}Ra (1,600年)、 ^{210}Pb (22年)、 ^{231}Pa (34,000年)は有用です。例えば、 ^{230}Th は ^{238}U から、 ^{226}Ra は ^{230}Th から生じます。マグマから結晶が晶出



第4図 マグマの斑晶の結晶化年代と噴出年代

する際に、結晶ごとにマグマとは異なったTh/UとRa/Thに変化するために、時計がスタートします。つまりこれらの年代はその結晶がマグマから生じた年代を意味します。一方、マグマの噴出年代は歴史記録や ^{14}C 年代によって得られます(第4図)。従って、結晶年代と噴出年代の差から、マグマだまりができてから噴出するまでに要した時間を推定できます。このような研究をさらにすすめるために、地質調査所においても、エネルギーフィルターとイオンカウンティングシステムを備えた表面電離型質量分析計を用いた精度のよい測定法の確立を急いでいます。

2) フィッシュントラック法と付加体の熱史

京都大学の田上高広氏は、ウランの天然での核分裂を用いた測定法であるフィッシュントラック法を用い、岩石の熱履歴の解析法を話されました。フィッシュントラック法は年代と同時に温度の情報を与えてくれるので、地質学的に応用範囲が広い方法です。たとえば、ジルコンのフィッシュントラックは200度の条件で500万年経過しても消失しませんが、1500万年たつと消失してしまい、年代がゼロにリセットされます。鉱物により、リセットする温度が違うのでこの差を利用して熱史を解明できます。田上氏は、具体的な適用例として、日本列島の基盤をなす付加体の成長過程において、堆積物がもぐり込み、大陸地殻に付加し、上昇して行く過程を本法によって明らかにしました。四万十帯の付加物質が非定常的に供給されていること、これが島弧における火成活動の非定常性に起因するものであることを主張されています。

3) ESR年代測定と環境変動

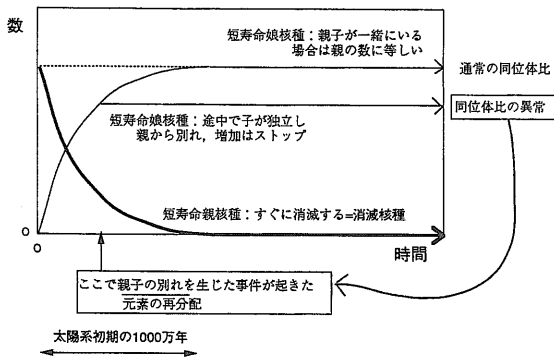
下川浩一および今井 登氏は、氷河性海面変動や地殻変動による海進、海退で生じた堆積物中に含まれる貝化石に、ESR法を適用しました。ESR年代測定は、環境放射線による不対電子の蓄積量から年代を求める方法です。岩石や火山灰、貝殻、骨などが測定対象になっており、100万年より若い年代値を得られることから、第四紀の地質の応用が行われています。下川氏は貝化石のESR年代は、宇宙線線量、周囲の岩石の含水率、貝の厚さによるβ線減衰補正により良好な結果が得られることを示しました。また、貝の表面へのウランの吸着による妨害について言及しています。

4) ¹⁴C年代と第四紀地質

名古屋大学に導入されたタンデム加速器により、微量の炭素による¹⁴C年代が可能となりました。試料の量はmg単位で可能であり、従来の気体係数法や液体シンチレーション法がg単位で必要なことと比べると、2ケタから3ケタも少ない量です。これにより、これまででは不可能であったボーリングコアの炭質物の年代測定も可能となるなど画期的な成果をあげています。

¹⁴C年代測定法は、5万年前位までの測定が可能であるので、人類の歴史や人間と地球環境の関わりにもっとも深い関係を持っています。実際に産業革命以降、化石燃料による¹⁴Cを含まない炭酸ガスによって大気中の¹⁴Cは薄まり、その後の原子爆の使用により大気中の¹⁴Cの濃度は急増してしまいました。その結果、現代に近い試料では¹⁴C年代測定法の前提である“大気中の¹⁴C濃度一定”はくずれています。もちろん、これまで多く測定された年代は、人為的な影響を受ける前のものですから前提はほぼ成り立っていますので心配は無用です。

しかし、測定法の精度が良くなった場合、古文書と突き合わせるなど正確な絶対年代を得ようとするときには注意が必要です。¹⁴C年代測定に使用することに決まっている半減期が本当の値からずれていることを補正した上で、大気中の¹⁴Cの微妙な変動も補正する必要があります。大気中の¹⁴C濃度は、宇宙線による生成量と放射壊変による消滅量が釣り合っている時は一定ですが、宇宙線量が変化するとこれに伴って変化します。過去の変動量は樹輪の¹⁴Cの測定による補正曲線が得られています。



第5図 短寿命核種による太陽系形成初期の年代測定

5) 人類の起源はどこまでさかのぼるか-火山灰の年代測定

エチオピアのラミダス猿人は、現在のところ最も古い人類の祖先だと考えられています。ラミダス猿人の生きていた440万年前の年代値は、化石の産する地層の直下の火山灰層の極微量⁴⁰Ar/³⁹Ar年代測定法によって得られたものです。火山灰層は同時に広い範囲を覆うことから、重要な鍵層として、地質学にとっては重要な役割を果たしています。しかし、火山灰層の年代測定は容易ではありません。火山灰層は岩石の単位では意味のある年代を示さないことが多いからです。その原因は、噴出の際に古い地層の岩石を異質岩片としてとりこんでいたり、火山ガラスが大気成分を多く含み、また変質しやすいからです。そこで、火山灰に含まれる鉱物単位での年代測定が実現してはじめて正確な年代が得られるようになったのです。

6) SIMSによる太陽系の形成初期の年代測定

SIMSを用いた年代測定の課題の一つとして、太陽系の形成初期の年代測定があげられます。46億年という地球の年齢は、隕石の年代測定を主な根拠とし、太陽系の中で両者がほぼ同時にできたとされます。しかし、太陽系星雲から惑星ができるという一大事件がどのくらいのスピードでどのように起きたのかを知るためには、太陽系の初期の年代学が必要です。放射性核種の中には、寿命が46億年よりずっと短いため、太陽系形成のごく初期にしか天然には存在しなかった消滅核種(たとえば²⁶Al)と言うものがあります(第5図)。隕石の中に残っている半減期の異なる各種の消滅核種からできた娘核種の同位体の変動を調べると、太陽系ができてから1千万年くら

いの際に何がおこったかを知ることができます。隕石には起源を異にする宇宙の塵や粒子が集まってできた試料がたくさんあります。この細かい一粒一粒の年代測定を行うにはSIMSのような微小領域の測定技術の向上が大変望まれます。

3. おわりに

以上に述べたように、今回の講演会では、主として人類の発生進化に影響をおよぼし得る、比較的新しい時代の地質に対する年代測定について話されました。測定法に主眼を置いたため、講演会では割愛しましたが、地質年代に関わる研究としては、隕石や月の石の年代学、日本の白亜紀の盛大な火成活動に関する年代学、マンツルの進化に関する年代学、島弧の成立に関わるテクトニクスに関する年代学など、地質調査所だけを見ても、様々な視点と方法によって研究が進められています。

また、ジルコンの結晶内部の様々な位置でのU-Pb年代測定については、先に述べたSIMSによる年代測定だけでなく、ICP-質量分析計(平田・ネスビット, 1994)やEPMAを用いたCHIME(鈴木ほか, 1992)などの複数の測定法の研究がすすめられています。それぞれの測定法には、年代精度、空間精度、迅速性、コストパフォーマンス、対象鉱物の種類、得意とする年代範囲などの長短があり、方法による特徴を良く踏まえて地質学的な適用をする必要があります。

このような最近の年代測定法の発展にとって、これまで先輩たちが築き上げてきた従来の年代測定法も、ますます重要になっています。例えば、ジルコンのU-Pb年代が可能になったのは、従来の方法(表面電離型質量分析計による同位体希釈法)で標準試料の精密なデータが得ることができたからです。

また、従来の測定法は、新たな手法の基礎となるだけではありません。日本の島弧形成過程のように

複雑な構造運動をうけた岩石について、全岩のRb-Sr法やSm-Nd法を適用し、空間スケールの大きなダイナミックな地質現象を見るため、従来の年代測定法の果たすべき役割を強調しておきたいと思います。また、従来法の精度をあげ、マンツル鉱物や付加体の碎屑物の年代測定の試みが行われつつあることも付記しておきます。

参考文献

- Bogaard, P. v.d. (1995): $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of sanidine phenocrysts from Lacher See Tephra (12,900 yr.BP): Chronostratigraphic and petrological significance. *Earth Planet. Sci. Lett.* 163-174.
- 福岡孝昭 (1995): 放射年代測定の高精度化の現状と年代値の解釈, 第四紀研究, 34, 265-270.
- 平田岳史・ロバート ネスピット (1994): Laser Probe ICP-MSを用いたジルコンのウラン-鉛年代測定. *地質ニュース*, no.482, 53-65.
- 今井 登・下川浩一 (1988): ESR年代測定法. *地質学論集*, 29, 59-72.
- Matsumoto, A., Uto, K. and Shibata, K. (1989b): K-Ar dating by peak comparison method-New technique applicable to rocks younger than 0.5 Ma. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 40, 565-579.
- Matsumoto, A. and Kobayashi, T. (1995): K-Ar age determination of late Quarternary volcanic rocks using the "mass fractionation correction procedure" -application to the Younger Ontake Volcano, central Japan. *Chem. Geol.* 125, 123-135.
- 中村俊夫・中井信之 (1988): 放射性年代測定法の基礎-加速器年代測定法に重点をおいて. *地質学論集*, 29, 83-106.
- Shimokawa, K., Imai N., Nakazato, H. and Mizuno, K. (1992): ESR dating of fossil shells in the Middle to Upper Pleistocene strata in Japan. *Quarternary Sci. Rev.* 11, 219-224.
- 鈴木和博・足立 守・山後公二・千葉弘一 (1992): 南部北上帯の氷上花崗岩および"シルル・デボン系" 碎屑岩中のモナザイト・ジルコンCHIME年代, *岩鉱*, 87, 330-349.
- Tagami, T., Hasebe, N. and Shimada. (1995): Episodic exhumation of accretionary complexes: Fission-track thermochronologic evidence from the Shimanto Belt and its vicinities, Southwest Japan. *The island arc*, 4, 209-230.
- Torigoye-Kita, N., Misawa, K., Dalrymple, G.B. and Tatsumoto, M. (1995): Further evidence for a low U/Pb source in the Moon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 2621-2632.
- 宇都浩三 (1993): 微量 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定にむけて-斜長石一粒の精密年代測定を目指す-. *地質ニュース*, no. 461, 32-38.
- TOGASHI Shigeko (1996): Recent progress in geological dating methods: introduction.

<受付: 1996年4月1日>