

(U,Th)/He年代学の現状と考古学への応用

田上高広*・山田国見**

(U,Th)/He geochronology; an overview and archeological applications

Takahiro Tagami* and Kunimi Yamada**

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

** 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

(U,Th)/He系を用いた年代測定は、人類史上最も早く提案された方法であるが、Heの拡散速度が速いため、得られた年代値が異常に小さくなることから、地質学的に広く応用されることはなかった。その後、長く忘れられた存在であったが、1980年代に入ってANUのグループが閉鎖温度の非常に低い熱年代計であることを指摘し、再び光が当たることとなった (Zeitler et al., 1987)。そして、1990年代におけるCaltechのKen Farley達の一連の研究により、最も新しい年代測定法として一躍脚光を浴び、現在では、低温領域の熱史復元に広く用いられている (例えば、Farley, 2002)。

(U,Th)/He法は、UとThの放射壊変系列において生じる α 粒子 (^4He) を利用する年代測定法である。対象試料中に微量に含まれるU,Thの放射壊変により、時間の経過とともに α 粒子が順次放出され、それが試料中に蓄積されていく。一般に、100万年より古い地質試料においては、U,Thの壊変系列において放射平衡が成立しているので、年代値 t は以下の式より求められる：

$$[^4\text{He}] = 8[^{238}\text{U}]\{\exp(\lambda_{238}t)-1\} + 7[^{235}\text{U}]\{\exp(\lambda_{235}t)-1\} + 6[^{232}\text{Th}]\{\exp(\lambda_{232}t)-1\}$$

ここで、 $[X]$ は核種Xの個数、 λ_{238} 、 λ_{235} 、 λ_{232} はそれぞれ ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th の壊変定数を表す。従って、試料中の ^4He 、 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th を定量することにより t を求めることが出来る。ただし、壊変時に α 粒子は初速度を持ち、固体中を20mm程度移動するため、アパタイトなど通常の鉱物粒では結晶表面からの損失を補正する必要がある。

(U,Th)/He法の特徴は、閉鎖温度がアパタイト

で約70°C、ジルコンで約180°Cと極めて低いことである。これにより、フィッション・トラック (FT) 法よりも更に低い温度域での熱史復元が可能となる。また、大気からの ^4He 混入が少なく、娘核種 ^4He の生成速度が大きいことから、FT年代などよりも一般に高精度の年代測定が可能である。短所は、上述した α 粒子損失の補正に加えて、100万年より若い試料では放射非平衡の影響が無視できず補正が必要となる場合があることである。また、通常の分析では年代値が得られるだけであり、FT法のようなトラック長分布を用いた確度の高い熱史逆解析は難しい。

分析手順は以下の通りである：

- (1) 分離した鉱物粒 (アパタイト、ジルコン) を実体鏡下で選別し、良好な粒子の大きさを計測した後、白金パケットに封入する。
- (2) レーザー加熱によってHeを試料より脱ガスし、希ガス質量分析装置を用いて同位体分析する。
- (3) 強酸/強アルカリにより鉱物粒を溶解し、ICP-MSでU,Thを定量する。
- (4) (1) の計測値から α 粒子損失の補正をした上で、上述の式より年代値を算出する。

(U,Th)/He法の応用分野は、主に次の2つである。

- (1) 低温領域の熱年代学：

上述したように、この方法の閉鎖温度は既存の地質年代測定法の中で最も低いので、50–200°C程度の低温域の熱史解析に大変有用である。測定に用いられる鉱物 (アパタイト

ト、ジルコンなど)がFT法と共通であるため、2つの方法は併用されることが多く、造山テクトニクスなど広い分野で数多くの成果をあげてきた。その結果、(U,Th)/He法の応用研究の90%以上が熱年代学分野で占められている。

(2) 若い試料の年代学:

上述した低い大気⁴He混入量と高い⁴He生成速度という特長から、分析感度という点では1万年程度の年代測定も十分可能である。ただし、年代測定の対象である地質(考古)イベントが、測定に用いる鉱物(アパタイト、ジルコンなど)の晶出/成長を伴う場合、U,Thの壊変系列における放射平衡が破られるため一般に大きな年代値の補正が必要となる。例えば、火山岩のジルコンをこの方法で年代測定する場合、放射壊変起源⁴Heのジルコン内での蓄積は、マグマが噴出し急冷され⁴Heの散逸が止まった時に開始される。もし、マグマ溜まりの中でジルコンが晶出してから噴出するまでに要する時間(滞留時間; Residence time)が100万年を超えれば、噴出時に放射平衡が達成されている可能性がある。しかし、通常の火山で推定される滞留時間は1万年から10万年のオーダーであるため、噴出時にジルコン中のU,Thの壊変系列は放射非平衡状態にあり、上記の年代算出式を適用できない。この場合、正確な補正のためには、U,Thの壊変系列元素の晶出時の分別とマグマ溜まり内での振る舞いに加え、滞留時間についての慎重な検討が必要となる。

本講演では、考古学への応用についてのレビューを依頼されたので、熱年代学については日本列島で最初の応用例である南部フォッサマグナ丹沢山地の上昇冷却史復元(Yamada and Tagami, 2008)を紹介するとどめた。若い試料の年代学については、放射非平衡の補正が必要でない再加熱系として、山火事(Wildfire)による基盤岩からの⁴Heの2次的脱ガスと年代値の若返りの例(Mitchell and Reiners, 2003; Reiners et al., 2007)を紹介した。また、放射非平衡状態にある試料の例として、ヴェスヴィオ火山噴出物中のガーネットの年代測定(Aciego et al., 2003)と古代の金製品と模造品の識別に関する年代学的研究(Eugster et al., 2009)を紹介した。これらの研究では、共に試料が2000年程度と非常に若いため、U,Th壊変系列の放射非平衡

状態での時間発展(同位体進化)を近似的に簡略化することにより、補正年代を算出している。ヴェスヴィオについては、既存の噴火の歴史記録(ポンペイを壊滅させた紀元79年の大噴火)並びにSanidineのAr/Ar年代値と整合的な(U,Th)/He年代値が得られたことから、補正は妥当であったと結論されている。

以上についての詳細は、近日中に出版が予定されているシンポジウム特集号での拙文を参照されたい。

文献

- Zeitler, P.K., Herczeg, A.L., McDougall, I. and Honda, M., 1987. U-Th-He dating of apatite: a potential thermochronometer. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 51, 2865-2868.
- Farley, K.A., 2002. (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications. In Porcelli D. P., Ballentine C. J. and Wieler R. (eds.) *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47, 819-44, Mineralogical Society of America, Washington D.C.
- Yamada, K. and Tagami, T., 2008. Postcollisional exhumation history of the Tanzawa Tonalite Complex, inferred from (U-Th)/He thermochronology and fission track analysis. *Journal of Geophysical Research* 113, B03402, doi: 10.1029/2007JB005368.
- Mitchell, S.G. and Reiners, P.W., 2003. Influence of wildfires on apatite and zircon (U-Yh)/He ages. *Geology*, 31, 1025-1028.
- Reiners, P.W., Thomson, S.N., McPhillips, D., Donelick, R.A. and Roering, J.J., 2007. Wildfire thermochronology and the fate and transport of apatite in hillslope and fluvial environments. *Journal of Geophysical Research*, 112, F04001, doi: 10.1029/2007JF000759.
- Aciego, S., Kennedy, B.M., DePaolo, D.J., Christensen, J.N. and Hutcheon, I., 2003. U-Th/He age of phenocrystic garnet from the 79 AD eruption of Mt. Vesuvius. *Earth and Planetary Science Letters*, 219,

209-219.

Eugster, O., Kramers, J. and Krahenbuhl, U.,
2009. Detecting forgeries among ancient
gold objects using U,Th-⁴He dating
method. *Archaeometry*, 51, 672-681.