

原位置宇宙線生成核種を用いた地表面の年代測定

—考古学分野への応用の可能性—

若狭 幸*

Landform Surfaces Dating deduced from concentration of *In Situ* Cosmogenic Radionuclides—Applications and potentials in Archaeological Sciences

Sachi A. Wakasa*

* 筑波大学生命環境系, Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

* Present address 秋田大学工学資源学研究科, Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University

はじめに

侵食速度や堆積速度, 地表面露出年代などの地表面の年代測定は, 堆積物から間接的に求められることが主であった。1990年代初頭から, 宇宙線生成核種を用いた地表面の照射年代測定法が注目されはじめた。これは, 地表面物質中の原位置宇宙線生成核種を定量することによって, 直接, 地表面の年代を推定することができる手法である。この手法は, 地形学分野をはじめとする地球環境科学分野で, 地形面の年代測定や, 地球環境変遷などを明らかにするために, ここ20数年で, 多数の研究例が蓄積されてきた。一方で, この手法を用いた古い遺跡の地形面の年代測定や石器の年代測定などの研究例が, 考古学分野においても蓄積されつつある。そこで, 本稿では, この手法の概略を説明し, 考古学分野への応用の可能性について示唆する。

宇宙線照射年代測定法

宇宙線照射年代測定法とは, 地表面物質中の元素と宇宙線が相互作用することによって生成される, 宇宙線生成核種の濃度から年代を推定する方法である (Lal, 1991; Gosse and Phillips, 2001; Bierman et al., 2002など)。核種の生成は, 地表面物質の中で, ‘その場 (*in situ*)’ で発生する (Fig. 1)。そのため, この手法で用いる核種を原位置宇宙線生成核種と呼んでいる (若狭ほか, 2004; 松四ほか, 2007)。主な核種は, ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl の4つの放射性核種と, ^3He , ^{21}Ne の2つの安定核種である (Table 1)。例え

ば, ^{10}Be と ^{26}Al は, 標的元素である酸素Oとケイ素Siからなる石英が, 宇宙線に照射されることによって生成される。いずれも放射性核種であり, それぞれの半減期は, ^{10}Be で150万年, ^{26}Al で71万年である。 ^{10}Be と ^{26}Al は, 同じ生成機構で同じ石英中に生成され, 適用可能な年代測定範囲が, 100年~500万年と広いとため, 比較的多く利用されている。

核種が生成される反応は, 主に3つあり, それぞれ (1) 中性子による核破砕反応, (2) 負電荷ミューオン捕獲反応, (3) 高エネルギーミューオン相互作用である。中性子による反応は地表面付近で最も大きく, 深度とともに指数関数的に減少する。二つのミューオンによる反応は, 地表面では中性子と比較すると小さいが (Braucher et al., 2003; Heisinger et al., 2002a, b), 地下深くなると, それぞれの寄与率は変化し, ある深度以深は, ミューオンによる寄与率の方が, 中性子による反応より多くなる。また, 核種の生成率は, 宇宙線の強度を決定する緯度と高度に依存する。高緯度, 高高度であるほど, 核種の生成が大きくなる。そのため試料採取地点ごとにおける核種の生成率を見積もる必要があり, そのスケーリング法は, Stone (2000)によって提示された計算方法が支持されている。

地表面に生成される核種濃度は, 宇宙線による照射時間が増加するに伴い, 増加する。最も単純に考えれば, 地表面の露出年代値は, 核種濃度と核種の生成率 (1年あたりの核種の生成量) から求めることができる。

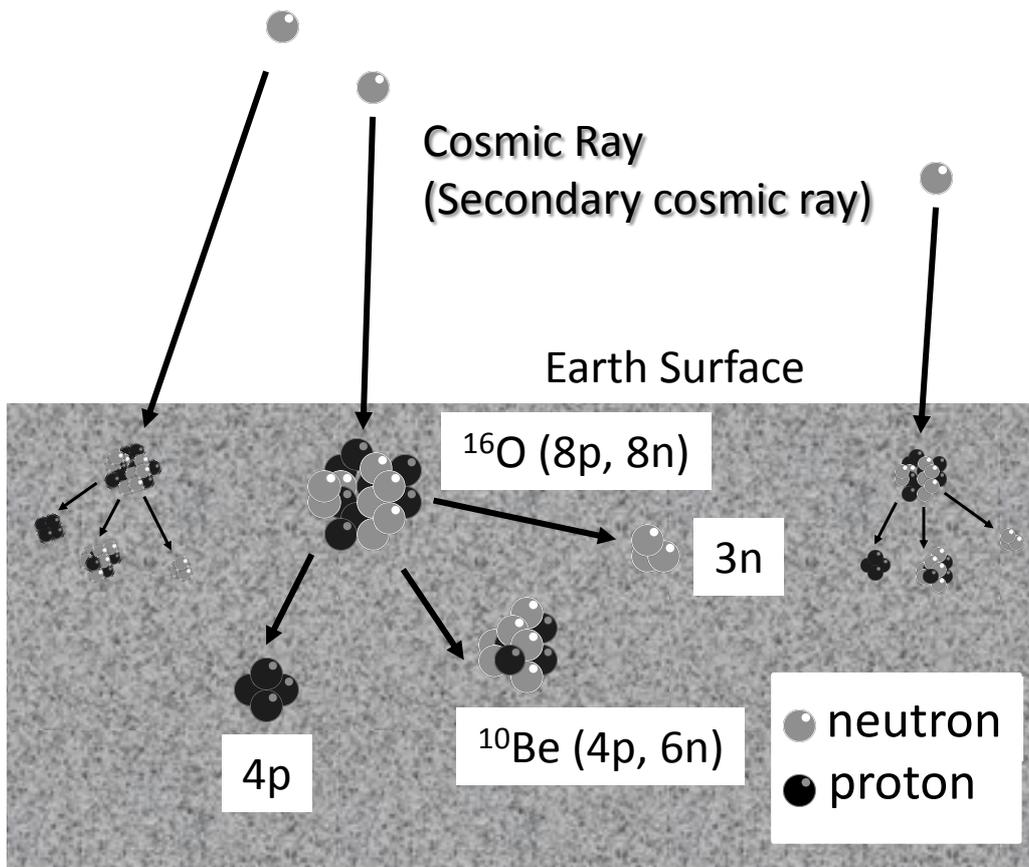


Figure 1 原位置宇宙線生成核種の生成反応（中性子による核破碎反応の例）

核種濃度の時間変化は

$$\frac{dC}{dt} = P(x) - C\lambda \quad (1)$$

から計算できる。ここで、 x は深度 (cm) , C は核種濃度 (atoms/g) , t は時間 (yr) , $P(x)$ は核種の生成率 (atoms/g/yr) , λ は核種の壊変定数 (yr^{-1}) である (半減期を $T_{1/2}$ とすると, $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$) . ここで, $t = 0$ のとき $C = C_0$ とすると, (1)式は,

$$C = C_0 e^{-\lambda t} + \frac{P(x)}{\lambda(1 - e^{-\lambda t})} \quad (2)$$

のように解くことができる。宇宙線に曝され始めた時の地表面の核種濃度がゼロであったとすると ($C_0 = 0$) , 得られた核種濃度から地表面が露出していた時間を求めることができる。

一方で、前述したように、 ^{10}Be と ^{26}Al は同一の鉱物中で同じ過程で生成される。しかし、 ^{26}Al の半減期は71万年であり、半減期が150万年の ^{10}Be より短い。そのため、一度露出した地表面が宇宙線の生成が停止されるほど厚い堆積物に覆われたとき、 ^{26}Al 濃度は、 ^{10}Be よりも相対的に減少する。この原理を用いて、地表面の埋没年代を求めることが可能となる (Granger and Muzikar, 2001) .

考古学における適用例

考古学において、宇宙線照射年代測定法は、地表面の露出年代値を求める研究から適用された。初めて適用された例は、Phillips et al. (1997) による、ポルトガルのthe Côa valleyの岩絵遺跡群の地表面露出年代値を ^{36}Cl 濃度から求めたものである。彼らは、岩絵の年代が旧石器時代であると推定している。しかし、核種濃度の初期値の考察をしていないため、いくつかの反論を受けている。また、Ivy-Ochs et al. (2001)は、エジプト

Table I 宇宙線照射年代測定法に用いる原位置宇宙線生成核種

Nuclide	Half-life	Other isotopes	Meas. method	Target elements	Target mineral	Production rate (atoms/g*yr)
¹⁰ Be	1.51 Myr	⁹ Be	AMS	O, Si	Quartz, Olivine	5
²⁶ Al	716 kyr	²⁷ Al	AMS	Si	Quartz	31
³⁶ Cl	301 kyr	³⁵ Cl, ³⁷ Cl	AMS	Ca, K, ³⁵ Cl	K-feldspar, Plagioclase, Calcite	10 (granite) 20 (limestone)
¹⁴ C	5.73 kyr	¹² C, ¹³ C	AMS	O	Quartz, calcite	16
³ He	Stable	⁴ He	Static mass spec.	O, Si, Fe	Olivine, Pyroxene, Hornblende, Garnet	120
²¹ Ne	stable	²⁰ Ne, ²² Ne	Static mass spec.	Mg, Si	Quartz, Olivine, Garnet, Clinopyroxene	20

のテーベマウンテンで発掘された、チャート石器の地表面露出年代値を、非常に信頼性の高い¹⁰Be濃度により推定した。得られた年代値は、旧石器時代の304±20 kyrと326±22 kyrであり、それまでの研究成果と調和的であった。

一方で、埋没年代値は、洞窟がいつ埋没したか、災害などによって遺跡がいつ埋没したか、ゴミ捨て場をいつ掘ったのか等を求めることが可能である。例えば、Pappu et al. (2011)は、インドのアッティランパッカム遺跡の埋没年代を、²⁶Al/¹⁰Be比と古地磁気年代からクロスチェックして、1.51±0.07Maと求めている。この値は、アッティランパッカムの年代を、更新世中期から更新世初期であると、それまでの仮説を変更させた例である。

考古学における宇宙線照射年代測定法の適用の可能性

宇宙線照射年代測定法を適用する際のメリットは、ターゲットとなる鉱物が存在していれば、どこでも測定可能であること、適用可能な年代範囲が、地表面露出年代測定で100年前～500万年前、埋没年代測定で10万年前～500万年前と広いことなどがあげられる。一方で、デメリットは、複雑な核種生成の歴史を考慮する必要があることと、極微量核種の定量である。原位置宇宙線生成核種は、極微量元素であるため、タンデム型

加速器質量分析機器を用いて測定される。原位置宇宙線生成核種が定量可能なタンデム型加速器施設は、日本国内には現在東京大学にしかなく、筑波大学において2013年現在、1台建設中である。また、岩石や鉱物試料からの前処理にも時間や技術を要する。特に、埋没年代を測定する際に必要な、¹⁰Beと²⁶Al濃度の両方を測定することが難しく、埋没年代値が得られた研究例はいまだに多くない。考古学においては、研究例のほとんどが、いまだテスト段階である。

しかしながら、宇宙線照射年代測定法を用いることによって、これまで有機物が存在せずにあきらめていた遺跡や、¹⁴C年代測定法では測定できない古い年代値の場所においても、年代測定が可能となる。このことは、考古学にとって、革新的であることは間違いないであろう。有機物がないために年代が測定されていないサイトは数えきれない。すべてのサイトにおいて宇宙線照射年代測定法が適用できるとは限らないが、いち早くテスト段階から脱却して、より多くのデータが蓄積されることが期待されている。

謝辞

安間了日本フィッシュントラック研究会会長には、第37回フィッシュントラック研究会共通テーマセッション「考古学との連携」で講演する機会を与えていただいたことを感謝いたします。

文献

- Bierman, P. R., Caffee, M. W., Davis, P. T., Marsella, K., Pavich, M., Colgan, P., Mickelson, D., Larsen, J. (2002) Rates and timing of earth surface processes from in situ-produced cosmogenic Be-10. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 50, 147–205.
- Braucher, R., Brown, E.T., Bourlès, D.L., Colin, F. (2003) In situ produced ^{10}Be measurements at great depths: implications for production rates by fast muons. *Earth and Planetary Science Letters*, 211, 251–258.
- Gosse, J. C., Phillips, F. M. (2001) Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application, *Quaternary Science Reviews*, 20, 1475–1560.
- Granger, D. E., Muzikar, P. F. (2001) Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations. *Earth and Planetary Science Letters*, 188, 269–281.
- Heisinger, B., Lal, D., Jull, A. J. T., Kubik, P., Ivy-Ochs, S., Neumaier, S., Knie, K., Lazarev, V., Nolte, E., (2002a) Production of selected cosmogenic radionuclides by muons I. Fast muons. *Earth and Planetary Science Letters*, 200, 345–355.
- Heisinger, B., Lal, D., Jull, A. J. T., Kubik, P., Ivy-Ochs, S., Knie, K., Nolte, E. (2002b) Production of selected cosmogenic radionuclides by muons 2. Capture of negative muons. *Earth and Planetary Science Letters*, 200, 357–369.
- Ivy-Ochs, S., Wüst, R., Kubik, P. W., Müller-Beck, H., Schlüchter, C. (2006) Can we use cosmogenic isotopes to date stone artifacts?. *Radiocarbon*, 43, 759-764.
- Lal, D. (1991) Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, 104, 424–439.
- Pappu, S., Gunnell, Y., Akhilesh, K., Braucher, R., Taieb, M., Demory, F., Thouveny, N. (2011) Early Pleistocene presence of Acheulian hominins in south India. *Science*, 331, 1596-1599.
- Phillips, F., Flinsch, M., Elmore, D., Sharma, P. (1997) Maximum ages of the Côa valley (Portugal) engravings measured with Chlorine-36. *Antiquity*, 71, 100-104.
- Stone, J.O. (2000) Air pressure and cosmogenic isotope production. *Journal of Geophysical Research*, 105, 23753–23759.
- 松四 雄騎, 若狭 幸, 松崎 浩之, 松倉 公憲 (2007) 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的应用. *地形*, 28, 87–107.
- 若狭 幸, 松崎 浩之, 松倉 公憲 (2004) 原位置宇宙線生成核種年代測定法: 侵食地形変化速度の解明への適用. *地形*, 25, 247–265.