

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

若狭 幸¹・松崎浩之²・松倉公憲³

Application of the Method of Terrestrial *in situ* Cosmogenic Radionuclides Dating to Geomorphology

Sachi WAKASA¹, Hiroyuki MATSUZAKI² and Yukinori MATSUKURA³

Abstract

The present paper introduces and reviews the method of terrestrial *in situ* cosmogenic radionuclides dating, which estimates the age of exposure of rock surfaces. We emphasize the value of this method in geomorphological research, in particular to clarify erosion processes and erosion rates of rock surfaces.

Key words: *dating, terrestrial in situ cosmogenic radionuclides, erosional landforms, exposure age*

1. は じ め に

侵食地形の形成年代や形成速度を求めるための年代測定は、地形変化の将来予測をする上で重要である。しかし侵食地形において地形形成プロセスの開始時間の遡知あるいは侵食プロセスの作用継続時間の見積もりは極めて難しい。なぜなら、侵食地形においては侵食された物質が除去されて、それらの地形の年代を測定する試料が得にくいからである。

このような侵食地形の年代値を知る方法の一つとして、近年、「原位置宇宙線生成核種年代測定法」が発展してきた。この方法は、地表面物質と宇宙線が反応することによって生成される原位置宇宙線生成核種 (Terrestrial *in situ* Cosmogenic Nuclides, 以下 TCN と略称する) を利用するものである (Lal and Peters, 1967)。後述するように、TCN は地表面が宇宙線に曝されている間、地表面物質中に生成されるため、その蓄積量から、地表面

2003年12月30日受付, 2004年3月17日再投稿, 2004年3月25日受理

¹ 筑波大学・生命環境科学研究科・大学院生 (日本学術振興会特別研究員)

¹ Graduate School of Life Environmental Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan

² 東京大学原子力研究総合センタータンデム加速器研究部門

² Research Center for Nuclear Science and Technology, the University of Tokyo, Japan

³ 筑波大学・生命環境科学研究科・地球環境科学専攻

³ Geoenviromental Sciences, Graduate School of Life Environmental Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan

が露出していた時間を算出することができる（例えば Lal, 1988, 1991 など）。こうして得られる年代値を TCN 年代（Terrestrial *in situ* Cosmogenic Nuclides ages）と呼び、年代を求める手法は原位置宇宙線生成核種年代測定法（Terrestrial *in situ* Cosmogenic Nuclides dating, 以下 TCN 年代測定法と呼ぶ）と呼ばれている。

TCN 年代測定法において主に用いられる核種は主として 6 種ある。安定核種である ^3He , ^{21}Ne と放射性核種である ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl である（それぞれの半減期： ^{10}Be ; 150 万年, ^{14}C ; 5730 年, ^{26}Al ; 71 万年, ^{36}Cl ; 30 万年, 例えば Gosse and Phillips, 2001）。例えば, ^{10}Be については酸素, ^{26}Al についてはケイ素などの標的物質に宇宙線が照射することにより生成されるため, 岩石および土壌中などの表面物質中に存在する石英中などで生成される。このような標的物質が存在している試料があれば, TCN 年代測定法が適用可能であるため, 宇宙線に照射される地域, また種々の地形種において絶対年代測定が可能となる。すなわち, 侵食地形において, その地形面に宇宙線に対する標的物質が存在し, かつ宇宙線に曝されるという環境条件が満たされていれば, この TCN 年代測定法が適用可能となる。

ところで, TCN 年代測定法を用いた研究例はわが国では数例しかない（青木, 2000; Aoki, 2003）。このことは TCN 濃度を測定する施設, また試料を処理する実験室が整っていないことも一つの理由として挙げられるが, TCN 年代測定法に関する情報不足も一つの理由として考えられる。そこで本稿では, TCN 年代測定法の基本概念を説明し, 侵食地形の研究におけるこの手法の重要性について触れたい。特に, ここでは主に現在国内で測定可能な ^{10}Be と ^{26}Al について紹介する。これら 2 つの核種の年代適用範囲は数千年程度から千万年程度である。

なお, 宇宙線と大気中の物質が反応して生成され地表に降下した大気生成核種（Meteoric ^{10}Be , ^{26}Al : 例えば, Arnold, 1956; Lal, 1962）が存在する。Meteoric な放射性核種を使って堆積物の年代を知る方法もあり, この方面の研究も徐々に蓄積されつつあるが（例えば, Curry and Pavich, 1996; Gu et al., 1997; Graham et al., 2001; 2003 など）、本稿ではこの方法については扱わない。本稿は地表面物質中で生成された TCN のみを対象とする。

2. 核 種 生 成 率

TCN 年代測定法では, 基本的に, 測定した宇宙線生成核種の蓄積量を, その核種の年間生成量で除することによって年代を得る。したがって, 観測地点での年間の核種生成量, すなわち核種生成率を決めることが重要である。

TCN は, 宇宙線と地表物質との相互作用によって生成するので, 核種生成率は宇宙線の強度に依存する。宇宙線の主成分は陽子であり, 地球磁場により偏向を受けるため, あるしきい値以下の運動量では地表に到達できない。この運動量のしきい値は, 赤道付近で最

も大きく、極付近で最も小さい。すなわち、高緯度地域で宇宙線の強度は大きく、そのため核種生成率も大きくなる。一方で、通過する大気の厚みが大きいほど、宇宙線フラックスの減衰は大きくなることから、低高度になるほど、宇宙線フラックスは小さくなる。すなわち、核種生成率は主として、観測地点の緯度と高度に依存する。

Lal (1991) は、1950 年頃に様々な地点で行われた中性子フラックスの実測値をもとに、核種生成率の緯度・高度依存性を調べ、さらに、シエラ・ネバダ山脈より採取された石英中の ^{10}Be および ^{26}Al の測定値 (Nishiizumi et al., 1989) を基に、さまざまな緯度 l と高度 a の組み合わせにおける宇宙線生成核種の生成率 $P(l, a)$ を求める計算式、すなわち：

$$P(l, a) = P_{\text{highlatitude}, 1013.25} \times F(l, a) \quad (1)$$

を示した。ここで、 $P_{\text{highlatitude}, 1013.25}$ は、高緯度地域で、大気圧が 1013.25 hPa (標準大気モデルにおける海拔 0 m の大気圧) である地点における核種生成量である。

なお、生成率の緯度による違いは、実際には地球磁場によるものであるから、この場合の緯度 l は、地磁気緯度のこととしている。ここに現れる、 $F(l, a)$ は、高緯度・海水準地域における生成率を 1 としたときの観測地点での TCN の生成率を与えるもので、スケーリングファクター $F(l, a)$ と呼ばれる (本稿では補正係数と仮称する)。

補正係数 $F(l, a)$ は、実際には次のように分解される：

$$F(l, a) = f_{\text{sp}} S(l, a) + (1 - f_{\text{sp}}) M(l, a) \quad (2)$$

ここで、 $S(l, a)$ は、核種生成率に対する高エネルギー宇宙線によるスポレーション (破碎反応) の寄与、 $M(l, a)$ は、低速ミューオン吸収の寄与であり、寄与の度合いが f_{sp} で示されている。

Stone (2000) では、実際に宇宙線強度に影響を与えるのは、高度ではなく、空気の厚みであることから高度 a のかわりに、地表面における大気圧 p をパラメータとした補正係数 $F(l, a)$ を提案した。これは、大気と高度の関係が標準大気からずれる南極等についても適用されるため、より汎用性があるといえる。そこでは $S(l, a)$ は：

$$S(l, p) = a(l) + b(l) \exp(-p/150 \text{ hPa}) + c(l)p + d(l)p^2 + e(l)p^3 \quad (3)$$

のように展開される (a, b, c, d, e は、 l に依存する係数)。また、 $M(l, p)$ は、

$$M(l, p) = M_{l, 1013.25} \exp((1013.25 [\text{hPa}] - p)/242 [\text{hPa}]) \quad (4)$$

のように書ける ($M_{l, 1013.25}$ は緯度 l に依存する定数である)。

Stone (2000) は、1990 年代に行われた新たな測定や、低速ミューオンの吸収による核種生成への寄与の再評価から、以下のような値を与えている。

$$P_{\text{highlatitude}, 1013.25} = 5.1 \pm 0.3 \text{ [atoms/g yr]}, f_{\text{sp}} = 0.974 \text{ (Be の場合)}$$

$$P_{\text{highlatitude}, 1013.25} = 31.1 \pm 1.9 \text{ [atoms/g yr]}, f_{\text{sp}} = 0.978 \text{ (Al の場合)}$$

なお, Lal (1991) による補正係数は, Stone (2000) の公式で,

$$P_{\text{highlatitude}, 1013.25} = 6.0 \text{ [atoms/g yr]}, f_{\text{sp}} = 0.844 \text{ (Be の場合)}$$

$$P_{\text{highlatitude}, 1013.25} = 36.7 \text{ [atoms/g yr]}, f_{\text{sp}} = 0.826 \text{ (Al の場合)}$$

としたものと同等である. すなわち, かつては, 核種生成率およびミューオンの寄与を大きめに見積もっていたことになる. Fig. 1 に, Stone (2000) の公式によって計算された, 地表に露出している石英中の ^{26}Al の生成率を示す.

Lal (1991) がその補正係数を導出するために用いた中性子のフラックスに関する観測データは, 当時の地磁気緯度によって整理されたものである. ところがその後, 実際の中性子のフラックスは, 地磁気の伏角 (Inclination) I の関数であることが分かった (Rothwell and Quenby, 1958). すなわち, Lal (1991) においては, 宇宙線強度を強引に地磁気緯度の関数にしようとしたため, 最大で 20 % の食い違いがあり, 補正係数に対しては $\pm 10\%$ の不確定性をもたらしている. Dunai (2000) は, 地球磁場の非双極子成分を考慮に入れた, すなわち I によって整理しなおした補正係数を提案している. しかしながら,

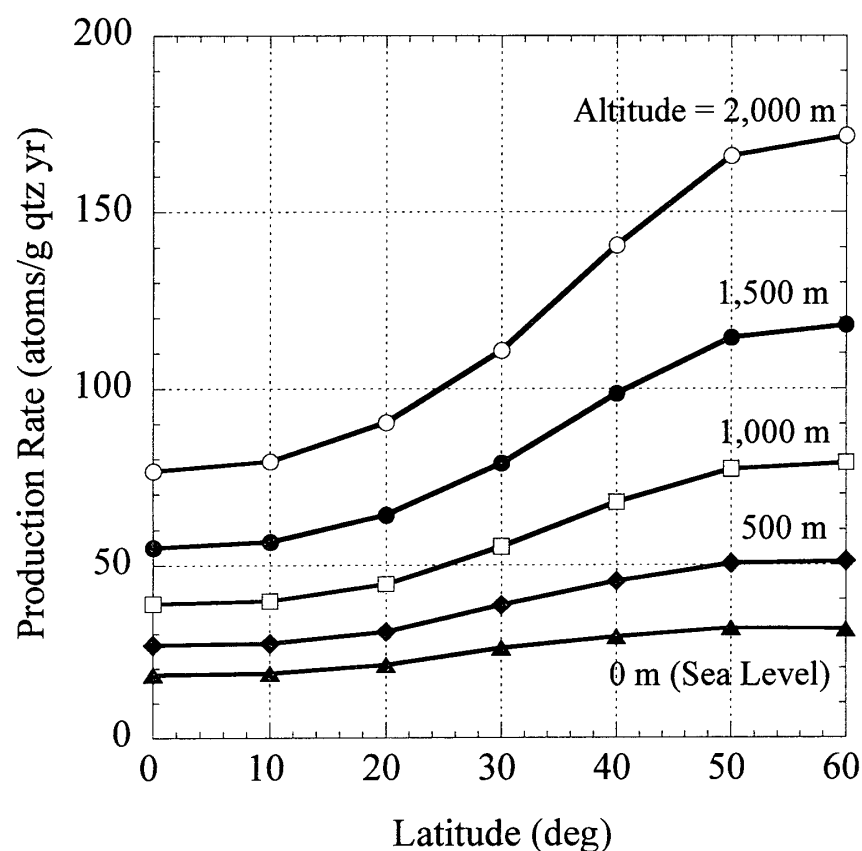


Fig. 1. Latitude, altitude dependency of the production rate of ^{26}Al in quartz exposed at the earth surface by Stone (2000).

Gosse and Phillips (2001) では、地球磁場の非双極子モーメント成分による影響は非常に小さく、長い時間スケールで考える場合には、地球磁場を双極子モーメントと見なしてよいとしている。この場合、地磁気の伏角 I と地磁気緯度 l との間には

$$\tan I = 2 \tan l \quad (5)$$

の関係が成立し、補正係数を与える関数の変数としては、 I , l のいずれを採用しても同等となる。なお、緯度 l としては地磁気緯度を用いるべきであるが、磁極は変動しており、ここ 78 万年間は平均化するとおおよそ地心であるという報告があるため (Negri et al., 1987; Acton et al., 1996; Constable and Tauxe, 1996), 測定対象のタイムスケール ($10^4 \sim 10^5$ yr) を考える上では、ほぼ現在の地理緯度を使用することができる。

地磁気緯度は双極子モーメントの軸位置によって変化する。いくつかの研究によって任意の期間、例えば 1 万年間 (Ohno and Hamano, 1992) における地軸位置の平均値が計算されているが、TCN 生成率のスケーリングに用いることに十分なメッシュのデータは得られていない。また、Gosse and Phillips (2001) によれば 1 万年より大きい露出年代では磁気北極の位置を見積もる手法が確立しないため軸位置による効果は評価できないとしているが、地磁気緯度の変化による TCN 生成率への影響は場所によって大きいところであれば 15 % であると示されており、今後の手法の確立の重要性が述べられている。しかし、Ohno and Hamano (1992) の計算によると過去 1 万年間で見ると地軸の位置はほとんどばらつきがなく、地磁気緯度と地理緯度は近い値をとるため、どちらの値を用いても TCN 生成率に差異はないが、現在の地磁気緯度のみを直接 TCN 生成率の計算に使うと大きくずれる。加えて、TCN 生成率の計算において地軸位置の変化よりも地磁気強度の変化の方がより影響があるため、地理緯度を使用することができる。

この他にも、Dunne et al. (1999) は、地表面の傾斜角や方向、また障害物の影響を吟味しており、傾斜角 45° 以下では、斜面の効果はあまりない ($< 20\%$) ことが示されている。

このように、観測地点における生成率を正確に見積もるためには、検討すべき様々な要素がある。地球磁場同様、宇宙線強度そのものも長い時間スケールで見ると変動している可能性がある。これらすべてのことを勘案すると、TCN 年代測定法によって得られた絶対年代値の誤差を 10 % 以下とすることは現在のところ困難である。しかし、同一領域内における複数の観測地点の比較など、相対的な年代については、これらの不確定分がキャンセルされて、詳細な考察が可能となる場合が多い。

3. 原位置宇宙線生成核種濃度測定

TCN は長寿命放射性核種であり、かつ極微量成分である。そのため、核種が崩壊することにより発する β 線や γ 線を計測するような従来の放射性核種定量装置では測定不可能であり、核種そのものの数を計数するタンデム型加速器による AMS 分析 (Accelerator Mass

Spectrometry Analysis, 加速器質量分析) により測定される (Elmore and Phillips, 1987).

現在日本では, AMS 分析による年代測定装置が 9 台稼動中であるが, 大部分は ^{14}C -AMS 専用機であり, ^{10}Be , ^{26}Al 両方の核種を測定できる装置は東京大学原子力研究総合センターのタンデム型加速器 (MALT) のみである (Kobayashi et al., 1997; 小林, 1998; Matsuzaki et al., 2004).

AMS 分析をする際, 試料をイオン源でイオン化するのに適した形に処理する必要がある. 前述したように, AMS 分析では核種そのものを計数するため, 採取した試料から測定核種そのものを抽出して測定試料とする. ただし, AMS 分析ではそれぞれの核種について安定核種との比, すなわち $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比と $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比を測定する. ベリリウムについては, 石英中に天然のベリリウムは存在しないので, ^9Be 原子吸光分析用試薬をキャリアーとして添加する. アルミニウムについては石英中に ^{27}Al が存在するため, 原子吸光分析や ICP-AES 分析などを用いて測定する. AMS 分析の後, それぞれの安定核種との比と安定核種の量を用いて放射性核種の量を計算する.

化学処理のとき重要な点は, (1) 大気中で生成され降下した meteoric ^{10}Be と ^{26}Al を除去すること, (2) 安定核種である ^{27}Al 濃度を低くすること, (3) AMS 分析の際妨害となる同重原子や同重分子を除去すること, である. たとえば, meteoric ^{10}Be の 1 年あたりの降下速度は $1.2 \times 10^6 \text{ atoms/cm}^2 \text{ yr}$ (Monaghan et al., 1985/86) であり, TCN ^{10}Be の 1 年あたりの生成率 5.11 atoms/g qtz (sea level, high latitude; Stone, 2000) より 10^6 オーダーも多いため, もし meteoric ^{10}Be が存在していると, TCN ^{10}Be は検出不可能になる. また, 安定核種である ^{27}Al 濃度が高すぎると $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比が小さくなり, AMS 分析における検出限界を下回ってしまう. MALT における検出限界は, $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比で 7×10^{-15} , $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 比で 1×10^{-15} である. $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ の場合は, キャリアーの量で同位対比を調節できるが, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の場合は, ^{27}Al 比を多く含む鉱物に対しては, 原理的に TCN 年代法を適用することができない場合もある. また, ^{10}Be -AMS においては, ^{10}B (ホウ素-10) は, 重大な妨害同重体であるが, ホウ素は発生源が明らかにできない上, 自然界に多量に存在しているため, 十分に除去するのは困難であり, ^{10}Be -AMS における検出限界を制限する大きな要因となっている.

^{10}Be , ^{26}Al の生成は, 主に, 中性子やミューオンとケイ素および酸素との核反応による (それぞれ $^{16}\text{O} (n, 4p3n) ^{10}\text{Be}$, $^{16}\text{O} (\mu^-, \alpha pn) ^{10}\text{Be}$, $^{28}\text{Si} (n, p2n) ^{26}\text{Al}$, $^{28}\text{Si} (\mu^-, 2n) ^{26}\text{Al}$). そのため, 石英を標的鉱物として岩石から抽出し, さらに石英から各核種を抽出し, 測定試料とすることが多い (例えば Nishiizumi et al., 1989; Lal, 1991, Kohl and Nishiizumi, 1992 など). 石英は安定した鉱物組成を持ち, 酸に強いことから, 他の鉱物と分離することが容易である. また, 石英を用いることにより, 同一試料から ^{10}Be と ^{26}Al の二つの核種を同時に抽出することが可能である.

測定に必要な試料の量は, 岩質, 測器の精度, 露出時間などに依存するため, 一概には決められない. 対象試料の石英の含有率, 対象とするタイムスケールなどを基に決定され

る．MALT における例を述べると， $10^4 \sim 10^5$ yr オーダーの花崗岩の露出年代を知るためには，100 g 程度の試料があれば十分である．

化学処理法については，もっとも標準的な Kohl and Nishiizumi (1992) の方法を紹介する (Fig. 2)．岩石から石英を抽出する時は，採取した試料中に存在する石英鉱物の粒径を調べ，その粒径になるまで試料を粉砕し，さらに篩を用いて粒径を均一にする．その後，塩酸を用いて有機物・鉄鉱物を溶解・除去し，1 % のフッ化水素酸・硝酸を加えることにより石英以外の鉱物を除去する．このとき，meteoric ^{10}Be と ^{27}Al が除去される．

また，石英から各核種を抽出するには，精製した石英を硝酸・フッ化水素酸・過塩素酸



Fig. 2. Steps of TCN dating.

を用いて分解し、陰・陽イオン交換によってベリリウムとアルミニウムを溶離する。その後、アンモニア水を用いて精製し、それを電気炉で加熱することによりそれぞれの酸化物とする。この酸化物をタンデム型加速器イオン源に装填し、計測をする。

AMS分析における測定精度は、核種の量が多ければ（核種は検出器によってカウントとして計数される）、その統計精度で決まるが、TCN年代測定法の場合、 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ と $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ の値は両者ともに比較的小さくなるため、統計精度は、任意数の測定サイクルにおける核種の量が1,000カウント程度のとき $\pm 3\%$ （ 1σ ）程度である。さらに、 ^{10}Be -AMSの場合は、同重体 ^{10}B の影響によるバックグラウンドを差し引く際に大きな誤差が入るため、最終的には $\pm 5\%$ （ 1σ ）以上の誤差が生ずることが多い。

4. 露出年代と侵食速度の計算

第2章では、地表面における宇宙線生成核種の生成率(P_0)を議論した。実際には宇宙線は地表物質内部にも侵入する。一般に、地表物質中での深さ方向の生成率 $P(x)$ は、以下のよう表される：

$$P(x) = P_0 e^{-\rho x / \Lambda} \quad (6)$$

ここで ρ は地表物質の密度であり、 Λ は減衰長、 x は地表面からの深さである。宇宙線生成核種の生成量(N 、この場合、岩石単位質量あたりの原子数など、濃度に比例する量である)の変化は、次式に従う：

$$\frac{dN}{dt} = -N\lambda + P \quad (7)$$

λ は核種の壊変定数($\ln 2$ を半減期で割ったもの)であり、 ^{10}Be の場合は $4.621 \times 10^{-7}/\text{yrs}$ であり、 ^{26}Al の場合は $9.763 \times 10^{-7}/\text{yrs}$ である。

(6)、(7)式から、地表面の露出年代や侵食速度を解釈する方法がLal (1988; 1991)などによって提案されている。以下に一般的に用いられる方法について説明する。

4.1. 露出年代

地表の侵食が全くなく、生成率 P が一定の場合、 $t = 0$ （時刻0）での核種の生成量を N_0 とすると、(7)式は、

$$N(t) = \frac{P}{\lambda} + (N_0 - \frac{P}{\lambda})e^{-\lambda t} \quad (8)$$

と解ける。さらに、 $t = 0$ の時の核種量(N_0)がゼロであるとする、(8)式は、

$$N(t) = \frac{P}{\lambda}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (9)$$

と解けて、地表面物質の核種生成量 N を測定することにより、 t の値、すなわち地表面露出時間を導くことができる。

4.2. 侵食速度

表面が、一定速度で侵食されていく場合を考える． $t = 0$ において、深さ x_0 のところの核種生成量が N_0 である点の核種生成量の時間変化は、(6)，(7)式をあわせて次のようになる．

$$\frac{dN}{dt} = -N\lambda + P_0 e^{-\mu x} \quad (10)$$

ただし、 ε を表面の侵食速度として、

$$x = x_0 - \varepsilon t \quad (11)$$

である．(10)について、 $N = N' e^{-\mu x}$ とおくと解析的に解けて、

$$N = N_0 e^{-\lambda t} + \frac{P_0}{\lambda + \mu \varepsilon} e^{-\mu x} (1 - e^{-(\lambda + \mu \varepsilon)t}) \quad (12)$$

となる．今、地表面が常に一定の速度で削られているとき、表面に露出している場所での核種生成量は各時刻でどのように変化していくのであろうか． $t = 0$ において、すべての深さ x_0 で核種量が0のとき、すなわち、式(12)において、 $N_0 = 0$ 、 $x = 0$ とにおいて、

$$N = \frac{P_0}{\lambda + \mu \varepsilon} (1 - e^{-(\lambda + \mu \varepsilon)t}) \quad (13)$$

を得る．さらにこのとき、 $\lambda + \mu \varepsilon \ll t$ のとき、

$$\varepsilon = \frac{1}{\mu} \left[\frac{P}{N} - \lambda \right] \quad (14)$$

となり、侵食速度を導くことができる．

4.3. 二つの核種を用いた解釈法

(9)式と(14)式はFig. 3のように核種濃度と時間の変化のグラフとして表される．Fig. 3は ^{26}Al についてと ^{10}Be についてそれぞれの生成率の変化グラフである．それぞれ実線で描かれた曲線が(9)式から得られる地表面侵食が全くない場合の核種濃度の時間変化であり、それぞれの破線は(14)式に任意の侵食速度の値を与えることによって得られるものである．

次にLal (1991)に従い、横軸に ^{10}Be 生成量、縦軸に $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 比を取ったグラフ上で考える．Fig. 3のそれぞれの侵食速度の曲線から比を取ったものがFig. 4の各曲線になる．侵食がない場合の地表における核種の生成量比の変化は、Fig. 4におけるno erosion曲線のようになる．Fig. 3を見れば明らかなように、ある一定時間以上経つと、生成量と壊変量がつりあって、定常状態となる．この場合の核種の存在量は式(9)において、 $t \rightarrow \infty$ とにおいて、 $N = P/\lambda$ となる．したがって、

$$\frac{{}^{26}\text{Al}}{{}^{10}\text{Be}} = \frac{P_{\text{Al}} \lambda_{\text{Be}}}{P_{\text{Be}} \lambda_{\text{Al}}} \quad (15)$$

となる．この点がno erosion曲線における右下の終点である．

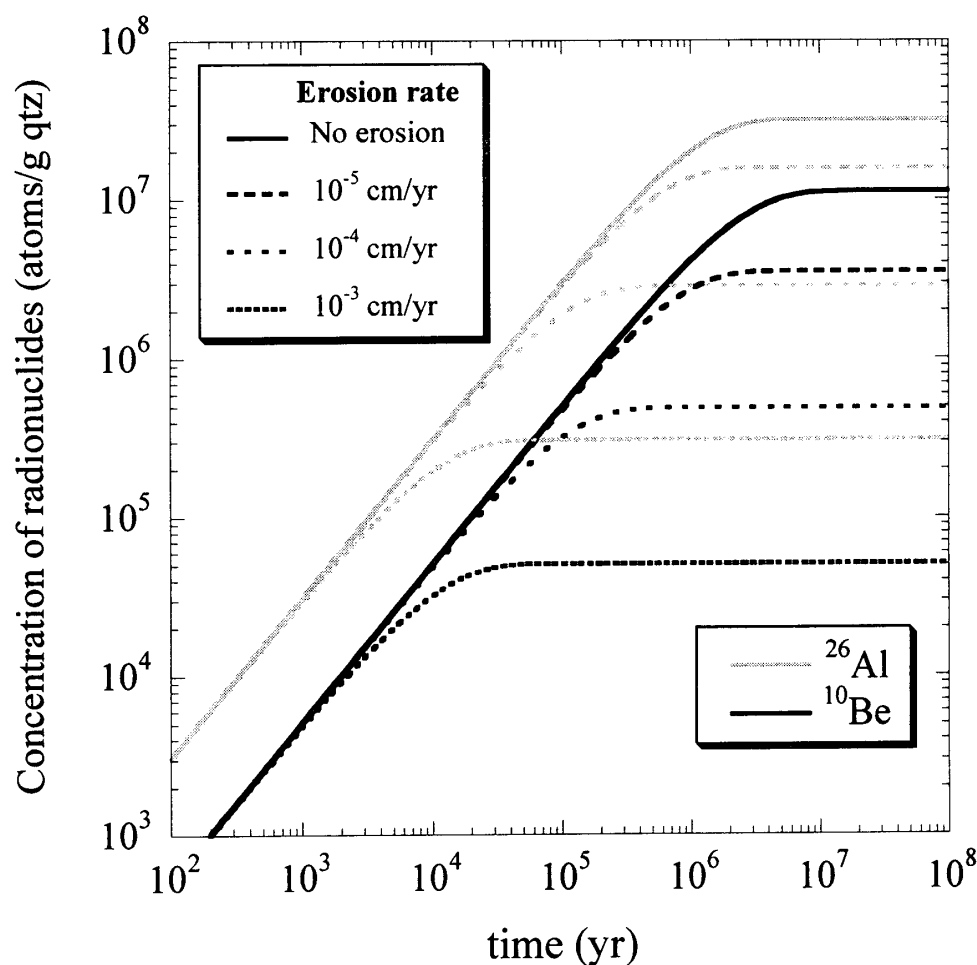


Fig. 3. Production of ^{10}Be and ^{26}Al (production rate (Stone, 2000); $P_{^{10}\text{Be}} = 5.1$ atoms/g qtz yr, $P_{^{26}\text{Al}} = 31.1$ atoms/g qtz yr). Solid lines display radionuclides production in case of no erosion at a surface. Dashed lines indicate radionuclides production that a surface erode with rates of 10^3 , 10^4 , 10^5 cm/yr.

次に、一定速度で侵食する場合は、no erosion 曲線と同様に Fig. 4 の各曲線の比を取って、Fig. 4 の破線になる。実際、核種の生成量は、式 (13) に従って変化するわけであるが、ここで $t \rightarrow \infty$ とおくと、ある一定の値 $N = P_0 / (\lambda + \mu \epsilon)$ に近づいていくことがわかる。その点が、Fig. 4 における各侵食速度についてのプロットの終点である (Steady state erosion end points)。

Fig. 4 において各侵食速度についての曲線の終点を結ぶ。このとき、no erosion 曲線と終点を結んだ曲線の 2 つの曲線は閉じた領域を作る。この領域は ‘定常侵食域’ (Steady state erosion island) と呼ばれる。計算上で得られる核種の生成量は、必ずこの領域に入る。実測データの解釈は、まずこの領域と実測データを比較してやることから始めるのが一つの方法である。二つの核種の生成量が no erosion 曲線より上方または右側に落ちることはあり得ない。ただし、この領域の左下側に来ることはあり得る。その場合には、二段階露出や埋没等のモデルによってデータを説明することができる。

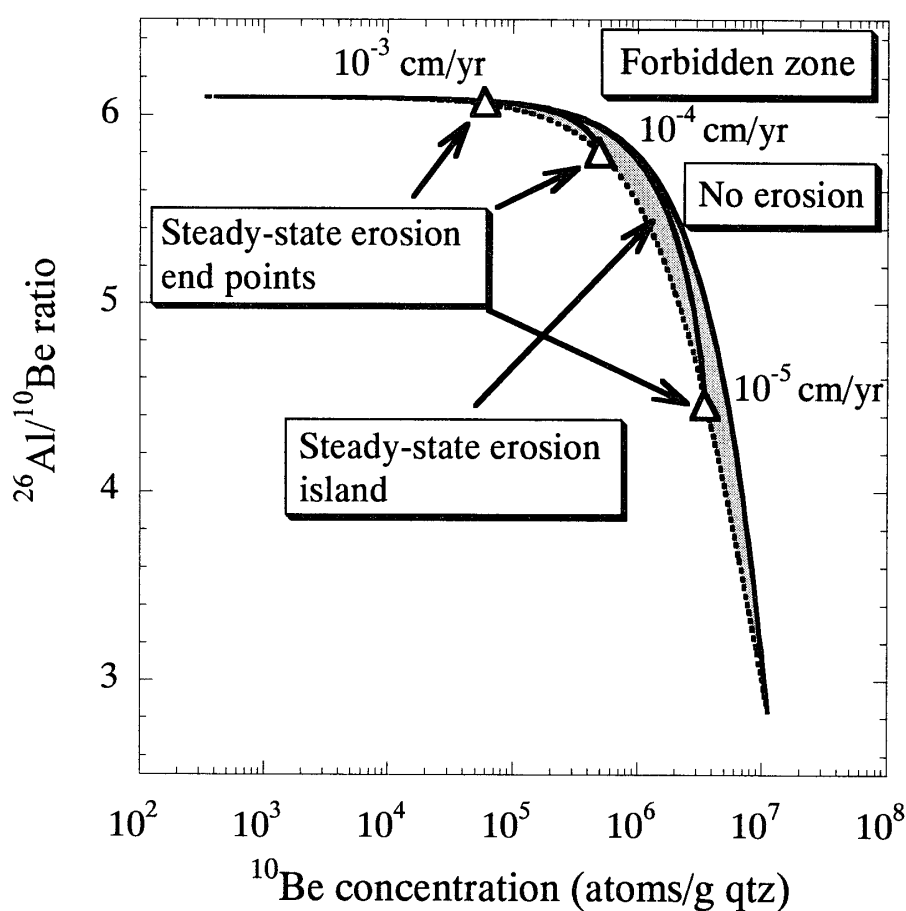


Fig. 4. The theoretically calculated build up of the ratios of ^{10}Be and ^{26}Al are plotted as a function of ^{10}Be concentration for a steady-state irradiation history, with and without erosion, for unit nuclide production rates (production rate; $P^{10}_{\text{Be}} = 5.1$ atoms/g qtz yr, $P^{26}_{\text{Al}} = 31.1$ atoms/g qtz yr, Stone, 2000). The upper curve is traced by irradiating a surface of no erosion. The lower curve shows endpoints by steady-state surface erosion with different erosion rates.

5. 地形学における有用性

^{10}Be と ^{26}Al の両者の濃度を計測し、(1) 露出年代だけではなく、(2) 侵食速度や (3) 侵食プロセスを議論する研究が 1990 年前後から急速に増加しつつある (Bierman, 1994). このような例を Table 1 にまとめた.

1990 年前後においては、前述の (1) 地表面露出年代と (2) 侵食速度を求めることが主流であった. 核種生成率を求めるために年代既知試料として氷河による擦痕のある基盤岩石の核種濃度を測定した例 (Nishiizumi et al. 1989) が注目されたためである. 同じように年代既知の溶岩噴出年代値と TCN 年代値の関係から核種生成率を求めた例もある (Nishiizumi et al., 1990). これらは核種生成率を求めることがもともとの目的であったが、他の方法による年代値よりも TCN 年代値が一般に低く見積もられたことから、この手法が、地表面で生じる種々のプロセス、例えば侵食や埋没などについての情報を TCN

Table 1. Application of terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al dating.

研究対象	研究例
花崗岩 inselberg・tor	Bierman and Caffee 2002; Bierman et al. 1999; Bierman and Turner 1995; Heimsath et al. 2001a; Nishiizumi et al. 1991a; Small et al. 1997; Stroeve et al. 2002; Wakasa et al. 2004
Boulder	Granger et al. 2001a; Seong 2002; Vance et al. 2003
岩石の侵食速度	Gillespie and Bierman 1995; Small et al. 1997; Heimsath et al. 2001a; Nishiizumi et al. 1986
氷食岩盤の露出年代	Nishiizumi et al. 1989; 1991a; Brown et al. 1992
氷河の消長	Brook et al. 1995a; 1996; Fabel et al. 2002; Lal et al. 1987;
モレーン, テイル	Brown et al. 1991; Brook et al. 1995b; Ivy-Ochs et al. 1999; Schäfer et al. 2002
河川の下刻, 遷移点の後退	Granger et al. 1997; 2001b; Leland et al. 1998; Seidl et al. 1997; Schildgen et al. 2002
段丘面年代	Anderson et al. 1996; Granger and Smith 2000; Hancock et al. 1999; Hetzel et al. 2002; Repka et al. 1997; Perg et al. 2001
浜提	Matmon et al. 2003
地すべり	Kubik et al. 1998
アロヨへの堆積物供給	Clapp et al. 2001
escarpment の後退, 侵食	Cockburn et al. 2000; Riebe et al. 2000
土壌生成	Bierman and Steig 1996; Brown et al. 1994, Braucher et al. 2000; Clapp et al. 2002; Heimsath et al. 1997; 1999; 2000; 2001b; 2001c; Small et al. 1999;
土壌移動	Heimsath et al. 2000; Nichols et al. 2002; Perg et al. 2003
埋没速度	Albrecht et al. 1993; Granger and Muzikar 2001
隕石衝突のクレーター	Nishiizumi et al. 1991b;
断層崖の形成・地震再来周期	Ritz et al. 1995; 2003; Bierman et al. 1995; Brown et al. 2002; Van Der Woerd et al. 2002
溶岩	Nishiizumi et al. 1990
総括的論文	Lal 1988; Nishiizumi et al. 1993; Bierman 1994; Cerling and Craig 1994; Gosse and Phillips 2001
考古学	Partridge et al. 2003

濃度から得られる可能性を導き出した。そのため、1990 年代前半は核種生成率をはじめ、地表面露出年代、侵食速度、埋没速度などを求める試みが多くなった。これらの年代値・速度値はこれまで全く議論されることがなかった値であり、それぞれの論文は地形学の分野に強いインパクトを与えるものであった。たとえば、Bierman and Caffee (2002) では、これまで測定したオーストラリアの 10 個の花崗岩地域に存在する 61 個の露岩における地表面露出年代値と侵食速度の値を示している。

さらに 1995 年以降は、単に年代値や侵食年代値を得るだけでなく、前述の (3) 地形プロセス、すなわち TCN 年代値を用いた様々な地形発達モデル、地表面の歴史の推定を試みる研究が始まった。たとえば、Small et al. (1997) は、4 つの山地の山頂部に露出する基盤岩石の TCN 濃度を求めている。それまでの研究では一度の露出イベントの後の地表面露出年代値や侵食速度年代値を計算していたが、彼らは、複数回の露出イベントの発生を仮定し、間欠的な侵食のそれぞれの速度について検討した。また、Heimsath et al.

(1997; 1999; 2000; 2001a; 2001b; 2001c) による一連の研究では、これまでの伝統的な地形学研究法と TCN 年代測定法を組み合わせている。例えば Heimsath et al. (2001c) ではアメリカ・オレゴン州のクーズベイ地域の流域を調査地域として TCN 年代測定法を適用した。この地域は水文地形学、斜面地形学の分野で活発に観測されてきた地域である（例えば、Dietrich and Dunne, 1978; Dietrich et al., 1986; Reneau and Dietrich, 1990, 1991; Montgomery et al., 1997; Roering et al., 1999 など）。彼らはこの流域において 100 個のピットから、深度ごとに土壌および基岩の風化層を採取し、TCN 濃度を測定し、土壌生成率および土壌の移動速度を求めた。その結果、TCN 濃度から得られた土壌生成率は深さとともに減衰することがわかった。ここでの結果は他の研究地域（例えば、北カリフォルニア (Heimsath et al., 1997, 1999), 南東オーストラリア (Heimsath et al., 2000)) において TCN 年代測定法を適用させても成り立つことを報告している。さらにこれまで土壌の生成速度や移動プロセスについて、斜面の屈曲率と土壌生成率の関係、侵食土砂量や土壌深度などの調査結果を用いて複雑な回帰式を求め相関関係を議論していたが、TCN 濃度と土壌深度の関係は二つだけで相関が得られ、さらに時間軸まで設けることができると述べている。

このように最近の TCN 年代測定法を用いた研究は、地形プロセスの検討をするために適用されることが多くなっており、またその研究対象地域も流域スケールや山地スケールにまで広がってきている。他には Van Der Woerd et al. (2002) による最終氷期からの氷河の消長、断層の移動速度を求めることにより、断層崖の形成過程について求めた例もあげられる。このような TCN 濃度による結果は、直接地形プロセスを説明するものではないが、これまで行われてきた地形学的研究、例えば斜面の安定解析、崩壊地観測、土壌クリープ観測や水文観測などとの組み合わせにより、それらの解析に時間軸を入れて、より高次の解析が可能になることを示唆している。

もちろん、この方法にはまだまだ問題点も多い。たとえば、雪・氷・風化物・堆積物の遮蔽の効果、すでに岩盤が宇宙線の照射を受けていた可能性の問題、照射を受けた岩石が侵食で除去される問題等々、得られた核種濃度からの年代値の算出や解釈も簡単ではない。またこの手法は石英を含む岩石が主に測定対象になっており、石英岩脈でもない限り、限定された岩石にしか適用できないし、鉱物粒径の小さい岩石（現在のところ $\phi 300 \mu\text{m}$ 以下）については化学処理が困難であるという制約もある。また、タンデム型加速器の設備やそれに対する化学処理施設が少ないという制約もある。さらに東大タンデムにおいても測定限界に近い値を測っているため、化学処理もしくは加速器質量分析における核種の検出を十分に行わなければならない。しかし、そのような問題はあるにせよ、TCN 年代測定法における測定対象時間は、放射性炭素年代測定法などに比較してかなり広い（数千年程度から千万年程度）という長所もあり、今後この手法が地形学、とくに侵食地形の研究に大きく貢献するであろうことが期待される。現在、世界では Table 1 に示したように、種々の地形、あるいは地形プロセスに、この方法が適用されつつあり、さらに日

夜新しい地形への適用が模索されている。それに対し、日本では唯一、青木 (2000a), Aoki (2003) がモレーン構成礫, till の生成年代を知るために、青木 (2000b) では北アルプス笠ヶ岳付近の氷食谷に分布する氷食岩盤の露出年代を見積もるために ^{10}Be 濃度を測定することによる TCN 年代測定例があるだけである。しかし、形成年代が不明な地形は日本にも数多いはずであり、それらの研究にこの手法が適用されることが望まれる。

6. ま と め

本稿では、侵食地形における絶対年代測定法として最近 10 年間に急速に発達してきた原位置宇宙線生成核種年代測定法について、(1) その手法の基本的概念と、(2) 試料採取から試料の前処理を含めた加速器質量分析法による核種濃度測定法、(3) ^{10}Be ・ ^{26}Al の両者の計測値を用いた露出年代・侵食速度の算定や侵食プロセスの推定などに関する具体的な適用例について述べた。そして、この手法がこれまで未知であった侵食面の地形編年を可能にすることから、地形学にとって革新的な手法となりうることを指摘した。今後、わが国においても TCN 年代測定法を用いて多くの研究がなされ、侵食速度や侵食プロセスの解明などに関する研究が大いに進展することが期待される。

謝 辞

本研究の一部に、若狭に与えられた日本学術振興会特別研究員奨励費を使用した。

引 用 文 献

- Acton, G. D., Petronotis, K. E., Cape, C. D., Rotto Ilg, S., Gordon, R. G. and Bryan, P. C. (1996) A test of the geocentric axial dipole hypothesis from an analysis of the central marine magnetic anomaly: *Earth and Planetary Science Letters*, **144**, 337-346.
- Albrecht, A., Herzog, G. F., Klein, J., Dezfouly-Arjomandy, B. and Goff, F. (1993) Quaternary erosion and cosmic-ray-erosion history derived from ^{10}Be and ^{26}Al produced *in situ*: An example from Pajarito plateau, Valles caldera region: *Geology*, **21**, 551-554.
- Anderson, R. S., Repka, J. L. and Dick, G. S. (1996) Explicit treatment of inheritance in dating depositional surfaces using *in situ* ^{10}Be and ^{26}Al : *Geology*, **24**, 47-51.
- Arnold, J. R. (1956) Beryllium-10 produced by cosmic rays: *Science*, **124**, 584-585.
- 青木賢人 (2000a) ^{10}Be 露出年代法を用いた氷成堆積物の形成年代の測定—木曾山脈北部、千畳敷カール・濃ヶ池カールの事例—: 第四紀研究, **39**, 189-198.
- 青木賢人 (2000b) 氷河地形編年に関わる新しい年代測定法: 日本地理学会発表要旨集, **57**, 132-133.
- Aoki, T. (2003) Younger Dryas glacial advances in Japan dated with *in situ* produced cosmogenic radionuclides: *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, **24**, 27-39.
- Bierman, P. R. (1994) Using *in situ* cosmogenic isotopes to estimate rates of landscape evolution: A review from the geomorphic perspective: *Journal of Geophysical Research*, **99**, 13885-13896.
- Bierman, P. R., Gillespie, A. R. and Caffee, M. W. (1995) Cosmogenic ages for earthquake recurrence intervals and debris flow fan deposition, Owens Valley, California: *Science*, **270**, 447-

450.

- Bierman, P. R. and Turner, J. (1995) ^{10}Be and ^{26}Al evidence for exceptionally low rates of Australian bedrock erosion and the likely existence of pre-Pleistocene landscapes: *Quaternary Research*, **44**, 378-382.
- Bierman, P. and Steig, E. J. (1996) Estimating rates of denudation using cosmogenic isotope abundances in sediment: *Earth Surface Processes and Landforms*, **21**, 125-139.
- Bierman, P. R., Marsella, K. A., Patterson, C. P., Davis, T. and Caffee, M. (1999) Mid-Pleistocene cosmogenic minimum-age limits for Wisconsinan glacial surfaces in southwestern Minnesota and southern Baffin Island: a multiple nuclide approach: *Geomorphology*, **27**, 25-39.
- Bierman, P. R. and Caffee, M. (2002) Cosmogenic exposure and erosion history of Australian bedrock landforms: *Geological Society of America Bulletin*, **114**, 787-803.
- Braucher, R., Bourlés, D. L., Brown, E. T., Colin, F., Muller, J.-P., Braun, J.-J., Delaune, M., Edou Minko, A., Lesouet, C., Raisbeck, G. M. and Yiou, F. (2000) Application of *in situ*-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al to the study of lateritic soil development in tropical forest: theory and examples from Cameroon and Gabon: *Chemical Geology*, **170**, 95-111.
- Brook, E. J., Kurz, M. D., Ackert, R. P., Raisbeck, G. and Yiou, F. (1995a) Cosmogenic nuclide exposure ages and glacial history of late Quaternary Ross Sea drift in McMurdo Sound, Antarctica: *Earth and Planetary Science Letters*, **131**, 41-56.
- Brook, E. J., Brown, E. T., Kurz, M. D., Ackert, R. P., Raisbeck, G. M. and Yiou, F. (1995). Constrains on age, erosion, and uplift of Neogene glacial deposit in the Transantarctic-mountains determined from *in-situ* cosmogenic Be-10 and Al-26: *Geology*, **23**, 1063-1066.
- Brook, E. J., Nesje, A., Lehman, S. J., Raisbeck, G. M. and Yiou, F. (1996) Cosmogenic nuclide exposure ages along a vertical transect in western Norway: Implications for the height of the Fennoscandian ice sheet: *Geology*, **24**, 207-210.
- Brown, E. T., Edmond, J. M., Raisbeck, G. M., Yiou, F., Kurz, M. D. and Brook, E. J. (1991) Examination of surface exposure ages of Antarctic moraines using *in situ* produced ^{10}Be and ^{26}Al : *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, 2269-2283.
- Brown, E. T., Brook, E. J., Raisbeck, G. M., Yiou, F. and Kurz, M. D. (1992). Effective attenuation lengths of cosmic rays producing ^{10}Be and ^{26}Al in quartz: implications for exposure age dating: *Geophysical Research Letters*, **19**, 369-372.
- Brown, E. T., Bourles, D. L., Colin, F., Sanfo, Z., Raisbeck, G. M. and Yiou, F. (1994) The development of iron crust lateritic systems in Burkina Faso, West Africa examined with *in-situ*-produced cosmogenic nuclides: *Earth and Planetary Science Letters*, **124**, 19-33.
- Brown, E. T., Bendick, R., Bourles, D. L., Gaur, V., Molnar, P., Raisbeck, G. M. and Yiou, F. (2002) Slip rates of the Karakorum Fault, Ladakh, India, determined using cosmic ray exposure dating of debris flows and moraines: *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **107** (B9), 2192.
- Cerling, T. E. and Craig, H. (1994) Geomorphology and *in-situ* cosmogenic isotopes: *Annual Review of Earth and Planetary Science*, **22**, 273-317.
- Clapp, E. M., Bierman, P. R., Nichols, K., K., Pavich, M. and Caffee, M. (2001) Rates of sediment supply to arroyos from upland erosion determined using *in situ*-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al : *Quaternary Research*, **55**, 235-245.
- Clapp, E. M., Bierman, P. R. and Caffee, M. (2002) Using ^{10}Be and ^{26}Al to determine sediment generation rates and identify sediment source areas in an arid region drainage basin: *Geomorphology*, **45**, 89-104.
- Cockburn, H. A. P., Brown, R. W., Summerfield, M. A. and Seidl, M. A. (2000) Quantifying passive margin denudation and landscape development using a combined fission-track thermochronology and cosmogenic isotope analysis approach: *Earth and Planetary Science Letters*, **179**, 429-435.
- Constable, C. and Tauxe, L. (1996) Towards absolute calibration of sedimentary paleointensity records: *Earth and Planetary Science Letters*, **143**, 269-274.
- Curry, B. B. and Pavich, M. J. (1996) Absence of glaciation in Illinois during marine isotope stage

- 3 trough 5 : Quaternary Research, **46**, 19-26.
- Dietrich, W. E. and Dunne, T. (1978) Sediment budget for a small catchment in mountainous terrain: Zeitschrift für Geomorphologie N. F. **29**, 191-206.
- Dietrich, W. E., Wilson, C. J. and Reneau, S. L. (1986) Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes: Abrahams AD (ed.) *Hillslope Processes*. Binghamton Symposia in Geomorphology, International Series. Allen and Unwin, 361-388.
- Dunai, T. J. (2000) Scaling factors for production rates of *in situ* produced cosmogenic nuclides: A criticalreevaluation: Earth Planetary Science Letters, **176**, 157-169.
- Dunne, J., Elmore, D. and Muzikar, P. (1999) Scaling factors for the rates of production of cosmogenic nuclides for geometric shielding and attenuation at depth on sloped surface: Geomorphology, **27**, 3-11.
- Elmore, D. and Phillips, F. (1987) Accelerator mass spectrometry for measurement of long-lived radioisotopes: Science, **236**, 543-550.
- Fabel, D., Stroeve, A. P., Harbor, J., Kleman, J., Elmore, D. and Fink, D. (2002) Landscape preservation under Fennoscandian ice sheets determined from *in situ* produced ^{10}Be and ^{26}Al : Earth and Planetary Science Letters, **201**, 397-406.
- Gillespie, A. R. and Bierman, P. R. (1995) Precision of terrestrial exposure ages and erosion rates estimated from analysis of cosmogenic isotopes produced *in situ*: Journal of Geophysical Research, **100**, 24, 637-24, 649.
- Gosse, J. C. and Phillips F. M. (2001) Terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides: theory and application: Quaternary Science Reviews, **20**, 1475-1560.
- Graham, I., Ditchburn, R. and Whitehead, N. E. (2001) Be isotope analysis of a 0-500 ka loess-paleosol sequence from Rangitatau East, New Zealand: Quaternary International, **76/77**, 29-42.
- Graham, I., Ditchburn, R. and Barry, B. (2003) Atmospheric deposition of ^7Be and ^{10}Be in New Zealand rain (1996-98): Geochimica et Cosmochimica Acta, **67**, 361-373.
- Granger, D. E., Kirchner, J. W. and Finkel, R. C. (1997) Quaternary downcutting rate of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in cave-deposited alluvium: Geology, **25**, 107-110.
- Granger, D. E. and Smith, A. L. (2000) Dating buried sediments using radioactive decay and muogenic production of Al-26 and Be-10: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **172**, 822-826.
- Granger, D. E., Fabel, D. and Palmer, A. N. (2001a) Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic Al-26 and Be-10 in Mammoth Cave sediments: Geophysical Society of America Bulletin, **113**, 825-836.
- Granger, D. E. and 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.
- Granger, D. E., Riebe, C. S., Kirchner, J. W. and Finkel, R. C. (2001b) Modulation of erosion on steep granitic slopes by boulder armoring, as revealed by cosmogenic Al-26 and Be-10: Earth and Planetary Science Letters, **186**, 269-281.
- Gu, Z. Y., Lal, D., Liu, T. S., Guo, Z. T., Southon, J. and Caffee, M. W. (1997) Weathering histories of Chinese loess deposits based on uranium and thorium series nuclides and cosmogenic ^{10}Be : Geochimica et Cosmochimica Acta, **61**, 5221-5231.
- Hancock, G. S., Anderson, R. S., Chadwick, O. A. and Finkel, R. C. (1999) Dating fluvial terraces with ^{10}Be and ^{26}Al profiles: application to the Wind River, Wyoming: Geomorphology, **27**, 41-60.
- Heimsath, A. M., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K. and Finkel, R. C. (1997) The soil production function and landscape equilibrium: Nature, **388**, 358-361.
- Heimsath, A. M., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K. and Finkel, R. C. (1999) Cosmogenic nuclides, topography, and the spatial variation of soil depth: Geomorphology, **27**, 151-172.
- Heimsath, A. M., Chappell, J., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K. and Finkel, R. C. (2000) Soil production on a retreating escarpment in southeastern Australia: Geology, **28**, 787-790.
- Heimsath, A. M., Chappell, J., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K. and Finkel, R. C. (2001a) Late

- Quaternary erosion in southeastern Australia: a field example using cosmogenic nuclides: *Quaternary International*, **83-85**, 169-185.
- Heimsath, A. M., Chappell, J., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K. and Finkel, R. C. (2001b) Soil production on a retreating escarpment in southeastern Australia: *Geology*, **28**, 787-790.
- Heimsath, A. M., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K. and Finkel, R. (2001c) Stochastic processes of soil production and transport: erosion rates, topographic variation and cosmogenic nuclides in the Oregon coast range: *Earth Surface Processes and Landforms*, **26**, 531-552.
- Hetzel, R., Neidermann, S., Ivy-Ochs, S., Kubik, W., Tao, M. and Gao, B. (2002) ^{21}Ne versus ^{10}Be and ^{26}Al exposure ages of fluvial terraces: the influence of crustal Ne in quartz: *Earth and Planetary Science Letters*, **201**, 575-591.
- Ivy-Ochs, S., Schluchter, C., Kubik, P. W. and Denton, G. H. (1999) Moraine exposure dates imply synchronous Younger Dryas glacier advance in the European Alps and in the Southern Alps of New Zealand: *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, **81**, 313-323.
- Kobayashi, K., Hatori, S., Nagai, H., Yoshida, K., Imamura, M., Matsuzaki, H., Murayama, M., Sakamoto, M., Aramaki, Y., Tanikawa, M., Shibata, S., Ohashi, H., Zoppi, U., Nakano, C., Sunohara, Y. and Saitoh, T. (1997) Current status of the AMS system at the University of Tokyo: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **123**, 107-111.
- 小林紘一 (1998) 加速器質量分析法－考古学から宇宙科学まで－：日本物理学会誌：53, 903-910.
- Kohl, C. P. and Nishiizumi, K. (1992) Chemical isolation of quartz for measurement of *in-situ*-produced cosmogenic nuclides: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, 3583-3587.
- Kubik, P. W., Ivy-Ochs, S., Masarik, J., Frank, M. and Schluchter, C. (1998) ^{10}Be and ^{26}Al production rates deduced from an instantaneous event within the dendro-calibration curve, the landslide of Kofels Otz, Valley Austria: *Earth and Planetary Science Letters*, **161**, 231-241.
- Lal, D. (1962) Cosmic-ray-produced radionuclides in the area: *Journal of Oceanography Society Japan*, 20th Anniversary vol., 600-604.
- Lal, D. and Peters, B. (1967) Cosmic ray produced radioactivity on the earth: in *Handbuch der Physik*, **XLVI/2**, Springer, Berlin, 551-612.
- Lal, D., Nishiizumi, K. and Arnold, J. (1987) *In situ* cosmogenic ^3H , ^{14}C and ^{10}Be for determining the net accumulation and ablation rate of ice sheets: *Journal of Geophysical Research*, **92**, 4947-4952.
- Lal, D. (1988) *In situ*-produced cosmogenic isotopes in terrestrial rocks: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **16**, 355-388.
- Lal, D. (1991) Cosmic ray labeling of erosion surface: *in situ* nuclide production rates and erosion models: *Earth Planetary Science Letters*, **104**, 424-439.
- Leland, J., Reid, M. R., Burbank, D. W., Finkel, R. and Caffee, M. (1998) Incision and differential bedrock uplift along the Indus River near Nanga Parbat, Pakistan Himalaya, From ^{10}Be and ^{26}Al exposure age dating of bedrock straths: *Earth and Planetary Science Letters*, **154**, 93-107.
- Matmon, A., Crouvi, O., Enzel, Y., Bierman, P., Larsen, J., Porat, N., Amit, R. and Caffee, M. (2003) Complex exposure histories of chert clasts in the late Pleistocene shorelines of lake Lisan, southern Israel: *Earth Surface Processes and Landforms*, **28**, 493-506.
- Matsuzaki, H., Nakano, C., Yamashita, H., Maejima, Y., Miyairi, Y., Wakasa, S. and Horiuchi, K. (2004) Current status and future direction of MALT, The University of Tokyo: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. (in press)
- Monaghan, M. C., Krishnaswami, S. and Turekian, K. K. (1985/86) The global-average production rate of ^{10}Be : *Earth and Planetary Science Letters*, **76**, 279-287.
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., Torres, R., Anderson, S. P., Heffner, J. T. and Logue, K. (1997) Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall: *Water Resources Research*, **33**, 91-109.
- Negrini, R. M., Versub, K. L. and Davis, J. O. (1987) Long-term non geocentric axial dipole directions and a geomagnetic excursion from the Middle Pleistocene sediments of the Humboldt River Canyon, Pershing County, Nevada, U.S.A.: *Journal of Geophysical Research* **92**,

- 10617-10628.
- Nichols, K. K., Bierman, P. R., Hooke, R. L., Clapp, E. M. and Caffee, M. (2002) Quantifying sediment transport on desert piedmonts using ^{10}Be and ^{26}Al : *Geomorphology*, **45**, 105-125.
- Nishiizumi, K., Lal, D., Klein, J., Middleton, R. and Arnold, J. R. (1986) Production of ^{10}Be and ^{26}Al by cosmic rays in terrestrial quartz *in situ* and implications for erosion rates: *Nature*, **319**, 134-136.
- Nishiizumi, N., Winterer, E. L., Kohl, C. P., Lal, D., Arnold, J. R., Klein, J. and Middleton, R. (1989) Cosmic ray production rates of ^{10}Be and ^{26}Al in quartz from glacially polished rocks: *Journal of Geophysical Research*, **94**, 17907-17915.
- Nishiizumi, N., Klein, J., Middleton, R. and Crag, H. (1990) Cosmogenic ^{10}Be , ^{26}Al , and ^3He in olivine from Maui lavas: *Earth Planetary Science Letters*, **98**, 263-266.
- Nishiizumi, K., Kohl, C.P., Arnold, J.R., Dorn, R., Klein, J., Fink, D. and Middleton, R. (1991a) Cosmic ray produced ^{10}Be and ^{26}Al in Antarctic rocks: exposure and erosion history: *Earth and Planetary Science Letters*, **104**, 440-454.
- Nishiizumi, K., Kohl, C. P., Shoemaker, J. R., Arnold, J. R., Klein, J. Fink, D., and Middleton, R. (1991b) *In situ* ^{10}Be , ^{26}Al exposure ages at Meteor Crater, Arizona: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, 2699-2703.
- Nishiizumi, K., Kohl, C. P., Arnold, J. R., Dorn, R., Klein, J., Fink, D., Middleton, R. and Lal, D. (1993) Role of *in situ* cosmogenic nuclides ^{10}Be and ^{26}Al in the study of diverse geomorphic processes: *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**, 407-425.
- Ohno, M. and Hamano, Y. (1992) Geomagnetic poles over the last 10,000 years: *Geophysical Research Letters*, **19**, 1715-1718.
- Partridge, T. C., Granger, D. E., Caffee, M. and Clarke, R. J. (2003) Lower Pliocene hominid remains from Sterkfontein: *Science*, **300**, 607-612.
- Perg, L. A., Anderson, R. S. and Finkel, R. C. (2001) Use of a new Be-10 and Al-26 inventory method to date marine terraces, Santa Cruz, California, USA: *Geology*, **29**, 879-882.
- Perg, L. A., Anderson, R. S. and Finkel, R. C. (2003) Use of cosmogenic radionuclides as a sediment tracer in the Santa Cruz littoral cell, California, United States: *Geology*, **31**, 299-302.
- Reneau, S. L. and Dietrich, W. E. (1990) Depositional history of hollows on steep hillslopes, coastal Oregon and Washington: *National Geographic Research*, **6**, 220-230.
- Reneau, S. L. and Dietrich, W. E. (1991) Erosion rates in the southern Oregon coast range: evidence for an equilibrium between hillslope erosion and sediment yield: *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 307-322.
- Repka, J. L., Anderson, R. S. and Finkel, R. C. (1997) Cosmogenic dating of fluvial terraces, Fremont River, Utah: *Earth and Planetary Science Letters*, **152**, 59-73.
- Riebe, C. S., Kirchner, J. W., Granger, D. E. and Finkel, R. C. (2000) Erosional equilibrium and disequilibrium in the Sierra Nevada, inferred from cosmogenic Al-26 and Be-10 in alluvial sediment: *Geology*, **28**, 803-806.
- Ritz, J. F., Brown, E. T., Bourles, D. L., Phillips, H., Schlupp, A., Raisbeck, G. M., Yiou, F. and Enkhtuvshin, B. (1995) Slip rates along active faults estimated with cosmic-ray-exposure dates: Application to the Bogd fault, Gobi-Altai Mongolia: *Geology*, **23**, 1019-1022.
- Ritz, J. F., Bourles, D., Brown, E. T., Carretier, S., Chery, J., Enhtuvshin, B., Galsan, P., Finkel, R. C., Hanks, T.C., Kendrick, K. J., Philip, H., Raisbeck, G., Schlupp, A., Schwartz, D. P. and Yiou, F. (2003) Late Pleistocene to Holocene slip rates for the Gurvan Bulag thrust fault (Gobi-Altay, Mongolia) estimated with Be-10 dates: *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **108**, 2162.
- Roering, J. J., Kirchner, J. W. and Dietrich, W. E. (1999) Evidence for non-linear, diffusive sediment transport on hillslopes and implications for landscape morphology: *Water Resources Research*, **35**, 853-870.
- Rothwell, P. and Quenby, J. (1958) Cosmic rays in the Earth's magnetic field, *Nuovo Cimento VIII, Serie X*, 249-256.

- Schäfer, J. M., Tschudi, S., Zhao, Z., Wu, X., Ivy-Ochs, S., Wieler, R., Baur, H., Kubik, P. W. and Schluchter, C. (2002) The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170,000 yr: *Earth and Planetary Science Letters*, **194**, 287-297.
- Schildgen, T., Dethier, D. P., Bierman, P. and Caffee, M. (2002) ^{26}Al and ^{10}Be dating of late Pleistocene and Holocene fill terraces: a record of fluvial deposition and incision, Colorado front range: *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, 773-787.
- Seidl, M. A., Finkel, R. C., Caffee, M. W., Hudson, B. and Dietrich, W. (1997) Cosmogenic isotope analyses applied to river longitudinal profile evolution: Problems and interpretations: *Earth Surface Processes and Landforms*, **22**, 195-209.
- Seong, Y. (2002) The exposure age dating of the mountain-top detritus employing *in-situ* produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al : Master thesis, Seoul National University, 55 pp.
- Small, E. E., Anderson, R. S., Repka, J. L. and Finkel, R. (1997) Erosion rates of alpine bedrock summit surfaces deduced from *in situ* ^{10}Be and ^{26}Al : *Earth and Planetary Science Letters*, **150**, 413-425.
- Small, E. E., Anderson, R. S. and Hancock, G. S. (1999) Estimates of the rate of regolith production using ^{10}Be and ^{26}Al from an alpine hillslope: *Geomorphology*, **27**, 131-150.
- Stone, J. O. (2000) Air pressure and cosmogenic isotope production: *Journal of Geophysical Research*, **105**, 23753-23759.
- Stroeven, A. P., Fabel, D., Hattestrand, C. and Hardor, J. (2002) A relict landscape in the center of Fennoscandian glaciation: cosmogenic radionuclide evidence of tors preserved through multiple glacial cycles: *Geomorphology*, **44**, 145-154.
- Vance, D., Bickle, M., Ivy-Ochs, S. and Kubik, P. W. (2003) Erosion and Exhumation in the Himalaya from cosmogenic isotope inventories of river sediments: *Earth and Planetary Science Letters*, **206**, 273-288.
- Van Der Woerd, J., Tapponnier, P., Ryerson, F. J., Meriaux, A.-S., Meyer, B., Gaudemer, Y., Finkel, R. C., Caffee, M. W., Guoguang, Z. and Zhiqin, X. (2002) Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from ^{26}Al , ^{10}Be , and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology: *Geophysical Journal International*, **148**, 356-388.
- Wakasa, S., Matsuzaki, H., Horiuchi, K., Tanaka, Y. and Matsukura, Y. (2004) Exposure ages deduced from *in situ* produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al : Application to the granite domes, Korea: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. (in press)