宇宙線照射生成核種を用いた地球表層プロセスの研究

Terrestrial Cosmogenic Nuclides as a tool for studying earth surface processes

Abstract

横山祐典* 阿瀬貴博*
村澤 晃* 松崎浩之**

Yusuke Yokoyama *, Takahiro Aze *,
Hikaru Murasawa * and
Hiroyuki Matsuzaki **

2004年11月22日受付.

2005年10月14日受理.

* 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻
宇宙線照射生成核種実験室

Laboratory for Accelerator Mass Spectrometry,
Department of Earth and Planetary Sciences,
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo,
Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033 Japan

** 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻
Department of Nuclear Engineering and Man-
agement, School of Engineering, The University
of Tokyo

Corresponding author; Y. Yokoyama,
yokoyama@eps.s.u-tokyo.ac.jp

The *in-situ* terrestrial cosmogenic nuclides (TCN) are produced from the interactions with cosmic ray bombardments with terrestrial rocks. The TCN exposure history measurement method is undergoing major developments in the Earth Science field. This method can be applied to various geological problems including tectonics, coastal environments changes and climate changes. The method is employed in the geological studies of which time scale ranges from 10^2 to 10^7 years using currently established method (^3He , ^{10}Be , ^{21}Ne , ^{26}Al , and ^{36}Cl). Combining measurements of nuclides which have different half-lives is particularly useful to determine the history of the surface process and hence quartz grains have been widely used for this types of research since they contain both *in-situ* ^{10}Be and ^{26}Al . In this paper we present some examples using TCN to reveal past histories of earth surface processes. Tibetan plateau is the widest plateau in the world and the detailed mechanisms of its tectonics have been under debate. TCN have revealed new insights into the Himalaya-Tibet regional tectonics in these days and its impact on the global climatic evolutions. In this short paper, we introduce the theory and some applications of study using TCN.

Key words: Terrestrial Cosmogenic Nuclides, Accelerator Mass Spectrometry, Tibet, tectonics, erosion, slip rate

ま え が き

地球表層は絶えずダイナミックに変動し、その地域特性は降水や気温などの気候パラメータの他、隆起量などテクトニックなセッティングにも支配されている。

宇宙線照射によって地球表層にて生成される安定および放射性核種 (*in situ* Terrestrial Cosmogenic Nuclides: TCN) を用いた表面照射年代測定の開発は、加速器質量分析計 (Accelerator Mass Spectrometry: AMS) の導入とともに急速に発展し、地質学的・地形学的・古気候学的研究に広く用いられてきた (例えば, Gosse and Phillips, 2001)。地球表層の岩石が宇宙線に被爆される環境におかれると、岩石中のターゲット原子と、宇宙線と大気との相互作用により生じた高エネルギー粒子との反応で、安定および放射性核種が生成される (Lal, 1991)。これらの蓄積量を使って、侵食・堆積作用を定量的に評価することが可能である。また地震、火山の噴火、気候変動に伴う表層地形変動、そして試料採取地点が地表に出て宇宙線の照射を受ける原因となった、あらゆる地質学的イベントのタイミングを正確に決定することができる (横山, 2004)。AMS を用いた試料中の TCN の存在量の測定は、それまで間接的に求められていた地域的な侵食速度等を直接測定することができるため、最近では地球表層プロ

セスの研究において広く用いられている。例えば、ストライクスリップ断層の変位速度の復元や正断層系の断層での滑り速度の定量化、海岸段丘の隆起速度の復元や氷床後退のタイミングの復元など、その応用範囲は幅広い (Gosse and Phillips, 2001)。

本論文では TCN を用いた地球表層プロセスの研究について簡単に紹介する。特に前半では TCN を用いた研究のバックグラウンドとその有用性について述べ、後半ではテクトニクスに関する研究例について数例紹介する。最後にチベット地域のテクトニクス研究の例を紹介する。

In-situ Terrestrial Cosmogenic Nuclides

地質学的に重要な TCN と岩石中でのターゲット元素を Table 1 に示す。様々な TCN はそれらの半減期によって、地質学的イベントの検出感度が異なり、複数の核種を組み合わせることで測定することは、地球表層プロセスをより精度良く議論することを可能とする。現在までのところ広く用いられているのは、 ^{10}Be - ^{26}Al のペアである。これらは地球表層に広く分布する石英中で宇宙線との相互作用によって生成される (Fig. 1) ため、両者の異なる半減期 (Table 1) を使うことで、より詳細な地質学的議論を行うことが可能となる。

Table 1. Principal terrestrial in-situ cosmogenic nuclides of geologic interest

Nuclide	Half-life (years)	Important target element(s) in terrestrial rocks
³ He	Stable	O, Mg, Si, Fe
¹⁰ Be	1.5×10^6	O, Mg
¹⁴ C	5.73×10^3	O
²¹ Ne	Stable	Mg, Al, Si
²⁶ Al	7.1×10^5	Si
³⁶ Cl	3.0×10^5	Cl, K, Ca, Fe
³⁶ Ar	Stable	Cl, K, Ca
³⁸ Ar	Stable	K, Ca
⁴¹ Ca	1.0×10^5	Ca, Ti, Fe
⁵³ Mn	3.7×10^6	Fe
¹²⁹ I	1.56×10^7	Te, Ba, REE

1. 岩石中での TCN の生成

¹⁰Be や ²⁶Al などの TCN は地球表層の岩石中において、主に速中性子との相互作用によって生成されるが (Lal, 1988), ³⁶Cl のように複数のターゲット (³⁵Cl, ³⁹K, ⁴⁰Ca) によって異なった過程 (³⁵Cl は熱中性子, ³⁹K や ⁴⁰Ca は速中性子との相互作用) で生成される場合もある。また表層での寄与は小さいがミューオンとの相互作用によって TCN が生成される場合もある。一般に TCN の生成率は、表層で最大となり深さとともに急激に減少する。これは TCN の生成に大きく寄与する中性子が岩石中で減速されたり吸収されたりするためである。一般に岩石の密度が 2.7 g/cm^3 とするとおよそ半分の中性子が深さ 50 cm 以浅において吸収されてしまう。TCN のうち ¹⁰Be や ²⁶Al のように速中性子との相互作用によって主に生成される核種のある深さ x (cm) の地点での生成率 P_x (atoms/g/yr) は以下のように表される。

$$P_x = P_0 e^{-(x\rho/\Lambda)} \dots \dots \dots (1)$$

ここで P_0 は表層での生成率、 ρ は岩石の密度 (g/cm^3)、 Λ は減衰長 (g/cm^2) で、速中性子の場合およそ $150 \sim 170 \text{ g/cm}^2$ であるとされ、地球上の異なる地点でのそれはほぼ一定であると報告されている (Kurz, 1986; Lal, 1991; Brown et al., 1992; Sarda et al., 1993)。

地表面における TCN の生成量 N (atoms/g) は、それが放射性核種である場合、以下のような式で表される。

$$N = \frac{P}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \dots \dots \dots (2)$$

ここで P は生成率 (atoms/g/yr)、 t は宇宙線照射年代、そして λ はその核種の壊変定数である。この式で表される核種の生成量は、試料採取地点が侵食を全く受けておらず、生成率の時間変化は無く、地磁気緯度や高度変化に伴う宇宙線のフラックスの影響もないという仮定がおかれている。地球表層プロセスを研究する上でも有用な“永続平衡”には、どの TCN も半減期の数倍の宇宙線照射年で達する (Table 1)。

安定な TCN の場合 (例えば、²¹Ne や ³He; Table 1) は、経過時間 (t) に比例して増加する。

$$N = P \cdot t \dots \dots \dots (3)$$

Fig. 1. A schematic diagram of the production of cosmogenic nuclides in terrestrial rocks interacting with the cosmic rays. The Fig. showing the case for quartz, the most commonly used mineral for the geological studies using TCN.

もし侵食作用などにより、宇宙線照射面が一定ではない場合はすなわち、現在採取された試料に照射された宇宙線フラックスが過去一定ではなかったということ意味するため、侵食作用を考慮したデータ解析を行う必要がある。ほとんどの地質学的試料は、地質学的なイベントによって突然宇宙線の照射を受けはじめる一方で、風化はゆっくりとした速度で進む。例えば溶岩の噴出はとても短い時間で起きるが、侵食の速度は遅い (Shepard et al., 1995; Liccardi et al., 1999)。TCN の生成率と表層の侵食速度が一定であると仮定でき、 $t = 0$ の時に $N = 0$ とすることができると、

$$N = \frac{P}{(\rho \epsilon \Lambda^{-1} + \lambda)} (1 - e^{-(\rho \epsilon \Lambda^{-1} + \lambda) t}) \dots \dots \dots (4)$$

と表すことができる (Nishiizumi et al., 1991)。ここで、もし半減期の異なる TCN を同じ試料中から抽出し定量することができると、原理的には上記の式の侵食速度 (ϵ) と宇宙線に照射されていた期間 (つまり年代 t) を求めることが可能である。

2. 複数 TCN を使った研究

石英中に生成される ¹⁰Be (半減期 = 1.5 Myrs) と ²⁶Al (半減期 = 0.71 Myrs) は、その半減期が 2 倍異なることから、TCN を用いた表層プロセスの研究にひろく使われてきた。長い間照射を受けてきた地球表層の岩石中では、²⁶Al/¹⁰Be の値は生成率の比であるおよそ 6 という値から徐々に減少していく。

岩石中の 2 種の TCN の測定を行い、長寿命核種の存在量に対して 2 核種の比をプロットすると、宇宙線照射履歴によって主に 2 つのケースが生ずる。一つは試料採取地点が安定で侵食を受けないか、とてもゆっくりとした侵食を受けるケース (1) で、もう一つは一旦地表に露出した後に埋没するケース (2) である。Fig. 2 に示すように (1) においては、はじめに 6 であった両核種の比が減少し、放射平衡に達するポイント (saturation point: Fig. 2a)、つまり生成率と放射壊変によって減少する量とが一致する地点まで変化する。半

減期が異なる2つのTCNを使ったプロット (Fig. 2) は、この変化を視覚化する意味でも非常に有用である。プロットは2本の曲線からなり、外側の曲線は侵食がない場合、内側の曲線が定常的な侵食があった場合の様々な侵食速度について、永続平衡に達するポイントを結んだものとなる (Fig. 2b)。地表に露出した試料が単純な照射史 (Simple exposure history: SEH) をもっている場合は、2つのTCNの測定値は、この2本の曲線の中にプロットされる。(2)のケースは埋没などによってTCNの生成が遮断される場合である (Fig. 2b)。一旦表層に露出してTCNの蓄積が開始されたものの、ある一定期間以上 (10^5 年以上) 宇宙線から遮断されると、 ^{26}Al が ^{10}Be より早く崩壊するために、 $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ が生成率の比よりも小さくなる (Granger et al., 2001)。すると(1)のケースで説明した領域、すなわち図2bの2本の実線で囲まれたSEHの領域から離れた地点にプロットされることになる。実験の操作によっては測定値がこの領域にプロットされることもありうる。その多くの場合は、 ^{27}Al の不十分な回収によって起こる ^{26}Al の見かけ上低い存在度である。一方で、岩石からの核種の抽出がうまく行った場合には、埋没などの複雑な宇宙線照射史 (Complex exposure history: CEH) を考慮する必要がある。試料がCEHをもつ場合、モデリングによってその照射史を復元することになる。その解は複数あるものの、照射を受けてからの期間や埋没の期間、そのイベントが起こったタイミングなど、TCNが用いられる以前には得られなかった情報をもたらすことができる。Granger and Smith (2000) は、河川堆積物の ^{10}Be - ^{26}Al の深度方向の分布を測定することによって、河成段丘の年代を求めることができることを示した。これは ^{10}Be - ^{26}Al のペアを使って埋没年代を明らかにできるという可能性を示した最初の研究で、その後 Granger and Muzikar (2001) によって100 万年のタイムスケールの地形-地質学的イベントについて、この方法を用いた埋没年代測定法の適用範囲について示した。実際にこの方法を使って、Green River によって堆積した洞窟の堆積物の年代を用いた研究例も報告されている (Granger et al., 2001)。

Bierman et al. (1999) は、最終氷期から現在までの北米氷床の融解史を復元するため、バフィン島の基盤岩の ^{10}Be - ^{26}Al 測定を行った。その結果、試料に対して次の3つのシナリオを示した: (i) 75–175 kyr の宇宙線照射を受けた後、約400 kyr の埋没を受けたというもの、(ii) 約680 kyr にわたって埋没と露出を繰り返していたというもの、そして (iii) 雪やティル、レスなどによる被覆 ($\Lambda = 320 \text{ g cm}^{-2}$) が960 kyr にわたって存在したという可能性である。これらをふまえて筆者らは最も可能性があるシナリオを採用することとした。つまりこの地域は、これまで考えられていた以上に Laurentide 氷床の影響を受けていて、長い間宇宙線の当たらない環境におかれていたことが明らかになった。基盤岩に氷河擦痕が残されているなど、他の複数の研究結果からも試料表層の侵食が極めて少ないことが明らかになり (Marsella et al., 2000; Briner et al., 2003)、Laurentide 氷床の氷床底が、cold-based であったことが明らかになった。氷床学的

Fig. 2. Two nuclides diagram using ^{10}Be and ^{26}Al pair. The values are normalized for the high-latitude ($> 60^\circ$) and sea-level. The ratio and the concentration of the nuclides follow the solid line curve when both no erosion and no interruption of the exposure can be assumed. The ratio will reach to the saturation point eventually. The numbers shown are the model exposure age (a). If the surface is undergone erosion process, the values begin the trajectory that is similar to the one for the no erosion case (ie. a). Yet the values fall off, depending on the ratio of the erosion, to an endpoint (symbols; b). The symbols represent erosion rates as is; filled circle = 10^{-3} cm/yr; open triangle = 10^{-4} cm/yr; plus sign = 5×10^{-5} cm/yr; cross = 3×10^{-5} cm/yr; open diamond = 10^{-5} cm/yr; open square = 5×10^{-6} cm/yr.

に極めて重要なこの研究結果であるが、同じく cold-based 氷床であったとされる Fennoscandian 氷床についての研究結果とも調和的であり (Stroeven et al., 2002)、例えば、最終氷期最盛期の北半球大規模氷床の体積は、汎世界的な海水準変動の研究結果から得られた氷床量を説明するために十分な規模の拡大があったことが示唆される (Yokoyama et al., 2000; Lambeck et al., 2000)。

TCN の測定

TCN のうち、地球表層プロセス研究でひろく用いられる ^{10}Be や ^{26}Al は半減期の長い長寿命核種であるため (Table 1), 核種の存在比を直接測定できる AMS を用いることが重要である。岩石中に生成された *in-situ* の核種量を測定するためには、試料の化学処理を行い、二次的に取り込まれた大気起源の meteoric 成分を取り除く必要がある。試料は採取され破碎された後、繰り返し酸処理によって表面をエッチングし、meteoric 成分を取り除く。一般に用いられている鉱物は石英で、フッ酸などを使って表面のクリーニングを行っている (Kohl and Nishiizumi, 1992)。精製された石英を溶解した後、陰イオン交換分離によって Fe や Ti などの不純物を除去し、陽イオン交換分離によって Be と Al を単離・精製する。これらの試料は BeO と Al_2O_3 の形にして AMS 測定に供する。AMS での ^{10}Be の測定には ^{10}Be と ^9Be のどちらの核種も加速器へと入射する必要がある。東京大学の AMS 施設では $^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$ と $^9\text{Be}^{17}\text{O}^-$ を同時に加速器へと入射している。 ^{26}Al の測定では ^{26}Al と ^{27}Al をジャンピング法によって入射しており、ほとんどの AMS 施設でも同様の方法をとっている (Matsuzaki et al., 2004)。 ^{10}Be の測定の際には、同重体である ^{10}B の妨害をできる限り防ぐ必要がある。これを行うにはガス吸収セル付きのガスイオン化検出器を用いる必要があるが、東京大学でもこの装置を使用している (Matsuzaki et al., 2000)。イオンは、まず薄い金属膜 (Havar foil $5.6\text{ }\mu\text{m}$) と約 5 cm の N_2 ガス (90 Torr) 中を通過する (ガス吸収セル)。イオンの媒体中での単位距離あたりのエネルギー損失は陽子数 (Z) に依存するので、 ^{10}Be よりも陽子数一つ大きい ^{10}B は大部分がここでエネルギーを完全に失う。その後、イオンは Ar (90 %), CH_4 (10 %) で構成される PR ガス中を通過する。その際電離された二次電子を内部に備えられた 2 枚の陽極プレートで捉え、エネルギー損失と残留エネルギーを検出する。これらを用いて同重体である ^{10}B の排除を行うことが可能となる。東京大学においては、加速電圧 4.7 MV (^{10}Be の場合) と 4.3 MV (^{26}Al の場合) にて測定を行っており、 $0.5\sim 3\%$ の精度での ^{10}Be の測定、 $1\sim 3\%$ の精度での ^{26}Al の測定が可能である (Matsuzaki et al., 2004)。

TCN を使ったテクトニクスの研究

以下のセクションでは、これまで述べたような TCN を使った地球表層プロセスの研究例についていくつか紹介する。

1. 断層崖の直接サンプリングによるスリップ速度の解明

地震などのテクトニックイベントによって表層に現れた断層崖を、直接 TCN を測定することによって、破壊イベントの規模とその繰り返しの頻度を見積もることができるため (Fig. 3), このような研究領域での TCN をつけた研究が広く行われている (例えば, Ritz et al., 1995)。大規模な傾斜方向の移動によって生成された断層崖において新たに形成され、表層に露出した面の岩盤には TCN の蓄積が開始されることになるため、TCN の測定を行うことでその断層運動のタイミングを決定することができる (Zreda and Noller,

Fig. 3. The diagram illustrates the idea using TCN (^{36}Cl) to detect the timing of the tectonic events (after Benedetti et al., 2002). Recurrence interval for the each earthquake is approximately 5,000 years for this case.

1998; Gran Mitchell et al., 2001)。この方法は、TCN の量が一番多い露出面が最も長い期間、宇宙線の照射を受けていると考えるもので、各々の露出面の露出期間の差を平均的な変動イベントの間隔とすることができ (Fig. 3)。Benedetti et al. (2003) では、全長 150 km を越える正断層である Sparta 断層について、おおよそ 10 km 離れた 2 地点について、比高が $7\sim 12\text{ m}$ を越える断層崖の表層を連続サンプリングし ^{36}Cl を測定した。その結果、全部で 5 回のスリップイベントを認定し、間隔は $0.5\sim 4.5\text{ kyrs}$ ということが明らかになった。これは地中海地域で広く報告されている他の断層崖の形成年代と一致する (Benedetti et al., 2003)。

2. 堆積物中の石英を用いた断層活動の復元

河川堆積物やモレーン、海岸の堆積物などを用いた TCN によるテクトニックなイベントの決定も行われてきている。Bierman et al. (1995) は、カリフォルニア州 Owens Valley の河川扇状地堆積物について ^{10}Be - ^{26}Al の測定を行い、各テラスのオフセット年代から、Lone Pine 断層の活動頻度の見積もりを明らかにした。その結果、断層活動の繰り返しの間隔が $5.8\sim 8.0\text{ kyrs}$ であることが解明された。これと類似した研究例として、アルゼンチンの河川扇状地を使った研究でも、El Tigre 断層の活動史を復元することに成功している (Siame et al., 1997)。このように断層の活動史を復元するには高精度年代測定によるタイミングの決定と、複数回のイベントの中での個々の活動のタイミングを復元することが重要であるが、いくつかの問題から、必ずしも上述の研究のように復元可能なケースばかりではない。

断層崖の基盤岩ではなく、堆積物を使ってテクトニクスを研究する上での問題点としてまず挙げられるのが、inheritance-TCN の影響である。最終堆積地点として堆積した場所での照射履歴の他に、堆積物がもともと存在した箇所を受けた照射によって生成された TCN (inheritance-TCN) の寄与がどの程度であるか、サンプリングの際に定量的に見積もることが困難であるという点である。アメリカの Death-

Fig. 4. Map of the Tibetan plateau and distribution maps of some rivers in Asia. Major rivers in the South and the South East Asia are originated from the Tibet. T: Tien Sien, A: Altyn Tagh, K: Kunlun, H: Himalayas.

Valley の更新世の堆積物を使った研究では、この効果によって、イベントの年代が見かけ上古く出てしまうという結果が得られている (Trull et al., 1995)。

これらの inheritance-TCN による問題を解決する方法がいくつか提唱されている。例えば、その地域 (扇状地を用いる研究の場合はその扇状地を切る形で) に現在も流れている河川の堆積物の TCN を測定する方法である。これは河川の堆積物が現在の川底に堆積するまでの時間は、運搬時に受けた照射によって TCN が生成されるには短すぎるというという考えに基づく方法である。河床の新鮮な堆積物は、そこに至るまでの後背地での宇宙線照射履歴を反映しているとし、したがってその TCN 量を同じ後背地からもたらされた河川扇状地の堆積物の inheritance-TCN 量とみなすものである (例えば, Brown et al., 1998)。しかしこの方法は、現在の河床の堆積物の inheritance-TCN を、現在とは異なる気候のもとで生成された他の扇状地堆積物の inheritance-TCN として定義して良いのかという問題点を含んでいる。これに対して新たに考案された方法が、深度方向にプロファイルをとるという見積もり方である (例えば, Anderson et al., 1996; Repka et al., 1997; Ayarbe et al., 1998, Hancock et al., 1999)。二次宇宙線との相互作用によって生成される TCN は深度とともに減少する。一般的な陸成堆積物の密度を考慮すると、およそ 3.5 ~ 4 m の深度での TCN の量は表層の 0.5 % 以下となる (式 1 を参照)。つまりこの深度より深い位置で高い TCN 濃度が測定されれば、これは inheritance-TCN ということになる。すなわち、厚い層厚をもつ堆積層の基底の TCN は、その層の平均的な inheritance-TCN を表すということになる。

TCN を用いたチベット地域のテクトニクスの研究

チベットは世界最大 (約 3500 km × 1500 km) でかつ高度が最も高い台地である (Fig. 4)。インドとユーラシア大陸との衝突によって形成され、現在も隆起を続けているが、その広大さは世界の高度 4 km 以上の地域の 82 % を占める (Fielding et al., 1994) という事実からも明らかで、北半球の気候変動に与える影響も少なくない。実際、チベット周辺のモンスーンの発達には、この地域の存在が大気循環に与える影響が大きいとされている (例えば, Ruddiman et al., 1989)。

TCN を使ったテクトニクスの研究も広く行われ、例えば, Brown et al. (1998) は扇状地堆積物を使った Tien Shan 地域の構造運動の議論を行っている。彼らは 3 つの古扇状地を横切る断層崖の調査を行い、 ^{10}Be 測定による年代から 2 mm/yr のスリップ速度を求めている。これは近辺の変動地域の変位量に比べてずっと遅いもので、コンバージェント断層沿いのゾーンの中でも地域差があることが示された。このことは, Abdrakhmatov et al. (1996) が GPS (Global Positioning System) によって求めた変位量 (約 20 mm/yr) と大きくずれることから示唆される。

北部チベットの地域には多くの断層系が発達しており、現在でも続くインドの衝突による歪みの解消地帯であると考えられている。この地域に発達する北西-南東方向に延びる山脈は、大規模なスラストの活褶曲により形成されたと考えられている (Tapponnier and Molnar, 1979)。北部チベットの境界に位置する Kunlun, Altyn Tagh そして Haiyuan 断層はどれもストライクスリップ断層で、ここでは M7.5 ~ M8.7 という大きな地震が繰り返し起こってきた (Gu et al., 1989)。長さ 1000 ~ 2000 km にも及ぶこの断層系は、チベ

ット台地の隆起速度を決定する重要な役割を果たしていると考えられる (Meyer et al., 1998). この断層系のインドーアジア衝突に関する位置づけがどのようなものなのかは、多くの研究で議論の対象となっており、地殻の地震波速度の不連続面を第一次近似的に反映している (Avouac and Tapponnier, 1993; Meyer et al., 1998) のか、インドの衝突によって変形を受けるアジアが粘性流体のようにふるまうために断層によって緩衝される変形は小さなものである (England and Molnar, 1997; Fielding et al., 1994) のかという2つの問いに対する答えはまだ出ていない。この問題に関して、断層の長期的なスリップ速度を明らかにする試みが ^{10}Be - ^{26}Al を用いて行われた (Van der Woerd et al., 2000, 2001). その結果、Kunlun 断層の過去 40,000 年間のスリップ速度はおおよそ 11.5 mm/yr で比較的一定であったことが明らかになった。この比較的大きな変位は、Kunlun 断層を含む北部チベットの断層が、地殻の地震波不連続面を反映している大きな構造線、つまり大陸内プレート境界である可能性を示唆する (Van der Woerd et al., 2000). またこの結果は、Altyn Tagh 断層で TCN を用いて得られた値 (18.4 mm/yr) と調和的 (Meriaux et al., 2004) である一方、GPS を用いた研究結果 (Bendick et al., 2000; Chen et al., 2000; Chen et al., 2004; Shen et al., 2001) である約 7 mm/yr のおおよそ2倍の変位速度になった。つまりこのことは、テクトニクスを議論する上で、スナップショット的な GPS による観測だけではなく、TCN を使った長期的かつ平均的な変位量を正確に求めることの重要性を示唆する。

アジアの大規模河川はチベットに源を抱くものが多いが、その河川の運搬する堆積物は、大気 CO_2 の循環を考える上で重要である。珪酸塩の風化が増えると大気中の CO_2 濃度が低下するといった物質循環プロセスの変動に伴う大気組成の変化が考えられるからである (例えば、Raymo and Ruddiman, 1992). すなわち TCN を用いた基盤岩の侵食速度の見積り研究は、チベットのテクトニクスだけではなく、地球化学的な側面からも有用である。これまでにもチベット地域の侵食速度を堆積物などから間接的に求めた研究は行われてきているが、チベットそのものの侵食速度を直接明らかにした例は多くない。Lal et al. (2003) はチベット北部～南部にかけての基盤岩の TCN を測定した結果、その TCN 年代に地域差があることを明らかにした。これから逆説的に求められる地球の定量的な侵食速度は、Kunlun など北部チベットにてきわめて大きく 60～2,000 mm/kyr に達することが明らかになった。これはヒマラヤでのそれと同等の規模である。一方で中部から南部にかけては 30 mm/yr 以下というきわめて小さな侵食速度であることが明らかになった。この小さな侵食速度によって生産される堆積物が、チベット地域外に河川を通して運搬される量は重要な量ではなく、これらの化学風化もまた意味のある大気組成の変化を引き起こす程ではないということは明らかである。さらに、高い侵食速度を記録している Kunlun など北部地域の侵食も、該当する地域の低い降水量を考えると、ヒマラヤ地域と異なり (Fielding et al., 1994), 珪酸塩の風化を促進するもの、つまり大

気二酸化炭素の変動に影響を及ぼすものとは考えにくい (Lal et al., 2003)。

あ と が き

以上、TCN を使った研究の原理と紹介を行った。日本を含め、変動地域での地形形成過程を議論する上で TCN は非常に有用である (例えば、横山, 2004)。実際に TCN を使った研究例として活構造の研究をいくつか提示したが、 ^{10}Be - ^{26}Al の組み合わせの他に、炭酸塩岩地域では ^{36}Cl を用いた研究も広く行われている。チベット高原の侵食速度の復元はほとんど行われていないのが現状である一方、降水量が比較的少ないため TCN を用いて高精度の復元が可能である。テクトニクスや古気候学的にも、この地域の研究を進めることは非常に重要である。また新たに開発されつつある *in-situ* ^{14}C を加えることにより、より詳細な地質学的情報を抽出することが可能となるため (Lifton et al., 2001; Yokoyama et al., 2004)、ルーチンでの *in-situ* ^{14}C 前処理システムが日本にて構築されることが望まれる (例えば、横山, 2004)。

謝 辞

本研究には研究費の一部として、文部科学省研究補助金および東京大学 21COE プロジェクトの研究費が与えられた。査読者である国立環境研究所の柴田康行博士と弘前大学の堀内一穂博士からのコメントによって原稿が改善された。記して謝意を表します。本研究は INQUA のワーキンググループ “Coastal and Marine Process” の関連研究のひとつでもある。

文 献

- Abdrakhmatov, K.Y., Aldazhanov, S.A., Hager, B.H., Hamburger, M.W., Herring, T.A., Kalabaeav, K.B., Makarov, V.I., Molnar, P., Panasyuk, S.V., Prilepin, M.T., Reilinger, R.E., Sadybakasov, I.S., Souter, B.J., Trapeznikov, Ye.A., Tsurkov, V.Ye. and Zubovich, A.V., 1996, Relative recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. *Nature*, **384**, 450-453.
- 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.
- Avouac, J.P. and Tapponnier, P., 1993, Kinematic model of active deformation in central-Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 895-898.
- Ayarbe, J.P., Phillips, F.M., Harrison, J.B.J., Elmore, D. and Sharma, D., 1998, Application of cosmogenic nuclides to fault-scarp chronology: preliminary results from the Socorro Canyon fault. Soil, water, and earthquakes around Socorro, New Mexico. *Rocky Mountain Cell 'Friends of the Pleistocene' Guide*, 39 p.
- Bendick, R., Bilham, R., Freymueller, J., Larson, K. and Yin, G.H., 2000, Geodetic evidence for a low slip rate in the Altyn Tagh fault system. *Nature*, **404**, 69-72.
- Benedetti, L., Finkel, R., King, G., Armijo, R., Papanastassiou, D., Ryerson, F.J., Flerit, F. and Farber, D., 2003, Earthquake time-slip history of the Kaparelli fault (Greece) from *in situ* ^{36}Cl cosmogenic dating. *Terra Nova*, **15**, 118-124.
- 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., Marsella, K.A., Patterson, C., Davis, P.T. and Caffee, M., 1999, Mid-Pleistocene cosmogenic minimum-age limits for pre-Wisconsinan glacial surfaces in southwestern Minnesota and southern

- Baffin Island: a multie nuclide approach. *Geomorphology*, **27**, 25-39.
- Briner, J.P., Miller, G.H., Davis, P.T., Bierman, P.R. and Caffee, M., 2003, Last Glacial Maximum ice sheet dynamics in Arctic Canada inferred from young erratics perched on ancient tors. *Quatern. Sci. Rev.*, **22**, 437-444.
- Brown, E.T., Bourles, D.L., Burchfield, C., Qidong, D., Jun, L., Molnar, P., Raisbeck, G.M. and Yiou, F., 1998, Estimation of slip rates in the southern Tien Shan using cosmic ray exposure dates of abandoned alluvial fans. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **110**, 377-386.
- Brown, E.T., Brook, E.J., Raisbeck, G.M., Yiou, F. and Kurz, M.D., 1992, Effective attenuation length of cosmic rays producing ^{10}Be and ^{26}Al in quartz: Implications for exposure age dating. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 369-372.
- Chen, Q., Freymueller, J.T., Yang, Z., Xu, C., Jiang, W., Wang, Q. and Liu, J., 2004, Spatially variable extension in southern Tibet based on GPS measurements. *Jour. Geophys. Res.*, **109**, doi: 10. 1029/2002 JB002350.
- Chen, Z., Burchfiel, B.C., Liu, Y., King, R.W., Royden, L.H., Tang, W., Wang, E., Zhao, J. and Zhang, X., 2000, Global positioning system measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 16,215-16,227.
- England, P. and Molnar, P., 1997, Active deformation of Asia: From kinematics to dynamics. *Science*, **278**, 647-650.
- Fielding, E., Isacks, B., Barazangi, M. and Duncan, C., 1994, How flat is Tibet? *Geology*, **22**, 163-167.
- Gosse, J.C. and Phillips, F.M., 2001, Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quatern. Sci. Rev.*, **20**, 1475-1560.
- Gran Mitchell, S., Matmon, A., Bierman, P.R., Enzel, Y., Caffee, M. and Rizzo, D., 2001, Displacement history of a limestone normal fault scarp, northern Israel, from cosmogenic ^{36}Cl . *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 4247-4264.
- Granger, D.E. and Muzikar, P.F., 2001, Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques, and limitations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **188**, 269-281.
- Granger, D.E. and Smith, A.L., 2000, Dating buried sediments using radioactive decay and muogenic production of ^{26}Al and ^{10}Be . *Nucl. Instr. Meth. B*, **172**, 822-826.
- Granger, D.E., Fabel, D. and Palmer, A.N., 2001, Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be in Mammoth Cave sediments. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **113**, 825-836.
- Gu, G., Tinghuang, L. and Zhenliang, S., 1989, *Catalogue of Chinese Earthquakes (1831 BC-1969 AD)*. Science Press, Beijing.
- 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.
- Kohl, C.P. and Nishiizumi, K., 1992, Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic nuclides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **56**, 3583-3587.
- Kurz, M.D., 1986, In situ production of terrestrial cosmogenic helium and some applications to geochronology. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **50**, 2855-2862.
- Lal, D., 1988, In situ-produced cosmogenic isotopes in terrestrial rocks. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **16**, 355-388.
- Lal, D., 1991, Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **104**, 424-439.
- Lal, D., Harris, N.B.W., Sharma, K.K., Gu, Z., Ding, L., Liu, T., Dong, W., Caffee, M.W. and Jull, A.J.T., 2003, Erosion history of the Tibetan Plateau since the last interglacial: constraints from the first studies of cosmogenic ^{10}Be from Tibetan bedrock. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **217**, 33-42.
- Lambeck, K., Yokoyama, Y., Johnston, P. and Purcell, A., 2000, Global ice volumes at the Last Glacial Maximum and early Lateglacial. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **181**, 513-527.
- Liccardi, J.M., Kurz, M.D., Clark, P.U. and Brook, E.J., 1999, Calibration of cosmogenic ^3He production rates from Holocene lava flows in Oregon, USA and effects of the Earth's magnetic field. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **172**, 261-271.
- Lifton, N.A., Jull, A.J.T. and Quade, J., 2001, A new extraction technique and production rate estimate for in situ cosmogenic ^{14}C in quartz. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **65**, 1953-1969.
- Marsella, K., Bierman, P.R., Davis, P.T. and Caffee, M.W., 2000, Cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al ages for the last glacial maximum, eastern Baffin Island, Arctic Canada. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **112**, 1296-1312.
- 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. *Nucl. Instr. Meth. B*, **223-224**, 92-99.
- Matsuzaki, H., Tanikawa, M., Kobayashi, K. and Hatori, S., 2000, Development of a gas counter for AMS measurements of ^{10}Be and ^{26}Al of cosmic spherules. *Nucl. Instr. Meth. B*, **172**, 218-223.
- Meriaux, A.-S., Ryerson, F.J., Tapponnier, P., Van der Woerd, J., Finkel, R.C., Xu, X., Xu, Z. and Caffee, M.W., 2004, Rapid slip rate along the central Altyn Tagh Fault: Morphochronologic evidence from Charchen He and Sulamu Tagh. *Jour. Geophys. Res.*, **109**, doi: 10. 1029/2003JB002558.
- Meyer, B., Tapponnier, P., Bourjot, F., Metivier, F., Gaudemer, Y., Pelzer, G., Guo, S. and Chen, Z., 1998, Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau. *Geophys. Jour. Int.*, **135**, 1-47.
- Nishiizumi, K., Kohl, C.P., Arnold, J.R., Klein, J., Fink, D. and Middleton, R., 1991, Cosmic ray produced ^{10}Be and ^{26}Al in Antarctic rocks: exposure and erosion history. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **104**, 440-454.
- Raymo, M.E. and Ruddiman, W.F., 1992, Tectonic forcing of late Cenozoic climate change. *Nature*, **359**, 117-122.
- Repka, J.L., Anderson, R.S. and Finkel, R.C., 1997, Cosmogenic dating of fluvial terraces, Fremont River, Utah. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **152**, 59-73.
- Ritz, J.F., Brown, E.T., Bourles, D.L., Philip, H., Schlupp, A., Raisbeck, G.M., Yiou, F. and Enkhtuvskin, 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.
- Ruddiman, W.F., Prell, W.L. and Raymo, M.E., 1989, Late Cenozoic uplift in southern Asia and the American West: Rationale for general circulation modeling experiments. *Jour. Geophys. Res.*, **94**, 18,379-18,391.
- Sarda, P., Saudacher, T., Allegre, C. and Lecomte, A., 1993, Cosmogenic neon and helium at Reunion: measurement of erosion rate. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **119**, 405-417.
- Shen, F.L., Royden, H. and Burchfiel, B.C., 2001, Large-scale crustal deformation of the Tibetan Plateau. *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 6793-6816.
- Shepard, M.K., Arvidson, R.E., Caffee, M., Finkel, R. and Harris, L., 1995, Cosmogenic exposure ages of basalt flows: Lunar Crater volcanic field, Nevada. *Geology*, **23**, 21-24.
- Siame, L.L., Bourles, D.L., Sebrier, M., Bellier, O., Castano, J.C., Araujo, M., Perez, M., Raisbeck, G.M. and Yiou, F., 1997, Cosmogenic dating ranging from 20 to 700 ka of a series of alluvial fan surfaces affected by the El Tigre fault, Argentina. *Geology*, **25**, 975-978.
- 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.
- Tapponnier, P. and Molnar, P., 1979, Active faulting and Cenozoic tectonics of Tien Shan, Mongolia and Baykal Regions. *Jour. Geophys. Res.*, **84**, 3425-3459.
- Trull, T.W., Brown, E.T., Marty, B., Raisbeck, G.M. and Yiou, F., 1995, Cosmogenic ^{10}Be and ^3He accumulation in Pleistocene beach terraces in Death Valley, California, USA: Implication for cosmic-ray exposure dating of young surfaces in hot climates. *Chem. Geol.*, **119**, 191-207.
- Van der Woerd, J., Ryerson, F.J., Tapponnier, P., Meriaux, A.-S., Gaudemer, Y., Meyer, B., Finkel, R.C., Caffee, M.W., Guoguang, Z. and Zhiqin, X., 2000, Uniform slip-rate along the Kunlun fault: Implications for seismic behaviour and large-scale tectonics. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2353-2356.
- Van der Woerd, J., Xu, X., Li, H.B., Tapponnier, P., Meyer, B., Ryerson, F. J., Meriaux, A.-S. and Xu, Z.Q., 2001, Rapid active thrusting along the northwestern range front of the Tanghe Nan Shan (western

- Gansu China). *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 30,475-30,504.
- 横山祐典, 2004, 氷期-間氷期スケールおよび Millennial スケールの気候変動の研究: 同位体地球化学的・地球物理学的手法によるアプローチ. *地球化学*, **38**, 127-150.
- Yokoyama, Y., Caffee, M.W., Southon, J.R. and Nishiizumi, K., 2004, Measurements of In-situ Produced ^{14}C in Terrestrial Rocks. *Nucl. Instr. Meth. B*, **223-224**, 253-258.
- Yokoyama, Y., Lamberk, K., De Deckker, P., Johnston, P. and Fifield, L.K., 2000, Timing of the Last Glacial Maximum from observed sea-level minima. *Nature*, **406**, 713-716.
- Zreda, M. and Noller, J.S., 1998, Ages of prehistoric earthquakes revealed by cosmogenic chlorine-36 in a bedrock fault scarp at Hebgen Lake. *Science*, **282**, 1097-1099.

(要 旨)

横山祐典・阿瀬貴博・村澤 晃・松崎浩之, 2005, 宇宙線照射生成核種を用いた地球表層プロセスの研究. *地質雑*, **111**, 693-700. (Yokoyama, Y., Aze, T., Murasawa, H. and Matsuzaki H., 2005, Terrestrial Cosmogenic Nuclides as a tool for studying earth surface processes. *Jour. Geol. Soc. Japan*. **111**, 693-700.)

宇宙線との相互作用によって地球表層で岩石中に生成される核種 (TCN) は, 加速器質量分析計 (AMS) の発達によって, 地球表層プロセスの研究に急速に広く用いられるようになってきた. TCN 研究では半減期の違う複数の核種を組み合わせることによって, 侵食速度, 埋没履歴などを求めることが可能である. 現在は TCN のうち, ^{10}Be や ^{26}Al の測定が AMS により活発に行われてきている. 現在のところ TCN の絶対量の誤差は約 10 % と大きい, それでもこれらの測定結果を使って, テクトニクスや気候変動についての新しい知見が得られるようになった. チベットにおいての研究例も増え始めており, 今後サンプリング地点を増やし測定を活発に行うことによって, インドのユーラシア衝突によって引き起こされているチベット地域のテクトニクスの詳細や気候変動を細かく明らかにすることができる.