

# 地表プロセスと環境変動を測る 時間軸の設定

長谷部徳子

## 1) はじめに

地表を「地球の表層部」といった広い意味ではなく、陸域における固体地球と水圏・気圏の境界部と捉えると、地表で観察されるプロセスとして、固体地球に主たる原因を持つもの（例えば火山の噴火や地震断層に起因する隆起・陥没など）と、水圏・気圏の主要な構成物である流体による固体地球の改変が挙げられる。マクロな改変は地形の変化として現れる。流体による地形の変化は、流体の挙動が環境因子として果たす役割の大きさを考えると、局所的・広域的環境を反映するといつてよい。固体地球部に主たる原因を持つ地表プロセスも、水圏・気圏と固体地球との相互作用を考えると（例えば噴火による気圏へのガス・微粒子の放出や、山脈形成による大気循環への影響など）、環境変動を司る因子のひとつといつてよく、このなかにも地形の変化を伴うものがある。現在観察される地形の形成過程に時間軸をいれることは、地形変化のプロセスの理解に必要であるとともに、その変化の要因が固体地球にあり、流体との相互作用にあり、環境変動をはかる上で重要な役割を果たす。

地形変化を一地点で考えると、基準面にたいして上方に変化する場合、下方に変化する場合、変化がない場合の3通りがある。基準面を地表にとれば、上方変化は物質の追加（堆積）によってもたらされ下方変化は物質の削除、すなわち

削剥によってもたらされる。したがって地形変化をもたらすプロセスを大きく堆積と削剥の2つに大別し、それに変化を伴わない安定状態を加え、それぞれのプロセスがいつ起こったのか見積もる方法について紹介する。

## 2) 堆積年代の求め方

堆積した「物」があるので、その「物」を利用していろいろな手法が可能である。生物の化石のなかでも、花粉や水生のプランクトン（珪藻や有孔虫など）は、進化発達史が分かっているれば堆積時代を決めることができるだけでなく、その時代の環境の指標にもなるためよく利用されている。また火山灰が挟まれているとその噴火の時期が分かっているれば年代が決まる。堆積物の特徴が深度に対して周期的に変化する場合、深度は時間のプロキシであるから、時間軸が既に入っているものと同様な周期的な変化が認められれば対照によって年代を入れることもある。

一方、堆積年代を数値で表そうとすると実はなかなか難しい。数値年代を得るためには放射性元素の壊変を利用する。この壊変は放射性元素があればいつでもどこでも営々と起こっている現象である。この現象を利用して数値年代を得る時には、分析する対象となる「物」が、外界との元素のやり取りをしなくなって以降どれくらいの量の放射性元素が壊変したかを

見積もるのが一般的である。元素のやりとりをしなくなった状況を「閉鎖系となった」と表現する。またこの閉鎖系が成立した「時」を「時計が動き出した」などと表現する。堆積物の場合、堆積するや否や「時計が動き出す」例は決して多くなく、前述の火山灰と、堆積に巻き込まれて死に至った生物の遺骸が、代表的な堆積時に閉鎖系を実現させる物質である。火山灰は含まれている鉱物次第でいろいろな放射性元素を利用した年代決定が可能である。生物の遺骸の年代を決めるには $^{14}\text{C}$ がよく利用される。5万年より新しい堆積物に利用可能である。

堆積性の放射性元素を利用する方法もある。この場合堆積性放射性元素の初期量を見積もり、現存量との比較で堆積以後経過した時間を求める。利用される放射性元素としては $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ などが挙げられる。閉鎖系を保っていることが必須であるため、例えば圧密や堆積物からの水の移動に伴い元素の移動が起こる場合には利用できない。初期量の決定が難しいため、多くは堆積物の深度方向への濃度変動や現在堆積しつつある放射性元素の観測に基づき初期量を仮定して年代を見積もる。

最近新たに利用されるようになった手法にルミネッセンス年代測定法がある。これは堆積物そのものを環境放射能の検出器ととらえ、堆積物が浴びた環境放射能を一年あたりの環境放射能と比較して年代を見積もる方法である。当然堆積する時にそれまでに浴びていた放射能による効果がリセットされていなければ堆

積年代をしめさない。ルミネッセンス年代測定の面白いところは露光によってリセットされることである。したがって、試料の採取や室内での分析実験の際に光を避ける必要があるのは苦勞であるが、堆積年代を求めるには好都合である。50年以上の歴史を持つ手法ではあるが、実際に堆積物の年代決定に頻繁に利用されるようになったのは近年の環境問題への関心の高まりに歩調を合わせ手法のポテンシャルが注目を集めるようになったここ20年くらいのことである。いまだ発展途上の手法でもあり、基礎実験が活発に行われている。堆積プロセスのうち、カタストロフィックなイベントによって急激に堆積した物に対しては、堆積時の露光が十分でないために年代測定ができないこともある。

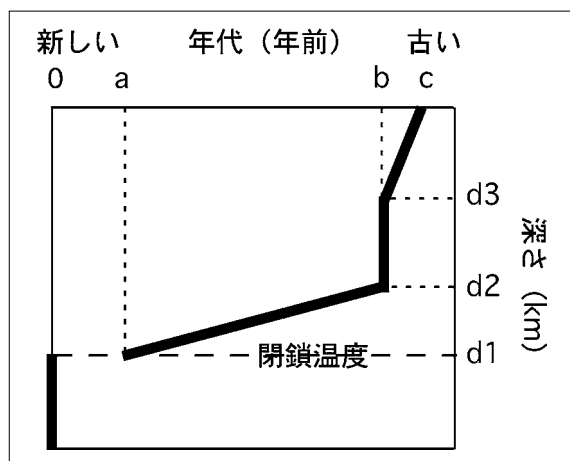
### 3) 削剥年代の求め方

堆積場と異なり、削剥が起こる場所は「物」が取り除かれる。削剥をもたらす営力は海水面との差が大きいほど大きいため、地表面を基準とした場合には削剥場では下方へ地形が変化しているが、海水面など他の基準面から見ると隆起のため上方へ地形が変化していることがあることがおもしろい。

削剥された物がどこに移動して堆積したのかが分かっている場合、その堆積物の堆積年代によって削剥プロセスに年代を入れることが可能である。削剥プロセスそのものを相手に

年代を見る場合は、熱年代学的な取り組みを行う。削剥によって地下深くにあった物が表層に近づくことは、地温により高温下にあった物が地表に近づくにつれて温度が低下することである。現在地表で得られる岩石が、どのような冷却を経たのかを調べる際には、放射年代測定法の中でも比較的低温で時計が動き出す手法が利用される。この時計が動き出す温度を閉鎖温度という。表層のみならず、柱状試料を利用できると、深度による年代値や熱履歴の違いからより詳細に削剥時期が特定できる（図1）。フィッシュトラック年代測定法、ウラン・トリウムから放出されるアルファ線（ヘリウム原

図1



深度方向に図のような仮想的な熱年代を得た場合、以下のように削剥プロセスを推定できる。d1の深さに対応する地温が閉鎖温度であるとする。c時点からb時点にかけては、削剥速度は  $\frac{d3}{c-b}$  (km/年)、b時点で一気に  $(d3 - d2)$  km削剥され、b時点からa時点にかけてはゆっくり  $\frac{d1 - d2}{b-a}$  (km/年) 削剥される。a時点から現在にかけては、削剥はおこらず静穏な時代。



## PROFILE

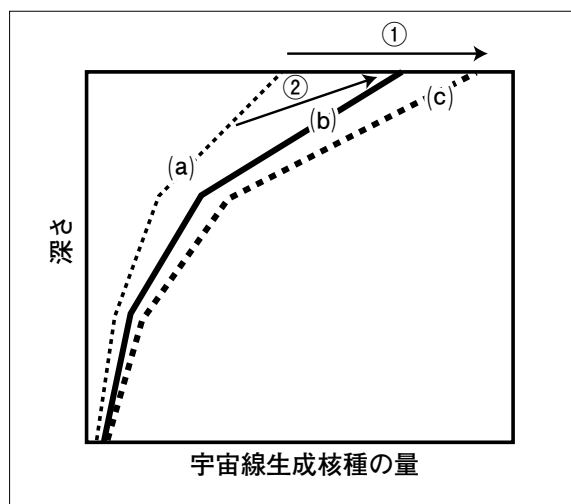
長谷部徳子  
(はせべ のりこ)  
金沢大学環日本海域環境研究センター  
准教授  
専門：地球年代学

子) による年代測定法、Ar/Ar法が、熱履歴を調べるのに利用される。これらの熱年代学的手法を網羅した国際会議が二年ごとに開催されるが、日本では手法ごとのコミュニティはあるものの、国際組織に対応するような手法横断的な組織がないのは残念なことである。これらの手法は数千万年のタイムスケールを持つ地形プロセス（例えばヒマラヤ山脈の形成による削剥や大陸内にリフト帯が形成されることに伴うリフト帯縁辺部の上昇削剥など）に有効であり、時間スケールの長い環境変動を見るのには役に立つが、人類紀の環境変動解析にはややその解像度に現状では不足があることも否めない。

## 4) 静穏期間の求め方

堆積も削剥も被らない安定な期間も地表プロセスの重要な一側面である。どれくらいの期間安定であったかを調べる直接的な手法としては宇宙線起源の同位体がどれくらいあるかを調べることによって試みられている。宇宙線に起因して様々な核反応がおこり、ある同位体

図2 宇宙線生成核種の量の概念図



深さ方向に核種生成率が低下し点線 (a) のように核種が生成される。静穏な場所の場合、時間がたてば矢印①のように核種がさらに増加し点線 (c) のようなプロファイルが得られ、年代決定ができる。しかし削剥があった場合、上方への移動と核種の増加によって矢印②のように値が変わり実線 (b) のようになる。従って削剥がないと思って年代を計算すると、年代値を若く見積もってしまう。異なる生成率を持つ宇宙線生成核種の分析結果と比較すると年代値の不一致が生じるので、複数の核種で削剥速度と表層年代が一致する組み合わせを見いだすことによってプロセスを理解する。

は放射性同位体に変化する。一年間の放射性同位体生成率を別途求め、表層試料にどれくらいそれらの同位体が形成されているかを見積もることにより表層が表層となって以降どれくらい時を経過したかを算出する (図2)。生成率は地球磁場の変動や宇宙線量の変動により時間変化するために見積もるのはかなり難しいようである。宇宙線は表層部にのみ降り注ぐとはいうものの、透過力があるので深さ方向に生成率が下がる。それらの放射性同位体は壊変

によって減少するので、生成と壊変の両方の効果を考慮に入れ、なおかつ深度方向に分析を行うことで生成率の異なる場の情報を包括的に説明できる安定期間を算出する。この手法は、元々は隕石がどれくらいの期間宇宙空間を旅してきたかを見積もることに利用されてきた。しかし分析機器の発達によりごく微量の放射性同位体の分析が可能になったことから、地球表層部への応用が可能になった。

## 5) おわりに

以上地表プロセスのうち、地形変化に着目して、3つに分けて年代軸を入れる方法を紹介した。実際の「場」が堆積場なのか削剥場なのか、あるいは静穏な場所なのか判断が難しい場合も多い。したがって上述の手法をいくつか組み合わせて包括的に地形変化史を理解する。図1の例のように削剥プロセスを理解するために熱年代学的な手法を適用したところ、静穏期間があることが明らかになることもある。また図2に示したように、静穏な場所だと考えて宇宙線に起因する放射性核種をはかる場合に削剥があったことが分かる例もある。従って多くの場合は複合的に手法を駆使して地表プロセスに年代を入れていく。図1や図2に示した例は単純かつ理想的な場合であるが、実際は分析誤差や手法そのものの基礎的な理解が十分でないなどの理由から、一筋縄の解釈ではないことが多いのも事実である。

ここで紹介した手法に興味がある方は、関連の地球科学や考古科学の教科書にてさらに理解を深めることができる。本稿ではふれなかったが、地形の変化を伴わない地表プロセスの年代決定に応用できる手法も多い。

これら3つの内容については参考になる文献を紹介して結びとする。

.....

#### 参考文献

- ルミネッセンス年代測定と地形発達：Geomorphology vol. 109, Special Issue on Application of Luminescence Dating in Geomorphology
- 熱年代学：Reviews in Mineralogy and Geochemistry vol. 58, Low-Temperature Thermochronology: Techniques, Interpretations, and Applications
- 宇宙線生成核種：Reviews in Mineralogy and Geochemistry vol. 47, p. 731-784, Cosmic-Ray-Produced Noble Gases in Terrestrial Rocks: Dating Tools for Surface Processes by Niedermann, S.