

地形プロセス学における実験と計測： 地形物質の物性計測をもとにした風化・ 侵食速度研究の二、三の事例

松 倉 公 憲*

Experiments and Measurements in Process Geomorphology: Some Examples of Studies on Rates of Weathering and/or Erosion Based on Landform Material Science

Yukinori MATSUKURA*

Abstract

The present paper introduces several studies on rates of weathering and/or erosion based on landform material science: (1) growth rates of tafoni, (2) recession rates of waterfalls, and (3) a field experiment of weathering rates of rock tablets. It is emphasized from these studies that measurements of rock properties, especially strength of rocks, are crucial to understand the formation and change of landforms in process geomorphology. The present paper also points out that the investigation using the method of *in situ* cosmogenic nuclides analysis is useful to estimate paleo-erosion rates and time scales of erosional processes.

Key words: *process geomorphology, landform material science, rates of erosion, rates of weathering*

1. は じ め に

当初、シンポジウムの世話人から「地形学の新展開：地形学における実験と計測」というタイトルで話題提供するように要請された。しかし、近年は地形プロセス学の進展にともない、多種・多様な実験や計測が行われてきている。また後述するように各種の計測技術の進展もめざましいものがある。しかも研究対象がより細分化した近年の地形学において、このような「実験と計測」にかかわる研究のすべてを筆者一人で総括することはほとんど不可能に近い。そこで、シンポジウムでは、筆者とその共同研究者によって行われた「実験と計測」に関わる最近の研究の中からいくつかを紹介することで責めを果たすこと

2005年9月28日受付, 2005年10月26日改稿, 2005年11月17日受理

* 筑波大学大学院・生命環境科学研究科・地球環境科学専攻

* Geoenvironmental Sciences, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan. e-mail: matukura@atm.geo.tsukuba.ac.jp

にした。取り上げた話題は、いずれも地形物質の物性計測をもとにした、風化・侵食速度に関わる「地形プロセス学」の研究例である。議論の過程では、特に地形物質の物性の中でも「強度」の計測が重要であることを強調した。そして話題提供の最後では、侵食地形研究の進展に関連して、岩盤の露出期間やその侵食速度が得られる、新しい手法である宇宙線表面照射年代測定法（TCN 法）と、それを使った一つの研究例を紹介した。本稿では、シンポジウムで取り上げたいいくつかのトピックを簡単にとりまとめるとともに、筆者の「地形プロセス学における実験と計測」に対する日頃の考えをとりまとめることにする。

地形学にはいくつかの方法論（たとえば発達史地形学、気候地形学、岩石制約論など）があるが、最近では地形プロセス学（process geomorphology）が地形学の中心的流れになっている。「地形プロセス」の主要なものは、風化・侵食・運搬・堆積の各プロセスである。このことから、「地形プロセス学」は、風化・侵食・運搬・堆積のプロセスの理解を通して地形の成り立ち・変化を理解することである。換言すると、地形プロセスとその結果形成される地形は、地形を変化させようとする営力（外的営力、内的営力）とそれに対する地形構成物質の抵抗力との相互の関連性（バランス）を分析することによって理解されることになる。このような見方からすると、谷津栄寿の主張した岩石制約論（Yatsu, 1966）は、地形プロセス学の中でも地形構成物質の物性の把握に重点をおいた研究法と理解される。

このような地形構成物質の物性把握を重視した「地形プロセス学」の研究は、世界に先駆けて我が国において発展してきた（このことは、2001 年に東京で開催された第 4 回 IGC の一つのセッションとして「ロックコントロール」が設けられ、会議終了後「地形」23 巻 2 号として「Rock Control in Geomorphology」という特集号が刊行されたことから伺える）。その中でも、時間の要素（地形変化速度）を取り入れた「地形プロセス学」研究の先魁となったのは、砂村継夫による海食崖の後退速度に関する研究（Sunamura, 1973）である。その後同様の研究法により、鈴木隆介とその共同研究者が、風食速度（Suzuki and Takahashi, 1981）、河川の側刻速度（Suzuki, 1982）、段丘崖斜面の減傾斜速度（Suzuki and Nakanishi, 1990）などについて議論した。

次章で紹介する研究も、このような研究と同じような地形構成物質の物性計測を基にした地形プロセスと地形変化速度との関係、すなわち地形変化速度に着目したものである。

2. 風化・侵食速度研究の二、三の例

2.1. タフォニの成長速度

タフォニは古くから多くの地形学者によって記載され、その形成プロセスについての議論がなされてきた。しかし、その形成速度に関する研究はほとんどなかった。その中で、Matsukura and Matsuoka (1996) は、岩石海岸に発達するタフォニの成長速度について議

論している。タフォニの1つの穴は、間口と高さ、奥行き、の3つの地形量を持つ。一般にタフォニはハニカムのような小さな穴が徐々に大きくなり、隣接の穴と合体することにより拡大していく。そのため穴（タフォニ）の成長速度を議論する場合、奥行き（深さ）方向の拡大速度をとるのが妥当であろう。従って、ある場所でのタフォニの成長速度を D_d/T で表す。ここで D_d はランダムに計測された30個のタフォニの深さのデータから最大10個のデータを平均したものであり、 T はそこでのタフォニの形成時間（単位は年）である。

タフォニは海岸段丘の前面段丘崖や、海食崖の崖面に形成されていることが多い。したがって、タフォニはそれらの段丘崖や崖面が離水してから現在までの間に形成され成長したと考えられる。そこでタフォニの形成時間 T は離水年代から現在までの時間で読み替えられる。

一方、タフォニの成長プロセスとしては、主に塩類風化のプロセスが考えられている。すなわち、海水飛沫を取り込んだ岩石が乾燥することにより塩類（NaCl）を析出するが、そのとき発生する結晶圧が岩石を破壊させる、という考えである。したがってタフォニの成長速度は塩類風化しやすい岩石で大きいと考えられる。そこで、風化し易さの指標（WSI = Weathering Susceptibility Index）として、風化させる力と風化させまいとする力の比で表すことにした。風化させる力は、岩石中で発生する結晶圧（ P ）であり、これは岩石の間隙径分布から計算される。風化に抵抗する力は岩石自身の持っている強度である。この場合は、岩石が自壊するのに抵抗する力（応力）として引張強度（ S_t ）を採用するのが妥当であろう。

房総半島、佐渡島、紀伊半島において、砂岩、凝灰角礫岩、礫岩、花崗岩、玄武岩、安山岩などの種々の岩石からなる海岸にみられるタフォニを対象に、その形状を計測し、一方で地形発達史の既存研究から離水年代を推定した。同時に岩石を採取し、間隙径分布と引張強度などの物性を計測した。得られた値を用いて整理した結果（Fig. 1）、以下のような関係式が導かれた。

$$\frac{D_d}{T} = 0.130 \left(\frac{P}{S_t} \right)^{0.648} \quad (1)$$

ここで、右辺の P/S_t は WSI に相当するものである。

Fig. 1 に示されたデータには多少のバラツキがあるが（ $R^2 = 0.848$ ）、その原因としては、（1）タフォニの成長速度を一定（等速）とみなしていること（タフォニは成長して奥行きを増すほど、海水飛沫の供給量が減少したり日陰のために乾燥しにくくなるため、時間経過とともに徐々に速度を低下させる可能性が高い）、（2）海岸での風化環境（海岸からの水平距離、高度、風向・風速などによる海水飛沫供給量の差異、日射量などの乾燥条件など）にはあまり差がないと仮定していること、（3）離水年代から推定された T の見積もりの信頼性の問題、などが考えられる。

従って、この式に時間依存性や風化環境などを取り込めば、それだけ解像度の高い式が

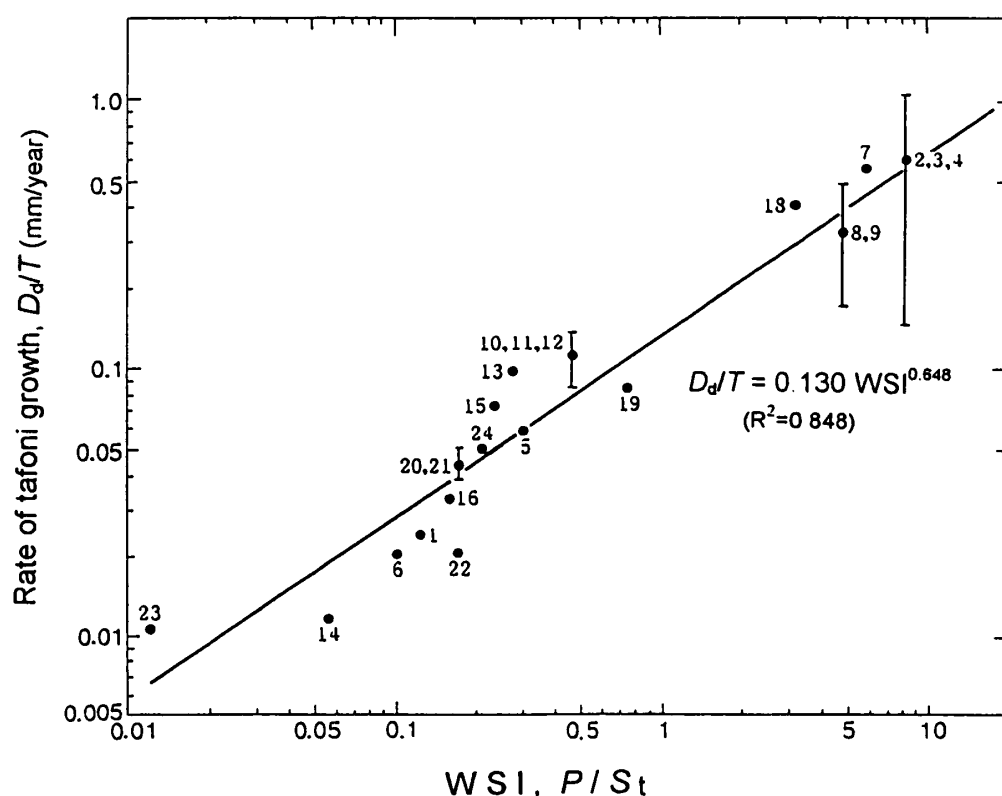


Fig. 1. Relationships between weathering susceptibility index (WSI), P/S_t , and the rate of tafoni growth, D_d/T , where P is the total crystallization pressure, S_t is the tensile strength, D_d is the depth of tafoni, and T is the period for tafoni growth (after Matsukura and Matsuoka, 1996).

得られることになる。そこで、次にこのことにアプローチしてみた。

青島・弥生橋橋脚砂岩塊にはタフォニ状の窪みが形成されている。形成されている窪みは、塩類風化によって劣化した表層が波浪によって侵食されることによって拡大していると考えられている (Takahashi et al., 1994)。すなわち風化制約地形 (weathering-limited landforms) と考えられる。したがって、この窪み深さもタフォニと同じ岩石物性に依存している。青木・松倉 (2005) は、橋脚竣工後 20 年目と 38 年目、50 年目の 3 回の窪み深さのデータを解析し、窪み深さの成長速度 (砂岩塊の風化・侵食速度) を表す式を提案した。すなわち、(1) 南面の窪み深さは満潮位の直上で最大値をとり、高度が高くなるほど小さくなる傾向があること、(2) 同じ高さの層であっても窪み深さと岩塊の強度 (硬度) にはそれぞれ差異があることから、岩塊強度の個体差と高さをパラメーターとして取り込んだ次式が提案された (青木・松倉, 2005)。

$$D = 68.6 \frac{P}{S_t} e^{-0.0038h^*} (1 - e^{-0.031t}) \quad (2)$$

ここで、 D は窪み深さ、 P は岩石中で発生する結晶圧、 S_t は岩塊の引張強度、 h^* は平均高潮位面からの相対的高さ、 t は時間 (年) を表す。

2.2. 滝の後退速度

滝の後退は河床縦断形の発達プロセスにおいて重要な役割をもつ。しかし、滝の後退速度に関するデータは、ナイアガラ滝で約 1 m/y という値以外ほとんど得られていなかった。Hayakawa and Matsukura (2003) は、房総半島の 9 箇所の滝において、まず後退速度のデータを次のようにして得た。すなわち、房総半島には河成段丘、海成段丘の形成に関わって形成された滝がいくつか存在し、それらの段丘の情報から、滝が最初に形成された位置と時間が特定できることから、後退速度（平均後退速度）が計算される。また、江戸時代に行われた「川廻し」と呼ばれる河川改修（ショートカット）により形成された滝もあり、そこでも後退速度が得られる。

次に滝の後退速度に影響を与えるパラメーターを吟味した。後退速度は侵食力と侵食に対する抵抗力とによって決定される。一般に河床岩盤の下刻・側刻などの侵食力は流量と河床礫などの磨耗材の多寡によって決まると思われる。また、同じ侵食力であっても、滝の規模が大きければ後退量は小さくなることが予想されることから、滝の大きさも後退速度に影響を与えるパラメーターと考えた。一方侵食に対する抵抗力は滝を構成する岩盤の強度であろう。これらのことから、侵食力 (F) と抵抗力 (R) の各パラメーターを組み合わせ、以下のような指標を考えた。

$$\frac{F}{R} = \frac{AP^*}{WH} \sqrt{\frac{\rho}{S_c}} \quad (3)$$

ここで、 A は流域面積、 P^* は降水量、 W は滝の幅、 H は滝の高さ、 ρ は水の密度、 S_c は滝を構成する岩石の一軸圧縮強度である。

得られた滝の後退速度と各パラメーターの値から、データを整理したところ (Fig. 2)、両者は両対数数のグラフではほぼ直線関係が認められ、両者の関係は以下の式で表された。

$$\frac{D}{T} = 99.7 \left[\frac{AP^*}{WH} \times \sqrt{\frac{\rho}{S_c}} \right]^{0.73} \quad (4)$$

ここで、 D は滝の後退距離、 T は後退に要した時間である。ただし、この式には河床礫の移動に伴う磨耗効果については考慮されていない。そのことがデータのバラツキ ($R^2 = 0.909$) の原因の一つかもしれない。今後の課題である。

2.3. タブレットを用いた岩石の風化速度

風化速度を知る一つの研究方法として、タブレットを用いた野外実験がある。これは岩石タブレットを野外に放置（あるいは土層中に埋積）し、一定期間ごとに回収してその欠損重量を計測することにより、風化速度を見積もるという方法である。これらの多くの研究では石灰岩を対象としており、石灰岩以外の岩石による実験は余り多くなく、ましてや岩型の違いによる風化速度の差異を議論している研究はほとんどない。そこで著者らは以下のような野外実験を実施した (Matsukura and Hirose, 1999; Matsukura et al., submitted)。

(1) 花崗岩、花崗閃緑岩、ハンレイ岩、石灰岩、安山岩、流紋岩、凝灰岩、結晶片岩の 8 つの岩型を選び、直径 4.5 cm、厚さ 1 cm のタブレットを用意した。

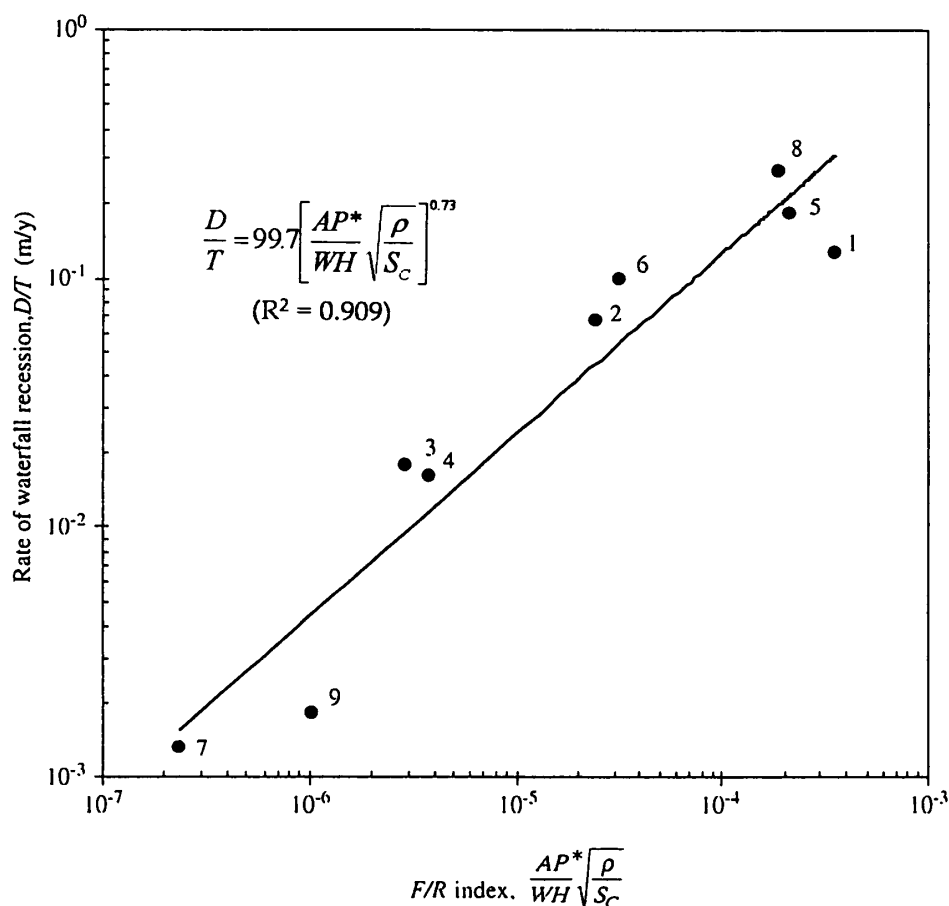


Fig. 2. Relationships between the F/R index and the rates of waterfall recession (after Hayakawa and Matsukura, 2003).

(2) 1 岩型 15 個ずつ (8 岩型で 120 個) のタブレットをナイロン製の網袋に入れたものを 4 個用意し, それを阿武隈山地の花崗閃緑岩の斜面に埋設した. 埋設は風化環境の異なる 4 地点 (地上, 腐植土層中: 深度 15 cm, 不飽和な風化層中: 深度 60 cm, 飽和している風化層中: 深度 25 cm) を選んだ.

(3) 3 ヶ月あるいは 6 ヶ月ごとに野外から回収し, 水洗い後に炉乾燥し, 各岩型ごと, および各風化環境ごとにタブレットの重量を計測した.

(4) 以上の手順を 10 年間にわたり行った.

実験結果として, 以下のようなことがわかった.

(1) 飽和帯における石灰岩が最も風化速度 (重量損失速度) が大きく, 3 %/y ほどであった. 花崗閃緑岩の風化速度はその次に大きく, ほぼ 2 %/y という値が得られた.

(2) 飽和帯以外の場所の, 石灰岩を除いた風化速度と岩石物性の関係は, 以下の式で表された (Fig. 3):

$$\text{Rate of weight loss} = 0.015e^{36(n/l)} \quad (5)$$

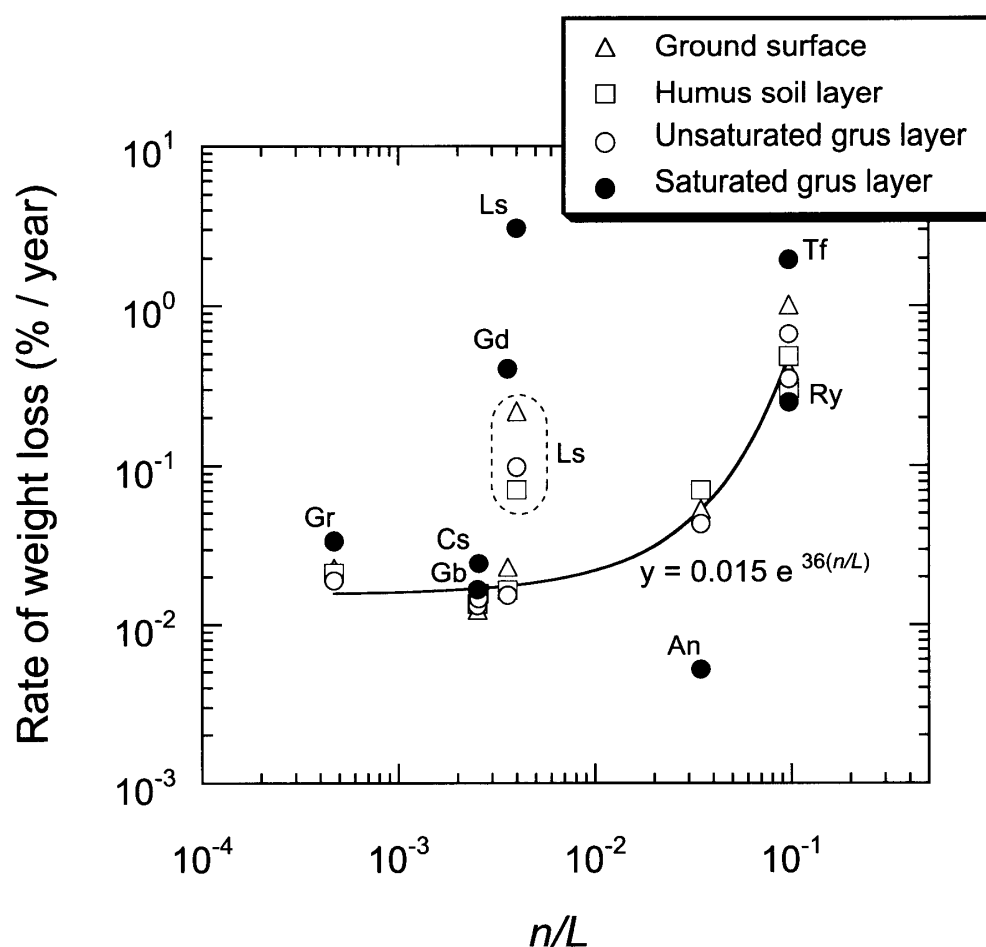


Fig. 3. Relations between weathering rates and WSI-values (after Matsukura et al., submitted).

ここで右辺の指数中の n は岩石の間隙率であり、 L は岩石強度に比例する値であるエコーチップ硬度（エコーチップ試験器については、4.3で後述する）である。従ってこの指数 (n/L) は、タフォニの易風化指数と類似の指標と考えてよい。一般にスレーキング (Matsukura and Yatsu, 1982) や凍結破碎 (Matsuoka, 1990) や塩類風化 (Matsukura and Matsuoka, 1996, 山田ほか, 2005) などの物理的風化速度は、岩石の空隙と強度に強く支配されることが知られている。従って、飽和帯以外の場所では物理的風化作用（たとえば凍結破碎など）が卓越している可能性が高いことが示唆される。

ところで、炭酸塩鉱物からなる石灰岩が化学的風化（溶解）が速いことはよく知られており、この野外実験においてもそれが確認される (Fig. 3)。しかしその他の珪酸塩鉱物からなる岩石の化学的風化速度の差異が何によってコントロールされているかという解釈は極めて難しい。一般的な鉱物の風化系列（風化され易さの順序）から言えば、橄欖石、角閃石、黒雲母等の有色鉱物が風化されやすく、石英が最も風化されにくい。このことから言えば、有色鉱物の含有量が多いハンレイ岩の方が、それらが相対的に少ない（石英が多くなる）花崗岩や花崗閃緑岩よりも風化されやすいはずである。しかしこの野外実験から

は、ハンレイ岩に比較して花崗閃緑岩の風化速度が圧倒的に大きく、鉱物の風化系列は岩石にはあてはまらないことを示している。

3. 侵食速度研究における新手法：TCN 年代法

3.1. TCN 年代法

2 章で議論したように、一般に侵食速度（地形変化速度）の値を得ることやその経時的変化に関する実証的研究はそれほど簡単ではない。なぜなら、（1）地形の変化量が 1 ～ 2 年では計測できないほど小さいこと、（2）地形変化の開始時期・継続期間を認定できないこと、（3）原地形（初期地形）を復元できないこと、（4）地形営力の経時的変化（たとえば気候変化）の遡知がきわめて困難であること、などがその理由である（高橋ほか、1993）。上述した 2 章の研究の中では、タブレットの野外実験においては、タブレットという人工的形状によって初期地形（形状）を与えており、地形変化の継続時間を 5 年とか 10 年という長期の野外実験をすることによってクリアしている。一方、タフォニや滝の研究においては、地形変化の開始時期・継続期間を海成段丘や河成段丘の離水年代等によって置き換えをおこなっている。

しかし、このように地形発達史の研究成果を取り入れられる研究対象はそれほど多くない。すなわち地形変化の開始時期・継続期間に関する情報が全く得られない場合はどうしたらいいのであろうか。このような要求に答えることが期待される新しい手法が最近確立されつつある。それが原位置宇宙線生成核種年代測定法（*Terrestrial in situ Cosmogenic Nuclides dating* と呼ばれるもので、以後、TCN 年代法と略称する）である。この方法は、宇宙線生成核種は、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、地表面が露出していた時間を算出することができる、という原理をもとにしている。TCN 法の原理やこの方法を用いた最近の研究例については、若狭ほか（2004）に詳しい。この手法は、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ものである（本稿脱稿後、*Earth Surface Processes and Landforms* に TCN 法を用いた研究の特集号が 30 巻（2005）の 8 号に組まれていることが判った：このことはまさに、この手法の地形学における今後の発展を暗示しているように思える）。次節では、この手法を用いた一つの研究例（Wakasa et al., 2004；2006）を紹介する。

3.2. 花崗岩ドームの表層シートの剥離速度

韓国、ソウルの北方郊外にはいくつかの花崗岩ドームが存在する。この花崗岩ドームの表層には数多くのシーティング・ジョイントが発達しており（Fig. 4）、それらのシートは外側のものから順に剥離・剥落していつているように観察された。すなわちドームの表層は厚さ数十 cm から数 m の数枚の厚さのシートにより構成されており、それらのシートは階段状に配列をしている。最も外側（上部）に位置するシートをシート 1 と呼び、ステッ

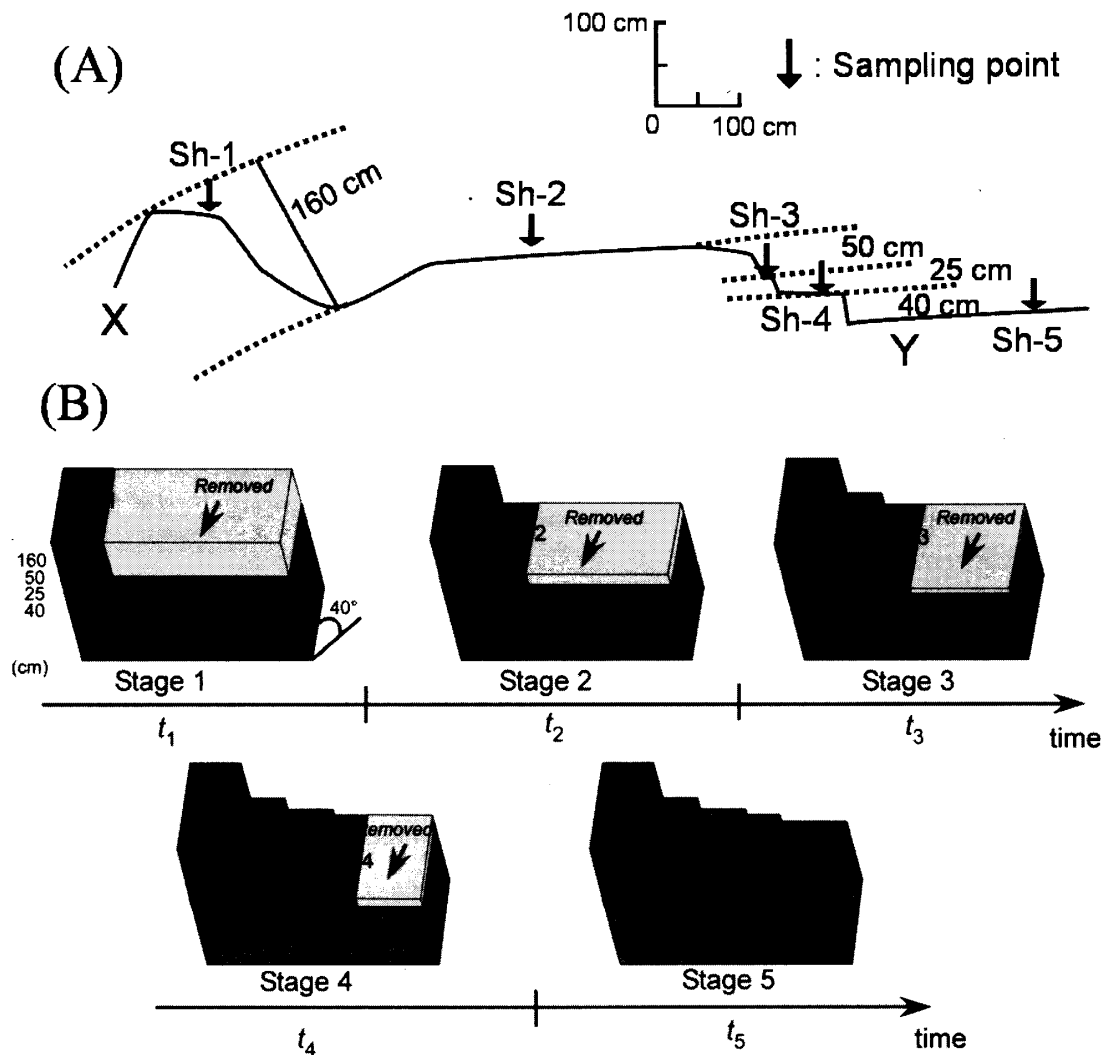


Fig. 4. (A) The cross profile of the sheeting structures (after Wakasa et al., 2006). The thickness of Sh-(n) was measured as the relative height of the front cliff of Sh-(n). Arrows indicate sampling points. (B) Schematic diagram of exfoliation model of sheets. Stage n corresponds to the period starting when from that the surface of Sh-(n) is exposed until exposed Sh-($n+1$) is exposed by exfoliation of a part of Sh-(n). The duration time of each sheet is t_n . The thickness of each sheet is denoted by $x_1 \sim x_5$.

プが低くなる方向にシート 2, 3, 4, 5 と呼ぶことにした。シート 1 の表面では、石英の粒子が突起をつくり、全体的にはざらざらした感触であり、風化がかなり進行していることが伺われた。一方、シート 4, 5 の表面はきわめて滑らかであり、ほとんど風化していない。シートの表面においてエコーチップ（この試験器については、4.3 で詳述する）の硬度を計測したところ、以下のような結果が得られた：シート 1 で 228，シート 2 で 279，シート 3 で 321，シート 4 で 384，シート 5 で 455。これらの値からもシート 1 が最も風化継続（露出）時間が長く、シート 5 の露出時間が短いことが予想された。

そこで、各シートの表面から岩石試料を採取し、TCN 濃度を計測した。ターゲットの核

種としては ^{26}Al と ^{10}Be を計測した。得られた濃度をもとに、各シートの露出時間を計算したところ、シート1は54.0 kyr、シート2は20.2 kyr、シート3は7.84 kyr、シート4は5.83 kyr、シート5は1.12 kyrとなった。

シート1は54,000年前に露出し、シート2は20,200年前に露出した、という結果から、シート2の上にあったシート1が剥離するのには $54,000 - 20,200 = 33,800$ 年を要したことになる。すなわち重なり合う各シートの露出年代の差が、それぞれのシートの剥離期間と読みとることができる。この剥離期間と各シートの厚さとの関係を見ると、厚いシートの剥離期間は長く、薄いシートの剥離期間は短いこともわかった。両者の関係から、厚さ1 mほどの厚さのシートが剥離するのに約13.5 kyrかかることがわかった。

4. 地形プロセス学における実験・計測の現状と今後の課題

地形プロセス学における実験・計測の現状把握に入る前に、実験(Experiment)と計測(Measurement)との違いを明確にしておこう。地形学の実験は、室内実験と野外実験に分けられるが、いずれにしても「実験には、意識的な自然へのはたらきかけ、つまり人為的に何か条件を設定するという操作が加わる(兵藤, 1993, p.15)」ことになる。したがってたとえば野外実験(field experiment)は「種々の要因が複雑にからみあっている自然現象のからくりを解明するために主要なファクターを人間が野外でコントロールして、すなわち条件を単純化して、その中で観察や計測を行うものである」(砂村, 1992)。地形学における野外実験は、コントロールするファクターの種類によって、次の三つに大別できる(砂村, 1988)：(1) 力(営力)をコントロールする実験、(2) 物質をコントロールする実験、(3) 境界条件をコントロールする実験がある。砂村(1992)によれば、海岸地形研究の論文の中に、単に「野外観測」をしているだけなのに、「野外実験」をした、と誤記しているものが散見されるという。このような誤りは海岸地形研究に限らないようであり、注意が必要であろう。ところで、2.3で紹介したタブレット実験は「野外実験」に属するものであり、上記(2)の物質をコントロールする実験に相当する。

一方、室内実験においても多様な実験が行われてきた。たとえば、一方向流れの水路、造波水槽、平面水槽などを用いた、流砂(河川関連)や漂砂(海浜関連)に関係した実験、風洞を用いた飛砂(砂丘関連)の実験、各種の物理風化・化学風化・生物風化などに関連した実験、降雨実験等々の室内実験などである。室内実験においても、野外実験と同様に、コントロールするファクターの種類によって三つに分けられる。

この章では、2章との関連から、(1) 地形プロセス学における「実験」とその問題点、(2) 地形プロセス学における岩石物性(特に強度)計測の重要性、(3) 岩石物性計測の新展開および課題、という3つのトピックについて述べる。

4.1. 地形プロセス学における「実験」とその問題点：タブレットの野外風化実験の例

近年のプロセス地形学の進展とともに、多種・多様な実験(室内、野外を問わず)が行

われてきている．そこで本章では，地形プロセス学における実験に関する現状紹介と今後の課題について簡単に触れたいと思う．ただし，各種の実験を網羅的に紹介したり，またそれらの問題点を抽出することは筆者の手に余る．ここでは一つの例として，2.3で紹介したタブレット野外実験にまつわる問題点と今後の課題について議論する．

阿武隈山地における著者らによる10年にわたるタブレット風化実験の研究(Matsukura and Hirose, 1999; Matsukura et al., 2001; submitted)をとおして，その実験の長所とともにいくつかの短所・欠点(問題点)も明らかとなってきた．タブレット実験では，岩石の野外での風化速度を直接計測することが可能であり，その点は長所であろう．しかし，タブレット実験は野外実験であるが故に，そのみでは物理風化と化学風化のどちらが卓越して働いているのか，両者の割合を特定できないという欠点を併せ持っている．また，自然条件下での風化実験ということから，風化速度データを得るためには少なくとも数年の長さが必要であり，かなり長期の研究計画を立てなければならないという短所もある．また，タブレットの形状から派生する問題もあるようである．以下にそのことを議論したい．

Yokoyama and Matsukura (submitted) は，野外実験で使用したのと同じ花崗閃緑岩のタブレットを用いて室内で溶解実験(化学的風化速度に関する実験)を行った．4つのタブレットを100 mlのプラスチックの容器にお互いが接触しないように立て，そこに野外と同じ条件のpH6-7の蒸留水を $29 \pm 1 \text{ ml d}^{-1}$ を流す流通系の実験をおこなった．温度は 20°C であり，攪拌や振とうは行わない．この結果，タブレットの風化による重量損失速度は， $2.1 \times 10^{-5} \text{ wt \% d}^{-1}$ となった．これに対して，野外実験では $1.2 \times 10^{-3} \text{ wt \% d}^{-1}$ となり，野外の方が50倍も風化(重量損失)が速いことがわかった．

このような野外と室内の実験結果の差異について，Yokoyama and Matsukura (submitted) は以下のような観察をもとに次のように考察した：

- (1) 10年の野外実験終了後のサンプルには，風化によって雲母が剥落したと思われる多くの穴が観察された．そこで，タブレットの上面の $1 \times 2 \text{ cm}$ の範囲において3D スキャナーを用いて穴の形状を把握した．その結果，穴の合計体積は 5.59 cm^3 と見積もられた．したがって，もしこのような穴の形成がタブレットの全表面積において起こると仮定すると，穴の全体積は $5.59 / 2 \times 31 / 1000 = 0.087 \text{ cm}^3$ となり，黒雲母の密度を 2.83 g/cm^3 とすると， $2.83 \times 0.087 = 0.25 \text{ g}$ の重量損失があったと計算される．一方，実際の野外における欠損重量は10年間で4.0%であり，タブレット1個(30 g)あたりの欠損重量は $30 \times 0.04 = 1.2 \text{ g}$ ということになる．したがって全損失量の79% [= $(1.2 - 0.25) / 1.2 \times 100$] がエッジでの損失であり，21%だけが表面からの損失となる．
- (2) 10年間野外実験をしたタブレットを一週間蒸留水に浸しておいたのちに，タブレットを水から引き上げると，ビーカーの底に黒雲母の粒子が何個も残留した：このことはタブレットの中で黒雲母が隣接する鉱物からすでに分離していたことを示す．

上記(1), (2)の観察から, 黒雲母の離脱は, 鉱物の粒界が溶解することと, 一つの黒雲母粒子の中での劈開での分離などによって起こると思われる。すなわち室内実験は純然たる化学的風化速度を計測しているが, 野外実験では化学的風化のほかに黒雲母の離脱を促す何らかの物理的プロセス(侵食プロセスやタブレット洗浄の際の人為的作用? など)が働いているのであろう。このような物理的プロセスはタブレットの面よりエッジの部分で作用しやすいので, 野外の風化実験での風化速度が大きくなる, と考えられる。一般に室内実験における化学的風化速度は野外実験から得られる風化速度より圧倒的に(5桁 = 10000 倍も)大きいとされている(たとえば, Swobado-Colberg and Drever, 1993; Yokoyama and Banfield, 2002; White and Brantley, 2003)。しかし, 上記の花崗閃緑岩の例では, 実験室での風化速度より野外の風化速度の方が大きいことを示しており, 興味深い。

以上の議論は, 風化速度にタブレットの形状が大きく影響していることを示唆している。すなわち, タブレットには上下の円周部エッジにおいて風化が進行しやすいという問題である。このことは同時に, 回収して洗浄するときに剥離しそうな鉱物を物理的(人為的)に剥がしているのではないかという危惧も抱かせる。この点は今後に残された課題であらう。

そして, もう一つ指摘しておきたいことは, 凝灰岩・安山岩などで, 時として3ヶ月前の回目の計測より重量が増加することがあることである。このことは, 重量計測の誤差では説明できないものであり, これらの岩石が間隙の多い(大きい)ことから, 目詰まりをおこしていることも考えられるが, とくに毎年5月の計測時に重量が増加することが多く, その原因の特定ができていない。この解明も今後に残された課題である。

4.2. 地形プロセス学における岩石物性(特に強度)計測の重要性

2章で議論したように, 風化・侵食速度は式(1)~(4)で示されるように, 風化・侵食プロセスや岩石物性などによって定量的に示される。このいずれの式中にも, 岩石の風化・侵食の抵抗性を表す強度に関係したパラメーターが含まれている。すなわち, 風化・侵食プロセスを議論するためには, 岩石強度は極めて重要なパラメーターであることがわかる。

ところで, 斜面で生起するプロセスとしてはマスマーブメントが重要である。このようなマスマーブメントの研究を力学的に扱おうと思えば, 斜面安定解析は最も有効な方法であらう。斜面安定解析は, 斜面構成物質の物性値を用いるものであるから, 岩石制約論そのものでもあろう。筆者らの研究室で行ってきた斜面安定解析のいくつかは既存の解析法やそれらを変形したもの – 無限長斜面の安定解析(たとえば, Matsukura and Tanaka, 1983; Matsukura and Mizuno, 1986; Matsukura, 1996, Wakatsuki et al., 2005; Matsushi et al., 2006)や Culmann の解析(たとえば, Matsukura et al., 1984; Matsukura, 1987; 2001), 片持ち梁の安定解析(たとえば, Matsukura, 1988; Kogure et al., submitted など) – を適用しているが, 新たに提案した岩盤崩落に関する解析式もある(たとえば, 青木は

か, 2005). これらのすべての安定解析式の中には, 斜面構成物質の単位体積重量やせん断強度などの物性値が取り込まれており, これらの解析においても岩石強度のパラメーターが重要であることがわかる.

ところで, このようなマスマーブメントを力学的に扱う研究は1970–1980年代に大きく飛躍した. この時期には斜面に関する多くの教科書(たとえばCarson 1972; Carson and Kirkby 1972; Selby 1982)や成書(たとえば, Yatsu et al., 1975; Brunsden and Prior 1984; Bromhead, 1986; Anderson and Richard, 1987)が出版され, 斜面地形プロセスを力学的に扱う重要性が指摘された. しかし, その後, 斜面地形に関する研究は, 水文地形学関連の研究において急速な発展を引き起こしたにもかかわらず, 斜面地形プロセスを力学的に扱う研究は遅々として進んでいないようである.

このような背景には, 鈴木(1994)がすでに指摘しているように, 地理学教室あるいは地形学教室における教育の問題があるのかもしれない. たとえば, Selbyは1982年に出版した「Hillslope Materials & Processes」を改訂し1993年に第2版を出版し(Selby, 1993), 岩石物性計測の重要性を述べている. しかし彼自身の研究を例にとると, シュミットハンマー反発値を利用したRock mass strength classification and rateという半定量的手法にとどまっている. また, マスマーブメントに限らなければ, 岩石物性から地形を説明しようとしている地形学教室は外国にもいくつかある(たとえば北アイルランドのクイーンズ大学など). しかし彼らはSEMやXRDなどの鉱物学的分析機器を利用することが主であり, あまり強度や硬度といった力学的物性には着目していないようである. たとえば, 最近2.2で議論したHayakawa and Matsukura(2003)の研究を引用したスコットランドにおけるknick pointの後退速度の論文(Bishop et al., 2005)がEarth Surface Processes and Landformsに掲載されたが, 彼らの式では, 侵食力に関係したパラメーターのみが採用され, 抵抗力を示す岩石物性のパラメーターが欠落している. パラメーターを減らしても説明がつくという主張には首肯できる点もあるが, 侵食力と抵抗力の両方を考慮してつくった著者らのパラメーターから, 抵抗力を除外しており, 岩石物性計測の意識が薄いことを伺わせる.

ここでは地形プロセス学においては, 特に岩石・土の強度について知ることの重要性を強調したい. 上述したように, 従来の研究では地形物質の強度を, そこで作用する応力の種類の如何にかかわらず, 一軸圧縮強度で代表させているケースが多い. しかし本来は, 実際にそこで働いている応力が圧縮なのか, 引張なのか, せん断なのかを明らかにし, そのうえで強度を計測しなければならない(このことに関してはすでに以前のシンポジウムで議論されている(地形, 15巻3号のロックコントロール特集号の「総合討論」を参照)). このような議論の精度があがるにつれて, 強度についても, より精度の高いデータの取得が必要になろう. 今後は, 強度の寸法効果(供試体オーダーの強度から岩盤・岩体マスとしての強度の見積もり), 強度の異方性(Matsukura et al., 2002), 水分条件による強度の差異(Matsushi and Matsukura, 2006)などを取り込んだ, より精度の高いデータ

を用いた地形プロセスの解析・解釈がなされるようになるものと思われる。

4.3. 岩石物性計測の新展開および課題

鈴木（1994, pp.183-187, および表3と表4）によれば,「地形構成物質の性質は地質学的性質と材料科学的性質の二つに大別される。そして,地形過程では総じて,地質学的性質よりも材料科学的性質（岩石物性）がより重要であり,このことが,谷津（1965）の「岩石物性を測定せよ」という主張の論拠である」という。

Table 1は岩石物性とその計測法についてまとめたものである。岩石物性の分類については,鈴木（1994, 表3）を基本としており,それに対する測定法を加筆したものである。多くの方法は,岩石・岩盤力学,土質力学などの分野において規格化されたものであり,それらを利用することによって,多くの物性値を計測することができる。最近では岩石物性の計測について書かれた地形学の成書もある（Goudie ed., 1981; Selby, 1982, 1993）。

岩石物性を計測することが重要であるといっても,ただやみくもに計測してもデータの山に埋もれてしまいかねない。その地形を形成している地形プロセスを知って,そのプロセスに対応した測定項目を吟味する必要がある（いわゆる測定音痴にならないようにしなければならない）。また,地形の説明のために欲しいデータが,既存の測定法に頼っては得られないことも多い。その場合は自ら新たな測定法を周辺の学問分野から借りてくるか,あるいは必要であれば自分で工夫して作り上げることも考えなければならない。ここでは,最近筆者の研究室で導入した二つの計測器について簡単に紹介する。

一つ目は岩石表面の含水比の計測法である。青島の橋脚砂岩の凹みの侵食量を議論していく過程で,岩石表層の含水比の時間的変化を知りたいと考えた。なぜなら,凹凸の形成には「塩類風化」が関係していることが予想され,海水の供給による湿潤と日射による乾燥との繰り返しのプロセスが大きく影響していることが判ったからである。一般には岩石の含水比は以下のようにして計測される: (1) 従来の含水比計測は現場でサンプリングし,すぐにその場で重量を計測するか,それができない場合は密封し実験室に持ち帰って秤量する。(2) 炉乾燥の後に秤量し,(1)と(2)の秤量の差が水分量となり,岩石の乾燥重量で除することにより,含水比を求める。しかし,青島橋脚の場合には,(1)岩石試料を採取することは許されないこと(橋脚は人工構造物であり,少量といえども不可),(2)含水比の変化を時系列(たとえば1時間ごとの変化)に追跡したいこと,などの理由で,非破壊でしかも繰り返しの計測が可能な方法はないかを検討した。その結果たどりついたのが吸光度計である(Matsukura and Takahashi, 1999)。この器機の原理は,水分に吸収されやすい近赤外光(吸収光)と水分の影響を受けにくい赤外光(参照光)を交互に試料表面に照射し,それらの反射光量の比を計算し吸光度とするものである。この吸光度と水分量のキャリブレーションから,岩石表面の含水比が求められる。岩盤を破壊することなく迅速に簡便に繰り返し測定ができることから,室内計測だけではなく,空間的・時間的変化を追う野外計測にも適している。

二つ目として,岩盤(あるいは岩盤表層の風化層)の強度の現場計測法であるエコー

Table 1. Various properties of landform materials and their measurement equipments and methods ("various properties of landform materials" is based on Suzuki's (1993) Table 3).

大分類		小分類	測定法（測定器）の例
岩石・鉱物学的性質	成因的性質	鉱物組成 粒径分布 組織・岩相 異方性 放射線核種法 化学法 色 粗さ（ラフネス） 硬度	XRD, TEM SEM, TEM SEM, 比表面積計 X線CTスキャン K-Ar, FT, ¹⁴ C, ²³⁰ Th/ ²³⁴ U ²³⁵ , U-Pb, TL, ESR 法 OBH 色彩色差計 MEM, AFM モース硬度計, ビッカース硬度計, エコーチップ
	生成年代		
	風化・変質程度		
化学的性質		化学組成	XRF, EDS, EPMA, ESCA
物理的性質	比重	真比重 見掛け比重（かさ比重）	ピクノメータ法, 空気比較式比重計, 砂・水置換法
	粒子 間隙	粒径・粒径分布・粒子形状 間隙率（間隙比）・間隙径分布	各種粒度分析装置（篩法, 沈降法, 光透過型粒度分布計測） ポアサイザー
	破壊強度 硬度	圧縮・引張・せん断強度 貫入硬度	圧縮・引張・せん断強度試験, ベーンせん断試験 簡易貫入試験機（土研式・筑波丸東式）, 針貫入試験, 山中式土壤硬度計
力学的性質	変形性	反発硬度 磨耗硬度 弾性率, ポアソン比など	シュミットハンマー, エコーチップ ドリー試験機, ドバル試験機, ロサンゼルス試験機, 動弾性係数測定器
		縦波速度・横波速度	弾性波速度計
動的性質			
水に対する性質		含水比 透水係数・浸透能	吸光度計, TDR 透水試験, 浸透能試験, 山中式土壤透水通気測定器
熱的性質		岩盤温度 比熱・熱伝導率	赤外線温度計, サーミスタ温度計, 赤外線サーモグラフィ
岩盤全体の性質		亀裂係数 風化層厚・風化層分布など	物理探査（現場弾性波速度計測） 電気探査

チップを紹介しよう。3.2で述べた花崗岩ドームのシーティング剥離の速度を検討する過程で、筆者らはそれらの岩盤表面の風化程度を知ることを目的に、シュミットロックハンマー反発値を計測したことがある。表面の観察では風化程度の差が明らかに認められるにもかかわらず、シュミットロックハンマー反発値には明瞭な差異は認められなかった。そこでシュミットロックハンマーと同じ原理（すなわち岩盤表面をインパクトし、その反発値を計測する）をもつエコーチップを使用してみた。エコーチップはシュミットロックハンマーの200分の1の衝撃力しかなく、そのために逆に強度の小さいものから大きいものまで計測できるという特長を持っている（青木・松倉, 2004 a）。エコーチップの計測結果は、2.3で記述したように、花崗岩ドームのシーティングにおいて、シートごとの硬さに明確な差異があることを示した。すなわち、シュミットロックハンマーより数段も解像度が高いことを示した。今後風化の研究に適用（使用）される例（たとえば、青木・松倉, 2004 b; Matsukura, et al., 2004）が増えそうである。

このような新しい計測法も含めて、Table 1は岩石物性とその計測法についてまとめたものである。この表には出ていないが、最近ではデータロガーの発達が顕著である。その結果、温度（気温のみならず地温や岩盤温度）・土壌水分・水位（流量）などの数ヶ月から数年にわたる長期連続観測が可能になり、特に水文地形学および周氷河地形学の分野の研究の発展に大きく寄与したことは特筆されよう。

5. お わ り に

10年ほど前（1993年）に本学会において、「ロックコントロール」のシンポジウムが開かれ、鈴木（1994）は以下のように述べている：「ロックコントロール研究を通じて地形プロセス学は革命的に進歩しつつある、と言っても過言ではなかろう。しかし、ロックコントロール研究は未だその端緒にいるに過ぎず、解決すべき事柄が山積している」。「ロックコントロール研究」を地形物質の物性研究と読み替えると、鈴木の指摘した状況は10年たった今も全く変わっていないように思われる。学問の進歩はそれほど速くないのかもしれない。従って鈴木（1994）がその論文の最後に述べた3つの課題（研究対象の拡張；岩石物性の測定技術の開発；研究教育体制の整備）は、現在読んでも全く色褪せていない。それどころか、いずれも今日的課題として地形プロセス学を指向する研究者に対する指針となっている。

一つ目の「研究対象の拡張」ということでいえば、2章で述べた宇宙線生成核種年代法（TCN法）の研究例などがその一つの解答例であるかもしれない。しかし地形学の対象とする「地形種」は無数にあり、そのため地形プロセスとその主要変数との関係を定量的に理解しなければならない題材も無数に残されている。二つ目の「岩石物性の測定技術の開発」については、4.3で少し触れた。「“地形”が判るためには、あらゆる方法を駆使すべきである。どん欲に他分野のテクニックを導入すべし」とは、谷津先生から筆者が教えられ

たことの一つである。その意味でも、今後、Table 1 に種々の計測項目が増え、それに対する計測法が追加されていくことを期待したい。三つ目の「研究教育体制の整備」に関しては、その必要性に同感はするが、どのようにすべきかについての妙案は浮かばない。これが3つのうちで最も解決の難しい問題なのかもしれない。

謝 辞

粗稿の段階で砂村継夫先生に読んでいただき、多くの有益なコメントをいただいた。記して謝意を表したい。

引 用 文 献

- Anderson, M. G. and Richard, K. S. (1987) *Slope Stability*: John Wiley & Sons, Chichester, 648 p.
- 青木 久・松倉公憲 (2004 a) エコーチップ硬さ試験機の紹介とその反発値と一軸圧縮強度との関係に関する一考察：地形, **25**, 267-276.
- 青木 久・松倉公憲 (2004 b) エコーチップ硬さ試験機による砂岩表面風化層の強度低下量の把握：地形, **25**, 371-382.
- 青木 久・松倉公憲 (2005) 海水飛沫帯における橋脚砂岩塊のくぼみ深さに関する定量的把握：日南海岸・青島弥生橋の事例：地形, **26**, 13-28.
- 青木 久・佐々木智也・小口千明・松倉公憲 (2005) 大谷石採掘場跡地における岩盤崩落：宇都宮市大谷町坂本地区における 1989 年陥没の安定解析：地形, **26**, 439-449.
- Bishop, P., Hoey, T. B., Jansen, J. D. and Artza, I. L. (2005) Knickpoint recession rate and catchment area: the case of uplifted rivers in Eastern Scotland: *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**, 767-778.
- Bromhead, E. N. (1986) *The Stability of Slopes*: Surrey Univ. Press, New York, 373 p.
- Brunsden, D. and Prior, D. B. (1984) *Slope Instability*: John Wiley & Sons, Chichester, 620 p.
- Carson, M. A. (1972) *The Mechanics of Erosion*: Pion, London, 174 p.
- Carson, M. A. and Kirkby, M. J. (1972) *Hillslope Form and Processes*: Cambridge Univ. Press, London, 475 p.
- Cockburn, H. A. P. and Summerfield, M. A. (2004) Geomorphological applications of cosmogenic isotope analysis: *Progress in Physical Geography*, **28**, 1-42.
- Gregory, K. J. (1977) A physical geography equation: *National Geographer*, **12**, 137-141.
- Goudie, A. ed. (1981) *Geomorphological Techniques*: George Allen & Unwin, 395 p.
- Hayakawa, Y. and Matsukura, Y. (2003) Recession rates of waterfalls in Boso Peninsula, Japan and a predictive equation: *Earth Surface Processes and Landforms*, **28**, 675-684.
- 兵藤申一 (1993) 科学実験法, 放送大学教材 23231-1-9311, 放送大学教育振興会, 240 p.
- Kogure, T., Aoki, H., Maekado, A., Hirose, T. and Matsukura, Y. (submitted) Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan: *Geomorphology*.
- Matsukura, Y. (1987) Evolution of valley side slopes in the "Shirasu" ignimbrite plateau: *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, **8**, 41-49.
- Matsukura, Y. (1988) Cliff instability in pumice flow deposits due to notch formation on the Asama mountain slope, Japan; *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., **32**, 129-141.
- Matsukura, Y. (1996) The role of degree of weathering and groundwater fluctuation in landslide movement in a colluvium of weathered hornblende-gabbro: *Catena*, **27**, 63-78.
- Matsukura, Y. (2001) Rockfall at Toyohama Tunnel of Japan in 1996: effect of notch growth on instability of coastal cliff: *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, **60**, 285-289.

- Matsukura, Y. and Hirose, T. (1999) Five-year measurement of weight loss of rock tablets due to weathering on a forested hillslope of a humid temperate region: *Engineering Geology*, **55**, 69–76.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996) The effect of rock properties on rates of tafoni growth on coastal environments: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Supplement Bd., **106**, 57–72.
- Matsukura, Y. and Mizuno, K. (1986) The influence of weathering on the geotechnical properties and slope angles of mudstone in the Mineoka earth-slide area, Japan: *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**, 263–273.
- Matsukura, Y. and Takahashi, K. (1999) A new technique for rapid and nondestructive measurement of rock-surface moisture content: preliminary application to weathering studies of sandstone blocks: *Engineering Geology*, **55**, 113–120.
- Matsukura, Y. and Tanaka, Y. (1983) Stability analysis for soil slips of two grass slopes in Southern Abukuma Mountains: *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, **4**, 229–239.
- Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1982) Wet-dry slaking of Tertiary shale and tuff: *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, **3**, 25–39.
- Matsukura, Y., Hashizume, K. and Oguchi, T. C. (2002) Effect of microstructures and weathering on the strength anisotropy of porous rhyolite: *Engineering Geology*, **63**, 39–47.
- Matsukura, Y., Hayashida, S. and Maekado, A. (1984) Angles of valley-side slope made of “Shirasu” ignimbrite in South Kyushu, Japan: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., **28**, 179–191.
- Matsukura, Y., Hirose, T. and Oguchi, T. C. (2001) Rates of chemical weathering in porous rhyolite: 5-year measurements using weight-loss method: *Catena*, **43**, 343–349.
- Matsukura, Y., Aoki, H., Hattanji, T. and Kuchitsu, N. (2004) Equotip hardness for weathered surface layer of tuffaceous sandstone at “Yagura” artificial caves in Kamakura City: *Annual Report of the Institute of Geoscience, University of Tsukuba*, **30**, 27–32.
- Matsukura, Y., Hattanji, T., Oguchi, C. T. and Hirose, T. (submitted) Ten year measurements of weathering rates of rock tablets in a forested hillslope of a humid temperate region, Japan: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F.
- Matsuoka, N. (1990) Mechanisms of rock breakdown by frost action: an experimental approach: *Cold Regions Science Technology*, **17**, 253–270.
- Matsushi, Y. and Matsukura, Y. (2006) Cohesion of unsaturated residual soils as a function of volumetric water content: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (in press).
- Matsushi, Y., Hattanji, T. and Matsukura, Y. (2006) Mechanisms of shallow landslides on soil-mantled hillslopes with permeable and impermeable bedrock in the Boso Peninsula, Japan: *Geomorphology* (in press)
- Selby, M. J. (1982) *Hillslope Materials and Processes*: Oxford Univ. Press, Oxford, 264 p.
- Selby, M. J. (1993) *Hillslope Materials and Processes* (2nd ed): Oxford Univ. Press, Oxford, 451 p.
- Sunamura, T. (1973) Coastal cliff erosion due to waves: Field investigations and laboratory experiments: *Jour. Fac. Eng., Univ. of Tokyo*, **32**, 1–86.
- 砂村継夫 (1988) 地形学における室内実験に関する総合討論の記録: 地形, **9**, 310–311.
- 砂村継夫 (1992) 野外実験 (field experiment) と野外観測 (field measurement): 用語法の混乱, 堆積学研究会報, **37**, 97–99.
- Suzuki, T. (1982) Rate of lateral planation by Iwaki River, Japan: *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, **3**, 1–24.
- 鈴木隆介 (1994) ロックコントロール研究小史: 地形, **15**, 179–201.
- Suzuki, T. and Nakanishi, A. (1990) Rates of decline of fluvial terrace scarps in the Chichibu Basin, Japan: *Transactions of the Japanese Geomorphological Union*, **11**, 117–149.
- Suzuki, T. and Takahashi, K. (1981) An experimental study of wind abrasion: *Journal of Geology*, **89**, 509–522.
- Swoboda-Colberg, N.G. and Drever, J.I. (1993) Mineral dissolution rates in plot-scale field and laboratory experiments: *Chemical Geology*, **105**, 51–69.
- 高橋健一・松倉公憲・鈴木隆介 (1993) 海水飛沫帯における砂岩の侵蝕速度: 日南海岸・青島の弥生

- 橋脚の侵蝕形状：地形, **14**, 143-164.
- Takahashi, K., Suzuki, T. and Matsukura, Y. (1994) Erosion rates of sandstone used for a masonry bridge pier in the coastal spray zone: In Robinson, D. A. and Williams, R. B. G. eds *Rock Weathering and Landform Evolution*. John Wiley & Sons, Chichester, 175-192.
- 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.
- Wakasa, S., Matsuzaki, H., Tanaka, Y. and Matsukura, Y. (2004) Exposure ages deduced from cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al produced in situ: application to granite domes and tors in Korea: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, **223-224**, 628-632.
- Wakasa, S., Matsuzaki, H., Tanaka, Y. and Matsukura, Y. (2006) Estimation of episodic exfoliation rates of rock sheets on a granite dome in Korea from cosmogenic nuclide analysis: *Earth Surface Processes and Landforms*, in press.
- Wakatsuki, T., Tanaka, Y. and Matsukura, Y. (2005) Soil slips on weathering-limited slopes underlain by coarse-grained granite or fine-grained gneiss near Seoul, Republic of Korea: *Catena*, **60**, 181-203.
- White, A.F., and Brantley, S. L. (2003) The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field?: *Chemical Geology*, **202**, 479-506.
- 山田 剛・青木 久・高橋 学・松倉公憲 (2005) 塩類風化速度に与える岩石物性の影響に関する一実験：応用地質, **46**, 72-78.
- 谷津栄寿 (1965) 岩石制約論の研究法について：地理評, **35**, 43-46.
- Yatsu, E. (1966) *Rock Control in Geomorphology*: Sozisha, Tokyo, 135 p.
- Yatsu, E., Ward, A. J. and Adams, F. eds (1975) *Mass Wasting: 4th Guelph Symposium on Geomorphology*, 1975: Geo Abstracts Ltd, Norwich, 202 p.
- Yokoyama, T. and Banfield, J. F. (2002) Direct determinations of the rates of rhyolite dissolution and clay formation over 52,000 years and comparison with laboratory measurements: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **66**, 2665-2681.
- Yokoyama, T. and Matsukura, Y. (submitted) Field and laboratory experiments on weathering rates of granodiorite: quantitative separation of chemical and physical processes: *Geology*.