

地形材料学からみた斜面地形研究における二、三の課題

Some Problems in Study of Weathering Concerning Hillslope Processes and Landforms

松倉 公憲*

Yukinori MATSUKURA

I はじめに

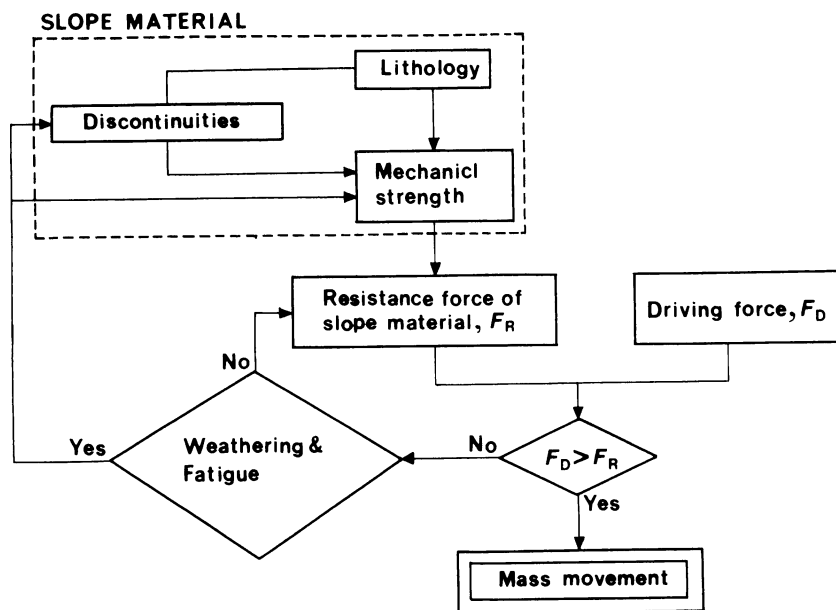
斜面物質（岩石・土）の重力による斜面下方への移動現象はマスマーブメントと総称され、そのマスマーブメントが起こることにより、斜面の地形変化がもたらされる。そこで、斜面地形研究においては、斜面物質、斜面プロセス（マスマーブメント）、あるいは斜面地形（あるいは斜面地形変化）のおおのが、それぞれ単独でも研究対象となると同時に、それらの相互の関連性が研究対象となる。たとえば、斜面物質とマスマーブメントとの関連性（すなわち斜面の不安定化のメカニズム）や、マスマーブメントと斜面地形変化との関連性（すなわち地形変化のプロセス）、あるいは斜面物質と斜面形との関連性などである。

斜面地形研究の流れを、このような研究対象を基準にすると、概略以下のようにまとめられる。斜面地形の研究は、斜面地形変化の定性的研究、すなわち斜面地形の発達モデルの提唱から始まった。すなわち、斜面勾配の変化は減傾斜する（slope decline）というデービスのモデルや、平行後退的（slope replacement）になるというペンクのモデルなどに代表されるものなどである。この時代には、斜面の計測が何ら行なわれないうままに、長期の地形変化（発達）が推測されていた。その後、この反省から、斜面形の測定（定量的記載）が盛んに行なわれた（たとえば、Fair, 1947; 1948a, b; Savigear, 1952）。

一方、斜面プロセス（マスマーブメント）に関しては、まず、その観察・分類からその研究がはじまった（たとえば、Sharpe, 1938）。そして斜面プロセスの計測・測定が精力的になされるようになったのは、1960年以降になってからであった（たとえば、Rapp, 1960; Kirkby, 1967）。特に、斜面プロセスに関する定量的研究は1970年代から急激に増加し、現在も増加の一途をたどっている。

ところで、1960年代半ばになると、Yatsu (1966; 1971) によって地形学における岩石物性計測（定量的把握）の重要性（すなわち、地形構成物質に関する研究の重要性）が指摘された。そして、彼はそれを岩石制約論（rock control theory）、あるいは地形材料学（landform material science）と呼称した。斜面物質に関していえば、勿論、それまでにも土質工学や土木工学の分野においては、岩石物性の計測値をもとに斜面の安定解析が行なわれてきてはいたが（たとえば、Skempton and De Lory, 1957; Terzaghi, 1962など多数）、地形学者にとっては、1960年代以前は、斜面物質は岩質（岩石の種類）としての認識しかなかった。たとえば、斜面物質の物性については、「ハンマーでたたくと金属音がする」とか、「ブーツで蹴ると崩れる」とかというような定性的な記載に止まっていた。しかし、Yatsuの地形材料学の提唱以後は、地形学者自身が岩石の力学的強度などの物性計測を行ない、岩石物性とマスマーブメントの関係を議論するようになった（たと

* 筑波大学地球科学系



第1図 岩石物性と斜面プロセスとの関係。

Sunamura (1983) の、「海食崖の基部の波による侵食に関係する要因」の図をもとに、斜面上のマスマーブメントに対応するように一部を筆者が改変した。

えば, Carson and Petley, 1970などがその先駆であろう)。

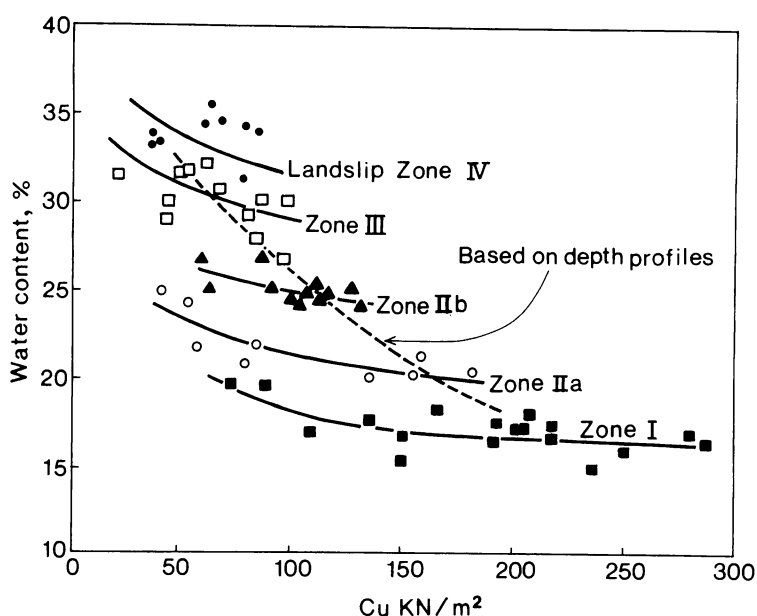
その後, Carson (1971a), Carson and Kirkby (1972), Selby (1982), Gerrard (1988), Parsons (1988)らによって, 斜面物質の物性研究のレビューがなされたり, その研究の重要性が繰り返して述べられてきた。しかし, 斜面地形研究においては, 斜面物質の物性を地形学者自身が計測しはじめたのが1970年代以降ということもあり, 斜面プロセスや斜面地形変化の研究に比較して, 斜面物質の研究, すなわち斜面物質の物性の定量的把握(地形材料学からのアプローチ)が最も立ち遅れていることも事実であろう。

本稿の目的は, このような斜面地形研究の流れやその現状をふまえて, 主に地形材料学の立場から, 斜面物質の物性研究において, 地形学者が取り組まなければならない課題について, 筆者なりの考えをまとめることにある。ところで, 筆者は, 別稿(松倉, 1994)において, 一般的な侵食地形研究においては, 岩石物性研究の中でも特に風化研究の重要性を強調した。斜面地形研究においても風化の研究が

重要であることに変わりはない。そこで, 斜面物質の物性研究に関連して特にここで取り上げるのは, (1)風化による強度低下, (2)風化による粒径変化, (3)風化土層の形成速度, という3つの課題である。

II 斜面物質の強度低下(速度)に関する研究の重要性

斜面物質が何らかの原因で不安定化することによりマスマーブメントが発生する。このような岩石物性とプロセスの間の関係は, 第1図のように表すことができる。この図は以下のことを示している。斜面物質は種々の強度(主なものは, 圧縮強度, 引張強度, せん断強度など)を持っている。斜面物質のもつ強度 F_R が, そこに作用する driving force, F_D , (たとえば, 圧縮力, 引張力, せん断力など) より大きい場合はマスマーブメントは発生しない。しかし, F_D は絶えず変動しており(地震による F_D の増加, 下刻に伴う斜面高さの増加による F_D の増加など), 時として F_R より大きくなることがある。すなわち, $F_D > F_R$ になった時, マスマーブメントが生起する。



第2図 Lias Clay における、風化と含水比、せん断強度の関係
(Chandler, 1972の図を一部改変)

このような F_D の変動のほかに、我々は、 F_R も変動することに注意しなければならない。 F_R の変動には、降雨に伴う間隙水圧の増減による比較的短期の強度変動と、風化による強度低下という極めて長期間にわたる強度変動現象とがある。ここでは、特に後者の、風化による強度低下を取り上げて考える。一般に未風化の硬い岩盤は侵食されにくい。すなわち、岩盤強度がそこで作用する侵食（削剥）力より大きい場合（ $F_D < F_R$ の場合）は、マスマーブメントは起こらない。しかし、風化による強度低下が進行し、その強度 F_R がそこで作用する F_D より小さくなると、斜面でマスマーブメントが発生することになる。

以上のような考察から、斜面地形研究における風化研究（とくに風化による強度低下に関する研究）の重要性が理解されよう。しかし、一般に風化現象はきわめて緩慢な速度でしか進行しないので、風化による物性変化（特にここでは強度低下）を知るのはきわめて難しい。それでもこの問題に挑戦したいくつかの研究がある。以下には、斜面プロセスに関係した、風化による強度低下に関する従来研究の若干のレビューを行ってみよう。もちろん、強度

低下というテーマには、強度低下のプロセス（メカニズム）と強度低下の速度の二つの問題が含まれる。

この問題は、風化の影響を受けやすい泥質岩やテイルなどもともと強度の小さい物質で主に研究されてきたようである。たとえば、Chandler (1969; 1972) は、イングランドの Keuper Marl や上部 Lias Clay の過圧密粘土を取りあげ、せん断強度に与える風化の影響を検討している。その結果の一例は第2図のように示されている。この図から、上部 Lias Clay においては、未風化のゾーン I で 200 kN/m^2 あった平均の非排水せん断強度が、風化によってゾーン III（風化層）では 63 kN/m^2 まで低下していることがわかる。また、Spears and Taylor (1972) は石炭系の泥質岩において、風化によって粘着力が 93% も減少したことを示している。同様の風化の影響が南西イングランドの上部石炭系の泥質岩でも強調されている (Grainger and Harris, 1986)。また、Quigley (1976) は、風化による膨潤性粘土の生成（たとえば、クロライトあるいはイライトからスメクタイトの生成）が、テイルの強度を著しく低下（せん断抵抗角を 29° から $16-19^\circ$ へと低下）させることを指摘している。また、Matsu-

kura and Mizuno (1986) は、千葉県嶺岡地域の地すべり地をとりあげ、斜面物質である泥岩の風化が進行すると細粒分が増加し、同時に粘土鉱物の変質（イライト/モンモリロナイト混合層鉱物やモンモリロナイトの増加）が進むためにせん断強度が低下することを明らかにした。そして、せん断強度の小さい（風化が進行している）斜面ほどその強度にみあった、勾配の低い斜面になるために地すべりによって勾配調節がなされていることを指摘した。

もちろん、硬い岩石である花崗岩等でも、風化による強度低下の計測が行なわれてきた（たとえば、鈴木ほか、1977；松倉ほか、1983、など多数）が、それは同一の露頭、あるいは近接したいくつかの露頭を用いて、風化による強度の低下のプロセスが追求されたものであり、マスマーブメント（たとえば崩壊）との関連において強度低下プロセスが議論されるところまでは研究が進んでいない。

ところで、崩壊や地すべりが、いつ発生するかという時間的予知は、地形学においてのみならず、防災という応用地学的立場においてもきわめて重要な問題である。そこで、風化による強度低下のプロセスも重要であるが、マスマーブメント発生の時間的予知のためには、風化による強度低下の速度についての知見を集積する必要がある。

しかし、マスマーブメントとの関連を議論したものに限らず、岩石物性の変化速度、特に力学的性質の変化速度（特に強度の低下速度）に関する研究は、きわめて少なく、以下の二、三の研究例があるのみである。

木宮（1975）は、堆積年代（新鮮な礫が供給された年代）が既知の三河地方の段丘礫層中の花崗岩の礫の引張強度を計測した。その結果、強度の時間的変化は減衰曲線で近似でき、強度 250kgf/cm^2 の花崗岩が 0.02kgf/cm^2 のそれになるまでには、約 500 万年の期間が必要であることを示した。また最近、小口ほか（1994）は、神津島の多孔質流紋岩は、風化の初期における強度（圧縮強度、引張強度の両者）の低下が著しいことを明らかにした。

このように強度低下速度に関する研究が少ないのは、その研究の困難さによる。その最大の理由は、

一般に、(1)岩石の風化量は数年では計測できないほど小さいこと、(2)風化の開始時期や計測時間の認定が難しいこと、などである。その意味で、風化の開始時期あるいはその継続時間が認定できる地形構成物質を見出すことができるかどうか、この種の研究を成功させるための重要な鍵をにぎることになる。

Ⅲ 斜面物質の風化による粒径変化に関する研究の重要性

斜面物質の物性がマスマーブメントの種類と密接に関係していることはよく知られている。たとえば、砂質土で山崩れ（崩壊）が発生し、粘性土で地すべりが発生する（松倉、1980）というような指摘である。これは、たとえばある時間断面での斜面物質とプロセスの関係であるが、同一斜面において、時間的に長期にわたってこの関係を追跡したらどうなるであろうか？ たとえば、Carson (1971b) によれば、斜面上方から新しい物質の供給がなくなった（成長が止まった）崖錐斜面においては、風化により斜面物質が細粒化し、それとともにせん断強度が低下するという。そのため、その強度に見合った勾配（もとの崖錐勾配より小さい）をとらざるをえなくなり（不安定になり）、マスマーブメントが発生し、その結果 taluvial slope が形成されることを指摘している。

このように、風化による物性変化（特にここでは粒径変化をとりあげた）がマスマーブメントの様式に影響を与える。また、マスマーブメントの移動（運動）速度の変化に与える影響も大きいと考えられる。したがって、我々は種々の岩石がそれぞれ風化によってどのような粒径の物質を生産するのか（粒径変化が起るのか）ということを知らなければならない。

たとえば、小出（1952）は、基岩が風化によって細粒化するとき、岩質によっては、基岩・岩塊・礫・砂利・砂・粘土という連続風化を通らないこと（“風化作用の不連続性”）を指摘した。また、同様な考え方に立って、黒田（1986）は、日本における種々の岩石の風化特性を一覧表にまとめている。しかし、

これらは野外における観察や経験をもとにした“定性的”なものであり、風化によって母岩からどのような物質が生産されるかについてシステマティック（定量的）に研究した例はほとんどみあたらない。したがって、たとえば、花崗岩は風化して砂質土（マサ土）になり、マスムーブメントとしては崩壊（山崩れ）の形態をとり、ハンレイ岩は粘性土になり、その斜面では地すべりの形態をとる（松倉，1980）というような個別の研究はいくつかあるものの、知見は断片的である。

マスムーブメントに関係したものを直接扱ったものではないが、風化による風化生産物の粒径に関する室内実験や野外観察の例が二、三報告されているので、以下に紹介する。たとえば、フランスのカーンの地形実験所での凍結破碎実験（Lautridou and Ozouf, 1982）によれば、500 回あるいは 1,000 回の凍結・融解を繰り返したあとの風化生産物の粒径分布をみると、石灰岩や片岩は大きい粒径に破碎されたが、泥岩やチョークなどは非常に細かく破碎されたという。このことは、岩質が異なれば、凍結破碎によって種々の粒径のものが生産されることを示している。しかし、同じ岩質であっても風化環境の差異や風化プロセスの種類によっても風化生産物の粒径は異なることに注意しなければならない。日本のような湿潤地域では起こりにくい現象ではあるが、たとえば、砂漠のような塩類風化作用が卓越するような場所では、主にシルトが生産されることが知られている。具体的には、チュニジアの砂漠に 6 年間放置されたヨークストーン（siliceous な中粒砂岩）が塩類風化により、シルトの風化生産物に変化したこと（Goudie and Watson, 1984）や、デス・バレーの扇状地の礫から塩類風化によりシルトが生産されている（Goudie and Day, 1981）という報告などである。

以上のような研究例をひもとくまでもなく、風化による物質生産（粒径変化）には、岩質の差異のほかに風化プロセスや風化環境の差異など、関与する要因が複雑である。しかし、だからといって、この問題へのアプローチをあきらめる訳にもいかないであろう。たとえば、我々はまず、日本のような湿潤

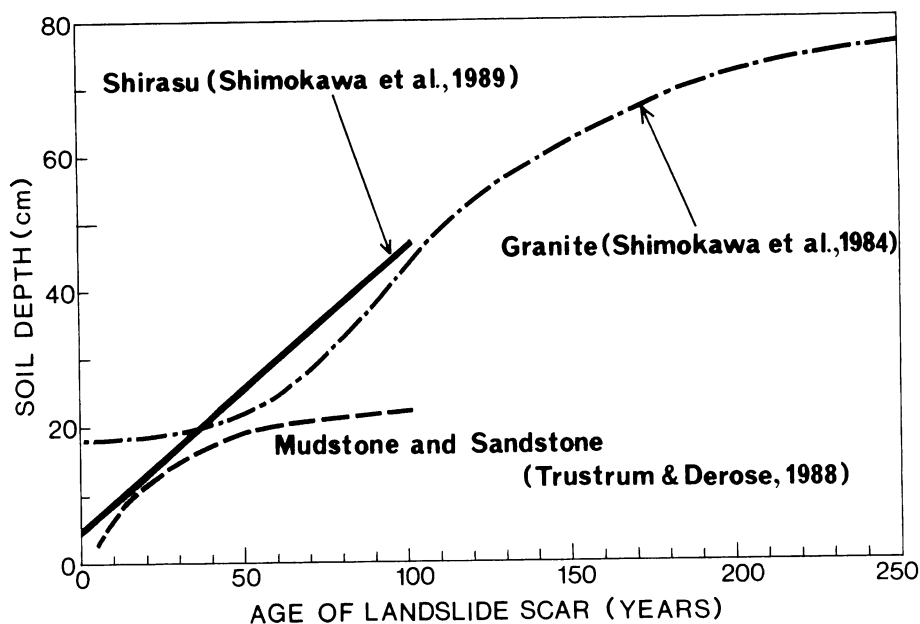
温帯地域を想定し、そこでの風化による物質生産（粒径変化）が岩質によりどのように異なってくるかの定量的な研究を着実に積み重ねるべく努力するのも一つの方向であろう。

IV 風化土層の形成速度に関する研究の重要性

上記のⅡとⅢの議論は、斜面上のある任意の点における斜面物質がどのように強度低下するか、あるいはどのような粒径変化をするかということの問題にしている。しかし、現実の崩壊や地すべりなどのマスムーブメントを考えると、たとえば斜面表層のみが強度低下しただけではマスムーブメントの発生には至らない。すなわち、風化土層が薄いうちは地すべりや崩壊は起りにくい。マスムーブメントの発生すなわち斜面の不安定化には、風化層（崩壊・地すべりを生起させることが可能になるまでに強度低下した層）が、ある程度以上の厚さだけ形成される必要がある。すなわち風化土層の深さの増加速度が問題になる。

ところで、斜面における土層の形成速度に関する研究としては、第 3 図に示したような例があるだけである。まず、下川（1983）、下川ほか（1984, 1989）は、鹿児島県のマサ（花崗岩）とシラスの斜面における土層の形成速度のグラフを作成している。この場合の土層とは、それぞれの斜面で表層崩壊する土層深を意味している。すなわち、崩壊を起こす厚さの土層は、シラスの場合に約 80 年で形成され、マサ（花崗岩斜面）の場合、約 250 年かかるということが示されている。また、最近、Trustum and De-Rose（1988）は、ニュージーランドの第三紀堆積岩（泥岩および砂岩）山地の牧草地に形成された斜面崩壊地において表層土の生成速度を計測し、その速度は時間の経過とともに徐々に小さくなることを示した。

一方、斜面上の土層形成ではなく、直接に風化層・土壤層およびデュリクラスト形成速度を求めた研究例を第 1 表にまとめてみた。噴出年代のわかった（すなわち、風化経過時間の見積もりが可能な）火山灰が、その土壌化の速度が大きいことも手伝って、しばしば研究の対象とされてきた。しかし、他の研究



第3図 土層の形成速度.

下川 (1983), 下川ほか (1984, 1989) と Trustum and DeRose (1988) のデータをもとに筆者作成.

第1表 風化層, 風化皮膜の形成速度に関する従来の研究例

(1) 風化層・土壌層およびデユリクラストの形成速度

岩石 (物質)	速度	地域	出典
火山灰から粘土	45-60cm/1000 y (0.45-0.6mm/y)	西インド諸島	Hay (1960)
花崗岩の鉄アルミナ化作用	1 m/22,000-77,000 y	象牙海岸	Leneuf and Aubert (1960)
花崗岩からデユリクラスト	9 m/100 万年	ウガンダ	Trendall (1962)
火山岩からシルト・粘土の形成	58mm/1000 y	パプア	Ruxton (1966)
未成熟 (成熟) 土壌の形成	5,000 (20,000) y	ニューギニア	Haantjens and Bleeker (1970)
未固結堆積岩からA B層の形成	13cm/50 y	北カロライナ	Menard (1974)
火山岩からフェリクレートの形成	600 万年	西セネガル	Nahon and Lapportient (1977)
レグ土壌のA層の形成	0.5cm/5,000-10,000 y	イスラエル	Amit et al. (1993)

(2) 風化皮膜の成長速度

岩石	速度	地域	出典
花崗岩	45mm/1 万年	コロラド	Birkeland (1973)
花崗岩	3 mm/1 万年	シェラネバタ	Burke and Birkeland (1979)
安山岩・玄武岩	約 1 mm/10 万年	北米	Coleman and Pierce (1981)
グレイワック	6 mm/9,500 y	ニュージーランド	Chinn (1981)
粗粒玄武岩	4.8-5.6mm/12-20 万年	タスマニア	Caine (1983)
ホルンフェルス	4 mm/2,000 年	日本 (神奈川)	朽津 (1991)
花崗閃緑岩	5 mm/2 万年	日本 (木曾駒が岳)	小泉・関 (1992)
石英斑岩	8 mm/5 万年	日本 (北アルプス・薬師岳)	小泉・青柳 (1993)

例をみるまでもなく、一般に、新鮮な岩石の風化層の形成速度は極めて遅いようである。最近、種々の相対年代決定法の手法の進歩・開発に伴い、風化皮膜 (weathering rinds) の形成速度が議論されるようになってきたが、これらのデータをみても、風化皮膜の形成速度は、いずれも数万年で数ミリメートルという小さいものである。

このような一般的な風化土層 (風化層) の形成速度に比較して、前述した鹿児島やニュージーランドの土層形成速度は大きすぎるようである。その理由は、斜面上での土層の形成には、基岩の風化によって形成される残積土と、土壌クリープなどにより斜面上方から供給される運積土の両者が関係するからである。したがって、斜面上の土層形成速度は、単純に基岩の風化速度とは一致しない。それどころか、場所によっては、風化による土層形成より、斜面上方からの運積土の供給や、風成による火山灰の供給やレス (黄土) の供給などによる土層形成の割合の方が大きい可能性すらある。現在のところ、斜面上の土層を、残積土と運積土とに区別するところまでは研究が進展していないようであるが、今後はこのような観点からのアプローチが是非必要であろう。

いずれにしても、斜面上における土層形成速度に関する研究は、崩壊の免疫性 (同一斜面での崩壊の周期性) を考える上でもきわめて重要である。従って、風化層の形成速度の研究と同様に、斜面上の土層形成速度に関する研究が数多く蓄積されることが期待される。もちろん、この場合にも、第Ⅱ章で指摘したように、土層形成開始時期やその継続時間をどのように認定するかが、研究遂行の最大のポイントになるであろう。

V おわりに

以上のように、本稿では、斜面地形研究における斜面物質の風化に関する研究、特に風化による強度低下、風化による粒径変化、風化土層の形成速度、などに関する研究の重要性を指摘し、現状ではそれらに関する研究がきわめて少ないことを述べた。

ここで取り上げたようなテーマに関する研究の蓄積・進展があれば、山地斜面でのマスムーブメント

の様式 (タイプ) や運動速度の推定が可能になるばかりではなく、特定の場所でのマスムーブメント発生の時間的予知、場所的予知が可能になるであろう。そうすれば、斜面地形研究は斜面発達の時間的变化というその最終目標に向かって大きく前進することになるだろう。

謝 辞

本稿は、平成5年度より始まった斜面地質委員会 (応用地質学会) における討論に触発されてまとめられたものである。委員長の藤田 崇先生 (大阪工業大学) や、幹事の田中耕平氏 (防災科学技術研究所) をはじめとする委員の皆様には謝意を表します。本研究の一部には文部省科学研究費補助金 (一般B、課題番号05452340) を使用した。

文 献

- 小口千明・八田珠郎・松倉公憲 (1994) 神津島における多孔質流紋岩の風化とそれに伴う物性変化。地理学評論, **67A**, 775-793.
- 木宮一邦 (1975) 三河・富草地域の花崗岩礫の風化速度。地質学雑誌, **81**, 683-696.
- 朽津信明 (1991) 神奈川県砂田台遺跡出土の石器に観察された風化—考古遺物のタフォノミー—。第四紀研究, **30**, 43-47.
- 黒田和男 (1986) 地すべり現象に関する日本列島の地質地帯区分。地質学論集, 第**28**号, 13-29.
- 小泉武栄・青柳章一 (1993) 風化皮膜から推定した北アルプス薬師岳高山帯における岩屑の供給期。地理学評論, **66A**, 269-286.
- 小泉武栄・関 秀明 (1992) 風化被膜から推定した木曽駒ヶ岳の化石周氷河斜面の形成期。季刊地理学, **44**, 245-251.
- 小出 博 (1952) 応用地質, 岩石の風化と森林の立地。古今書院, 東京, 177p.
- 下川悦郎 (1983) 崩壊地の植性回復過程。林業技術, **496**, 23-26.
- 下川悦郎・地頭蘭 隆・堀 与志郎 (1984) 花崗岩地帯における山くずれの履歴。日本林学会九州支部研究論文集, **37**, 299-300.

- 下川悦郎・地頭蘭 隆・高野 茂 (1989) しらす台地周辺斜面における崩壊の周期性と発生場の予測. 地形, **10**, 267-284.
- 鈴木隆介・平野昌繁・高橋健一・谷津榮壽 (1977) 六甲山地における花崗岩類の風化過程と地形発達の相互作用, 第一報, 六甲花崗岩風化物質の鉛直的变化. 中央大学理工学部紀要, **20**, 343-389.
- 松倉公憲 (1980) 筑波山周縁に分布する二, 三の土の力学的性質と地形学的意味について. 地理学評論, **53**, 54-61.
- 松倉公憲 (1994) 風化過程におけるロックコントロール-従来の研究の動向と今後の課題-. 地形, **15**, 202-222.
- 松倉公憲・前門 晃・八田珠郎・谷津榮壽 (1983) 稲田型花崗岩の風化による諸性質の変化. 地形, **4**, 65-80.
- Amit, R., Gerson, R. and Yaalon, D. H. (1993) Stages and rate of the gravel shattering process by salts in desert Reg soil. *Geoderma*, **57**, 295-324.
- Birkeland, P. W. (1973) Use of relative age-dating methods in a stratigraphic study of rock glacier deposits, Mt. Sopris, Colorado. *Arctic Alp. Res.*, **5**, 401-416.
- Burke, R. M. and Birkeland, P. W. (1979) Reevaluation of multiparameter relative dating techniques and their application to the glacial sequence along the eastern escarpment of the Sierra Nevada, California. *Quaternary Res.*, **11**, 21-51.
- Caine, N. (1983) *The Mountains of Northern Tasmania*. A. A. Balkema, Rotterdam, 200p.
- Carson, M. A. (1971a) *The Mechanics of Erosion*. Pion, London, 174p.
- Carson, M. A. (1971b) An application of the concept of threshold slopes to the Laramie Mountains, Wyoming. *Transactions of the Institute of British Geographers, Special Publication*, No. **3**, 31-48.
- Carson, M. A. and Kirkby, M. J. (1972) *Hillslope form and Process*. Cambridge University Press, 475p.
- Carson, M. A. and Petley, D. (1970) The existence of threshold hillslopes in the denudation of the landscape. *Inst. Br. Geogr. Trans.*, **49**, 71-96.
- Chandler, R. J. (1969) The effect of weathering on the shear strength properties of Keuper marl. *Geotechnique*, **19**, 321-334.
- Chandler, R. J. (1972) Lias clay: weathering processes and their effect on shear strength. *Geotechnique*, **22**, 403-431.
- Chinn, T. J. H. (1981) Use of rock weathering and rind thickness for Holocene absolute age dating in New Zealand. *Arctic Alpine Res.*, **13**, 33-45.
- Colman, S. M. and Pierce, K. L. (1981) Weathering rinds on andesite and basaltic stones as a Quaternary age indicator, western United States. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*, **388A**, 84p.
- Fair, T. J. (1947) Slope form and development in the interior of Natal. *Geol. Soc. South Africa Trans.*, **50**, 105-120.
- Fair, T. J. (1948a) Slope form and development in the coastal Hinterland of Natal. *Geol. Soc. South Africa Trans.*, **51**, 37-53.
- Fair, T. J. (1948b) Hillslopes and pediments of the semiarid Karoo. *South Africa Geol. Jour.* **30**, 71-79.
- Gerrard, A. J. (1988) *Rocks and Landforms*. Unwin Hyman, Boston, 319p.
- Goudie, A. S. and Day, M. J. (1981) Disintegration of fan sediments in Death Valley, California, by salt weathering. *Physical Geography*, **1**, 126-137.
- Goudie, A. S. and Watson, A. (1984) Rock block monitoring of rapid salt weathering in southern Tunisia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **9**, 95-99.
- Grainger, P. and Harris, J. (1986) Weathering and slope stability on Upper Carboniferous mud-rocks in south-west England. *Q. Jour. Engng*

- Geol.*, **19**, 155–173.
- Haantjens, H. A. and Bleeker, P. (1970) Tropical weathering in the Territory of Papua and New Guinea. *Aust. Jour. Soil Res.*, **8**, 157–177.
- Hay, R. L. (1960) Rate of clay formation and mineral alteration in a 4000-year-old volcanic ash soil on St Vincent, B. W. I. *Amer. Jour. Science*, **258**, 354–368.
- Kirkby, M. J. (1967) Measurement and theory of soil creep. *Jour. Geol.*, **75**, 359–378.
- Lautridou, J. P. and Ozouf, J. C. (1982) Experimental frost shattering: 15 years of research at the 'Center de Geomorphologie du CNRS'. *Progress in Physical Geography*, **6**, 215–232.
- Leneuf, N. and Aubert, G. (1960) Essai d'évaluation de la vitesse de ferrallitisation. *Proc. 7th Int. Conf. Soil. Sci.*, 225–228.
- Matsukura, Y. and Mizuno, K. (1988) 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.
- Menard, H. W. (1974) *Geology, Resources and Society*. W. H. Freeman, San Francisco, 621p.
- Nahon, D. and Lappartient, J. R. (1977) Time factor and geochemistry in iron crust genesis. *Catena*, **4**, 249–254.
- Parsons, A. J. (1988) *Hillslope Form*. Routledge, London, 212p.
- Quigley, R. M. (1976) Weathering and changes in strength of glacial till. in Yatsu, E., Ward, A. J. and Adams, F. eds. *Mass Wasting: 4th Guelph Symposium on Geomorphology*. 1975. Geo Abstract Ltd., Norwich, 117–131.
- Rapp, A. (1960) Recent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, northern Scandinavia. *Geogr. Annal.*, **42**, 65–200.
- Ruxton, B. F. (1966) The measurement of denudation rates. *Inst. Aust. Geogr. Rep. 5th Mtg. Sydney*, 1–5.
- Savigear, R. A. G. (1952) Some observations on slope development in South Wales. *Inst. Br. Geogr. Trans.*, **18**, 31–51.
- Selby, M. J. (1982) *Hillslope Materials and Processes*. Oxford University Press, Oxford, 264p.
- Sharpe, R. P. (1938) *Landslides and Related Phenomena*. Columbia, New York, 137p.
- Skempton, A. W. and De Lory, F. A. (1957) Stability of natural slopes in London Clay. *Proc. 4th Interl. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engng., London*, **2**, 378–381.
- Spears, D. A. and Taylor, R. K. (1972) The influence of weathering on the composition and engineering properties of *in situ* coal measures rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **9**, 729–756.
- Sunamura, T. (1983) Processes of sea cliff and platform erosion. in P. D. Komar, *CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 233–265.
- Terzaghi, K. (1962) Stability of steep slopes on hard unweathered rocks. *Geotechnique*, **12**, 251–270.
- Trendall, A. F. (1962) The formation of apparent peneplains by a process of combined laterization and surface work. *Zeit. Geomorph.*, **6**, 183–197.
- Trustrum, N. A. and DeRose, R. C. (1988) Soil depth-age relationship of landslides on deforested hillslopes, Taranaki, New Zealand. *Geomorphology*, **1**, 143–160.
- Yatsu, E. (1966) *Rock Control in Geomorphology*. Sozoshia, Tokyo, 135p.
- Yatsu, E. (1971) Landform material science—Rock control in geomorphology. in Yatsu, E., Dahms, F. A., Falconer, A., Ward, A. J. and Wolfe, J. S. eds., *Research Method in Geomorphology* (Proc. 1st Guelph Symp. on Geomorphology, 1969), Science Research Associates, Ontario, 49–56.