

風化および斜面形成プロセス — 筑波大学における研究の展開 —

A Review of Studies on Weathering and Slope Processes in the University of Tsukuba

松倉 公憲*

Yukinori MATSUKURA

I はじめに

地形学において地形構成材料（岩石や土）の物性を定量的に把握することの重要性は、Yatsu (1966, 1971) によって最初に提唱された。この研究法は、岩石制約論 (rock control theory) とか地形材料学 (landform material science) と呼ばれている。その後、この研究法は Carson (1971) や Whalley (1976) などの著書に強い影響を与えたように、徐々に地形学者の中へ浸透していった。その結果、1981年に刊行された“Geomorphological Technique” (Goudie ed., 1981) には、“Material properties”の章が設けられ、岩石や土の物理的・化学的・力学的性質の測定法が取り上げられるまでになった。また、1976年および1980年に相次いで創刊された“Earth Surface Processes and Landforms” (British Geomorphological Research Group) や“地形” (日本地形学連合) に掲載される論文には、実測された岩石物性の定量的なデータをもとに地形を論じた研究論文が数多くみられるようになっている。

本稿では、本学で行われた地形の研究の中から、特にこのような地形材料学の立場から行われた風化と山地斜面形成プロセスに関したものに焦点をあてレビューすることを目的とした。なお、本稿と一部重複するが、わが国におけるここ10年間のこの分野の研究動向については、Matsukura (1989) の総括

があるのでそれも参照されたい。

II 風化に関する研究

1. 物理的風化

物理的風化に関する本学における初期の実験的研究としては、谷津と松倉によって行われた乾湿風化の実験と、松岡によって行われた凍結破碎の実験とがあげられる。これらは乾湿風化、凍結破碎のメカニズムを明らかにしようという目的で行われたものである。

Matsukura and Yatsu (1982) は、日本各地の第三紀層から採取した頁岩および凝灰岩の試料、計68個について、乾湿の繰り返し実験を行った。実験では、スレーキングによって2.83mm以下の細粒になったものを風化による欠損分とみなし、残留重量が50%に相当するサイクルを風化速度の指標にした。一方、新たに開発した装置 (Matsukura and Yatsu, 1980) を用い、吸水膨潤圧を測定した。その結果、膨潤圧の大きい岩石が風化速度も大きいという関係が認められた。また、個々の岩石の物理的性質 (比重、乾燥単位体積重量、間隙率、粒度組成、比表面積)、力学的性質 (引張強度) を測定し、あわせて含有する鉱物および粘土鉱物 (モンモリロナイトを含有するものは、その含有率)、岩石内部の間隙の状態などを調べた。その結果、“頁岩と凝灰岩の乾湿風化の速度は、岩石の力学的強度には依存せ

*筑波大学地球科学系

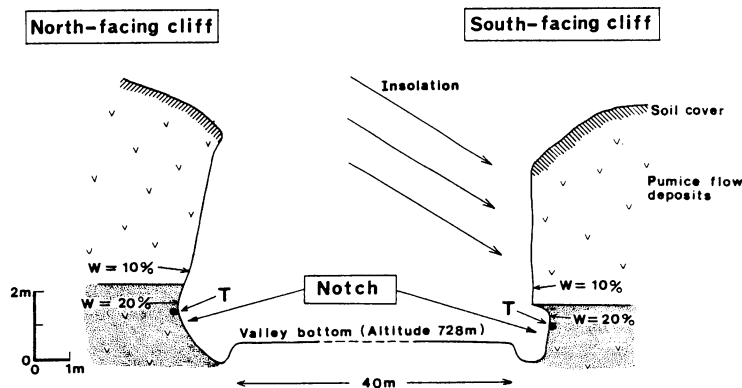
ず、モンモリロナイトの含有量と岩石内部の間隙の大きさに強く支配されている”という結論を得た。この実験は浸水の場合に蒸留水を用いたが、それに加えて、塩水を用いた実験も行われた (Matsukura and Yatsu, 1985)。

松岡によって、凍結・融解実験が種々の岩石を用いて行われた。彼は凍結過程での岩石内部での水分ポテンシャル分布の計測 (福田・松岡, 1982), 凍結点降下と岩石の弾性波速度の測定 (福田・松岡, 1983), 水分供給条件と冷却速度を変数としたときの凍結ひずみの測定 (松岡, 1987) などの精力的な仕事を通して、Everett (1961) の毛管力理論に代わる岩石の凍結破砕のメカニズムを考えた (松岡, 1984 b; 1986; Matsuoka, 1988; 1990 b)。それによると、空隙中の氷晶と空隙壁の間に存在する不透水膜の発生する吸引力によって水分移動が起こり、この力が凍結破砕速度に影響するという。また、岩石の凍結破砕速度は、主として、単位体積あたりの空隙表面積と引っ張り強度の2種類の物性に依存するという。

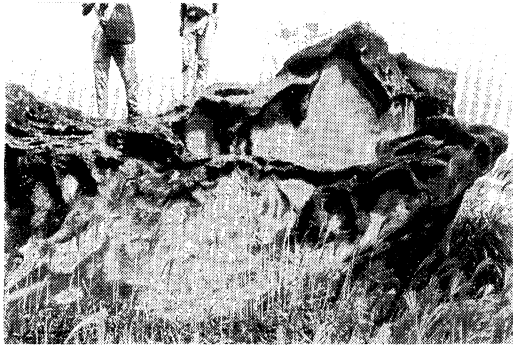
一方、野外における凍結破砕や乾湿風化、塩類風化などの物理風化の現象も数多く観察・測定された。たとえば特に高山地域や極地地域において、地温と凍上量の関係 (Matsuoka et al., 1988) や岩盤における凍結・融解サイクルの頻度・岩石物性・水分の供給条件などの調査 (小野・松岡, 1982; 松岡,

1984 a; Matsuoka, 1990 a) が行われた。また、島尻泥岩の乾湿風化の状況 (Maekado et al., 1982) や、上総丘陵の笠森層のつくる崖において、乾湿風化に与える含水比の影響が調べられた (藁谷・松倉, 1988)。また、Matsukura and Kanai (1988) や Matsukura (1991) は、浅間軽石流堆積物からなる谷壁の基部に、塩類風化作用によってノッチが形成されていることを見いだした (第1図)。従来、塩類風化の報告は、海岸を除くとほとんどが乾燥地域に限られていたが、日本のような湿潤な地域の内陸部においても、条件さえ整えば、塩類風化が起こり得ることがこの研究によって示された。このノッチの形成条件としては、谷壁が垂直で雨があたりにくいことや、谷壁が南向きで、日射による乾燥が起こり易いことなどがあげられる。これに対し、北向きの谷壁では、直達日射が当たらないために、特に冬季に崖の表面が低温になりやすく (松倉・柳生, 1987)、谷壁基部には霜柱やアイスレンズなどの凍結・融解作用によるノッチが形成されることになる (Matsukura, 1988 b; 1990)。

以前は風食によると考えられていたタフォニ (第2図) や蜂の巣状構造は、近年は塩類風化によるという説が有力になってきた。Matsukura et al. (1989) は、房総半島南端の野島崎において、タフォニの分布を調べるとともに、離水時期の判っている隆起波食棚上のタフォニの大きさから、タフォニの



第1図 浅間火山南西麓の緩斜面に発達する「田切」の横断形 (松倉・柳生, 1987を一部改変.)



第2図 野島崎でみられるタフォニ (Matsukura et al., 1989).

形成速度 (塩類風化の速度) を推定した (Matsukura and Matsuoka, 1991)。

2. 化学的風化

化学的風化作用とは、言い換えると岩石と水との相互作用 (water-rock interaction) である。したがって、溶出実験による水質の変化から岩石の風化機構を探ったり、風化速度を知ろうという試みがなされることがある。飯田ほか (1986) は、日本各地の花崗岩を用いた溶出実験から、それらの風化速度と野外で観察される風化層の厚さとの関係を議論した。

化学的風化現象に対するもう一つのアプローチは、岩石・鉱物の変化・変質とそれに伴う物性の変化を調べることである。たとえば、筑波山塊のハンレイ岩の風化過程が調べられ、ハンレイ岩を構成する角閃石や斜長石が、緑泥石、カオリナイト、ハロイサイト、束沸石などに変質することが明らかにされている (松倉ほか, 1979; Kimata, et al., 1979)。また、Matsumoto and Watanabe (1986) は、ブラジル北東部の低台地上でみられる「白砂」について研究し、その砂は熱帯湿潤気候下におけるポドソル化作用によって、表層部が極限まで溶脱されて生成されたものと考えた。八田ほか (1983) は極めてマイクロなアプローチを行い、長石からカオリナイト鉱物への変化における結晶方位関係を議論した。

一般に、花崗岩は deep weathering (通常はこの訳語として「深層風化」が使われているが、「厚層風化」

とすべきだという主張もある; 八田ほか, 1980) することはよく知られている。笠間市稲田における花崗岩石切り場の高さ50mの掘削断面において、新鮮な岩石からマサまでの一連の鉱物および化学組成の変化のみならず、物理的性質・力学的性質の変化が計測された (松倉ほか, 1983)。そしてそれらの結果をもとに、以下のような考察が行なわれた。1) 風化の初期において、化学的風化は重要な役割を果たしており、鉱物の変質や物理的性質の変化を伴う。2) 石英・長石・黒雲母の鉱物変質における差異がマサ (砂質土) 化の原因となる。3) マサは砂質土であるため透水性が良く、そのため水は容易に深部の新鮮な岩石にアタックすることができる。このことが deep weathering の基本的な原因である。4) 力学的性質の変化の多様性は、与えられた外力に対して、風化物質の物理的な性質が複合して応答する結果である。

ところで、Goldich (1938) の示した風化における鉱物の安定系列によれば、一般にフェルシック鉱物は風化されにくいとされている。この考えを拡張すると、フェルシック鉱物よりなる花崗岩の方が、マフィック鉱物よりなるハンレイ岩より風化しにくいことになる。実際、溶出実験および野外の表流水の分析においても花崗岩からの溶出量はハンレイ岩に比較して少ない (広瀬ほか, 1990) ようである。しかし、野外においてこの二種類の岩石を比較すると、花崗岩礫の方が礫の中心まで風化されているのに対して、ハンレイ岩は礫の表層のみが粘土化しているだけである (八田ほか, 1981)。すなわち花崗岩礫の方が風化されやすいことになり、前述の考えと矛盾する。このように、鉱物の風化と岩石あるいは岩体の風化とは必ずしも対応しないようである。

III 組織地形に関する研究

松岡ら (松岡・小野, 1982; 松岡・上本, 1984; 松岡, 1985) は、日本アルプスの稜線の起伏を、基盤岩の引張強度やジョイントの密度などを計測することにより説明しようと試みた。その結果、たとえば赤石山脈の堆積岩地域では、チャートや砂岩などの節理の発達が少ない岩石が突出部を構成し、節理

の発達著しい頁岩が鞍部を構成するという対応関係を見いだしている。また、前門らは、筑波台地周縁の人工切り取り面に見られる凹凸を取扱い、砂層・粘土層・ローム層の物性とそこでの風化・侵食のプロセスとの関連からその凹凸の形成メカニズムを以下のように説明した。1) 南向きの斜面上にみられる微起伏は、各層の侵食速度が異なっていることによる。2) ローム層・粘土層の侵食量が大きいのは、それらが乾湿風化によってクラックができ易いからである。3) 乾湿風化をきめる収縮特性は、粘土含有量と粘土鉱物の種類によって決まる(前門ほか, 1979; Maekado, 1984)。一方、北向き斜面では凍結・融解作用によって、ローム層・砂層・粘土層ともにほとんど同じ後退速度を持つため明瞭な起伏が形成されない。Maekado and Matsukura (1985) は凍結指数や熱伝導率などの計測から計算した凍結深が、野外での実測値にほぼ等しいことを示した。

IV 斜面形成プロセスに関する研究

山地斜面においては土の種類が地形形成プロセスを規定していることが多い。例えば、砂質の土では、脆性破壊的な山崩れ(崩壊)が発生し、粘性土では、塑性変形運動である地すべりが発生する(松倉, 1980) ことが一般に知られている。この要因の一つとして、両者のクリープ特性の違い(松倉ほか, 1984; 水野・松倉, 1985) があげられる。そこで、ここでは扱っている材料が粘性土か砂質土かによって分けて紹介することにする。また、砂質土の中でも粘着力を全く持たない砂礫材料は砂質土とは別に扱うことにする。

1. 粘性土を扱った研究

前述したように、花崗岩と異なり、ハンレイ岩の風化生成物は粘土となる。この粘土中の緑泥石は膨潤する性質を持っているため、地すべり粘土となることがある(松倉ほか, 1979)。柿岡盆地の北部に位置する東山(ハンレイ岩体)において、1976年に地すべりが発生した。繰り返しの緩速一面せん断試験により、ハンレイ岩風化物(粘土)の残留強度が測定され、地すべり斜面での安定勾配が議論された(松倉・水野, 1984)。同様の手法を用い、房総半島・嶺

岡地域(水野, 1984)や新潟(佐藤ほか, 1985; 水野, 1990)における地すべり粘土の物性の計測や地すべり斜面の安定解析が行われた。

Matsukura and Mizuno(1986)は、房総半島嶺岡層群中の泥岩起源の粘土層中に発生している地すべりを取り上げ、風化と地すべりと斜面勾配の相互の関連性を明らかにした。すなわち、風化(特に化学的風化作用)がより進行している粘土は、イライト・モンモリロナイト混合層鉱物の含有量が増し、そのためせん断強度の低下が起こり、それを反映して斜面勾配も緩くなることを示している。

地すべりのスピードは斜面の勾配と土の塑性指数によって決まる(Mizuno and Matsukura, 1988)が、水野は、地すべりをそのスピードと持続時間とから、slow type と rapid type とに分類し(水野, 1989)、さらに波状すべり面をもつ地すべりの力学的運動モデルを構築した(水野, 1987; Mizuno, 1989)。

ローム層は高い含水比をもち、そのため霜柱が立ちやすい。小野(1983)は学園都市内のローム切り取り面での霜柱による侵食量を計測しており、掘井ら(1987)はローム土を材料にし、フロストクリープによる斜面物質の移動についての実験的研究を行った。また、軽石層も高い含水比をもち、このために地震動により軽石層中の水が絞り出されることがある。この現象が軽石層中に地すべりを惹起させることがある。Matsukura and Maekado (1984)は、1949年の今市地震の時に、今市軽石層中に起こったこのタイプの地すべりについて斜面安定解析を行った。

2. 砂質土を扱った研究

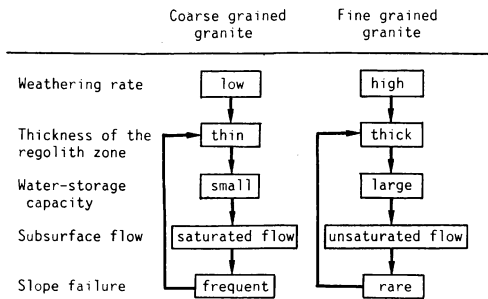
阿武隈高原や三河高原(愛知県小原村)にはそれぞれ粗粒と細粒の花崗岩が分布しており、とくに粗粒地域において崩壊がよく発生する。それらの崩壊地において、土層深やせん断強度の計測が行われ、それらの結果をもとに斜面の安定解析が行われた(Matsukura and Tanaka, 1983; Matsukura, 1984)。また、恩田(1989)は、小原村の粗粒花崗岩と細粒花崗岩の両地域において水文観測を行った。その結果をもとに、風化-土層厚-水文プロセス(貯

留容量)一崩壊の関係について議論し、それらの中には第3図に示すようなフィードバックシステムが存在していることを明らかにした。

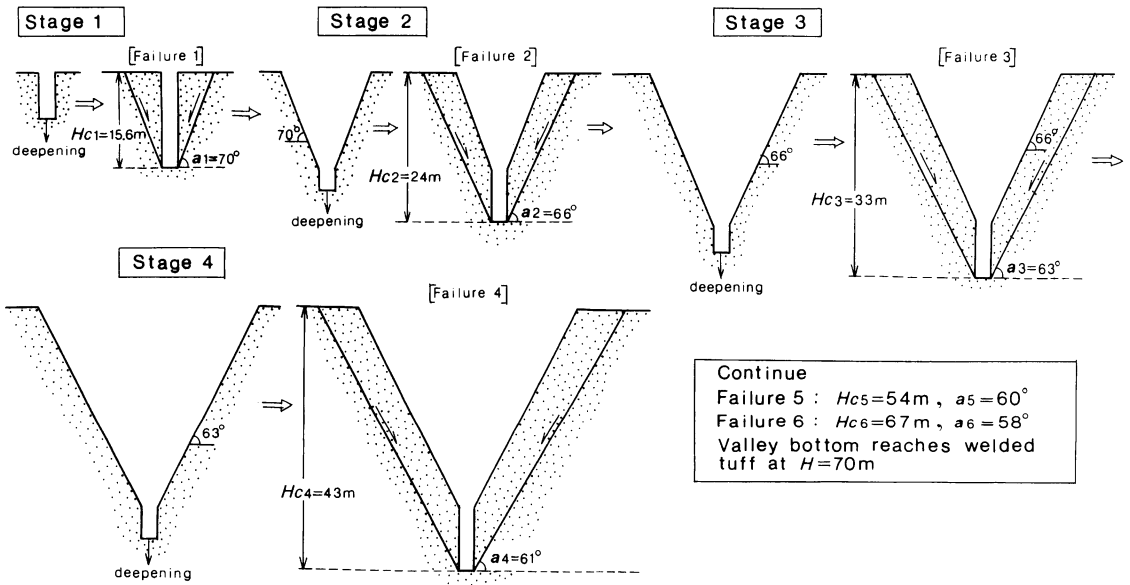
日本には火山が多く、そのため各地に火砕流台地や火山砕屑物からなる斜面が数多く広がっている。たとえば、鹿児島県のシラスや長野県の浅間軽石流堆積物などである。これらの物質は流水に対する侵食に弱いために、深いガリーを形成し易い。また、砂質であるため粘着力が小さく、そのため急勾配で自立できる高さには限界がある (Matsukura, 1987

a)。このガリーの発達過程やそれに関連した問題が取り扱われた。シラス台地の開析谷は、下刻が進行するのに伴い比高を増すが、それとともに谷壁は不安定になり崩壊 (くさび型の斜面破壊) が起こる。Matsukura (1987b) は、この下刻に伴う谷壁斜面のプロファイルの変化過程に関するモデルを作成した (第4図)。その結果、厚さ70mのシラスの非熔結部まで下刻が進行した場合、谷壁の斜面勾配は約58度まで減傾斜すると見積もられた。この斜面は、現在は台風時や梅雨時の豪雨によって表層崩壊を繰り返しており、その勾配は約50度ほどである (Matsukura, et al., 1982; 1984)。

一方、浅間軽石流からなる緩斜面を切る谷は、垂直な谷壁と平坦な谷底とからなる箱型の形状 (田切と呼ばれている) をもっている (第1図参照)。この谷壁においては、その基部でノッチが拡大するにつれて谷壁内部の引張応力が増大することにより、崖全体の不安定性が増す (松倉・近藤, 1985)。Matsukura (1988a) は、力学的安定解析により、谷壁が崩落を起こす場合のノッチの奥行き限界深を見積っている。



第3図 愛知県小原村における風化土層の形成に関するダイアグラム (恩田, 1989)。



第4図 シラス台地開析谷の谷壁斜面の発達モデル (Matsukura, 1987b)。

3. 砂礫を扱った研究

前節で述べた砂質土は、いずれも弱く固結しているか、あるいは少量の細粒分を含んでいたりと、含水比が高いことにより、見かけの粘着力をもっている。しかし、乾燥した砂礫は粘着力をもたないため垂直な斜面で自立することはできない。一般に、このような砂礫のとりうる最大の斜面勾配は安息角 (angle of repose) と呼ばれ、崖錐、デューンの slip surface、三角州の前置層斜面、スコリアコーンの斜面などがそれに相当すると言われている。しかし、安息角に関する研究は進んでいるとはいえず (松倉・恩田, 1989), そのために砂礫斜面の力学的研究は極めて少ない。ここ二、三年、恩田と松倉を中心に、アルミ棒や砂礫を用いた安息角および限界安息角において発生する崩れに関連した研究が積み重ねられている。その結果、いくつかの新知見がもたらされた。1) 安息角と内部摩擦角とは全く異なるメカニズムにより支配された物理量であり、両者が等しいという従来の考えは疑問視される (恩田ほか, 1989a ; 1989b, Onda and Matsukura, 1991)。2) 限界安息角で生起する崩れ (avalanche あるいは dry fragments flow = 乾燥岩屑流) が発生するためには、粒子平均粒径の70-80倍相当の斜面長が必要である (松倉ほか, 1989 ; Onda and Matsukura, 1989)。3) 崩れの深さは粒径の約8層分に相当する (Onda and Matsukura, 1990)。

V おわりに

地形構成材料と一口に言っても、それらは実に多種であり、それぞれがその物性とそこに働く地形形成プロセスに応じた多様な地形をつくっている。本稿では、筑波大学で行われた「風化」と「斜面形成プロセス」に関係した研究をレビューした。これらの仕事をまとめてみて、ここで扱われた地形材料はごく限られたものであることに気がつく。たとえば、固結した岩石で主に扱われたものは、花崗岩やハンレイ岩、砂岩、凝灰岩、頁岩 (泥岩) などの場合が多い。その他の岩石、たとえば安山岩や玄武岩、蛇紋岩、石灰岩などの風化現象やそれらをつくる地形、そこでの斜面形成プロセスに関する定量的なデータ

を、我々はほとんどもっていない。これらは今後に残された課題であろう。特に、わが国においてはカルスト地形の分布がそれほど広がらないにしても、石灰岩の風化 (congluent dissolution) は、他の岩石と異なり、風化が即座に地形変化に結びつくという特徴をもっていることから、より積極的に研究されていいテーマであろう。

風化の研究の中で、最も重要でありかつ解明の難しいテーマは、風化速度あるいは風化による強度低下の時間的変化の問題であろう。“地形学の最終目標は地形変化の予知・予測である” (鈴木, 1981) とすれば、なおさらこの問題に我々は真正面から取り組まざるをえないことになる。風化速度に関する斬新な実験方法を考えるか、あるいは形成年代の明らかな地形 (河岸段丘や離水波食棚など) や建設年代のはっきりしている人工構造物 (石造りの建築物や墓石) などをうまく利用して地道にデータを積み重ねる努力が必要であろう。

また、IV-3で述べた安息角の実験は現在も継続中であり、水理実験センターに設置されている大型一面せん断試験機 (松倉, 1988 ; 松倉ほか, 1988) を用いた実験により、砂礫の内部摩擦角のデータが蓄積され、さらに新しい知見が加わることが期待される。

謝 辞

本稿で取り上げた拙著論文のいくつかのものは、水理実験センターで行われたものであり、また、センターの測器を用いたり、センターの工作室でつくられた自作の実験装置を用いて行われたものも多い。この機会に、同センターの皆様にあらためて御礼を申し上げる。また、本稿執筆の機会を与えて頂いた榎根 勇センター長および池田 宏助教授に感謝致します。また、地球科学系・水野恵司博士には粗稿を読んで頂き貴重なご意見を賜った。記して謝意を表します。

文 献

飯田智之・吉岡龍馬・松倉公憲・八田珠郎 (1986) : 溶出による花崗岩風化帯の発達. 地形, 7, 79-89.

- 小野有五 (1983) : 筑波台地上での霜柱による土壤侵食. 筑波の環境研究, 7, 128-140.
- 小野有五・松岡憲知 (1982) : 凍結破砕作用にもとづく赤石山地での岩屑生産. 筑波大学大井川プロジェクト報告, 山地崩壊にともなう土砂流出と機作と環境保全に関する山岳地域生態的研究II, 15-39
- 恩田裕一 (1989) : 土層の水貯留機能の水文特性および崩壊発生に及ぼす影響. 地形, 10, 13-26.
- 恩田裕一・松倉公憲・松岡元・大橋弘明 (1989a) : 安息角に関する基礎的実験. 日本地理学会予稿集, no, 35, 232-233.
- 恩田裕一・松倉公憲・松岡元・大橋弘明 (1989b) : 粒状体斜面の崩壊機構に関する基礎的実験. 第24回土質工学研究発表講演集, 1605-1606.
- 佐藤亮・水野恵司・松倉公憲 (1985) : 地すべり粘土の物性からみた新潟県下の二, 三の地すべりについて. 筑波大学水理実験センター報告, 9, 15-26.
- 鈴木隆介 (1981) : 地形学の最終目標. 三野与吉先生喜寿記念会編: 「地理学と地理教育—その背景と展望—」, 古今書院, 117-129.
- 八田珠郎・松倉公憲・木股三善・谷津栄壽 (1980) : カコウ岩の風化に関する研究—いわゆる“深層風化”に関するある考え—. 日本地理学会予稿集, no. 18, 4-5.
- 八田珠郎・木股三善・松倉公憲・谷津栄壽 (1981) : 筑波山周辺における深成岩の風化について. 鉱物学雑誌, 15 (特別号), 202-209.
- 八田珠郎・松倉公憲・谷津栄壽 (1983) : 長石から二次鉱物への風化過程における相互結晶方位関係. 地形, 4, 81-88.
- 広瀬孝・八田珠郎・松倉公憲 (1990) : 深成岩類および石灰岩の溶出速度に関する一考察. 地形, 11, 303.
- 福田正己・松岡憲知 (1982) : 凍結過程での岩石内の水分ポテンシャル分布について. 低温科学物理篇, 41, 217-224.
- 福田正己・松岡憲知 (1983) : 岩石内の水の凍結点降下と弾性波速度変化について. 保存科学, 22, 1-14.
- 堀井徹・松岡憲知・松倉公憲 (1987) : フロストクリープによる斜面物質の移動に関する実験. 筑波大学水理実験センター報告, 11, 21-27.
- 前門晃・松倉公憲・木股三善 (1979) : ローム切り取り面におけるクラックの形成条件と受食性について. 地理学評論, 52, 643-649.
- 松岡憲知 (1984a) : ネパール・ヒマラヤの水河周辺における岩盤の凍結破砕について. 雪氷, 46, 19-25.
- 松岡憲知 (1984b) : 多孔質岩石の凍結破砕における水分条件の影響. 地形, 5, 337-344.
- 松岡憲知 (1985) : 赤石山脈主稜線部における線状凹地の分布と岩石物性. 地理学評論, 58 (Ser. A), 411-427.
- 松岡憲知 (1986) : 凍結破砕速度に影響を与える岩石物性. 地形, 7, 23-40.
- 松岡憲知 (1987) : ひずみゲージによる多孔質凝灰岩の凍結ひずみの測定. 地形, 8, 33-39.
- 松岡憲知・上本進二 (1984) : 日本アルプス主稜線部の組織地形. 地理学評論, 57, 263-281.
- 松岡憲知・小野有五 (1982) : 大井川上流地域の赤石山地における二重山稜. 筑波大学大井川プロジェクト報告, 山地崩壊にともなう土砂流出と機作と環境保全に関する山岳地域生態的研究II, 41-55.
- 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 (1988) : 大型一面せん断試験機の作製とその目的. 筑波大学水理実験センター報告, 12, 37-41.
- 松倉公憲・奥山武彦・恩田裕一 (1988) : 一面せん断試験における試料径とせん断箱の径との関係に関する予察的研究. 筑波大学水理実験センター報告, 12, 43-48.
- 松倉公憲・恩田裕一 (1989) : 安息角: 定義と測定法にまつわる諸問題. 筑波大学水理実験センター報告, 13, 27-35.
- 松倉公憲・恩田裕一・井石博之 (1989) : 安息角の測定における斜面長の影響に関する予察的実験. 筑波大学水理実験センター報告, 13, 37-44.
- 松倉公憲・木股三善・谷津栄壽 (1979) : 柿岡盆地北部, 東山におけるハンレイ岩の風化と地すべり粘土の生成. 地理学評論, 52, 30-39.
- 松倉公憲・近藤昭彦 (1985) : 田切谷壁における応力状態について. 筑波大学水理実験センター報告, 9, 49-52.
- 松倉公憲・前門晃・八田珠郎・谷津栄壽 (1983) : 稲田花崗岩の風化による諸性質の変化. 地形, 4, 65-80.
- 松倉公憲・水野恵司 (1984) : 柿岡盆地北部, 東山地すべりにおける斜面勾配とその力学的安定について. 地理学評論, 57, 485-494.
- 松倉公憲・水野恵司・今永元 (1984) : 二, 三の砂質土

- および粘性土のクリープ特性について. 筑波大学水理実験センター報告, 8, 49-55.
- 松倉公憲・柳生真宏 (1987): 田切の南向きおよび北向き谷壁における地温の差異とその地形形成プロセスに及ぼす影響. 筑波大学水理実験センター報告, 11, 13-19.
- 水野恵司 (1984): 千葉県南部における地すべりと斜面勾配. 地すべり, 21-1, 33-41.
- 水野恵司 (1987): 波状すべり面をもつ慢性型地すべりの運動モデル. 地理学評論, 60 (Ser. A), 499-515.
- 水野恵司 (1989): 速度と持続時間の頻度分布にもとずいたランドスライドの分類. 地理学評論, 62 (Ser. A), 320-331.
- 水野恵司 (1990): 新潟県寺泊・椎谷層泥岩中に発生する崩壊型地すべり一地すべり土塊のせん断強度の評価に関する一考察一. 地形, 11, 23-40.
- 水野恵司・松倉公憲 (1985): 直接せん断クリープ試験における粘土供試体の変形一破壊過程. 筑波大学水理実験センター報告, 9, 53-58.
- 藁谷哲也・松倉公憲 (1988): 上総丘陵の谷壁斜面における含水比変化に伴うスレーキング剥離. 地形, 9, 135-144.
- Carson, M. A. (1971): *The Mechanics of Erosion*. Pion, London, 174p.
- Everett, D. H. (1961): The thermodynamics of frost damage to porous solids. *Trans. Faraday Soc.*, 57, 1541-1551.
- Goldich, S. S.(1938): A study in rock weathering. *J. Geol.*, 46, 17-58.
- Goudie, A. ed. (1981): *Geomorphological Techniques*. George Allen & Unwin, London, 395p.
- Kimata, M., Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1979): Stilbite in the weathered gabbro. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.5, 62-64.
- Maekado, A. (1984): Differential erosion on artificially cut slopes made of loosely consolidated Quarternary deposits in Kanto district, Japan. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, 5, 79-109.
- Maekado, A., Hatta, T. and Matsukura, Y. (1982): Field measurement on slaking in Shimajiri mudstone in Okinawa, Southwestern Japan. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.8, 45-50.
- Maekado, A. and Matsukura, Y. (1985): Recession of cutting slope made of loosely consolidated Quarternary deposits due to freeze-thaw action. *Zeit. Geomorph., N. F.*, 29, 213-222.
- Matsukura, Y. (1984): Soil slips of two gressslopes in Mino-Mikawa Mountains, Central Japan. *Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba*, no.10, 59-62.
- Matsukura, Y. (1987a): Evolution of valley side slopes in the "Shirasu" ignimbrite plateau. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, 8, 41-49.
- Matsukura, Y.(1987b): Critical height of cliff made of loosely consolidated materials. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.13, 68-70.
- Matsukura, Y. (1988a): Cliff instability in pumice flow deposits due to notch formation on the Asama mountain slope, Japan. *Zeit. Geomorph., N. F.*, 32, 129-141.
- Matsukura, Y. (1988b): Notch formation due to freeze-thaw action in the north-facing valley cliff of the Asama volcano region. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.14, 30-33.
- Matsukura, Y. (1989): Weathering, rockproperties and denudational processes. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, 10-A, 103-112.
- Matsukura, Y.(1990): Notch formation due to freeze-thaw action in the north-facing valley cliff of the Asama Volcano region, Japan. *The Geogr. Bull.*, 32, 118-124.
- Matsukura, Y. (1991): Notch formation processes and cliff instability in pumice flow deposits on the Asama mountain slopes, Japan. *Sci. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba, Sect.A*, 12, 37-63.
- Matsukura, Y., Hayashida, S. and Maekado, A. (1982): Slope stability analysis for circular surface-failure and its application to the slope made of "Shirasu" ignimbrite. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.8, 51-52.
- Matsukura, Y., Hayashida, S. and Maekado, A. (1984): Angles of valley-side slope made of "Shirasu" ignimbrite in South Kyushu, Japan. *Zeit. Geomorph., N. F.*, 28, 179-191.
- Matsukura, Y. and Kanai, H.(1988): Salt fretting in the valley cliff of the Asama volcano region, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 85-90.
- Matsukura, Y. and Maekado, A. (1984): Slope stabil-

- ity analysis for "Murose" debris-slide triggered by the 1949 Imaichi earthquake. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.10, 64-65.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1991) : Rates of tafoni weathering on uplifted shore platforms in Nojimazaki, Boso Peninsula, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 51-56.
- Matsukura, Y., Matsuoka, N. and Yano, N. (1989) : A preliminary study on tafoni and honeycombs in Nojimazaki, Boso Peninsula, Japan. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.15, 29-32.
- 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 Tanaka, Y. (1983) : Stability analysis for soil slips of two grass-slopes in Southern Abukuma Mountains, Japan. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, **4**, 229-239.
- Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1980) : An apparatus for the measurement of swelling pressure of some argillaceous rocks and the concept of swelling energy. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, **1**, 35-41.
- Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1982) : Wet-dry slaking of Tertiary shale and tuff. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, **3**, 25-39.
- Matsukura, Y. and Yatsu, E. (1985) : Influence of salt water on slaking rate of Tertiary shale and tuff. *Trans. Japan. Geomorph. Union*, **6**, 163-167.
- Matsumoto, E. and Watanabe, T. (1986) : Site conditions and the formation of white sand in north-east Brazil. *Latin America Studies*, **8**, 31-48.
- Matsuoka, N. (1988) : Laboratory experiments on frost shattering of rocks. *Sci. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, Sect. A, **9**, 1-36.
- Matsuoka, N. (1990a) : The rate of bedrock weathering by frost action : field measurements and a predictive model. *Earth Surface Processes and Landforms*, **15**, 73-90.
- Matsuoka, N. (1990b) : Mechanisms of rock break down by frost action : an experimental approach. *Cold Region Science and Technology*, **17**, 253-270.
- Matsuoka, N., Moriwaki, K. and Hirakawa, K. (1988) : Diurnal frost-heave activity in the Sor-Rondane Mountains, *Antarctica. Arctic and Alpine Research*, **20**, 422-428.
- Mizuno, K. (1989) : Landsliding of clayey slopes with a wavy slip surface : model and its application. *Sci. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, Sect. A, **10**, 87-151.
- Mizuno, K. and Matsukura, Y. (1988) : The influence of plasticity index and slope angle on speed of rapid-type landslides. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.14, 30-33.
- Onda, Y. and Matsukura, Y. (1989) : The influence of slope length on critical angle of repose : tilting-box tests using an assembly of aluminum rods. *Ann. Rep. Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, no.15, 39-42.
- Onda, Y. and Matsukura, Y. (1990) : Depth of avalanching on slopes composed of two-dimensional granular assemblies. *Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba*, **16**, 30-32.
- Onda, Y. and Matsukura, Y. (1991) : Is the maximum stable angle of slope of granular assemblies comparable to the angle of shearing resistance? *Trans. Japan. Geomorph. Union*, **12**, 147-154.
- Whalley, W. B. (1976) : *Properties of Materials and Geomorphological Explanation*. Oxford Univ. Press, London, 60p.
- Yatsu, E. (1966) : *Rock Control in Geomorphology*. Sozosha, Tokyo, 135p.
- Yatsu, E. (1971) : Landform material science - Rock control in geomorphology. Yatsu, E. et al., ed. : *Research Method in Geomorphology* (Proc. 1st Guelph Symp. on Geomorphology, 1969 : Science Research Associates, Ontario, 140p.