

シュミットハンマー： 地形学における使用例と使用法にまつわる諸問題

松倉公憲¹・青木 久²

The Schmidt Hammer: A Brief Review and Some Problems in Geomorphology

Yukinori MATSUKURA¹ and Hisashi AOKI²

Abstract

We briefly review some problems arising in papers on the Schmidt hammer used in a geomorphological context. There are several types of Schmidt hammer, and many measurement methods including ways of collecting data have been proposed, but no standard method for taking measurements has yet been established. We propose *continuous (repeated) impacts* for assessing the hardness of intact rock and *single impact* for assessing the hardness of a rock surface, including the weathering layer.

Key words: *Schmidt hammer, rock hardness, rock strength, field measurement.*

1. はじめに

シュミットハンマー¹⁾は、Schmidt (1951) によってコンクリートの強度を非破壊で知るためにつくられたものであり、たとえば、28日養生した立方体コンクリートの強度を見積もるために利用された (Kolek, 1958)。その後、シュミットハンマーは野外で簡便に岩石・岩盤の「硬さ²⁾」を計測することができることがわかり、岩盤工学 (岩盤力学) の分野にも応用され (たとえば, Hucka, 1965), その計測値から一軸圧縮強度を推定するための方法が提案された (Deer and Miller, 1966)。

シュミットハンマーは小型で軽量 (N型やL型でおよそ2.3kg) なため携帯が楽であり、しかも非破壊で比較的簡便に岩石・岩盤の「硬さ」が計測できることから、野外の計測には便利である。比較的短時間に多量のデータをとれるというメリットもある。しかも測定者によるデータのバラツキが少ないこと (Day and Goudie, 1977; Day, 1980; Caseldine, 1987) もこの機器を有用なものとしている。しかし一方で、割れ目が極度に多い岩石では

2003年12月16日受付, 2004年1月15日再投稿, 2004年1月20日受理

¹ 筑波大学地球科学系

¹ Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

² 筑波大学大学院地球科学研究科

² Graduate School of Geoscience, University of Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

使えない、緩んだ表面物質は除去しなければならない、強度が弱い岩石には使えない (R 値が 10 以下の値は無効とされる)、礫岩や角礫岩などのように均質でない岩石では使えない、などのいくつかの弱点ももっている。

地形学において、シュミットハンマーを最初に利用したのは、Yaalon and Singer (1974) であると思われる³⁾が、彼らはイスラエルのカルクレート殻の硬さを数量化するために使用しており、一軸圧縮強度との関係式も提示した。この頃、Yatsu (1966; 1969) や Whalley (1976) によって地形学における岩石物性計測の重要性が提唱されたこととも関連し、その後シュミットハンマーを使用した研究が急激に増加しつつある。それにしたがって、データ採取の目的が、岩石・岩盤の「硬さ」あるいは「強度」といった基本物性を知ること以外に、岩盤評価・風化程度の指標を得るためとか、堆積物である礫の堆積年代を知るためなどと、多様になってきた。このこととも関連し、データ採取の方法 (使用法) も多様化し、研究者によって異なることも多い。このことは、別の見方をすれば、使用法が基準化されていないことを反映している。

本稿では、主に岩石・岩盤を対象として行われた、シュミットハンマーを用いた従来の研究を総括し、(1) 研究者ごとの多様な「データの取り方」を整理し、(2) シュミットハンマー反発値 (以後 R 値⁴⁾と呼ぶ) と他の岩石物性との関連性を整理するとともに、(3) R 値の計測に際しての注意点・問題点をまとめる。

2. シュミットハンマーの原理とその種類

シュミットハンマーの原理は、ハンマーの先端が岩石・岩盤表面に押しつけられたときに、バネのついた鋼鉄のかたまり (ハンマー) が自動的に解放されて先端のプランジャーに打撃されることによっている。バネの解放がもたらすエネルギーの一部を岩石の弾性変形が吸収するが、その結果バネの残留弾性エネルギーはハンマーの反発をもたらす。この反発値 (これが R 値となる) は 0 から 100 (目盛上では 10 から 100) まで変化する。この値は反発した距離をパーセントで表したものである⁵⁾。したがって「硬い」ものほどバネの反発が大きくなり、R 値が大きくなる。

シュミットハンマーには、打撃システムや打撃エネルギーの大きさが異なる数種のタイプがある (Table 1; Fig. 1)。基本タイプとして、P 型、L 型、N 型、M 型がある。P 型は振り子型 (pendulum hammer) と呼ばれるものであり、一般に強度の弱いコンクリートやモルタルに使用され、岩石・岩盤に使用された例はないようである。L 型、N 型、M 型は打撃エネルギーに違いがあり、それぞれ 0.735 Nm (0.075 mkg), 2.207 Nm (0.225 mkg), 29.43 Nm と順に大きくなる。M 型は打撃エネルギーが大きいと同時に、プランジャー先端の径が大きき⁶⁾、粒径 32 mm 以上の骨材を使用してつくられたコンクリートの強度を計測するためのものである。これも現在のところでは、岩石・岩盤に使用された例はないようである。

Table 1. Several types of Schmidt hammer.

Schmidt hammer type		Impact energy	Application
P-type*	P-type	Pendulum hammer	70 kPa 以下の低硬度物質 [1] 5-30 N/mm ² 25 N/mm ² 以下で使用 [2] Plaster floor 熱処理したコンクリートの初期強度 [2] 若材令コンクリート [3]
	PT-type		0.2-5 N/mm ² [3] 石膏・軽量コンクリート [3]
	PM-type		5-30 N/mm ² [3] レンガ・ブロックの目地 [3]
L-type	L-type	0.735 Nm (0.075 mkg)	20-150 MN/m ² 10-70 N/mm ² [2] 10 cm 以下の薄い壁で使用 [2]
	LB-type		Plunger tip が特別仕様, レンガ用 [2]
N-type	N-type	2.207 Nm (0.225 mkg)	20-250 MPa, ただし 30 MPa 以下では信頼性が低い [1] 10-70 N/mm ² [2]
	KS-type		直径 30 mm のアタッチメント付きプランジャー ただし R = 20 以下では N 型と異なる値をとる [4]
M-type		29.43 Nm	10-70 N/mm ² [2] 粒径 32 mm 以上の骨材コンクリートで使用 [2]

*P/PT/PM はハンマーの大きさと形が異なる

[1] Selby (1982) [2] Proceq 社カタログ [3] 富士物産社カタログ [4] 斎藤・菊池 (1975)

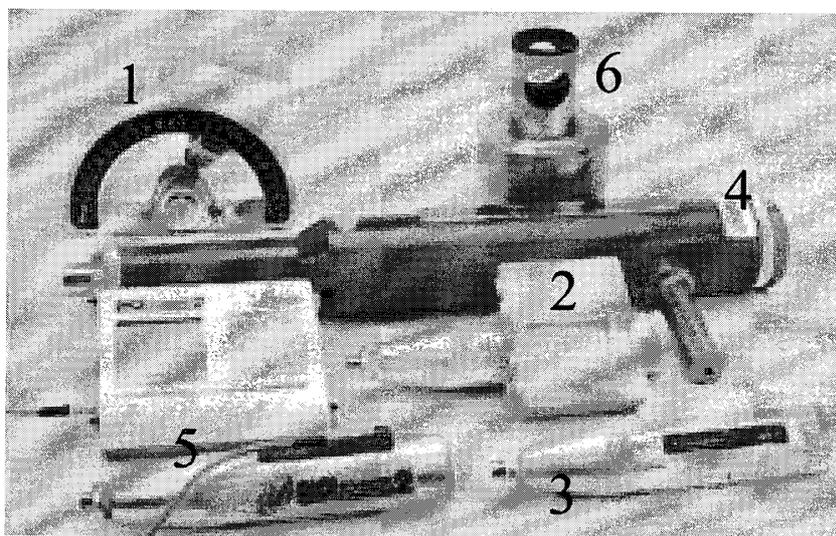


Fig. 1. Several types of Schmidt hammer.

1: P-type, 2 and 3: L- and N-type, 4: M-type,
5: digital type, and 6: testing anvil

地形学や岩盤工学の分野において岩石・岩盤の硬度を計測するのに、L型とN型の両方が使われてきた⁷⁾。L型はたとえばDeer and Miller (1966)によって使用された。打撃エネルギーはN型の1/3であり、比較的柔らかな岩石の計測に有効とされている(たとえば圧縮強度が20-300 MN/m²のコンクリート, 人工岩石など)。岩盤工学の分野においては、このL型が推奨されている(国際岩の力学学会(ISRM: International Society of Rock Mechanics)のsuggested method (ISRM, 1981, pp.101-102))。ただしL型でR値が30を超えるような硬岩には、N型ハンマーの使用が推薦されている(Poole and Farmer, 1980)。一方N型は、たとえばDay and Goudie (1977)が使用したものであり、この型は、圧縮強度が20-250 kPaの広範囲の岩石に適用できるが、ただし30 kPa以下の軟岩ではデータの信頼性が低いという。

このN型と同じ衝撃エネルギーをもつKS型がある。これは上述のN型の欠点を補うために、斎藤・菊池(1975)によって、N型ハンマーのプランジャー先端に直径30 mmのアタッチメントをつけて岩石・岩盤用に改良したものである(通常のL型, N型においては、プランジャーは直径15 mmの棒であり、先端にアタッチメントは付いていない)。KS型の名称の由来は、改良者である菊池・斎藤の頭文字をとったものである。本邦ではこのタイプを特に「シュミットロックハンマー」と呼び、岩石・岩盤の計測には、このタイプが多く使われている(たとえば、今泉ほか, 1989)。ただしこのタイプは本邦以外ではほとんど使われていないようである。したがって、このタイプを使用して論文を書く場合には、N型の改良型と明記しないと海外の研究者には理解されないと思われる。

このように、岩石・岩盤の計測では、L型とN型(KS型も含めて)の2種類の類似したハンマーが使われており、このことも多少の混乱を引き起こす原因ともなっている。Queisser et al. (1986)のように、岩石・岩盤に使用する場合、両者には有意な差異はないという指摘もあるが、上述したように、L型の打撃エネルギーはN型の3分の1であり、そのため同じ硬度の岩石を打撃した場合、両者のR値は当然異なることになる。すなわち打撃エネルギーの大きいN型のR値がL型のそれより若干大きい値をとる(たとえば、後述するように、キャリブレーション用のアンビルを打撃した場合、N型のR値は79 ± 2, L型のそれは73 ± 2となる; West, 1991)。

この両者のハンマーによるR値の関係については、Ayday and Goktan (1992)による詳しい研究がある。彼らは、19個の岩石を用いて、以下の3測定法(測定法については次章で詳述する)による計測から、L型とN型のR値の比較をした。

測定1: 1点を5回連続して打撃し、最大値をとる方法(Pool and Falmar, 1980)であり、3つの異なった点から得られたデータの最大値を平均してR値とする。

測定2: 1点を10回連続して打撃してその最大値をとる(Hucka, 1965)。そして3つの異なった点から得られたデータの最大値の平均値をR値とする。

測定3: 少なくともプランジャーの直径より離れたポイントを1回ずつ打撃する(single impacts) (ISRM suggested method: ISRM, 1978)。20ヶのデータをとることが望

ましい。クラックがある岩石からのデータは除外し、大きい方から10ヶのデータを平均しR値とする。

その結果、N型のR値 (R_N) とL型のR値 (R_L) の間には、以下のような関係式が導かれている。

$$\text{測定1では } R_N = 7.334 + 1.175 R_L \quad R_L = 1.180 + 0.717 R_N$$

$$\text{測定2では } R_N = 7.989 + 1.142 R_L \quad R_L = 1.003 + 0.769 R_N$$

$$\text{測定3では } R_N = 7.124 + 1.249 R_L \quad R_L = 0.605 + 0.677 R_N$$

いずれのケースでも、前者はL型からN型への換算式であり、後者はN型からL型への換算式である。これらの関係式は、いずれの場合も同じ岩石を打撃した場合、N型（打撃エネルギーの大きいもの）のR値の方がL型のそれより若干大きい値をとることを示している。

3. 測定法（データ採取方法）とそれに関連する諸問題

3.1. 多様なデータ採取・整理方法

シュミットハンマーは、ハンマー先端を岩石・岩盤表面に押し当て、打撃の反発値を読むものである。従って、通常は何回か打撃をくりかえし、それらをもとに、そこでのR値を得ることになる。Poole and Farmer (1980) は、1980年以前に提案された測定法を以下の7種類にまとめている。

- (a) Hucka (1965) の推奨した方法：1点を連続して10回の打撃を行い、その最大値を記録する。
- (b) Young and Fowell (1978) : face indexing 技術と呼ばれるもので、トンネルの壁面をグリッドに分割し、それぞれを1回ずつ打撃し、平均をとる。
- (c) Priest (私信) : 近接した5ポイントで、少しずつずらしながら1回ずつ打撃し、大きい方から3個のデータを選び平均する。
- (d) Soiltest Inc (1976) : 一つのエリアにおいて15回の打撃 (25 mm 以上離れたところで) をし、大きい値から10個のデータを平均する。平均からの最大偏差は2.5以内。
- (e) Proceq (1977) : 10 cm × 10 cm のエリアにおいて1回ずつ打撃し、平均から5以上離れた値を除外し、平均する。
- (f) British Standards Institution (1971) : 1回ずつの打撃 (single impacts) を9-25回行い、それらの平均をとる。平均値、最大・最小の範囲、標準偏差、変動係数の値も提示することが望ましい。
- (g) ISRM (1978) 少なくともプランジャーの直径より離れたポイントにおいて1回ずつの打撃 (single impacts) を行う。20個のデータをとることが望ましい。クラックがある岩石からのデータは除外し、大きい方から10個のデータを平均する。

1980年以降も、多くの計測法が提示されている。たとえば、Kazi and Al-Mansour (1980) は、35個のデータを取り、低い値の10個は棄て25個のデータを平均するという

方法を採用している。Selby (1993, p.78) の方法は、同じポイントを5回打撃し、最大値をとる（一般に最後が最大値になる）というものである。田中（1990）はポイントを変えて20回の打撃をし、その最頻値をR値とした。また、田中ほか（1993）はポイントを変えて20回の打撃をし、上位5個のR値の平均をとっている。Campbell (1991) は、5 cm × 5 cm × 5 cm の三角形の頂点と中央の合計4点でおのおの3回ずつ打撃し、その平均をとっている。また、Boelhouwers, et al. (1999), Sumner and Nel (1999; 2002) は、15回の打撃を異なったポイントで行い、その15個のデータの平均から最も離れた値の5個のデータを除き、残りの10個のデータを平均する方法をとっている。またごく最近、地盤工学会基準部が作成した基準案が提示されたが、それによると、15-50 cm 四方の測定面内で最低9箇所のポイントで各1回の測定を行い、全測定値の平均をとる、とされている（地盤工学会基準部, 2003）。

以上のような従来の研究例から、シュミットハンマーの計測方法をまとめると、大きく2つに分類される。一つは上記 (a) に代表されるように、同じポイントを複数回打撃する方法 (continuous impacts 連続打撃法: 以後「連打法」と呼ぶ) であり、もう一つは (b) ~ (g) のように、同じポイントは1回のみ打撃し、次々とポイントを移動させながら打撃する方法 (single impacts 一回打撃法: 以後「単打法」と呼ぶ) である。前者は、計測点が固定しているため、打撃回数とデータの選別がR値に影響を与える。一方後者は、それらのほかに、打撃点が移動するためその打撃するポイントをどのように選ぶか、によってR値が異なることになる。

連打法では、3.3で後述する例のように、最初の3-4回は反発値が小さく、しかも徐々にR値が上昇することが多い。そこで、R値の最大値を得るためには最低5回の打撃が必要 (Poole and Farmer (1980)) という主張もある。一般に岩盤表層は緩んでいることが多く、場合によっては風化層がある。そのため最初の数回の打撃は、この緩み層・風化層の影響で値が小さいことがしばしばある。最初の数回の低い値を除去するのはこのためである。連打法の場合はこの (a) のように最大値を選択する方法のほかに、数回から数10回の計測値の平均をとる方法もある。ちなみに筆者らの研究室においては、新鮮な岩盤のR値を求めるために、岩盤表面にプランジャーの先端を押しつけたままの連打法によって15回ないし20回の計測をし、計測初期の小さな値を除去した残りのデータを平均することにより最終的なR値を求めている (たとえば、水野・松倉, 1999; Matsukura and Tanaka, 2000)。連打法では、表層の風化層や岩盤表面の凹凸の影響を除去できるというメリットがある反面、測定対象の均質性 (測定点の代表性) が問題になる。そこで、このような心配がある場合には、数点で計測をおこない、それらを平均する方法もあろう。また連打法では、ハンマーの打撃を繰り返すことにより、その部分が局部的に塑性変形を起こすという指摘がある (三木, 1978, p.142)。

単打法では、次々と打点が移動する。従来の研究では、この打点の位置の取り方は多様であるが、いずれにしても、この移動には打点が重ならないように注意しなければならない

い。打点数も 5～20 と多様であり、R 値の決め方も、最大値、上位 3 個の平均、10 個の平均、全部の平均と多様である。

3.2. データ採取に際しての機器操作にまつわる注意点

地形学の分野では、シュミットハンマーは野外で使われるが、ボーリング・コアや岩石ブロックなどを対象に室内での計測に使用される場合もある。実験室で使う時は供試体ブロックが動かないようにしっかり固定しなければならないとされている。たとえば、Gunsallus et al. (1984) は、V-notch holder を用いると高い R 値が得られ、それを使うべきと主張した (Kolaiti and Papadopoulos, 1993)。また、実験室での測定では、立方体の供試体は最小でも一辺が 17.5 cm の長さは必要という報告 (Brook, 1993) がある。

またシュミットハンマーを野外で使用する場合には以下の注意が必要とされている (Day and Goudie, 1977; Gardiner and Dackombe, 1983, pp.90-93)。

- (a) クラックの端から少なくとも 60 mm 離して打撃しなければならない。
- (b) おおのこの打撃点を、常に新鮮なスポットに移動させなければならない (単打法の場合)。
- (c) 打撃面は平坦にする (カーボランダム砥石などで整形する)。計測前にフレークや汚れを取り除いておく必要がある。
- (d) 一つのサイトで少なくとも 10 から 15 回の打撃が必要。Selby (1980) は以下のように報告している。最も信頼できる結果が、反発値の上位と下位の 20 % を除外すれば得られる。そして残りの平均値からの偏差が 3 ポイントを超えることがなくなるまで計測を続けなければならない。
- (e) ハンマーを使う方向性を記録しておかなければならない。L 型の場合は、Deer and Miller (1966) が、ハンマーの打撃方向 (壁面との角度) による反発値から一軸圧縮強度に換算するグラフを作成している。N 型の場合は、Day and Goudie (1977) が反発値の校正係数を提示している (横向き水平打ちが基準で、打撃方向の違いで反発値を補正する：上向き計測の場合は、得られた値にマイナス、下向き計測の場合はプラスする)。
- (f) ハンマーは定常的にテストアンビルで校正しておかなければならない。
- (g) 反発値は含水比の変化によって異なってくる。それゆえ理想的には、すべての反発値は同じ含水比条件下で計測しなければならない。

上記 (a)～(d) は 3.1 の測定法とも関係したものであるが、これはあくまでも一般論として読むべきである。すなわち、これらの注意 (方法) は「岩盤 (内部の新鮮な部分) の硬さを知る」ための計測をする場合のものである。もし表層の風化程度や風化による凹凸 (MaCarroll, 1992) などを評価するために使用する場合は、(b) の指摘のように常に新鮮なスポットに移動する必要もないし、(c) の指摘のように平坦化する必要もない (後述 3.4 参照)。また、野外の計測においては (g) の指摘のように同じ含水比条件下で計測することはほとんど不可能であろう。

上記の中で、(e) (f) は当然の指摘である。特に (f) に関連しては、MaCarroll (1987)

が詳細な実験をおこない、シュミットハンマーの機器にまつわる測定誤差の5つの起源を明らかにした：(1) 新しいハンマーの器差：アンビルでチェック（アンビルのR値はN型で78であり，誤差は±2が許容範囲とされる），(2) アンビルを15回打撃すると，数回は小さいR値を記録する（計測誤差がある），(3) 使用しているうちにR値が減少する：アンビルでチェックすると4000回の打撃で，R値が76.5から67.0に低下した．(4) ハンマーのキャリブレーションをしない場合の測定誤差，(5) R値の頻度分布特性：使用回数の増加とともにR値が小さくなり，それにしたがってとりうるR値の範囲が増加する（測定値のヒストグラムの分散が大きくなる）．以上の結果をふまえて，彼は1000回の打撃ごとにハンマーのチェックをする必要があり，キャリブレーションの必要な場合はそれを行うことを勧めている．なお，キャリブレーションの式は以下であたえられる：

$$78 \times (\text{計測の R 値} / \text{アンビルを使った時の R 値})$$

そしてもし，キャリブレーションしていないハンマーでR値の計測が行われたのであれば，そのことを論文（報告書）に明記しなければならないことを指摘している．

なお，West (1991, pp. 66-68) によれば，アンビルのR値に関しては，N型の場合に 79 ± 2 ，L型で 73 ± 2 となり，キャリブレーションはN型で

$$79 \times (\text{計測の R 値} / \text{アンビルを使った時の R 値})$$

L型で

$$73 \times (\text{計測の R 値} / \text{アンビルを使った時の R 値})$$

とするという提案がある．またN型のアンビル使用のR値が72以下，L型で66以下になった場合は速やかに分解・内部清掃・再キャリブレーションを行うべきであるという．

3.3. R値に影響を与える岩盤特性および試験環境

R値に影響を与える岩盤側の要因としては，(1) 岩盤表面の凹凸，(2) 含水比，(3) 岩石の異方性，(4) 風化程度，(4) 温度の影響，などが考えられる．以下に示すように，これらの要因がR値に与える影響はいくつか議論されているものの，それぞれの厳密な関係については不明な点が多い．

(1) の岩盤表面の凹凸の影響については Williams and Robinson (1983) の計測がある．同じ砂岩をハンマーで割った状態の凹凸のある表面と，のこぎりで切った平滑な表面をL型ハンマーで計測し，両者のR値を比較したところ，前者は32.1，後者は42.4と有意な差があったことから，凹凸の影響は大きいとした．

(2) の含水比の影響については Day and Goudie (1977) によって調べられている．乾燥している砂岩のR値は35.7（50回の打撃）であったが，砂岩を水に3時間つけて計測したところ，10分後には34.26，90分後に33.72，3時間後には32.32となった．この実験結果は水分の影響が有意（水分が多いほどR値が小さくなる）であることを示している．また Sumner and Nel (2002) も玄武岩・珪岩・ドレライト・砂岩を用いて含水比の影響を検討し，いずれの岩石も飽和試料は乾燥試料よりR値が低くなることが確かめられた．とくに砂岩でR値の減少が顕著であった．

(3) の岩石の異方性の影響については、従来あまりデータがない。しかし、層理、葉理、片理や片麻状組織の方向によって強度の異方性があるように、R 値がそれぞれ異なることは当然予想される。

(4) 風化程度の影響についてであるが、風化が進行するにしたがい、R 値が小さくなることは多くの研究で指摘されてきた（たとえば、鈴木ほか，1977；八田ほか，1981）。風化程度の差異が R 値に影響することは明かであり、このことを逆に利用し、5で後述するようにモレーン礫の相対年代を推定することなどに応用されている。

(5) の温度の影響については、Day and Goudie (1977) によって検討されているが、R 値に対する温度の影響はなさそうである。彼らは花崗岩を 75 °C で 24 時間加熱したあと、室温 (16 °C) まで低下させる実験と、- 40 °C に 24 時間冷却したのち室温 (16 °C) まで上昇させる実験を行い、それらの実験の過程で 5 分間隔で R 値を計測したが、R 値には有意な差異は見られなかったという。

3.4. R 値計測の二、三の例（測定法の違いによる R 値の差異）

ここでは、我々が行った具体的な R 値の計測例を示し、使用（計測）方法の差異による R 値の違いを議論する。本計測で使用したシュミットハンマーは KS 型である。この機器は 2002 年 10 月に購入したものであり、2003 年 8 月の計測時にまでに、すでに、およそ 3000 回程度の打撃をしている。野外計測直後のアンビルによるテストでは以下の R 値を示した。

アンビルテスト連打法 76 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78 78

最初の R 値を除くとすべて 78 であり、2003 年 8 月の計測ではほぼ正常な値が得られているものと判断される。

このハンマーを用いて 2003 年 8 月 30 日、銚子半島の海鹿島（あしかじま）海岸においていくつかの計測を試みた。計測対象は、いけすを囲む石垣を構成している砂岩塊（先白亜系銚子層群の海鹿島層と呼ばれる中～細粒砂岩）である。

石垣の上から 3 層目（くぼんでいる箇所）の一つの岩塊を計測対象とした。この岩塊には青島橋脚砂岩にみられるようなタフォニ状の浅い凹み（高橋ほか，1993）が形成されている。すなわち岩塊表面では塩類風化による粒状風化が起こっていると考えられる。その岩塊を対象に連打法と単打法を試みた。連打法は、岩塊のほぼ中央の一点でプランジャーの先端を固定したままで行った⁹⁾。単打法は、連打法で打撃した点の周辺で、打撃点が重ならないように数 cm ずつ打点を移動させた。15 回の打撃をしたが、その測定範囲はおおよそ 7 × 7 cm² の範囲内にある。打撃の向きは横向きである。

連打法 45 52 52 53 55 55 54 54 54 55 56 56 56 56 55 55 56 56
56 56 56 (21 打)

単打法 42 48 47 48 44 43 42 48 48 40 44 47 48 47 48 (15 打)

連打法の場合、この例のように、最初の数回は R 値が低いことが多い。これは 3.1 で前述したように、表層の風化層、あるいは緩み層の硬度を反映しているためと考えられ

る。したがって、R 値は、最大値をとれば 56 であり、最初の 4 つのデータを除去して残りの 17 個を平均すると 55.4 ± 0.79 となる (± の値は標準偏差を示す)。一方、単打法によって得られた R 値は、連打法よりかなり小さくバラツキが大きい (R 値の平均は 45.6)。このように、単打法は表層の微小な凹凸や風化程度を反映したものであり、この岩塊内部の硬度・強度を正確に反映したものではない。したがって、この岩塊内部のより新鮮な硬度・強度を知るためには連打法によって計測しなければならないことがわかる。

次に全く同じ岩塊において、機器に付属のカーボランダム砥石を用いて表面を研磨したのちに、再度同様の計測を試みた。その結果は以下ようになった。なお、この場合の打点は研磨前の計測打点とは少しずれている。

連打法 48 50 53 53 54 54 56 54 54 54, 54 53 54 54 54 54 55 55
55 56, 54 (21 打)

単打法 50 50 48 49 49 50 48 46 47 48, 46 46 48 49 47 (14 打)

連打法の場合、最初の 2 打までは若干小さな値をとるが、3 打目以上は最大値の 56 に近い値となった。研磨前の値と比較すると、最大値は 56 で同じである。5 打目以降の平均値は 54.4 ± 0.79 となり、研磨前よりわずかに 1 ポイント小さい値となったが、これは場所の差異によるものと考えられる。すなわち、連打法では研磨の有無にかかわらず、類似の値が得られることになる。一方、研磨後の単打法の平均値は 48.1 となり、研磨前に比較して平均値は 2.5 ポイント大きくなり、変動は小さくなる。これは明らかに、表面の粒状風化の影響が除去されたことを示している。ただし、それでもなお連打法の値に比較すると、平均で R 値が 6.3 ポイントほど小さく、岩盤表層が脆弱化していることを伺わせる。

同じ海岸で、波食棚上に岩盤が厚さ 1 cm の板状に剥離した部分があり、その剥離部分を打撃した。その結果は以下ようになった。連打法で、打撃の方向は鉛直下向きである。

36 38 36 40 41 44 44 45 39 44, 42 39 33 32 29 29 36 41 40 42, 47
48 49 52 48 49 50 52 47 52, 51 50 50 49 53 52 52 51 52 (39 打)

最初の数回は徐々に値が増加し、8 打目で 45 の極大値をとった。その後 12 打目 (R 値は 39) に、表層の剥離部分が破壊した。破壊後も同じ点を打撃し続けたが、33 32 29 29 と小さい値をとったあとに徐々に値が増加し、とくに 50 打目以降 49-52 の安定した値をとっている。このように、薄い岩盤 (クラックやジョイントがある岩石) では、最初の 10 数回の打撃では剥離して浮き上がった岩盤の値しか表さず、岩盤本来の硬度・強度を知るためには、数 10 回の打撃が必要な場合もある。類似の現象として、軟岩 (泥岩、凝灰岩など) の場合、連打法によって岩石が破壊し、硬度・強度の計測が難しく、計測に注意が必要な場合がある。たとえば以下のデータは、いわき市・塩屋崎にある海食崖の基部を構成する泥岩の例である。

連打法：横向きで打撃 16 21 23 25 25 25 25 24 24 24, 23 22 21 20 21
(15 打)

最初から4～6打目で最大値をとるが、その後破壊によって徐々に値が小さくなっている。このような場合岩盤硬度・強度としては、平均値よりは最大値を採用すべきであろう。

以上の測定例からもわかるように、同じ岩盤の計測において、連打法と単打法では得られるR値に大きな差異がある。このことは、計測の目的に合わせて、計測法を選択する必要があることを示している。

4. R値と他の岩石物性との関係

従来、R値との関連で最も多く取り上げられてきた岩石物性は一軸圧縮強度であろう。R値を一軸圧縮強度に換算するということに対する批判もある（たとえば、Neville, 1973, p.501）が、多くの研究が、R値から一軸圧縮強度へ換算する関係式を導く試みをおこなってきた。それらの研究の先駆けはYaalon and Singer (1974)であり、彼らはN型ハンマーを用いて、R値と圧縮強度との間に以下のような直線関係が成り立つことを見出した。

$$\text{LogUCS} = 0.0387 R + 0.826$$

ここでRは反発値、UCSは一軸圧縮強度を示す。その後L型ハンマーを用いて、Miller (1965)とDeer and Miller (1966)により、ハンマーの打撃方向による補正を入れた換算法が提唱された。この結果は、Hoek and Bray (1977)によって修正されたグラフ (Hoek and Bray, 1977, Fig. 37, p.98; 小野寺・吉中訳, 1979, p.78)としてよく知られており、地形学分野においても、多くの教科書・成書に引用されている（たとえば、Gardiner and Dackombe, 1983, Fig. 6. 1, p.90; Selby, 1993, Fig. 5.27, p.79; Sunamura, 1992, Fig. 4. 12, p.63）。

これら以外にもR値と一軸圧縮強度、ヤング率との関係を議論した論文は多く、それらをTable 2にまとめた。Miller (1965)以降、これだけ多くの研究が積み重ねられた背景には、岩石の種類（岩型）が異なるとR値と一軸圧縮強度との関係あるいはR値とヤング率との関係が若干異なるからであろう。したがって、R値を野外で計測したとしても、一軸圧縮強度やヤング率の値は、実験室で直接実測して得ることが望ましい。

また、R値と曲げ強度、圧裂引張強度、ロサンゼルス磨耗強度 (Kazi and Al-Mansour, 1980; Hodder and Hetherington, 1991)、ショア硬度、弾性波速度 (Queisser et al., 1985)などとの関係も議論されている (Table 3)。また、Allison (1990)は降伏強度との関係を調べているが、その相関係数は0.33と低い。

5. 地形学におけるシュミットハンマーの利用

シュミットハンマーは、一般的には野外の露頭表面での岩石・岩盤の硬度を計測するために使用されてきた（たとえば、鈴木ほか, 1977; Day, 1980; Summerfield and Goudie, 1980; Shorey et al., 1984; 松岡・上本, 1984; 松岡, 1985; Suzuki et al., 1985; Pye et

Table 2. Correlations between Schmidt hardness with unconfined compressive strength and tangent Young's modulus in literature.

	Equation	Unit	r	r^2	Hammer type	Rock type
Miller (1965)	$\text{Log UCS} = 0.00088\gamma R + 1.01$?	0.94		L	28 lithological unit, three base rock types
Deere and Miller (1966)	$\text{UCS} = 10^{(0.000147R+3.16)}$	Psi	0.88		L	
	$E = 6.95\gamma^2 R - 1.14 \times 10^6$	Psi			ditto	
Aufmuth (1973)	$\text{UCS} = 6.9 \times 10^{(1.348 \log(\gamma R) - 1.325)}$	MPa				25 lithological unit
	$E = 6.9 \times 10^{(1.961 \log(\gamma R) + 1.96)}$	MPa				
Yaalon and Singer (1974)	$\text{Log UCS} = 0.0387 R + 0.826$	kgf/cm ²	0.97		N	15 rocks
Saito and Kikuchi (1975)	$\text{Log } E = 0.0343 R + 3.6800$	MPa	0.9116		KS	53 different rocks
Irfan and Dearman (1978)	$\text{UCS} = 7.752 R + 213.349$?				Granite
Beverly et al. (1979)	$\text{UCS} = 12.74 \exp(0.0185\gamma R)$	MPa				20 lithological unit
	$E = 192(R\gamma^2) 12710$	MPa				
Kidybinski (1980)	$\text{UCS} = 0.447 \exp[0.045(R+3.5)+\gamma]$	MPa				Different rock types and coal
Kikuchi et al. (1982)	$\text{Log UCS} = 0.0307 R + 1.4016$	MPa			KS	
	$\text{Log } E = 0.0331 R + 3.7032$	MPa	0.912		ditto	54 different rocks
Singh et al. (1983)	$\text{UCS} = 2R$	MPa	0.72			30 sedimentary unit
Shorey et al. (1984)	$\text{UCS} = 0.4R - 3.6$	MPa	0.94		N	20 lithological unit
Haramy and DeMarco (1985)	$\text{UCS} = 0.994R - 0.383$	MPa	0.7			10 lithological unit
Ghose and Chakraborti (1986)	$\text{UCS} = 0.88R - 12.11$	MPa	0.87			Coal
Imaizumi et al. (1989)	$\text{UCS} = 9.16931 \text{Ln}R - 15.0340$	kgf/cm ²	0.77		KS	Limestone
Cargill and Shakoov (1990)	$\text{Ln UCS} = 4.3 \times 10^{-2}(R\gamma) + 1.2$	MPa			L	Sandstone
	$\text{Ln UCS} = 1.8 \times 10^{-2}(R\gamma) + 2.9$	MPa			ditto	Carbonate
Sachpazis (1990)	$R = 0.2329 \text{UCS} + 15.7244$	MPa	0.96		L?	33 different carbonates rocks
	$R = 0.51549 E + 17.488$	MPa	0.88		ditto	
Xu et al. (1990)	$\text{UCS} = \exp(aR+b) [1]$?	0.88			Mica-schist, prasinite, serpentinite, gabbro, Mudstone
	$E = \exp(cR+d) [1]$	MPa	0.96			
Brook (1993)	$\text{UCS} = 4(R-25) \quad R < 50 [2]$	MPa				
	$\text{UCS} = 20(R-45) \quad R > 50 [2]$	MPa				
Aggitalis et al. (1996)	$\text{UCS} = 2.22R - 47.67$	MPa	0.79			Basalt
	$\text{UCS} = 1.52R - 5.94$	MPa	0.54			Gabbro
Gökçeoğlu (1996)	$\text{UCS} = 0.0001 R^{3.2658}$	MPa	0.84			Marl
Kahraman (1996)	$\text{UCS} = 4.5 \times 10^{-4}(R \times \gamma)^{2.46}$	MPa	0.93	0.964		10 lithological unit
Katz et al. (2000)	$\text{Ln UCS} = 0.067 R + 0.792$	MPa		0.994		7 different rocks
	$\text{Ln } E = 3.091 \text{Ln}R - 8.967$	GPa		0.913		
	$\gamma = 1308 \text{Ln}R - 2874$	kg/m ³				
Kahraman (2001a)	$\text{UCS} = 6.97 \exp 0.014 R\gamma$?	0.78		N	48 different rocks
Yılmaz and Sendir (2002)	$\text{UCS} = \exp(0.818 + 0.059 R)$	MPa	0.98		-	Gypsum
	$E_c = \exp(1.146 + 0.054 R)$	MPa	0.91			
Yaşar and Erdoğan (2003)	$\text{UCS} = 4 \times 10^{-6} R^{4.2817} \text{MPa}$	MPa		0.8		6 different rocks
	$\gamma = 0.9377 \text{Ln}R - 1.0299$	g/cm ³		0.84		

UCS=Unconfined compressive strength, E=Young's modulus, R=Schmidt hardness, γ = Unit weight. [1] a, b, c and d coefficient based on rock types, [2] Data derived from Deere and Miller (1966)

Table 3. Correlations between Schmidt hardness with rock properties in literature.

	Equation	<i>r</i>	<i>r</i> ²	Rock type
Barton and Choubey (1977)	$\phi_r = 10^0 + r_1/R_1 (\phi_b - 10^0)$ $\phi_r = (\phi_b - 20^0) + 20 (r_2/R_2)$			
Augustinus (1991)	$B = 0.15 \gamma R - 13.7$ $PLI = 0.09 \gamma R - 8.65$	0.84 0.8		—
Charitaras (1996)	$R = 22.5176 \exp (0.2432 V)$	0.967		Limestone
Tiryaki et al. (2001)	$R = -0.1498 SSH^2 + 14.86 SSH - 314.95$	0.963		Coal
Kahraman (2001b)	$SVI = 0.11 R - 4.71$ $SVI = 0.2 R - 5.21$ $SVI = 0.11 R - 4.41$	0.81 0.83 0.83		
Kahraman et al. (2003)	$PR = -0.037 R + 1.60$	0.9		8 different rocks
Yaşar and Erdoğan (2003)	$P = -0.19999 R + 11.21$ $SB = 0.0151 \exp (0.0664 R)$ $SBE = 0.0383 R^{1.5398}$ $AAS = 243.1 \exp (-0.0485 R)$ $R = 56.883 \ln (SSH) - 181.38$		0.8 0.17 0.8 0.47 0.82	6 different rocks

ϕ_r = Residual friction angle, ϕ_b = Basic friction angle, r_1 = Rebound on weathered joint surface, R_1 = Rebound on unweathered rock surface, R_2 = Rebound on dry unweathered sawn surfaces, r_2 = Rebound on wet joint surfaces, B = Brazilian tensile strength (MPa), PLI = Point load strength index (MPa), V = Ultra sonic velocity (km/sec), SVI = Sound velocity index (sec/km), PR = Penetration rate (m/min), P = Porosity (%), SB = Strength to blow (MPa), SBE = Strength to bending (MPa), AAS = Average abrasion strength (cm³/50 cm²), SSH = Shore Scleroscope hardness, V = Ultra sonic velocity (km/sec), and R = Schmidt hammer hardness.

al., 1986; Goudie et al., 1989; 田中, 1990; Suzuki and Nakanishi, 1990; Whitloe and Shakesby, 1988; Dardis, 1991; 田中ほか, 1993; Matsukura and Matsuoka, 1996; 水野・松倉, 1999; Xiao et al., 2000; Goudie et al., 2002; Snyder et al., 2003). これらの多くの研究は、地形を構成する岩石・岩盤の基本物性の一つである強度（あるいは硬度）を、強度測定のための岩石試料の採取が困難な場所で、簡便に迅速にしかも多数のデータが計測できるというシュミットハンマーの特性を利用したものであり、そのR値と地形との関係を議論しているものが多い。多くの論文はR値は%表示のままであるが、たとえばDeer and Miller (1966)の図を用いて一軸圧縮強度に換算して使用している場合もある（たとえば、Hayakawa and Matsukura, 2003）。

岩石力学・土木工学の分野では、岩盤分類が重要なテーマとなる。ISRM (1981, pp.30-34)では岩盤の不連続な属性をもった壁の強度を決定するための所定の試験方法としてシュミットハンマーを利用すべきと推奨している。地形学の分野でR値を使った岩盤評価の一つとして考案されたのが、Selby (1980)のRMS (rock-mass strength classification and rating)である。彼はN型ハンマーを用いてintactな岩盤・岩石のR値を求め、それに風化程度やジョイントの密度・幅・方向・連続性などのパラメーターを組み合わせることで、トータルのrating数をだし、その結果をもとに岩盤を5階級に分類している。そしてその岩盤の階級分けとその岩盤が構成する斜面の勾配との関係を議論した。RMSはその後多くの研究

で援用された (Selby, 1982; Moon and Selby, 1983; Moon, 1984; Hall, 1987; Augustinus and Selby, 1990; Allison and Goudie, 1990; Augustinus, 1992, 1995; Trenhaile et al., 1998).

風化程度の指標としてシュミットハンマーを利用した研究例もある (Day and Goudie, 1977; Barton and Choubey, 1977; 八田ほか, 1981; Day, 1981; 松倉ほか, 1983; Matthews and Shakesby, 1984; Ballantyne, 1986; Matthews et al., 1986; Dawson et al., 1986; Pye et al., 1986; Shakesby et al., 1987; Sjöberg, 1987, 1991 a, 1994; Campbell et al., 1987; Ballantyne et al., 1989, 1990, 1997, 1998; McCarroll, 1987; 1989 a, 1989 b, 1990, 1991; Campbell, 1991; Sjöberg and Broadbent, 1991; Hall, 1993; McCarroll and Nesje, 1993; 小口ほか, 1994; Mottershead and Pye, 1994; Unal, 1996; Anderson et al., 1998; Haslett and Curr, 1998; White et al., 1998; Le Pera and Sorriso-Valvo, 2000; Stephenson and Kirk, 2000; Matsukura and Tanaka, 2000).

たとえば Day and Goudie (1977) によって石灰岩と砂岩の基盤の風化やケースハードニングによってもたらされた力学的強度の変化がシュミットハンマーで計測された。結果の一例であるが、深さ 2 m 以深は石灰岩の基盤で R 値が 30 であり、それ以浅の石灰岩がケースハードニングで硬化した部分は 50 前後の値を示した。また, Gökçeoğlu and Aksoy (2000) は L 型ハンマーを使用し, 風化係数なるパラメーターを考案した。対象とした岩石はマール・泥岩・砂岩・片岩などである。風化係数 W_c は以下のように表される:

$$W_c = R_f / R_w$$

ここで R_f は新鮮な岩石表面での R 値, R_w は風化した岩石表面での R 値である。ISRM (1981, pp. 101 - 102) の方法で合計 142 の計測をおこなったが, ジョイント表面の風化の指標 (Rating: Unal, 1996) は以下のように表される:

$$\text{Rating (joint surface weathering)} = 10.7 - 2.7 W_c$$

堆積時に新鮮だった岩塊は, 時間経過とともに風化し, その表面の R 値が低下する。このことを逆に利用して, 高い R 値のものは風化していない (すなわち若い堆積物である) と仮定して (Day, 1980; McCarroll, 1989 a), R 値をモレーン礫などの堆積年代を知るために用いる (相対年代推定) 方法が考案されてきた (たとえば, Brookes, 1982; Matthews and Shakesby, 1984; MaCarroll, 1985, 1989 a, 1989 b, 1991; Caseldine, 1985, 1987; Dawson et al., 1986; Matthews et al., 1986, 1996; Shakesby et al., 1987; Sjöberg, 1990, 1991 b; Shiraiwa and Watanabe, 1991; Nesje et al., 1994; Boelhouwers et al., 1999, 2001; Aa and Sjastad, 2000; Winkler, 2000; Christiansen et al., 2002 など)。たとえば, この分野で最も初期の頃に野外研究にシュミットハンマーを使ったのは Matthews and Shakesby (1984) であり, 彼らによって小氷期のモレーンの相対年代を検討するために精力的にデータが収集された。彼らによれば, シュミットハンマーの計測とライケノメトリー (地衣類相対年代法) などと組み合わせることによって, 完新世の堆積物の堆積年代を知ることができるという。この分野の詳しいレビューは渡辺 (1990) によってなされている。

6. ま と め

シュミットハンマーには上述したようにいくつかの種類があり、データ採取方法・データ処理の方法も多様である。そこでシュミットハンマーを使用した研究成果を発表する場合には、ハンマーの種類（たとえばN型かL型か）、データ採取法（打撃の方法・回数、打撃の方向）、データの処理・計算法（R値と標準偏差）、等を明記する必要がある。それがなければその研究の追試もできないし、他の研究者の計測値との比較も正確にはできない。また、R値は岩石（あるいは露頭面）の測定面と垂直な方向の強度である。したがって岩石の条件（岩石表面の凹凸、含水比、異方性、風化程度など）によっても影響を受ける。そのため岩石側の状況をできるだけ詳細に記述しておく必要もある。

いずれにしてもR値の計測は、計測目的によって測定機器の選定と測定方法を選択しなければならない。たとえば計測方法について言えば、岩石・岩盤の基本物性としての新鮮な「硬さ」を計測する場合は、連打法で計測し、最初の低いR値（表層の緩みや風化層の影響する）を除外した残りの10-15個のデータを平均して求めるのが一般的であろう。他の物性への変換もこのR値を使用すればよい。しかし、それ以外の目的（たとえば岩盤表層の凹凸程度の評価や風化層の厚さや強度の計測）などでは、単打法が適している。このように、シュミットハンマーを野外で使用する場合は、それぞれの研究の目的に適合した使い方とデータの取り方をしなければならない。

また、正しいR値を計測するためには、シュミットハンマーは絶えずキャリブレーションしておかなければならない。同じ機器を用いることによってR値の単なる相対的大小を議論するだけなら問題はないが、そうでなければ他の研究とのR値の比較はできないことになり、混乱をひきおこすことになる。

本稿ではシュミットハンマーを使用して研究を行う場合には、その使用法に十分留意する必要があることを強調した。そのうえで、地形学に適用できる新たな測定法をみつける努力も必要になる。

謝 辞

本稿をとりまとめるにあたり、富士物産営業部の藤原貴央さんから、試験器のデモをしていただいたり、試験器についての情報を提供していただいた。記して感謝します。

注

- 1) コンクリート分野においては、シュミットハンマーは単にテストハンマーと呼ばれることが多い。一方、岩盤力学・地形学分野においてはシュミットロックハンマーと呼ばれることもあるが、本稿ではシュミットハンマーと呼ぶことにする。
- 2) 「硬さ」は、試験方法の違いにより、(1) 押し込み硬さ、(2) 引っかき硬さ、(3) 動的硬さ、などに分類される。シュミットハンマーによって計測される「硬さ」は、(3) の動的硬さに分類され、反撥硬度とも呼ばれる。

- 3) Sjöberg (1990), Sjöberg and Broadbent (1991), 渡辺 (1990) などによれば, シュミットハンマーを地形学に最初に応用したのは, Monroe (1966) であるとしているが, 原典にあたったところ, シュミットハンマーを使用したという記載を見つけることが出来なかった。
- 4) シュミットハンマーによって得られる値はシュミットハンマー反発値 (hardness number, rebound number) と呼ばれ, N とか R-value と表現される. 本稿では, N 型ハンマーとの混乱を避ける意味でも N を使用せず, R 値と用いることにする。
- 5) R 値は, 一般的には % を省略し, 数値のみで表すことが多い。
- 6) 径が大きいのは, 骨材である礫の部分とマトリックスであるセメントの部分の平均的な硬度 (強度) を得るためである. この M 型シュミットハンマー礫岩のような岩石の礫岩とマトリックスを含んだ平均的な硬度 (強度) を計測する場合には使える可能性がある。
- 7) なお, L 型と N 型のシュミットハンマーには, 自動記録 (記録紙が紙送りされ 1 回ごとの反発値が棒グラフ状に記録される) できるタイプと, その装置がついていない (R 値を逐次読み取る方式のもの) タイプとがあり, 自動記録装置は R 型と呼ばれている. したがってたとえば, LR 型とは L 型で記録装置付きのものを指す. LR 型にしる NR 型にしる, 記録計付きのハンマーを使用する際には, 記録計ではなく, ハンマー上部を押さえて打撃するように注意しなければならない. これは記録計の部分を押さえて打撃すると記録計 (容器) が破損する原因となるためである。
- 8) 連打法の場合には, プランジャー先端の位置が少しでもずれると R 値に影響がでる. したがってプランジャー先端の位置が全く動かないように固定して打撃する必要がある. そのため連打法を多用する場合は, 記録紙付きのタイプを用いるのが望ましい. 最近ではデジタル表示で自動記録がとれるタイプが市販されている (商品名: デジシュミット 2)。

引用文献

- Aa, A. R. and Sjastad, J. A. (2000) Schmidt hammer age evaluation of the moraine sequence in front of Boyabreen, western Norway: *Norsk Geologisk Tidsskrift*, **80**, 27-32.
- Aggitalis, G., Alivizatos, A., Stamoulis, D. and Stournaras, G. (1996) Correlating uniaxial compressive strength with Schmidt hardness, point load index, Young's modulus, and mineralogy of gabbros and basalts (Northern Greece): *Bull. Int. Assoc. Engeng. Geol.*, **54**, 3-11.
- Allison, R. J. (1990) Developments in a non-destructive method of determining rock strength: *Earth Surface Processes and Landforms*, **15**, 571-577.
- Allison, R. J. and Goudie, A. S. (1990) The form of rock slopes in tropical limestone and their associations with rock mass strength: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. **34**, 129-148.
- Anderson, E., Harrison, S., Passmore, D. G. and Mighall, T. M. (1998) Geomorphic evidence of Younger Dryas glaciation in the Macgillycuddy's Reeks, south west Ireland: *Quaternary Proceedings*, **6**, 75-90.
- Aufmuth, R.E. (1973) A systematic determination of engineering criteria for rocks. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* **11**, 235-245.
- Augustinus, P. C. (1991) Rock resistance to erosion: some future considerations: *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 563-569.
- Augustinus, P. C. (1992) The influence of rock mass strength on glacial valley cross-profile morphometry: a case study from the southern Apls, New Zealand: *Earth Surface Processes and Landforms*, **17**, 39-51.
- Augustinus, P. C. (1995) Rock mass strength and the stability of some glacial valley slopes: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. **39**, 55-68.
- Augustinus, P. C. and Selby, M. J. (1990) Rock slope development in McMurdo Oasis, Antarctica, and implications for interpretations of glacial history: *Geografiska Annaler*, **72A**, 55-62.
- Ayday, C. and Gökten, R. M. (1992) Correlation between L- and N-type Schmidt hammer rebound values obtained field testing: in Hudson, J. A. ed. *International ISRM Symposium on Rock Characterization*, 47-50.
- Ballantyne, C. K. (1986) Protalus rampart development and the limits of former glaciers in the

- vicinity of Baosbheinn, Wester Ross: *Scottish Journal of Geology*, **22**, 13-25.
- Ballantyne, C. K., Black, N. M. and Finlay, D. P. (1989) Enhanced boulder weathering under late-lying snowpatches: *Earth Surface Processes and Landforms*, **14**, 745-750.
- Ballantyne, C. K., Black, N. M. and Finlay, D. P. (1990) Use of the Schmidt hammer to detect enhanced boulder weathering under late-lying snowpatches: *Earth Surface Processes and Landforms*, **15**, 471-474.
- Ballantyne, C. K., McCarroll, D., Nesje, A. and Dahl, S. O. (1997) Periglacial trimlines, former nunataks and the altitude of the last ice sheet in Wester Ross, northwest Scotland: *Journal of Quaternary Science*, **12**, 225-238.
- Ballantyne, C. K., McCarroll, D., Nesje, A., Dahl, S. O. and Stone, J. O. (1998) The last ice sheet in north-west Scotland: reconstruction and implication: *Quaternary Science Reviews*, **17**, 1149-1184.
- Barton, N. and Choubey, V. (1977) The shear strength of rock joints in theory and practice: *Rock Mech.*, **10**, 1-54.
- Beverly, B. E., Schoenwolf, D. A. and Brierly, G. S. (1979) Correlations of rock index values with engineering properties and the classification of intact rock: FHWA, Washington, D.C.
- Boelhouwers, J. C., Jager, D. F. and De Joode, A. (1999) Application of relative age dating methods to openwork debris flow deposits in the Cederberg Mountains, Western Cape, South Africa: *South African Geographical Journal*, **81**, 135-142.
- Boelhouwers, J. C., Craemers, F. C. W. and Helsen, M. M. (2001) Geomorphic evolution of debris fans in the Du Toit's Kloof, Western Cape Mountains: *South African Geographical Journal*, **83**, 263-273.
- British Standards Institution (1971) *Recommendations for Nondestructive Methods of Test for Concrete, Part 4*: BS 4408.
- Brook, N. (1993) The measurement and estimation of basic rock strength: *Comprehensive Rock Engineering*, **3**, 41-66.
- Brookes, I. A. (1982) Dating methods of Pleistocene deposits and their problems. VIII, Wathering: *Geoscience Canada*, **9**, 188-199.
- Campbell, I. A. (1991) Classification of rock weathering at Writing-on-stone Provincial Park, Alberta, Canada: a study in applied geomorphology: *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 701-711.
- Campbell, I. A., Shakesby, R. A. and Walsh, R. P. D. (1987) The distribution of weathering and erosion on an inselberg-pediment system in semi-arid Sudan: in Gardiner, V. ed., *International Geomorphology 1986*, Part II, John Wiley and Sons, 1249-1270.
- Cargill, J. S. and Shakoor, A. (1990) Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **27**, 495-503.
- Caseldine, C. J. (1985) The extent of some glaciers in Northern Iceland during the Little Ice Age and the nature of recent deglaciation: *Geographical Journal*, **151**, 215-227.
- Caseldine, C. J. (1987) Neoglacial glacier variations in Northern Iceland: examples from the Eyjafjardur area: *Arctic Alpine Research*, **19**, 296-304.
- Charitaras, B. (1996) Non destructive methods for investigation of some mechanical properties of natural stones in the protection of monuments: *Bull. Int. Assoc. Engng. Geol.*, **54**, 59-63.
- Christiansen, B., Bennike, O., Böcher, J., Elberling, B., Humlum, O. and Jakobsen, B. H. (2002) Holocene environmental reconstruction from deltaic deposits in northeast Greenland: *Journal of Quaternary Science*, **17**, 145-160.
- Dardis, G. F. (1991) The role of rock properties in the development of bedrock-incised rills and gullies: examples from southern Africa: *GeoJournal*, **23**, 35-40.
- Dawson, A. G., Matthews, J. A. and Shaksby, R. A. (1986) A catastrophic landslide (Sturzstrom) in Verkilsdalen, Rondane National Park, Southern Norway: *Geogr. Ann.*, **68**, 77-87.
- Day, M. J. (1980) Rock hardness: field assessment and geomorphic importance: *Professional*

- Geography, **32**, 72-81.
- Day, M. J. (1981) Rock hardness and landform development in the Gunong Mulu National Park, Sarawak, E. Malaysia: *Earth Surface Processes and Landforms*, **6**, 165-172.
- Day, M. J. and Goudie, A. S. (1977) Field assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer: *British Geomorphological Research Group Technical Bulletin*, **18**, 19-29.
- Deere, D. U. and Miller, R. P. (1966) Engineering classification and index properties for intact rocks: *Tech. Report. Air Force Weapons Lab., New Mexico, No., AFNL-TR*, 65-116.
- Gardiner, V. and Dackombe, R. (1983) *Geomorphological Field Manual*: George Allen & Unwin, London, 254 p.
- Ghose, A. K. and Chakraborti, S. (1986) Empirical strength indices of Indian coals - an investigation: *Proceedings of 27 th US Symp. on Rock Mechanics*, Balkema, Rotterdam, 59-61.
- Gökçeoğlu, C. (1996) Schmidt sertlik çekici kullanılarak tahmin edilen tek eksenli basınç dayanımı verilerinin güvenilirliği üzerine bir değerlendirme. *Jeol. Mühendis.*, **48**, 78-81 (In Turkish).
- Gökçeoğlu, C. and Aksoy, H. (2000) New approaches to the characterization of clay-bearing, densely jointed and weak rock masses: *Engineering Geology*, **58**, 1-23.
- Goudie, A. S., Bull, P. A. and Magee, A. W. (1989) Lithological control of rillenkarren development in the Napier Range, Western Australia: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. **75**, 95-114.
- Goudie, A. S., Migoń, P., Allison, R. J. and Rosser, N. (2002) Sandstone geomorphology of the Al-Quwayra area of south Jordan: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. **46**, 365-390.
- Gunsallus, K. L., Kulhawy, F. H., O'Rourke, T. D. (1984) Evaluation of Schmidt hammer rebound hardness test holders: *Geotech. Test. Jour.* **7**(3), 164-166.
- Hall, K. (1987) The physical properties of quartz-micaschist and their application to freeze-thaw weathering studies in the maritime Antarctic: *Earth Surface Processes and Landforms*, **12**, 137-149.
- Hall, K. (1993) Enhanced bedrock weathering in association with late-lying snowpatches: evidence from Livingston Island, Antarctica: *Earth Surface Processes and Landforms*, **18**, 121-129.
- Haramy, K.Y. and DeMarco, M. J. (1985) Use of Schmidt hammer for rock and coal testing: 26 th US Symp. on Rock Mechanics, 26-28 June, Rapid City. Balkema, Rotterdam.
- Haslett, S. K. and Curr, R. H. F. (1998) Coastal rock platforms and Quaternary sea-levels in the Baie d'Audierne, Brittany, France: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. **42**, 507-515.
- 八田珠郎・木股三善・松倉公憲・谷津榮壽 (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.
- 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.
- Hoek, E. and Bray, J. W. (1977) *Rock Slope Engineering*: The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 p.
- Hodder, A. P. W. and Hetherington, J. R. (1991) A quantitative study of the weathering of greywacke: *Engineering Geology*, **31**, 353-368.
- Hucka, V. (1965) A rapid method of determining the strength of rocks *in situ*: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **2**, 127-134.
- 今泉真之・富田友幸・座波吉実 (1989) シュミットロックハンマーによる宮古島南東部琉球石灰岩の工学的性質について: 応用地質, **30**, 1-13.
- Irfan, T. W. and Dearman, W. R. (1978) Engineering classification and index properties of a weathered granite: *Bull. Int. Assoc. Engng. Geol.*, **17**, 79-80.
- ISRM (1978) Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **15**, 89-98.
- ISRM (1981) *Rock Characterization Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods*: International Society for Rock Mechanics. 211 p.
- 地盤工学会基準部 (2003) 新規制定の地盤工学会基準案「シュミット式ハンマー試験方法」について: 土と基礎, **51-12**, 105-108.
- Kahraman, S. (1996) Basınç direnci tahmininde Schmidt ve nokta yük indeksi kullanmanın

- güvenilirliği: In: Korkmaz ve, S. and Akçay, M. (Eds.), K.T.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü **30**. Yıl Sempozyumu. Bildiriler Kitabı, Trabzon, 362-369 (In Turkish).
- Kahraman, S. (2001a) Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **38**, 981-994.
- Kahraman, S. (2001b) A correlation between *P*-wave velocity, number of joints and Schmidt hammer rebound number: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **38**, 729-733.
- Kahraman, S., Bilgin, N. and Feridunoglu, C. (2003) Dominant rock properties affecting the penetration rate of percussive drills: *Int. Jour. Rock Mech. & Min. Sci.*, **40**, 711-723.
- Katz, O., Reches, Z. and Roegiers, J. C. (2000) Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt hammer: *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, **37**, 723-728.
- Kazi, A. and Al-Mansour, Z. R. (1980) Empirical relationship between Los Angeles abrasion and Schmidt hammer strength tests with application to aggregates around Jeddah: *Quarterly Journal Engineering Geology*, **13**, 45-52.
- Kidybinski, A. (1980) Bursting liability indices of coal: *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* **17**, 167-171.
- 菊池宏吉・斎藤和雄・楠 建一郎 (1982) ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について：大ダム, **102-103** 合併号, 20-31.
- Kolaiti, E. and Papadopoulos, Z. (1993) Evaluation of Schmidt rebound hammer testing: a critical approach: *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, **48**, 69-76.
- Kolek, J. (1958) An appreciation of Schmidt rebound hammer: *Magazine of Concrete Research*, **10**, 144-149.
- Le Pera, E. and Sorriso-Valvo, M. (2000) Weathering and morphogenesis in a Mediterranean climate, Calabria, Italy: *Geomorphology*, **34**, 251-270.
- McCarroll, D. (1985) Weathering-based dating techniques: a critical review: *Swansea Geographer*, **22**, 27-45.
- McCarroll, D. (1987) The Schmidt hammer in geomorphology: five sources of instrument error: *British Geomorphological Research Group Technical Bulletin*, **36**, 16-27.
- McCarroll, D. (1989 a) Schmidt hammer relative-age evaluation of possible pre-'Little Ice Age' Neoglacial moraine, Leirbreen, south Norway: *Norsk Geologisk Tidsskrift*, **69**, 125-130.
- McCarroll, D. (1989 b) Potential and limitations of the Schmidt hammer for relative-age dating: field tests on neoglacial moraines, Jotunheimen, southern Norway: *Arctic and Alpine Research*, **21**, 268-275.
- McCarroll, D. (1990) A comment on 'Enhanced boulder weathering under late-lying snowpatches' by Ballantyne, C. K., Black, N. M. and Finlay, D. P.: *Earth Surface Processes and Landforms*, **15**, 467-469.
- McCarroll, D. (1991) The age and origin of Neoglacial moraines in Jotunheimen, southern Norway: new evidence from weathering-based data: *Boreas*, **20**, 283-295.
- McCarroll, D. (1992) A new instrument and techniques for the field measurement of rock surface roughness: *Zeitschrift für Geomorphologie, N. F.*, **36**, 69-79.
- McCarroll, D. and Nesje, A. (1993) The vertical extent of ice sheets in Nordfjord, western Norway: measuring degree of rock surface weathering: *Boreas*, **22**, 255-265.
- 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.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N. (1996) The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments: *Zeitschrift für Geomorphologie, N. F., Suppl. Bd.* **106**, 57-72.
- Matsukura, Y. and Tanaka, Y. (2000) Effect of rock hardness and moisture content on tafoni weathering in the granite of Mount Doeg-Sung, Korea: *Geografiska Annaler*, **82A**, 59-67.
- 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, **57A**, 263-281.
- 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, **58A**, 411-427.
- Matthews, J. A., Dawson, A. G. and Shakesby R. A. (1986) Lake shoreline development, frost

- weathering and rock platform erosion in an alpine periglacial environment, Jotunheimen, southern Norway: *Boreas*, **15**, 33-50.
- Matthews, J. A., Nesje, A. and Dahl, S. (1996) Reassessment of supposed early 'Little Ice Age' and older Neoglacial moraines in the Sandane area of western Norway: *The Holocene*, **6**, 106-110.
- Matthews, J. A. and Shakesby, R. A. (1984) The status of the 'Little Ice Age' in southern Norway: relative-age dating of Neoglacial moraines with Schmidt hammer and lichenometry: *Boreas*, **13**, 333-346.
- 三木幸蔵 (1978) わかりやすい岩石と岩盤の知識: 鹿島出版会, 318 pp.
- Miller, R. P. (1965) Engineering classification and index properties for intact rock: PhD Thesis, University of Illinois, 333 pp.
- 水野恵司・松倉公憲 (1999) 和歌山県田辺市の「ひき岩群」に見られるケスタ地形形成に関与する岩石物性と風化の影響: *地形*, **20**, 571-588.
- Monroe, W. H. (1966) Formation of tropical karst topography by limestone solution and reprecipitation: *Carib. Jour. Sci.*, **6**, 1-7.
- Moon, B. P. (1984) Refinement of a technique for determining rock mass strength for geomorphological purposes: *Earth Surface Processes and Landforms*, **9**, 189-193.
- Moon, B. P. and Selby, M. J. (1983) Rock mass strength and scarp forms in Southern Africa: *Geografiska Annaler*, **65A**, 135-145.
- Mottershead, D. N. and Pye, K. (1994) Tafoni on coastal slopes, south Devon, U.K.: *Earth Surface Processes and Landforms*, **19**, 543-563.
- Nesje, A., Brikra, L. H. and Anda, E. (1994) Dating rockfall-avalanche deposits from degree of rock-surface weathering by Schmidt-hammer tests: a study from Norangsdalen, Sunnmore, Norway: *Norsk Geologisk Tidsskrift*, **74**, 108-113.
- Neville, A. M. (1973) *Properties of Concrete*, London (Pitman), 686 p.
- 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.
- 小野寺 透・吉中龍之進訳 (1979) 岩盤斜面工学: 朝倉書店, 293 p.
- O'Rourke, J. E. (1989) Rock index properties for geoenvironmental development: *Mining Engineering*, **41**, 106-110.
- Poole, R. W. and Farmer, I. W. (1980) Consistency and repeatability of Schmidt hammer rebound data during field testing: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, **17**, 167-171.
- Priest, S. D. 私信 (Priest から Poole and Farmer (1980) への私信)
- Proceq, S. A. (1977) *Operating Instructions Concrete Test Hammer Types L and LR*. Zurich. 15 pp.
- Pye, K., Goudie, A. S. and Watson, A. (1986) Petrological influence on differential weathering and inselberg development in the Kora area of central Kenya: *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**, 41-52.
- Queisser, A., Platen, H. v. and Fürst, M. (1986) Rebound and ultrasonic investigations on freestones of Bamberg Area, F. R. Germany: *Proceedings of the 5th International Congress on Detrioration and Conservation of Stone*, **1**, 79-86.
- Sachpazis, C. I. (1990) Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks: *Bull. Int. Assoc. Engng. Geol.*, **42**, 75-83.
- 斎藤和雄・菊池宏吉 (1975) 岩盤計測におけるコンクリートシュミットハンマーの適用: 第9回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要. 61-65.
- Schmidt, E. (1951) A non-destructive concrete tester: *Concrete*, **59**, 34-35.
- Selby, M. J. (1980) Rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. **24**, 31-51.
- Selby, M. J. (1982) Rock mass strength and the form of some inselberg in the central Namib Desert: *Earth Surface Processes and Landforms*, **7**, 489-497.
- Selby, M. J. (1993) *Hillslope Materials and Processes*: Oxford University Press, Oxford, 451 pp.
- Shakesby, R. A., Dawson, A. G. and Matthews, J. A. (1987) Rock glacier, protalus ramparts and

- related phenomena, Rondane, Norway: a continuum of large-scale talus-derived landforms: *Boreas*, **16**, 305-317.
- Shiraiwa, T. and Watanabe, T. (1991) Late Quaternary glacial fluctuations in the Langtang Valley, Nepal Himalaya, reconstructed by relative dating methods: *Arctic and Alpine Research*, **23**, 404-416.
- Shorey, P. R., Barat, D., Das, M. N., Mukherjee, K. P., Singh, B. (1984) Schmidt hammer rebound data for estimation of large scale in-situ coal strength (Technical Note). *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* **21**, 39-42.
- Singh, R. N., Hassani, F. P. and Elkington, P. A. S. (1983) The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations: *Proc. 24th US Symp. On Rock Mech.*, Texas A&M Univ., AEG. Balkema, Rotterdam, pp. 599-609.
- Sjöberg, R. (1987) Caves indicating neotectonic activity in Sweden: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. Suppl. Bd. **63**, 141-148.
- Sjöberg, R. (1990) Measurement and calibration of weathering processes and lichnenometric investigations on a wave washed moraine, Badamalen, on the upper Norrland Coast, Sweden: *Geogr. Ann.* **72**, 319-327.
- Sjöberg, R. (1991a) Weathering studies on pseudokarst-caves along the northern swedish coast: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. **35**, 305-320.
- Sjöberg, R. (1991b) Relative dating with the Schmidt test-hammer of terraced house-foundations in Forsa Parish, Hälsingland, Sweden: *Laborativ Arkeologi*, **5**, 94-99.
- Sjöberg, R. (1994) Diagonosis of weathering on rock carving surfaces in northern Bohuslän, southwest Sweden: in Robinson, D. A. and Williams, R. B. G. eds, *Rock Weathering and Landform Evolution*, John Wiley & Sons, 223-241.
- Sjöberg, R. and Broadbent, N. (1991) Measurement and calibration of weathering, using the Schmidt hammer, on wave washed moraines on the upper Norrland Coast, Sweden: *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 57-64.
- Snyder, N. P., Whipple, K. X., Tucker, G. E. and Marritts, D. J. (2003) Channel response to tectonic forcing: field analysis of stream morphology and hydrology in the Mendocino triple junction region, northern California: *Geomorphology*, **53**, 97-127.
- Soiltest Inc. (1976) *CT-320 Operating Instructions - Concrete Test Hammer*: Soiltest Inc., Evanston, IL.
- Stephenson, W. J. and Kirk, R. M. (2000) Development of shore platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand II: The role of subaerial weathering: *Geomorphology*, **32**, 43-56.
- Summerfield, M. A. and Goudie, A. S. (1980) The serses stones of southern England: their palaeoenvironmental significance with regard to other silcretes: in Jones, D. K. ed. *The shaping of southern England*, Institute of British Geographers, Special Publication, **11**, 71-100.
- Sumner, P. and Nel, W. (1999) Rock weathering characteristics as relative-age indicators for glacial and post-glacial landforms on Marion Islands: *South African Geographical Journal*, **81**, 135-142.
- Sumner, P. and Nel, W. (2002) The effect of rock moisture on Schmidt hammer rebound: tests on rock samples from Marion Island and South Africa: *Earth Surface Processes and Landforms*, **27**, 1137-1142.
- Sunamura, T. (1992) *Geomorphology of Rocky Coasts*: John Wiley & Sons, Chichester, 302 p.
- 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：中央大学理工学部紀要, **20**, 343-389.
- Suzuki, T., Tokunaga, E., Noda, H. and Arakawa, H. (1985) Effects of rock strength and permeability on hill morphology: *Trans. Japan. Geomorph. Union*, **6**, 101-130.
- 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.
- 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食速度：日南海岸・青島の弥生
橋脚砂岩の侵食速度：地形, **14**, 143-164.
- 田中幸哉 (1990) 宗谷丘陵および白糠丘陵における谷壁斜面発達と岩石物性：地理学評論, **63A**,

- 836-847.
- 田中幸哉・恩田裕一・安形 康 (1993) 河床縦断形に対する岩石物性の影響—花崗岩溪流と古生層溪流について: 地理学評論, **66A**, 203-216.
- Tiryaki, B., Atasoy, K., Yaşitli, N. E., Eyüboğlu, A. S. and Aydın, M. Z. (2001) Studies in the relationships between Hardgove grindability and some rock index tests on Çayırhan Coals: 17th Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET 2001.
- Trenhaile, A. S., Pepper, D. A., Trenhaile, R. W. and Dalimonte, M. (1998) Stacks and notches at Hopewell Rocks, New Brunswick, Canada: *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 975-988.
- Unal, E. (1996) in *Modified Rock Mass Classification: M-RMR System, Milestones in Rock Engineering*, The Bieniawski's Jubilee Collection. A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 203-223.
- 渡辺悌二 (1990) 氷河・周氷河堆積物を主対象とした相対年代法: 第四紀研究, **29**, 49-77.
- West, G. (1991) *The Field Description of Engineering Soils and Rocks*: Open University Press, Buckingham, 129 p.
- Whalley, W. B. (1976) *Properties of Materials and Geomorphological Explanation*: Oxford University Press, London, 60 p.
- White, K., Bryant, R. and Drake, N. (1998) Techniques for measuring rock weathering: application to a dated fan segment sequence in southern Tunisia: *Earth Surface Processes and Landforms*, **23**, 1031-1043.
- Whitloe, R. and Shakesby, R. A. (1988) Bornhardt micro-geomorphology: form and origin of micro-valleys and rimmed gutters, Domboshava, Zimbabwe: *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F. **32**, 179-194.
- Williams, R. B. G. and Robinson, D. A. (1983) The effect of surface texture on the determination of the surface hardness of rock using the Schmidt hammer: *Earth Surface Processes and Landforms*, **8**, 289-292.
- Winkler, S. (2000) The 'Little Ice Age' maximum in the Southern Alps, New Zealand: preliminary results at Mueller Glacier: *The Holocene*, **10**, 643-647.
- Xiao, Y. J., Lee, C. F. and Wang, S. X. (2000) Spatial distribution of inter-layer shear zones at Gaobazhou dam site, Qingjiang River, China: *Engineering Geology*, **55**, 227-239.
- Xu, S., Grasso, P. and Mahtab, A. (1990) Use of Schmidt hammer for estimating mechanical properties of weak rock: 6th Int. IAEG Congress. Balkema, Rotterdam, 511-519.
- Yaalon, D. H. and Singer, S. (1974) Vertical variation in strength and porosity of calcrete (Nari) on chalk, Shefela, Israel and interpretation of its origin: *Journal of Sedimentary Petrology*, **44**, 1016-1023.
- Yaşar, E. and Erdoğan, Y. (2003) Estimation of rock physicomaterial properties using hardness methods: *Engineering Geology*, in press.
- Yatsu, E. 1966. *Rock Control in Geomorphology*: Sozosha, Tokyo, 135 p.
- Yatsu, E. 1969. Landform material science: in Yatsu, E. et al, (eds) *Rock Control in Geomorphology: 1st Guelph Symposium on Geomorphology, 1969*, Geo-Abstracts, Norwich, 49-56.
- Yılmaz, I. and Sendir, H. (2002) Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey): *Engineering Geology*, **66**, 211-219.
- Young, R. P. and Fowell, R. J. (1978) Assessing rock discontinuities: *Tunnels and Tunnelling*, **10**, 45-48.