

# 岩石の熱風化に関する研究の展望

A Review of Studies on Thermal Weathering

藁谷 哲也\*・松倉 公憲\*\*

Tetsuya WARAGAI and Yukinori MATSUKURA

## I はじめに

機械的風化作用のうち、温度変化によって岩石が破碎する風化過程は、熱風化 (thermal weathering または thermoclasty) あるいは日射風化 (insolation weathering) と呼ばれている。この熱風化は、とくに沙漠のような乾燥地域における主要な風化作用の一つと考えられてきた。たとえば、Goudie (1989) によって指摘されているように、熱風化の存在は以下のような事実や考えがその根拠となっていた。

- (1) 沙漠の地表には、シャープで角ばった破壊形態をもつ礫が多い (Bosworth, 1922)。
- (2) 沙漠で、日没後の急激な冷却が起こるとき、ピストルの発砲音と同じような爆発音が聞こえる (Walther, 1893 ; George, 1978)。
- (3) 沙漠では、気温変化に比較して岩石表面の温度変化がきわめて大きい。
- (4) 岩石の熱伝導率は小さいため、岩石内部との温度差が大きくなり、これが表面剥離や球状風化を促進させる。
- (5) 岩石中の鉱物は、それぞれ異なった膨張率をもち、異なった結晶軸に沿って膨張する (Hockmann and Kessler, 1950)。

一方で、この熱風化の存在、速度、能力についての疑義がしばしば主張されてきた (たとえば、Schattner, 1961)。とくに Blackwelder (1925, 1933) や Griggs (1936) による実験は、日射による温度変化のみでは岩石の破碎が起こり難く、破碎には水

分の存在が不可欠であることを示した。これらの研究のもたらした影響は大きく、しばらくの間、熱風化の研究はあまり取り上げられなくなった時期があった。

その後、Rice (1976) が熱風化の重要性を再評価したと前後して、熱風化の研究もいくつか見られるようになってきた。しかし、相変わらず熱風化の効果については、対立した、あるいは異なった種々の意見が提出されている。たとえば Ollier (1963) は、中央オーストラリアにおいて日射によるボールダーの亀裂を確認した。一方、Roth (1965) はモハーベ沙漠における石英モンズナイトの破壊には、水分の影響が大きいと考えている。また、Biro (1968) は熱風化による岩石の破碎は、冷却時に起こることを示唆している。

以上のように、熱風化のプロセスはその存在自体についての疑いがしばしば表明されてきており、いまだに不明な点が多い。そこで今後、熱風化の研究をどの様に進めるべきかを考える一助として、本稿では、熱風化に関する従来の研究を筆者らの観点から整理し直して見ることにした。なお、熱風化 (日射風化) に関する研究のレビューとしては、すでにいくつかの論文がある。たとえば、Winkler (1975, pp. 169-175), Ollier (1984, pp. 18-23), Gerrard (1988, pp. 124-126), Yatsu (1988, pp. 120-140), Goudie (1989, pp. 11-15) などである。とくに、Yatsu においては研究のレビューのほかに、鉱物や岩石における熱応力や熱特性についての詳細な解説がされている。

\* 日本大学文理学部 \*\* 筑波大学地球科学系

## II 野外における岩石表層温度の観測 および実験的研究

野外に露出する岩石(岩盤)が、日射によってどのくらいまで温度上昇するか、また、気温とどの程度の温度差が生じているかを知ることは、熱風化の環境を明らかにする上で重要である。そこで、Roth (1965), Peel (1974), Lattman (1977), Smith (1977), Whalley *et al.* (1984)などによって行われた乾燥地域における岩石表層部の温度観測結果を第1表にまとめた。また第1表には、乾燥地域に供試体を設置してその表層温度を測定した野外実験(Kerr *et al.*, 1984; Jenkins and Smith, 1990)結果、および温帯湿潤地域における岩盤表面の温度観測(高橋・鈴木, 1971)や野外実験(McGreevy, 1985)の結果についても併記した。

### 1. 乾燥地域における岩石表層温度の観測

第1表に示したように、これまでに観測された岩石表面の最高温度としては、Peel (1974)がサハラ沙漠東部に位置するチベスチ山地で観測した温度が最も高い。Peelの観測は、黒褐色の風化皮膜が形成された粗粒な砂岩や青白色砂岩および玄武岩(溶岩流)を対象として行なわれたが、黒褐色の砂岩では79.3℃というきわめて高い表面温度が記録された。また、日変化(岩石表面の最高温度と最低温度の差)についても、概してPeelの観測結果は他の研究者のそれに比べて高く、玄武岩表面においては43.0℃であった。

Peelが対象とした岩石とほぼ同様の岩種についての観測結果は、Whalley *et al.* (1984)がカラコラム山地北西部のフンザから報告した。彼らによると、日最高気温が41.0℃という条件で、南に向く高さ1.6mの崖を構成する砂岩の表面温度は54.0℃、最低温度9.2℃、日変化44.8℃であった。この砂岩では、内部においても温度が高く、5cm深の温度は46.2℃、日変化は36.6℃を記録した。砂岩表面で観測されたこの日変化は、野外で観測された日変化としては最大である(第1表)。一方、風化皮膜の形成された暗色の岩石では、日最高気温が26.5℃のとき表面温度は46.3℃に達しており、気温がさらに上昇した場合には60℃を越えると推測されている。

Whalley *et al.* (1984)では、観測対象とした岩石の冷却速度を計算している。それによると岩石表面の冷却速度は、観測地点における空気の冷却速度より大きい。すなわち、表面の冷却速度は、玄武岩で4.6℃/hour、砂岩で2.7℃/hour、またそれぞれの観測地点における空気の冷却速度は0.6℃/hour、2.1℃/hourであった。これに対して、日射による温度上昇速度は、風化皮膜の形成された暗色の岩石で9.6℃/hourを示した。一方、先述したPeelの観測した玄武岩では、温度上昇速度は5.3℃/hour、冷却速度は2.9℃/hourと計算される。Roth (1965)は、カリフォルニアのモハーベ沙漠において長さ3m、幅1mの石英モンゾナイトの表面で観測を行い、表面温度が49℃に達することを報告したが、この地点における温度上昇速度はおよそ4.6℃/hour、冷却速度は2.5℃/hourと計算される。さらに、Smith (1977)がサハラ沙漠北西のモロッコで観測した石灰岩表面においては、温度上昇速度は2.8℃/hour、冷却速度は1.3℃/hourと計算される。

このように、乾燥地域におけるこれまでの温度観測によれば、岩石表面はおよそ80℃まで上昇し、日変化はおよそ45℃に達するようである。また、日射による岩石表面の温度上昇速度は最大で9.6℃/hour (0.16℃/min)、冷却速度は4.6℃/hour (0.08℃/min)を示した。

### 2. 乾燥地域における岩石表層温度の野外実験

野外における自然岩石・岩盤の温度観測に対して、実験室で整形した岩石試料を野外に設置して観測を行った野外実験が行われている(Kerr *et al.*, 1984; Jenkins and Smith, 1990)。

Kerr *et al.* (1984)による実験は、アイルランドから持ち込んだ石灰岩・花崗岩・砂岩の立方体供試体(1辺7cm)を、1982年8月、モロッコ南東のEr Rachida {年降水量140mm、年平均気温19.6℃、最暖月(7月)の平均気温31.6℃}に設置して行われた。この実験では、供試体の表面だけを露出させて他の面を発砲スチロールで断熱し、表面と6cm深の温度が測定された。実験の結果、岩石の表面温度は砂岩(54.8℃)と花崗岩(54.0℃)で高く、石灰岩(45.2℃)で低い(第1表)。また、日変化も花崗岩(34.0℃)と砂岩(33.8℃)で大きく、石灰岩(26.2℃)

第1表 岩石(岩盤)表層部のおもな温度観測結果

| Source                       | Location            | Rock             | Depth of measurement | Maximum temperature (°C) | Minimum temperature (°C) | Diurnal range (°C) | Month  |
|------------------------------|---------------------|------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|--------|
| Roth (1965)                  | California          | Quartz Monzonite | Surface              | 49                       | 22                       | 27                 | August |
| Peel (1974)                  | Tibesti Mountains   | Basalt           | Surface              | 78.5                     | 35.5                     | 43.0               | August |
|                              |                     | Dark Sandstone   | "                    | 79.3                     | 45.1                     | 34.2               | "      |
|                              |                     | Pale Sandstone   | "                    | 78.8                     | 41.8                     | 37.0               | "      |
| Latiman (1977)               | Nevada              | Andesite         | 2cm depth            | 62                       | 24                       | 38                 | July   |
| Smith (1977)                 | Morocco             | Limestone        | Surface              | 48.1                     | 25.5                     | 22.6               | August |
|                              |                     | "                | 5cm depth            | 41.8                     | 28.0                     | 13.8               | "      |
|                              |                     | "                | 10cm depth           | 39.0                     | 29.0                     | 10.0               | "      |
| Whalley <i>et al.</i> (1984) | Karakoram Mountains | Basalt           | Surface              | 41.0                     | 1.1                      | 39.9               | July   |
|                              |                     | "                | "                    | 33.5                     | 1.1                      | 32.4               | "      |
|                              |                     | "                | 5cm depth            | 21.9                     | 2.8                      | 19.1               | "      |
|                              |                     | Varnish (Dark)   | Surface              | 46.3                     | 14.0                     | 32.3               | August |
|                              |                     | Varnish (Light)  | "                    | 44.3                     | 10.5                     | 33.8               | "      |
|                              |                     | Sandstone        | "                    | 54.0                     | 9.2                      | 44.8               | "      |
| Kerr <i>et al.</i> (1984)    | Morocco             | "                | 5cm depth            | 46.2                     | 9.6                      | 36.6               | "      |
|                              |                     | Limestone        | Surface              | 45.2                     | 19                       | 26.2               | August |
|                              |                     | "                | 6cm depth            | 44.3                     | 20                       | 24.3               | "      |
|                              |                     | Granite          | Surface              | 54.0                     | 20                       | 34.0               | "      |
|                              |                     | "                | 6cm depth            | 52.4                     | 19                       | 33.4               | "      |
|                              |                     | Sandstone        | Surface              | 54.8                     | 21                       | 33.8               | "      |
| Jenkins and Smith (1990)     | Canary Islands      | "                | 6cm depth            | 51.8                     | 21                       | 30.8               | "      |
|                              |                     | Sandstone        | Surface              | 52.2                     | 4                        | 48.2               | June   |
|                              |                     | "                | "                    | "                        | "                        | "                  | "      |
| Takahashi and Suzuki (1971)* | Miura Peninsula     | Tuff             | Surface              | 46.2                     | 25.7                     | 20.5               | July   |
|                              |                     | "                | 5cm depth            | 43.0                     | 27.9                     | 15.1               | "      |
| McGreevy (1985)              | Belfast             | Basalt           | Surface              | 29.2                     | 19.0                     | 10.2               | August |
|                              |                     | Sandstone        | "                    | 28.5                     | 19.2                     | 9.3                | "      |
|                              |                     | Granite          | "                    | 27.4                     | 18.3                     | 9.1                | "      |
|                              |                     | Chalk            | "                    | 24.2                     | 17.7                     | 6.5                | "      |

\* in Japanese

では小さいという結果が得られた。一方, Jenkins and Smith (1990) は,  $0.8 \times 10.1 \times 7.6 \text{ cm}^3$  の板状に整形した砂岩 (イングランド産) をテネリフェ島 (カナリー諸島) の標高 2,080 m の地点に設置し, 1986 年 6 月と 1987 年 1 ~ 2 月の 2 回にわたって表面温度を計測した。その結果, 砂岩表面の温度は, 最高で  $52.2^\circ\text{C}$ , 最低で  $4^\circ\text{C}$  を記録し, 日変化は  $48.2^\circ\text{C}$  に達した。この日変化は, Whalley *et al.* (1984) がカラコラム山地で観測した砂岩の日変化より大きいものである。

### 3. 温帯湿潤地域における岩石表層温度の観測ならびに野外実験

温帯湿潤地域における野外観測の事例としては, 高橋・鈴木 (1971) が三浦半島, 荒崎海岸において, 洗濯板状の起伏を有する波食棚の表面温度を 1967 年 7 月, 10 月および 1968 年 2 月の 3 回にわたって観測した (第 1 表)。それによると突出部をなす凝灰岩の表面温度は, 夏季に最高で  $46.2^\circ\text{C}$  (最高気温  $29.0^\circ\text{C}$ ) まで上昇し,  $20.5^\circ\text{C}$  の日変化を記録した。秋季では最高温度  $29.5^\circ\text{C}$  (気温  $22.1^\circ\text{C}$ ), 日変化  $17.1^\circ\text{C}$ , 冬季では最高温度  $14.0^\circ\text{C}$  (気温  $7.8^\circ\text{C}$ ), 日変化  $12.3^\circ\text{C}$  であった。冬季における観測結果から, 岩盤表面の温度は, 冬季でも気温より  $6^\circ\text{C}$  以上も高くなることが明らかにされた。

野外実験の事例としては, McGreevy (1985) が北アイルランドのベルファストにおいて, 一辺  $7 \text{ cm}$  の立方体に整形した玄武岩・砂岩・花崗岩・チョークの 4 種類の岩石を用いた実験を行っている。1980 年 8 月に実施されたこの実験では, 表面だけを露出させて他の面をポリスチレンで断熱し, 表面と内部の温度が記録された。その結果, 最高気温  $19.2^\circ\text{C}$  のとき, 表面の温度は玄武岩において最大で, 砂岩, 花崗岩, チョークの順に低くなっている (第 1 表)。

### 4. 火災時の岩石の破碎とその表面温度

岩石の上に柴を積み重ねて燃やし, 十分に熱した上で冷水をかけて急激に冷やすと, 岩石が破碎することは古くから知られていた。このような岩石の破碎方法は, わが国では 770 年に東大寺の礎石を取り除く方法として, あるいは 1606 年に保津川の舟運を開く際の岩盤の除去方法として利用されたとされる

(三木, 1978)。火を用いた人為的な岩石の破碎からも明らかのように, 高温と急速な加熱は, 岩石の破碎にきわめて有効である。火災によって, 岩石表面の温度が急速に上昇するのに伴って, 岩石が剥離 (exfoliation あるいは spalling) を生じることは Blackwelder (1925, 1927), Emery (1944), Ollier and Ash (1983) などの報告がある。

Blackwelder (1925, 1927) は, ワイオミングのメジシン・パウ山地から, 林野火災による珪岩表面の exfoliation の例を報告した。また, Emery (1944) は, 1943 年 11 月と 12 月にカリフォルニアのサンディエゴで発生したやぶ火災について報告し, 石英閃緑岩の exfoliation を観察した。一方, Ollier and Ash (1983) はアーミデールの私有地に火を放ち, 花崗閃緑岩の礫が spalling (splitting) することを確認するとともに, オーストラリアでは原住民や移住者による火入が岩石の破碎に大きい影響を与えていることを強調した。

このように火災を原因とする岩石の破碎は, 剥離の一つの要因と考えられているが, 火災による岩石表面温度の実測例はあまり報告されていないようである。しかし火災時の最高温度については, Goudie *et al.* (1992) がこれまでの報告をまとめ,  $800^\circ\text{C}$  を越え  $1,100^\circ\text{C}$  に達する場合もあることを示した。わが国では, 1986 年 4 月に宮城県泉ヶ岳山麓のリング園跡地で林野火災実験が行われ, 高橋 (1987) によってススキを主燃料とする場合の燃焼温度が観測された。その観測によれば, 地上  $20 \sim 40 \text{ cm}$  の温度は  $360 \sim 580^\circ\text{C}$  の高温になるが, 地表下  $1 \text{ cm}$  では  $110^\circ\text{C}$  以上にはならないことが報告されている。また, 地表面の燃焼温度は, 燃料となる物質の種類によって異なり, シバ地では  $270^\circ\text{C}$  以下, 木枝やススキ枯草では  $360^\circ\text{C}$  以上になるという。

## III 室内における実験的研究

### 1. 加熱-冷却実験

岩石に加熱-冷却の繰り返しを与え, 重量損失や岩石表面における機械的変化の発生の有無を調べるための室内実験は Griggs (1936), Goudie (1974), Aires-Barros *et al.* (1975) などによって実施された。

Griggs (1936) の加熱-冷却実験は、 $8 \times 8 \times 7 \text{ cm}^3$  の立方体に近い形に整形した花崗岩を試料として、電気ヒーターと扇風機を用いて行われた。この実験では最高温度 $142^\circ\text{C}$ 、最低温度 $32^\circ\text{C}$ 、温度差 $110^\circ\text{C}$ という条件が1サイクル15分間で与えられ、89,400サイクル(1サイクルを1日に換算すると244年分に相当)続けられた。しかし、外見でも顕微鏡下における観察でも、なんらの機械的变化を認めることはできなかった。Goudie (1974) は、1辺が3 cmの立方体供試体を用いて砂岩とチョークの風化実験を実施した。この実験の条件は、温度上昇率がGriggsのそれより緩やかで、1サイクルを24時間として $60^\circ\text{C}$ の最高温度を6時間、 $30^\circ\text{C}$ の最低温度を18時間継続するように設定された。砂岩試料においては58サイクル、チョーク試料では43サイクルの加熱-冷却が繰り返されたが、両者ともに重量損失は認められなかった。また Aires-Barros *et al.* (1975) は、直径4.2 cm、高さ0.8 cmのディスク状に整形した3種類の火成岩(花崗岩、カスミ石閃長岩、コウ斑岩)を用いた風化実験を行った。実験は赤外線ランプを用いて $70^\circ\text{C}$ を20分間、室温( $20^\circ\text{C}$ )を10分間とする、1サイクル30分間で進められた。最終的には3,650サイクルの加熱-冷却の繰り返しが行われたが、2,555サイクル時の重量損失は0.5%以下であった。

このように、従来の風化実験においては、岩石が明瞭に破碎した例はないようである。しかし温度変化に伴って、岩石の力学特性や熱物性は変化する。そこで、温度変化に伴う岩石物性の変化や挙動に関する研究について以下に紹介する。

## 2. 温度変化に伴う岩石物性の変化

岩石の一軸圧縮強度・引張強度・弾性係数・ポアソン比などの力学特性や線膨張係数・熱伝導率・比熱・温度伝導率などの熱物性値が、温度変化に伴ってどのように変化するかについては、北野ほか(1988)が多数の文献を収集して明らかにした。これによって、 $0 \sim 600^\circ\text{C}$ の範囲における岩石物性の変化傾向を知ることができる。熱物性値のうち熱伝導率については、Kawada (1964, 1966)が、室温から $1,400^\circ\text{C}$ までの広い範囲における変化を種々の岩石を対象として調べた。また、熱拡散係数・熱膨張

率・圧縮強度に加えて、室温から $350^\circ\text{C}$ までの石灰岩と片麻岩におけるクラック形成の温度依存性については、Lo and Wai (1982), Wai and Lo (1982)によって報告された。

一方、Goudie *et al.* (1992) は、 $15 \times 3 \times 2 \text{ cm}^3$ に整形した7種類の岩石供試体を用いて弾性率の変化を分析した。彼らによれば、加熱-冷却サイクルの繰り返しにより、花崗岩・大理石・斑レイ岩・石灰岩の弾性率は $50 \sim 900^\circ\text{C}$ の範囲で大きく低下したが、粘板岩のそれは $50 \sim 600^\circ\text{C}$ の範囲でほとんど変化しないという。また $500^\circ\text{C}$ の雰囲気にとらえず時間を6段階(1, 2, 5, 10, 15, 30分)に変化させた実験でも、花崗岩や大理石においては弾性率の変化が大きく、粘板岩では変化しないことが報告された。

低温域における岩石物性の変化については、常温から $-160^\circ\text{C}$ の範囲で弾性波速度や弾性定数の温度による変化が、江原ほか(1983, 1985a, b, 1986a, b)の一連の研究によって検討された。

## 3. 温度変化に伴う岩石の変形特性

一般的には、温度変化に伴って物質の弾性波速度は一樣に変化する。しかし、岩石の場合にはマイクロクラックが存在するため、温度変化に伴う弾性波速度の変化は一樣ではない(江原ほか, 1986b)。このマイクロクラックは、初生的に粒界に存在するものと、熱サイクルの進行に伴って生じるものとに分けて考えることができる。Simmons and Cooper (1978) は、熱サイクルに伴うマイクロクラックの発生について、温度勾配によるクラックと熱履歴によるクラックとに分けている。前者は温度勾配による熱応力に起因して発生するクラックであり、後者のクラックの発生機構としては、鉱物間で熱膨張率が異なったり、鉱物自身の熱膨張率の異方性によって鉱物粒子間に不均等なひずみが生じたことによる(江原ほか1985a)と考えられている。このことは、加熱速度が小さい場合においても、岩石内部でクラックが形成されることを示唆するものである。

Richter and Simmons (1974) は、花崗岩・斑レイ岩・輝緑岩の熱膨張特性を、円柱状の供試体(直径1 cm、高さ4.5~5.0 cm)を用いて $25 \sim 550^\circ\text{C}$ の範囲で分析した。その結果、加熱速度が $2^\circ\text{C}/\text{min}$

以下で最大温度が250℃以下の場合には、膨張曲線にヒステリシスが認められるが永久ひずみは残らない。しかし、加熱速度が2℃/minを越え、最大温度が350℃より高い場合には、クラックが形成されるとともに永久ひずみが生じることを報告した。

このような熱応力によるクラックの発生を避けるため、江原ほか（1986a）は加熱-冷却速度を0.5℃/minとして、およそ-160~+97℃（110~370K）の範囲における玄武岩・花崗岩・凝灰岩の熱変形挙動を調べた。その結果、玄武岩では残留ひずみの発生はなく、加熱-冷却に伴う膨張-収縮ひずみは $-7 \sim +4 \times 10^{-4}$ の範囲で、P波速度は5.8~6.0km/secの範囲で直線的に変化することが確かめられた。また、凝灰岩では、加熱によっておよそ87℃（360 K）以上で収縮してヒステリシスがあらわれたが、これは岩石に含まれる沸石中の水分が脱水するためであり、マイクロクラックの発生によるものではないと考えた。このような挙動の原因として、玄武岩や凝灰岩では微細な鉱物粒子で構成されているためアスペクト比（クラックの長さに対する幅の比）の小さい初生的なマイクロクラックが存在せず、また、新たなマイクロクラックもほとんど生じないためであると推察した。

一方、花崗岩では加熱、冷却サイクルでそれぞれ $0.4 \times 10^{-4}$ 、 $1.2 \times 10^{-4}$ の残留ひずみが発生し、P波速度はそれぞれ3%、9%低下したことから、マイクロクラックが形成されたと考えた。このP波速度は温度によって複雑に変化したが、それは加熱によるマイクロクラックの閉塞と冷却に伴う開口によるものと解釈した。さらに、全温度範囲で認められるヒステリシスは、マイクロクラックの開口と閉塞に加えて、クラック表面での摩擦すべりや内部でのアスペリティの崩壊によるものと考察した。

最近、八田（1993）は、種々の岩石を-125℃と+550℃の間で加熱-冷却を行って膨張-収縮ひずみを計測し、岩石によってひずみのヒステリシスが回復性のものと、非回復性のものがあることを明らかにしている。

#### 4. 熱衝撃による岩石の破砕

温度の急変による破壊は、機械的な衝撃による破

壊になぞらえて熱衝撃による破壊と呼ばれ（たとえば富塚，1987）、火災など急激に温度上昇が生じたときには岩石の破砕に有効である。このためYatsu（1988, p. 120）のように、熱風化を熱疲労破壊と熱衝撃破壊の2つに分ける考え方もある。急激な温度変化による岩石の破砕に関する実験的研究はTarr（1915）、Blackwelder（1927）、小林ほか（1983）、酒井・伊達（1987）などによってなされた。

Tarr（1915）は、およそ1辺5cmの立方体に整形した花崗岩を用い、500℃と750℃に加熱してこの温度を30分間保持したのち空気や冷水にさらすという実験を行った。一方、Blackwelder（1927）は安山岩・玄武岩・黒曜石などを試料として、電気炉で200~350℃まで加熱したのち冷水に浸すことを繰り返した。また、玄武岩・グレイワック・ホルンフェルス・花崗岩を試料として、加熱速度を様々に変えて最高880℃まで加熱した実験を行った。その結果、玄武岩や黒曜石の破壊には、300℃以上の高温環境と急速な加熱-冷却の繰り返しが必要であることを明らかにした。

小林ほか（1983）や酒井・伊達（1987）は、凝灰岩・溶結凝灰岩などの堆積岩と大理石・花崗岩などの結晶質岩石を試料として、150~600℃の範囲で最大625回の加熱-冷却を繰り返し、岩石の熱衝撃疲労特性を検討した。加熱-冷却の繰り返しは、高さ5.0cm、直径2.5cmの円柱状に整形した供試体を、あらかじめ設定温度まで加熱した電気炉と水槽の間を上下動させて行った。その結果、堆積岩では非定常熱応力によって規則的な破壊亀裂が発生して破壊が進行すること、また、結晶質岩石では構成鉱物間の相互作用による粒界破壊が主たる破壊機構であり、紛状または粒状に破壊することを明らかにした。

#### IV おわりに

熱風化は、実験による結果と野外における観察とが必ずしも整合しないために、これまでその働きは疑問視されてきた。とくに乾燥地域の岩石表面で観測されるような温度や温度変化速度では、岩石は機械的変化を生じないと考えられ、乾燥地域における岩石の破砕には水和作用や塩類風化（Goudie, 1974）、

凍結融解（たとえば, Journaux and Coutard, 1974）など別の作用が重要視されることもある。しかし、温度変化速度が小さくても、岩石を構成する鉱物粒子間や鉱物粒子自身の熱膨張係数の違いによって、岩石内部にマイクロクラックの形成されることが実験的に明らかにされている。一方、これまでの実験的研究では、用いられた試料のサイズが小さいこと、膨張-収縮が自由な非拘束状態で実験されていることなど、野外における風化条件を正確に再現していないという意見（Rice, 1976; Ollier, 1984）も提出されている。このため現時点では、熱風化の存在に疑義を挟みながらも明確な否定を困難なものとしている。

林地や草地などの火災に伴う岩石の破碎は、高温と急激な温度変化に基づく熱応力の発生によって解砕することが可能であり、熱衝撃疲労実験はこれを裏付ける結果を提供している。しかし、火災に伴う岩石表面の温度変化の観測や火災跡地における岩石破碎の定量的研究など、野外における研究事例がきわめて少ないのが現状である。

このような点から、熱風化に関する研究は、野外におけるデータと実験的研究の蓄積を基礎に、今後さらに分析を進めるべき課題を残しているということができる。

#### 謝 辞

本稿は、著者の一人・藁谷哲也が、平成4年度国内研修員として、筑波大学地球科学系で行った研究の一部をもとにしている。研修の機会を与えて頂いた(財)私学研修福祉会、日本大学および日本大学文理学部地理学教室の先生方に謝意を表します。

#### 文 献

- 江原昭次・柳谷 俊・平尾一之・寺田 孚(1983): 低温下の岩石の熱膨張について. 材料, **32**, 1403-1409.
- 江原昭次・柳谷 俊・寺田 孚(1985a): 低温で熱サイクルを受ける乾燥岩石の熱膨張について. 材料, **34**, 857-863.
- 江原昭次・柳谷 俊・寺田 孚(1985b): 低温で

熱サイクルを受ける含水岩石の熱膨張について. 材料, **34**, 864-870.

江原昭次・柳谷 俊・寺田 孚(1986a): 岩石のP波速度に及ぼす温度の影響. 材料, **35**, 1291-1297.

江原昭次・柳谷 俊・寺田 孚(1986b): 低温で熱サイクルを受ける岩石の弾性定数について. 材料, **35**, 1298-1303.

北野晃一・新 孝一・木下直人・奥野哲夫(1988): 高温下岩石の力学特性, 熱特性および透水特性に関する文献調査. 応用地質, **29**, 242-253.

小林良二・酒井 昇・松本浩二(1983): 岩石の熱疲労に関する実験的研究. 日本鉱業会誌, **99**, 81-86.

酒井 昇・伊達和博(1987): 熱衝撃疲労試験による岩石の物性変化の評価に関する研究. 応用地質, **28**, 242-253.

高橋健一・鈴木隆介(1971): 三浦半島荒崎海岸における岩盤温度. 中央大学理工学部紀要, **14**, 285-310.

高橋日出男(1987): 泉ヶ岳山麓の林野火災実験における燃焼温度. 飯泉茂編『林野火災の生態』(日産科学振興財団助成, 林野火災の拡大機構とその跡地における生態回復過程に関する研究, 研究報告集) 林野火災研究グループ, 75-76.

冨塚 功(1987): 熱膨張・熱衝撃・熱疲れ・熱ラチエット. 材料科学, **23**, 313-318.

八田珠郎(1993): 熱帯乾燥地域における岩石の風化機構. 平成4年度熱帯農業試験研究推進会議部会資料, 熱帯農業研究センター, 12-24.

三木幸蔵(1978): 『わかりやすい岩石と岩盤の知識』 鹿島出版, 318p.

Aires-Barros, L., Graca, R. C. and Velez, A. (1975): Dry and wet laboratory tests and thermal fatigue of rocks. *Engineering Geol.*, **9**, 249-265.

Biro, P. (1968): *The Cycle of Erosion in Different Climates*. translated from the French by Jackson, C. I. and Clayton, K. M., Batsford, London, 144p.

- Blackwelder, E. (1925): Exfoliation as a phase of rock weathering. *Jour. Geol.*, **33**, 793–806.
- Blackwelder, E. (1927): Fire as an agent in rock weathering. *Jour. Geol.*, **35**, 134–140.
- Blackwelder, E. (1933): The insolation hypothesis of rock weathering. *Amer. Jour. Sci.*, 5th ser., **26**, 97–113.
- Bosworth, T. O. (1922): *Geology of the Tertiary and Quaternary Periods in the North-west Part of Peru*. Macmillan, London, 434p.
- Emery, K. O. (1944): Brush fires and rock exfoliation. *Amer. Jour. Sci.*, **242**, 506–508.
- George, U. (1978): *In the Deserts of this Earth*. translated from the German by Richard and Clara Winston, Hamish Hamilton, London, 309p.
- Gerrard, A. J. (1988): *Rocks and Landforms*. Unwin Hyman, London, 319p.
- Goudie, A. S. (1974): Further experimental investigation of rock weathering by salt and other mechanical processes. *Z. Geomorph. N. F., Suppl.*, **21**, 1–12.
- Goudie, A. S. (1989): Weathering processes. Thomas, D. S. G. ed.: *Arid Zone Geomorphology*, Belhaven Press, London, 372p.
- Goudie, A. S., Allison, R. J. and McLaren, S. J. (1992): The relations between modulus of elasticity and temperature in the context of the experimental simulation of rock weathering by fire. *Earth Surface Processes and Landforms*, **17**, 605–615.
- Griggs, D. T. (1936): The factor of fatigue in rock exfoliation. *Jour. Geol.*, **44**, 783–796.
- Hockmann, A. and Kessler, D. W. (1950) Thermal and moisture expansion studies of some domestic granites. *Jour. Res., U. S. Bureau of Standards*, **44**, 395–410.
- Jenkins, K. A. and Smith, B. J. (1990): Daytime rock surface temperature variability and its implications for mechanical rock weathering: Tenerife, Canary Islands. *Catena*, **7**, 449–459.
- Journaux, A. and Coutard, J. P. (1974): Experiences de thermoclastie sur des roches siliceuses. *Bulletin, Centre de Geomorphologie de Caen*, **18**, 1–20.
- Kawada, K. (1964): Studies of the thermal state of the earth. The 15th paper: Variation of thermal conductivity of rocks. Part 1. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **42**, 631–647.
- Kawada, K. (1966): Studies of the thermal state of the earth. The 17th paper: Variation of thermal conductivity of rocks. Part 2. *Bull. Earthquake Res. Inst.*, **44**, 1071–1091.
- Kerr, A., Smith, B. J., Whalley, W. B. and McGreevy, J. P. (1984): Rock temperatures from south-east Morocco and their significance for experimental rock-weathering studies. *Geology*, **12**, 306–309.
- Lattman, H. (1977): Weathering of caliche in southern Nevada. Doehring, D. O. ed.: *Geomorphology in Arid Regions*, Allen & Unwin, London, 221–231.
- Lo, K. Y. and Wai, R. S. C. (1982): Thermal expansion, diffusivity, and cracking of rock cores from Darlington, Ontario. *Can. Geotech. Jour.*, **19**, 154–166.
- McGreevy, J. P. (1985): Thermal properties as controls on rock surface temperature maxima, and possible implications for rock weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, **10**, 125–136.
- Ollier, C. D. (1963): Insolation weathering: examples from central Australia. *Amer. Jour. Sci.*, **261**, 376–381.
- Ollier, C. D. (1984): *Weathering*. Longman, New York, 270p.
- Ollier, C. D. and Ash, J.E. (1983): Fire and rock breakdown. *Z. Geomorph. N. F.*, **27**, 363–374.



- Peel, R. F. (1974): Insolation weathering: Some measurements of diurnal temperature changes in exposed rocks in the Tibesti region, central Sahara. *Z. Geomorph. N. F., Suppl.*, **21**, 19–28.
- Rice, A. (1976): Insolation warmed over. *Geology*, **4**, 61–62.
- Richter, D. and Simmons, G. (1974): Thermal expansion behavior of igneous rocks. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **1**, 403–411.
- Roth, E. S. (1965): Temperature and water content as factors in desert weathering. *Jour. Geol.*, **73**, 454–468.
- Schattner, I. (1961): Weathering phenomena in the crystalline of the Sinai, in the light of current notions. *Bull. Res. Council Israel*, **10G**, 247–266.
- Simmons, G. and Cooper, H. W. (1978): Thermal cycling cracks in three igneous rocks. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **15**, 145–148.
- Smith, B. J. (1977): Rock temperature measurements from the northwest Sahara and their implications for rock weathering. *Catena*, **4**, 41–63.
- Tarr, W. A. (1915): A study of some heating tests, and the light they throw on the cause of the disaggregation of granite. *Economic Geol.*, **10**, 348–367.
- Wai, R. S. C. and Lo, K. Y. (1982): Temperature effects on strength and deformation behaviour of rocks in southern Ontario. *Can. Geotech. Jour.*, **19**, 307–319.
- Walther, J. (1893): The north American deserts. *National Geographic Magazine*, **4**, 163–208.
- Whalley, W. B., McGreevy, J. P. and Ferguson, R. I. (1984): Rock temperature observations and chemical weathering in the Hunza region, Karakoram: Preliminary data. Miller, K. J. ed.: *The International Karakoram Project*, vol. 2., Cambridge University Press, Cambridge, 616–633.
- Winkler, E. M. (1975): *Stone: Properties, Durability in Man's Environment*. Springer-Verlag, Wien, 230p.
- Yatsu, E. (1988): *The Nature of Weathering*. Sozsha, Tokyo, 624p.