

琉球大学学術リポジトリ

[研究ノート]

沖縄島本部山里の円錐カルストを構成する石灰岩の
表面温度観測と熱風化実験

メタデータ	言語: 出版者: 沖縄地理学会 公開日: 2018-11-16 キーワード (Ja): 石灰岩, 熱風化, 岩石表面温度, 沖縄島, 円錐カルスト, limestone キーワード (En): thermal weathering, rock surface temperature, Okinawa Island, cone karst 作成者: 廣瀬, 孝, 玉城, 玲奈 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/0002017704

沖縄島本部山里の円錐カルストを構成する石灰岩の表面温度観測と熱風化実験

廣瀬 孝*・玉城 玲奈**

(* 琉球大学法文学部・** もしもしホットライン)

Field Observation of Rock Surface Temperature and Thermal Weathering Experiment of Limestone Composed Cone Karst at Yamazato, Motobu, Okinawa Island.

Takashi HIROSE* and Reina TAMAKI**

(* Faculty of Law and Letters, University of the Ryukyus

** MOSHI MOSHI HOTLINE, INC)

摘 要

本研究では、沖縄島本部町山里の円錐カルストを構成する石灰岩を対象に、風化作用の一つとして熱風化に着目し、その風化環境を探るための岩石表面の温度変化の野外観測と、岩石試料を用いた熱風化実験(加熱-冷却実験)を行った。その結果、本部町山里の円錐カルストを構成する石灰岩の表面温度は、最高で55.1℃を記録し、日較差は、最高で29.9℃であった。これらの値は、従来の研究と比較しても、高い値であった。また、雨による急激な温度変化も観察され、この変化は、晴天時の日中の温度上昇や日没後の温度低下の変化と比較しても最大であった。風化実験では410℃に加熱した水冷実験で、結晶粒界が鮮明になったり、潜在的弱線と思われる場所からの破壊(破壊音とともに)が観察された。

キーワード：石灰岩、熱風化、岩石表面温度、沖縄島、円錐カルスト

Key words: limestone, thermal weathering, rock surface temperature, Okinawa Island, cone karst

I はじめに

沖縄島本部山里の円錐カルストの地表面には大小様々な大きさの角礫が見られる。このような角礫は単に化学的な風化作用で石灰岩が溶けて出来たものとは考えにくく、割れ目の影響や、また、物理的な作用も働いている可能性が示唆される。しかし、これまでの石灰岩地域における風化作用の研究においては、おもに化学的風化作用に焦点が当てられている。たとえば、青木(2009)は現地調査からカメニツァの成長速度を推定し、また、羽田(2008)はリレンカレンの形成実験を行うなど、どちらも石灰岩地域における化学的風化作用(溶食作用)によって形成される微地形に着目して研究を行っている。

沖縄の石灰岩地域で働く物理的な作用を考えた場合、日射が強いという特徴から、温度変化によって岩石が破碎する熱風化あるいは日射風化

と呼ばれる物理的風化プロセスが考えられる。この熱風化は高温と低温の繰り返しによる疲労破壊と定義され、砂漠のような乾燥地域における主要な風化作用の一つとして考えられてきた。たとえば、Goudie(1989)によって指摘されているように、熱風化の存在は砂漠における以下のような事実や考えがその根拠になっている(たとえば、松倉2008)。

- (1) 地表には、シャープで角ばった破壊形態をもつ礫が多い。
- (2) 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。
- (3) 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

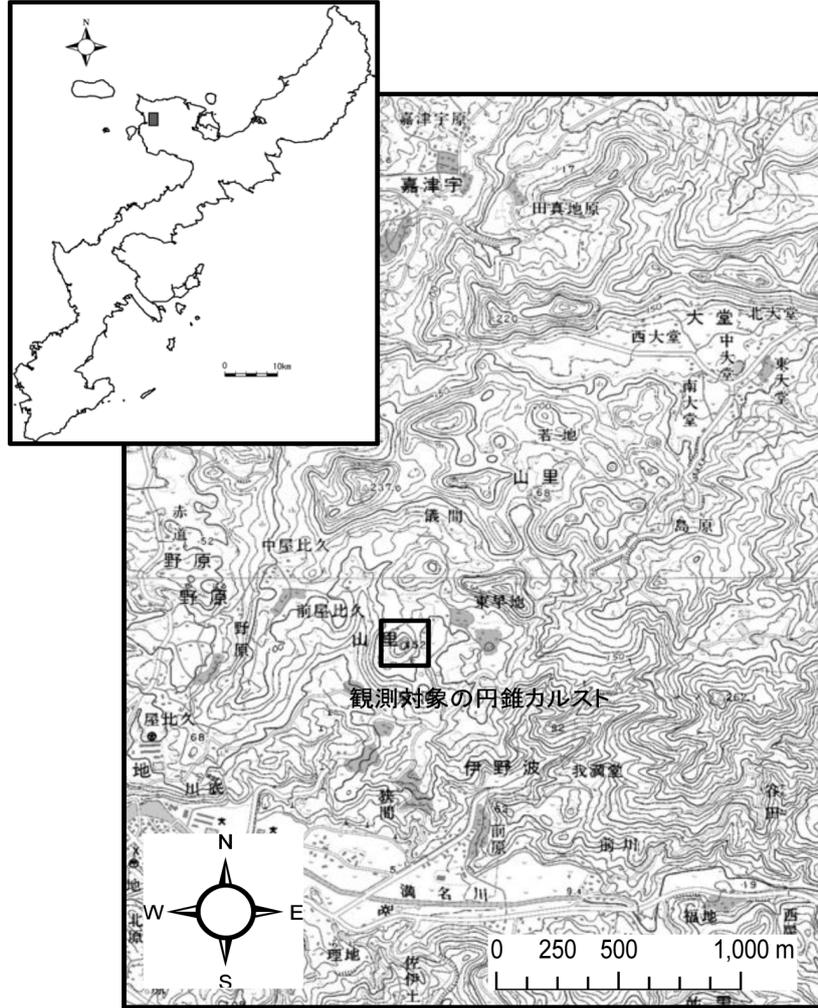


図1 観測地の位置

もち、異なった結晶軸に沿って膨張する。

熱風化に関する研究としては、たとえば、藁谷(2007)はアンコール・ワットを構成する砂岩ブロック表面の放射温度を測定し、砂岩ブロックに対する熱風化の可能性を探っている。また、藁谷・松倉(1993)は熱風化に関する研究の展望として、それまでの野外における岩石表面温度の観測および熱風化に関する実験的研究をまとめているが、石灰岩の研究事例は少ない。石灰岩を対象とした岩石そのものの温度変化についての研究も少なく、特に日本ではほとんど見られない。石灰岩を含む岩石の熱疲労に関する実験的研究として、小林ほか(1983)は、凝灰岩、大理石(結晶質石灰岩)、花崗岩を用いて、加熱と水冷による冷却の繰り返しを行った。それによると、大理石と花崗岩の場合は、600℃に加熱した岩石を水冷するとすぐに

崩壊することが報告されている。したがって、石灰岩(大理石を含む)の熱風化に関しては若干の知見が得られているものの、熱風化を含む石灰岩の物理的風化作用についての研究はまだまだ事例が少なく、いまだ未解明な部分が多い。

そこで、本研究では風化作用の一つとして熱風化に着目し、まず風化環境を探るため、野外調査によって、岩石表面の温度変化の実態を明らかにし、さらに石灰岩試料を用いて熱風化実験を行い、石灰岩の熱疲労特性を探ることを目的とする。

II 研究対象と研究方法

1. 調査地域と研究対象

調査地域である本部町山里は、沖縄島の本部半島に位置している(図1)。山里地区から大堂地区にかけての一带は、中生代三畳紀の石灰岩を主体とする地質からなり、円錐カルストが多数分布

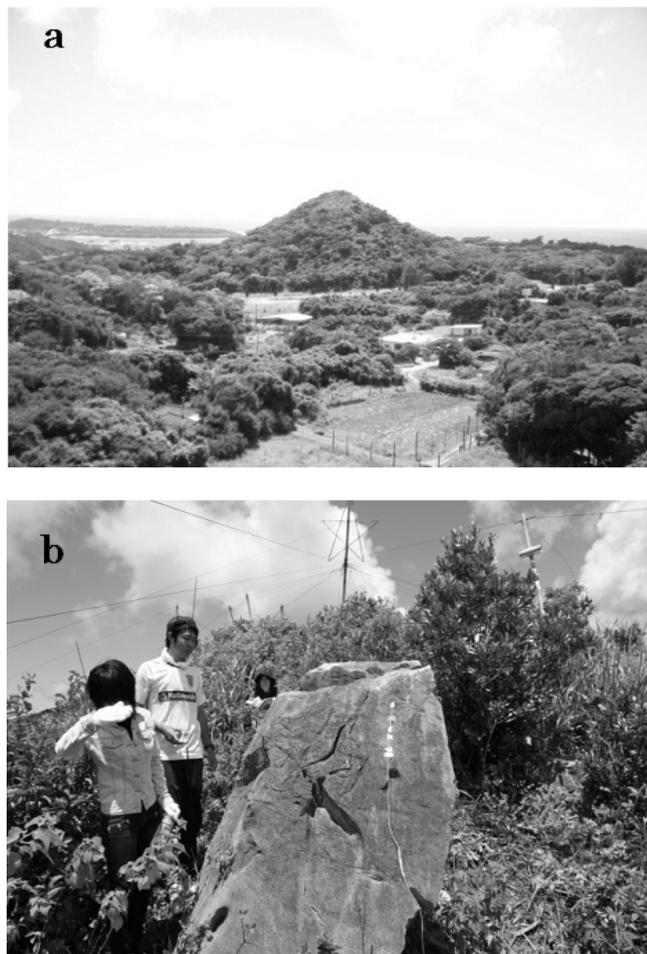


図2 a: 研究対象の円錐カルスト (ユネームイ),
b: 観測対象のピナクル

している。今回は、山里地区に分布する「ユネームイ」と呼ばれる円錐カルストを研究対象とした(図2a)。「ユネームイ」の標高は152 mで、山頂付近にはピナクルが分布し、山頂から山麓にかけて斜面には多くの角礫が散在している。研究対象(観測対象)とした岩石は、円錐カルストの山頂付近に分布するピナクルで、高さが最大で約1 m50 cm、上面は約65 cm × 90 cmで、方形の形状をしている(図2b)。

また、近隣の気象庁の観測所のデータによれば、名護観測所の年平均気温(1973～2000)は22.5℃、本部アメダスの年降水量の平均値(1981～2000)は2094.8 mmである。

2. 野外における岩石表面温度の観測

岩石表面温度の測定は、条件の異なる6ヶ所(P1～P6)を選定して行った。温度測定には「おんどとり Jr.」を使用し、岩石表面部に直径約3 mm、

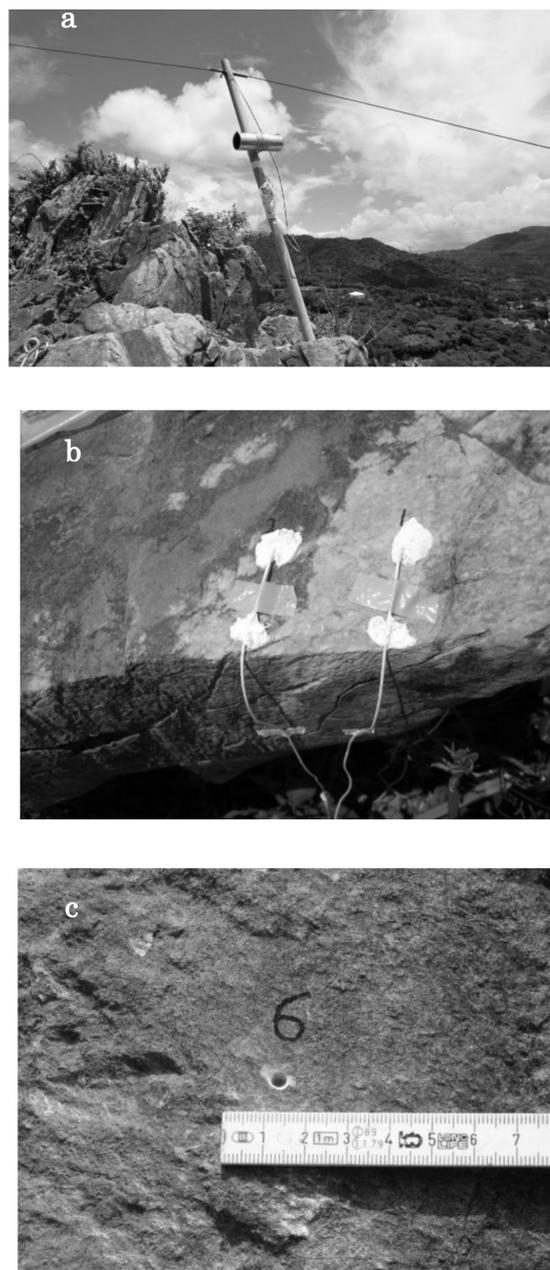


図3 a: 気温・湿度の観測, b: 温度センサーの設置,
c: センサーを埋め込む穴

深さ1 cm 弱の穴をあけ、そこに温度センサーの先端部分を埋め込み、シリコン樹脂で覆い、測定を行った(図3)。温度センサーをこのように設置した場合、センサーの示す温度とセンサー設置点のすぐわきの岩石表面温度にはほとんど差がないことをあらかじめ確認している。

P1 および P2 は岩石の上部で、日射を受けやすいと考え設定した。また、両地点は岩石の色が異なり、P1 は岩石の白い部分で、P2 は少し黒い部分である。設置した岩石面は、ほぼ真上(鉛直方向に対して南に6°傾いている)に向いている。P3

設置面は、東北東に向いており、また鉛直より20°オーバーハングしているため、太陽の光があまり当たらない陰の部分になっている。また、観測の初期（8月初め）にはピナクル周辺（特にP3付近）に木が生えており、それによる影もあったが、11月から12月にかけて、周りに生えていた木がすべて伐採された。そのため、オーバーハングによる陰のみになってしまった。P4は南に面しており、また、84°の傾斜を持つほぼ鉛直な面となっているため、太陽高度の高い夏には光は斜めに当たる。P5は西南西に向いており、傾斜は68°で、西日の影響を受けやすくなっている。P6の設置面は北西に向いており、傾斜は52°である。

また、付近の岩石に打ち込まれた鉄パイプに温度計および温・湿度計を設置（岩石上面から約1 mの所）して温度と湿度を測定した（図3a）。測定間隔は2分～10分で、観測は2010年8月1日から12月30日まで行い、約2週間おきにデータ回収を行った。データを回収する際には、確認のため放射温度計（Fluke574）を用いて岩石の表面温度を測定して記録した。

3. 室内実験

室内実験に用いた試料は、温度を観測している円錐カルストの山麓の工事露頭から採取した石灰岩で、約3×3×6 cmの角柱状に成形したものを使用した（図4a）。それぞれの試料にはNo.をつけ、110℃で24時間炉乾燥した後、重量と体積を測定して、乾燥密度を求め、ヒビやカケなどの状態の

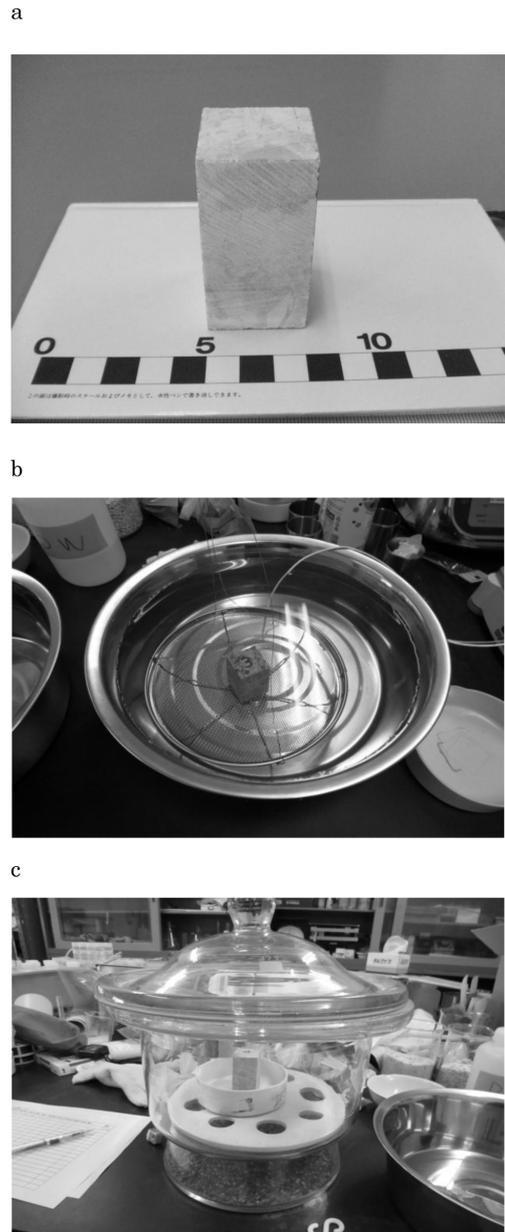


図4 a: 実験に用いた石灰岩試料 (3×3×6 cm),
b: 水冷の様子, c: 空冷の様子

表1 岩石試料のデータと実験条件

試料 NO.	重さ (g)	上面(縦) (cm)	上面(横) (cm)	高さ (cm)	体積 (cm ³)	密度 (g/cm ³)	温度 条件	冷却 方法
1	160.26	3.150	3.160	6.005	59.774	2.681	110℃	水冷
2	162.82	3.070	3.170	6.170	60.046	2.712	110℃	空冷
3	162.99	3.180	3.040	6.220	60.130	2.711	210℃	水冷
4	164.67	3.205	3.110	6.155	61.350	2.685	210℃	空冷
5	161.70	3.215	3.090	6.175	61.345	2.636	60℃	水冷
6	162.58	3.175	3.165	6.025	60.544	2.686	60℃	空冷
7	161.56	3.185	3.060	6.105	59.500	2.716	410℃	水冷
8	164.25	3.099	3.245	6.149	61.836	2.657	410℃	空冷

特徴を観察して記録した。体積の測定は、ノギスによる大きさの計測からの計算と、水を入れたメスシリンダーに浸して計測する2つの方法で行った。各試料の実験前の重さ、密度、実験条件を表1にまとめた。

実験は、乾燥炉を用いて65℃～410℃の範囲(温度は乾燥炉の設定値)で加熱し、冷却は空冷と水冷の2つの条件で行った。加熱時間および冷却時間はすべての条件で統一し、2時間半加熱、30分冷却を1サイクルとし、それぞれ15サイクル(16サイクル目に加熱後に計測して終了)行った。加熱温度は、65℃、110℃、210℃、410℃の4条件(水冷・空冷合わせて8つの条件)で、410℃のみ機械の温度設定上、別の乾燥炉を使用した。加熱後速やかに乾燥炉から試料を取り出し、表面温度と重量を計測後冷却した。水冷には蒸留水を使用し、水を張ったステンレス製の桶にステンレス製のザルに入れた試料を静かに入れて行った(図4b)。また、空冷にはデシケーターを用いた(図4c)。冷却した試料は表面温度を計測した後、再度乾燥炉に入れて加熱を行った。水冷の条件では、水冷開始時と水冷終了時の水温も計測し、また、室温の計測も適宜行った。

III 結果と考察

1. 野外における岩石表面温度の変化

2010年8月の温度観測の結果を図5に、9月27日の1日の結果を図6に示した。回収した温度データは、ロガーや温度センサーの個体差をなくすために、あらかじめ較正を行って、基準となる1台のロガーの値に換算式で換算した。これらの観測結果を見ると、岩石の温度は日中、気温とともに高くなり、日没とともに低くなっている。逆に、湿度は日中に低い値(すなわち乾燥)を示している。また、日中に気温があまり上昇していない日は曇りや雨の日(この場合は湿度が高い)であると思われるが、岩石表面温度も気温同様あまり上昇していない。また、場所によって最高温度に達する時間も異なっており(図6)、西日が当たるP5や、西寄りに面しているP4では、ほかの4地点より2時間近く遅れている。最高温度に達する時間や最高温度の値は季節によって異なっている。

観測結果をもとに、各地点における一日の最高温度、最低温度、日較差を求めた。P1、P3の2地点について、日最高温度の変化を図7に、日最低温度の変化を図8に示した。さらに、各地点における観測期間中の日最高温度の上位3日と日較差が大きいほうから上位3日をそれぞれ表2、表3に示した。

最高温度の変化をみると、短期間でも日によって温度が大きく異なっている。また、どの地点も同様に変化しているが、同じ日の地点間の差が20℃～30℃になる日もある(図7)。また、P3は他の地点よりも温度変化が小さい。一方、日最低温度の変化では、短期間での日ごとの温度差は小さく、また、各地点の温度差もほとんどなく、気温とほぼ同じである(図8)。

今回の観測期間中で最も岩石温度が高かったのは、西に面しているP5の9月22日の55.1℃で(表2)、日較差(1日の温度差)が最も大きかったのは、同じくP5で、9月27日の29.9℃であった(表3)。岩の陰にあたるP3は6地点の中で温度が最も低く、最高で43.2℃、日較差も最高で18.9℃であった。また、ほぼ真上を向いたP2でも最高53.0℃と50℃以上(P1は51.3℃)に達しており、気温より20℃以上高くまで上昇している。北に面するP6では、最高温度を観測した日がほかの地点より早く、季節による太陽高度の違いが関係していることが示唆された。

山里での観測結果と比較するために、従来の岩石表面温度の研究のいくつかをまとめると、たとえば、藁谷(2005)は、2004年8月～2005年3月にかけて、アンコールワットの回廊を支える砂岩柱表面に小型の温度ロガーを貼り付け、3時間間隔の温度測定を行った。その結果、砂岩柱の表面温度は、西向き表面で最高52.5℃に達し、また、ほかの向きの砂岩柱の最高表面温度は、南向きで49.3℃、東向きで43.7℃、北向きで38.5℃を記録している。また、Peel(1974)がサハラ砂漠東部に位置するチベスチ山地の黒褐色の粗粒な砂岩や、青白色砂岩および玄武岩を対象として観測した結果では、黒褐色の砂岩で79.3℃という極めて高い表面温度が記録された。また、日較差についても、玄武岩表面において43.0℃あった。Kerr et al.(1984)による野外実験は、アイルランドから

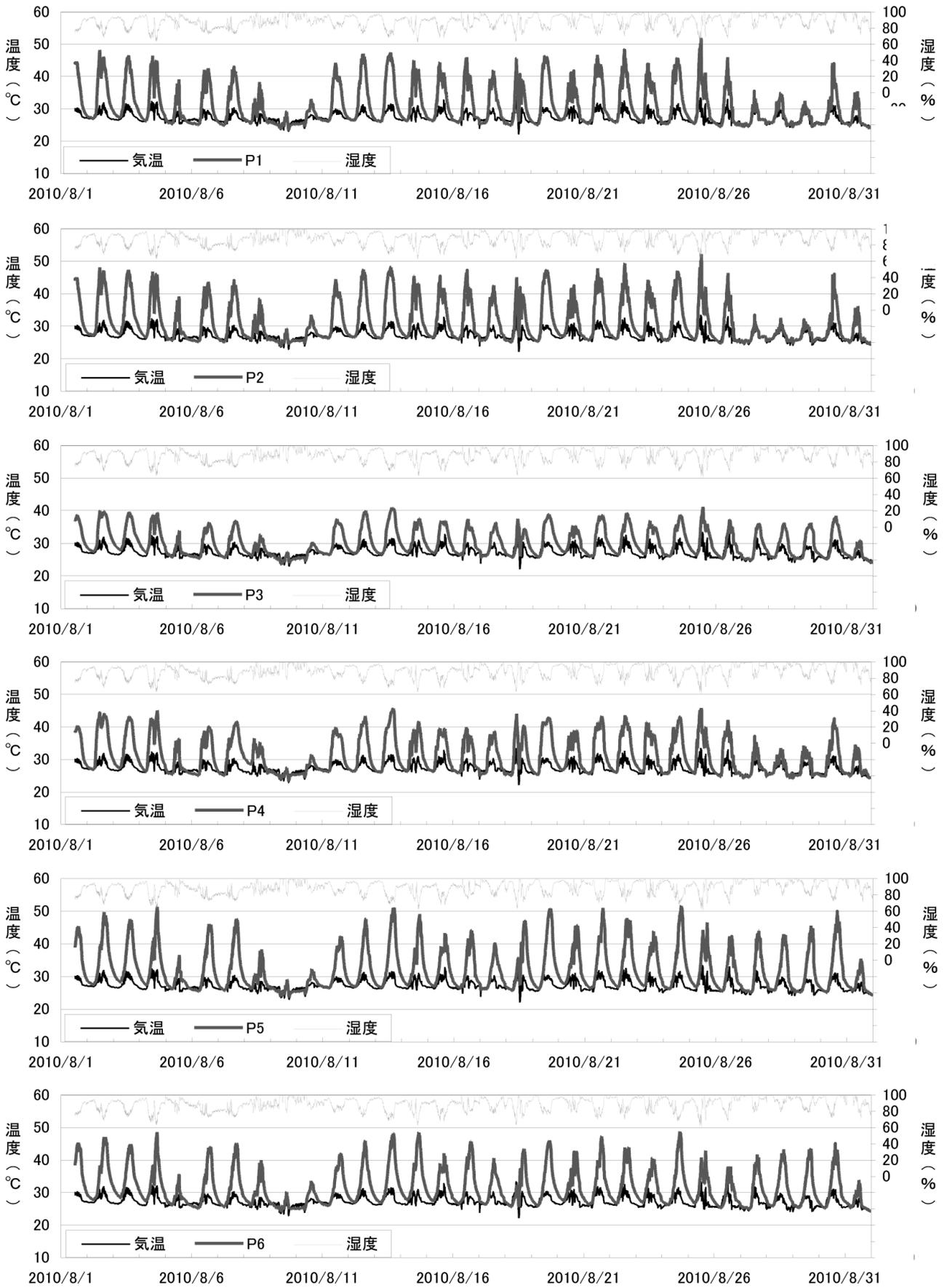


図5 2010年8月の観測結果

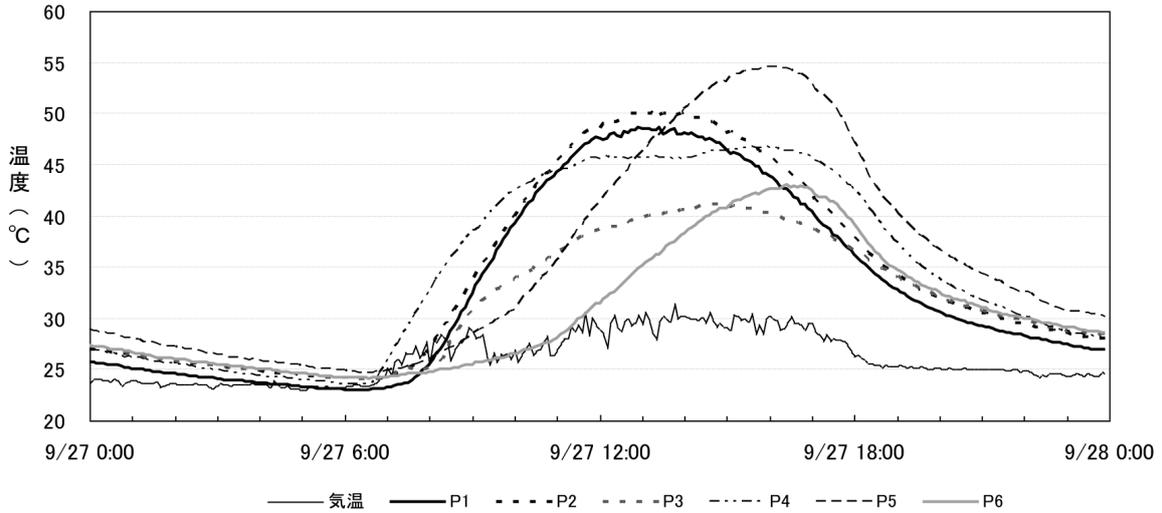


図6 2010年9月27日の気温と岩石表面温度の変化

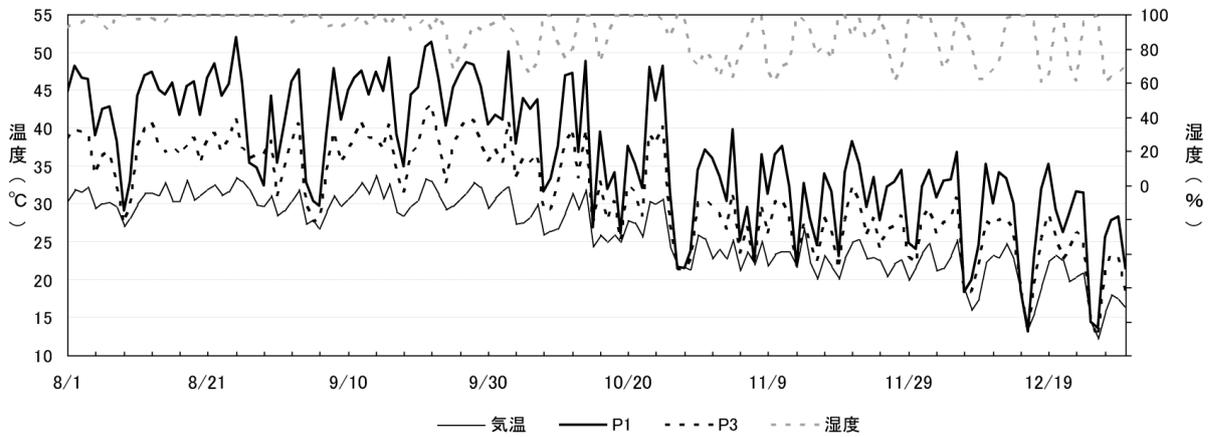


図7 日最高温度の変化 (P1, P3)

表2 気温および岩石表面温度の日最高値の上位記録 (1位~3位)

	気温	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1 温度(°C)	33.8	51.3	53.0	43.2	49.0	55.1	48.8
1 日時	9/14 11:25	9/22 13:55	9/22 13:55	9/22 14:35	9/22 15:20	9/22 15:15	8/24 16:35
2 温度(°C)	33.5	50.7	52.2	42.2	46.9	54.6	48.5
2 日時	8/25 11:45	9/21 13:20	8/25 12:20	9/21 13:35	10/3 13:00	9/27 15:55	8/14 16:55
3 温度(°C)	33.3	50.1	51.9	41.0	46.8	53.0	48.2
3 日時	9/21 16:15	10/3 13:05	9/22 13:20	10/3 15:00	9/21 13:35	9/26 16:05	8/13 17:15

表3 気温および岩石表面温度の日較差の上位記録 (1位~3位)

	気温	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1 温度(°C)	11.1	27.8	28.7	18.9	23.8	29.9	22.8
1 年月日	2010/8/18	2010/9/21	2010/9/21	2010/9/21	2010/9/21	2010/9/27	2010/9/8
2 温度(°C)	9.3	26.8	27.7	17.1	23.3	29.0	22.6
2 年月日	2010/9/14	2010/10/3	2010/10/3	2010/9/27	2010/10/3	2010/9/21	2010/8/24
3 温度(°C)	8.7	25.7	26.4	16.8	23.2	28.6	21.3
3 年月日	2010/8/25	2010/9/27	2010/9/27	2010/10/3	2010/9/27	2010/9/16	2010/8/13

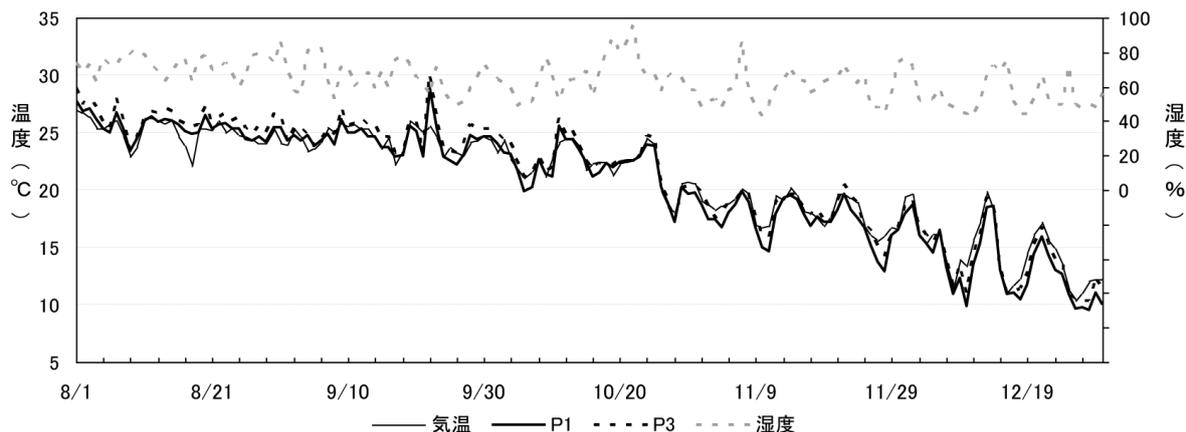


図8 日最低温度の変化 (P1, P3)

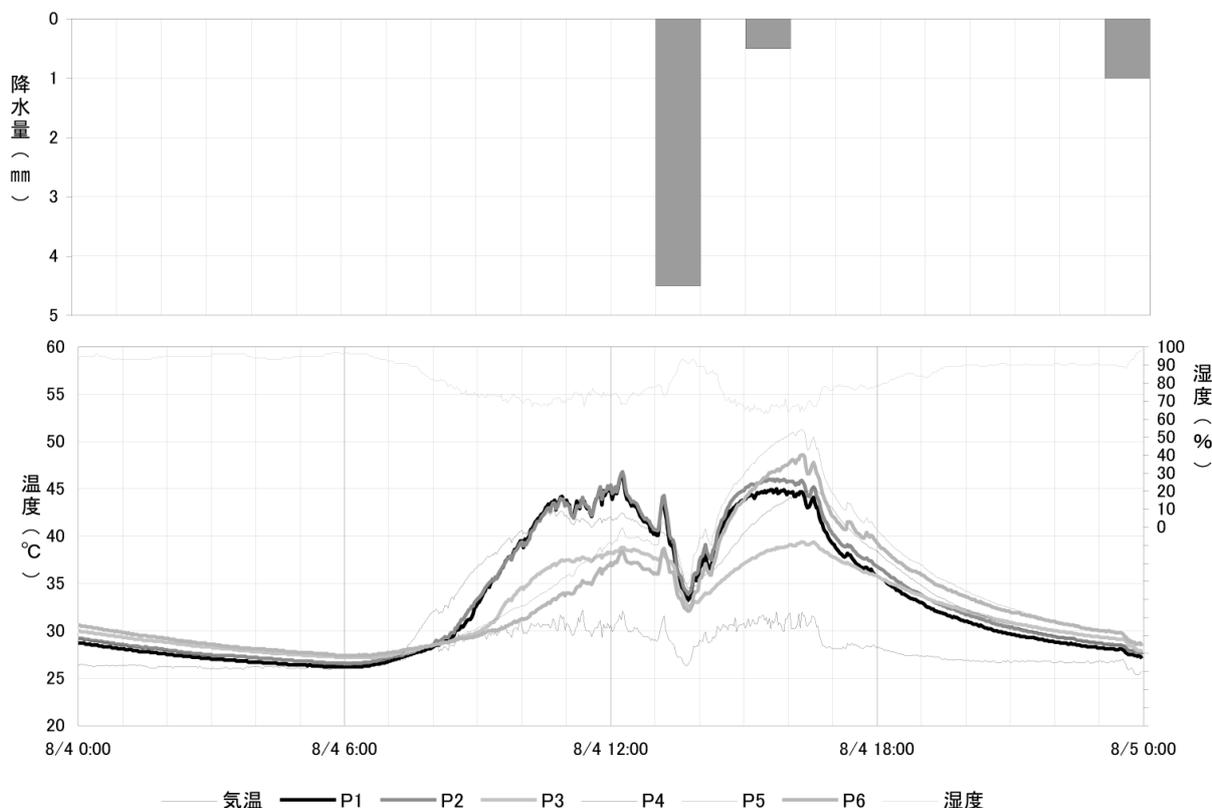


図9 雨による急激な温度変化 (8月4日)

持ち込んだ石灰岩・花崗岩・砂岩の立方体試料（一辺 7cm）を、1982 年 8 月、年降水量 140 mm、年平均気温 19.6 °C、最暖月の平均気温 31.6 °C のモロッコ南東の ErRachida に設置して行われた。この実験では試料の表面だけを露出させて他の面を発泡スチロールで断熱し、表面と 6 cm 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で 54.8 °C、花崗岩で 50.4 °C、石灰岩で 45.2 °C となっ

ている。また、日較差も花崗岩 34.0 °C と砂岩 33.8 °C で、石灰岩 26.2 °C という結果になっている。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ている。それによると凝灰岩の表面温度は、夏季に最高で 46.2 °C まで上昇し、20.5 °C の日

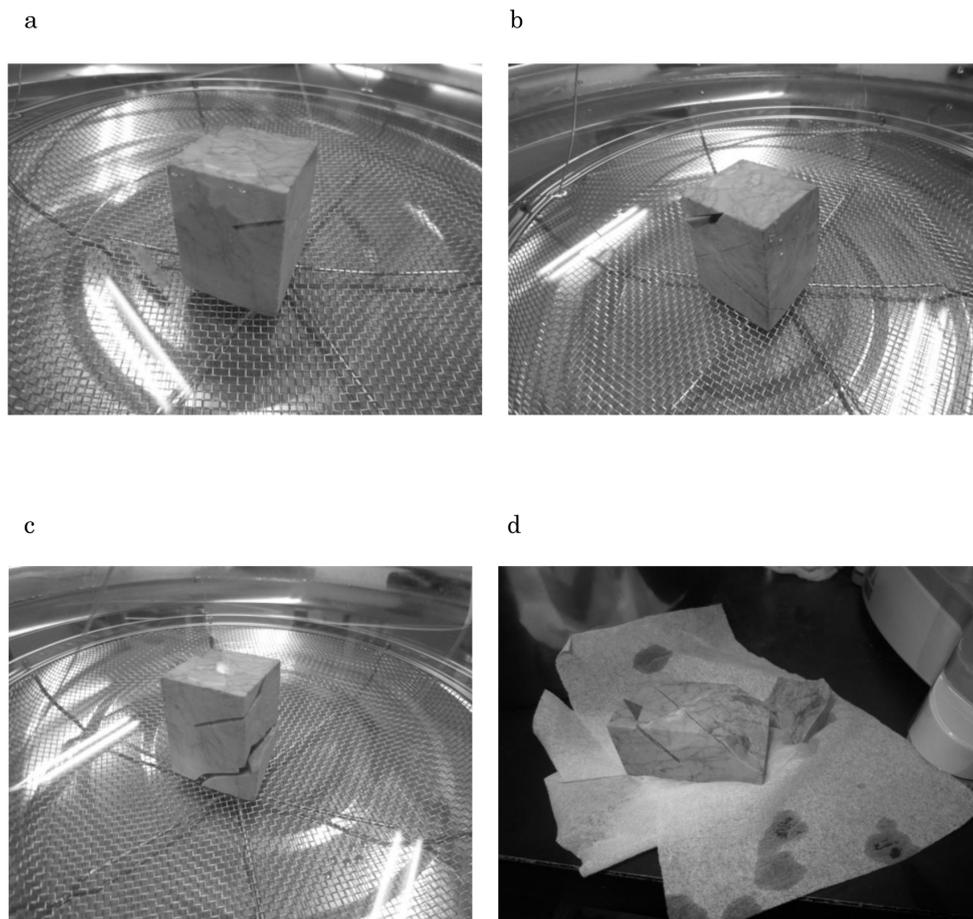


図10 410℃加熱実験（水冷）における試料の様子
(a：2回目入水時，b：5回目入水時，c：7回目入水時，d：7回目水冷後)

較差を記録している．秋季では最高温度 29.5℃，日較差 17.1℃，冬季では最高温度 14.0℃，日較差 12.3℃であった．

これらの事例と比較すると，50℃以上に達した本研究の野外観測で測定された石灰岩の表面温度の最高値は，Peel (1974) の観測結果を除けば，高い値であり，山里の石灰岩の表面はかなり高温になっている．

また，今回の観測では晴れから急な雨に変わる天気の急変の影響によると思われる急激な温度変化も何回か見られた．その中で最も顕著な変化を示したのは8月4日の日中の変化であった(図9)．これをみると，日中温度が上昇し，最高はP2で12:16に46.8℃を記録している．その後，13:00～14:00の1時間に4.5mmの降雨(本部アメダスのデータ)があり，その時にP2の温度は33.9℃まで下がっている．つまり，この降雨で12.9℃の温度変化があったことになる．また13:26か13:28までの2分間では，-1.5℃の温度変化が見られた．この温度

変化は今回の観測で最も急激で，他は2分間で1℃以上の変化は見られなかった．つまり，晴天時の日没後の湿度低下率よりも大きなものとなっている．

2. 室内実験

今回の熱風化実験(加熱—冷却実験)では水冷の場合，乾燥炉から出した試料をすぐに秤に乗せ，重さを量り，それと同時に放射温度計で試料の表面温度も計測し，そのあとすばやくステンレス製のザルに試料を入れ，衝撃を加えないように静かに桶の中の水につけた．これは，野外における雨による急激な温度変化を意識したものである．空冷の場合も同じように，乾燥炉から出した試料の重さを量り，デシケータに入れ，冷却を行った．

実験の結果，410℃に加熱した水冷実験では，岩石の破壊が見られたが，他の条件では破壊は見られなかった．110℃および65℃の加熱—冷却実験では，水冷，空冷のどちらの条件においても，

重さ、見た目ともに試料に変化は見られなかった。210℃での実験では、加熱直後に炉から出した時の色が若干変化しているように見られたが、重量変化などは見られなかった。水冷実験では、入水時に水が蒸発する音が鳴り、7回目に水冷したときに少し試料の見た目が変化した（色が少し赤くなりヒビが濃くなった）が、その後大きな変化はなく、重さにも変化は見られなかった。

410℃の実験では、1回目の加熱で試料に書いていたマジックの数字が消えたが、空冷の場合は重量などの変化は見られなかった。また、破壊の見られた410℃加熱の水冷実験による岩石試料の変化は以下のものであった(図10)。1回目の水冷で、結晶粒界と思われるところの色が赤褐色に変化し、結晶構造に沿ったような模様が浮き出るように見られた。炉から出した直後の試料の表面温度は約360℃～391℃で、水に入れた瞬間蒸発音とともにたくさんの気泡と対流が観察できた。試料を入れる前の水温と入れた直後の水温でも1℃～2℃の差が見られた。2回目の入水時には試料にもともと入っていたヒビの部分から欠け(図10a)、欠けた部分を水から取り出す際に、少し力を加えただけで壊れてしまった。さらに4回目、5回目の入水時でも同じくヒビの入っている部分から欠け(図10b)、亀裂も大きくなり始めた。また、欠けた分、試料の重さが最初の重さより約1g軽くなった。7回目の入水時に亀裂が入っていた下部が大きく欠け、破壊した分、15g軽くなった(図10c, 10d)。また、下部が大きく崩壊する際には、パキッという崩壊音も聞こえた。大きく欠けた断面をみると、赤褐色の土が付着しており、もともとの割れ目のような潜在的な弱線と考えられ、そこで破壊が起こったと思われる。

熱風化実験について、本研究と従来の研究を比較検討してみる。石灰岩の熱疲労特性を探るための本研究の室内実験では、410℃の高温で加熱、水冷を繰り返す条件のもとで、破壊が起こった。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℃、最低温度32℃、温度差110℃という条件が1サイクル15分で与えられ、89,400サイクル続けられた。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、一辺が3cmの立方体試料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のより緩やかで、1サイクルを24時間として60℃の最高温度を6時間、30℃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、両者ともに質量損失は認められなかった。また、Aries-Barros et al. (1975) は、直径4.2cm、高さ0.8cmのディスク状に整形した三種類の火成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℃を20分間、室温(20℃)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サイクル時の質量損失は0.5%以下であった。急激な温度変化による岩石の破碎に関する実験的研究は小林ほか(1983)、酒井・伊達(1987)などによってなされている。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ている。その結果、大理石と花崗岩の場合は、600℃ではすぐに崩壊が起こった。

これらの従来の研究と比較すると本研究の実験はサイクル数が少ない。65℃、110℃、210℃の加熱条件では、210℃の加熱条件で色の変化が少し観察されたが、水冷、空冷ともに見た目と質量に大きな変化は見られなかった。一方、410℃の加熱—水冷実験では7回目の入水時に大きく崩壊した。すなわち、小林ほか(1983)に比べて、低温で大きな変化が起こったことになる。破壊した断面は赤褐色の土が付着しており、そこは潜在的な弱線と考えられ、破壊が起こったと考えられる。したがって、このような弱線の存在が石灰岩の熱風化に大きく関与することが示唆される。

今回行った実験のサイクル数では、温度の上昇・下降による熱疲労特性を十分に考察することはできない。したがって、低温であっても、長い時間、温度が上昇・下降を繰り返すことにより熱疲労を起こすことは考えられる。また、410℃の実験では、

数サイクルで岩石の破壊が起こった。400℃以上の高温というのは、実験室だけの条件のように思われるが、山焼き（野焼き）や山火事などでは、それ以上の高温に岩石がさらされる。したがって、そこに雨が降った場合、急激な冷却が起こり、そのような熱と水の影響で岩石が野外でも破壊する可能性もある。

IV おわりに

本研究では本部町山里の円錐カルストを構成する石灰岩を対象に、風化作用の一つとして熱風化に着目し、その風化環境を探るため、野外観測によって、岩石表面の温度変化の実態を明らかにした。また石灰岩試料を用いて、石灰岩の熱風化特性を探る風化実験を行った。本研究で得られた結果は以下のとおりである。

1. 本部町山里の円錐カルストを構成する石灰岩の表面温度は、最高で55.1℃を記録し、日較差は、最高で29.9℃であった。また、岩石の面の方位によって、最高温度や、それに達する時間が異なっており、今回は西向きの面が最も高温であった。本研究における観測結果は、従来の研究と比較しても、高い値であった。
2. 雨による急激な温度変化も観察され、最大で2分間で-1.5℃の温度変化があり、この値は、晴天時の日中の温度上昇や日没後の温度低下の変化と比較しても最大であった。
3. 風化実験では、65℃～210℃の加熱—冷却では、水冷、空冷ともにほとんど変化は見られず、410℃の空冷実験でも変化は見られなかった。しかし、410℃の水冷実験は、結晶粒界が鮮明になったり、潜在的弱線と思われる場所からの破壊（破壊音とともに）が何度か起こったりした。山焼きや山火事で熱せられた岩石が、降雨による冷却で破壊する可能性が示唆される。

今回の野外観測や実験結果からは、山里の円錐カルストに多数分布する角礫の生産を熱風化と結び付けることはできない。しかし、降雨による急激な冷却の存在も観測されたので、それが何度も繰り返されることにより、石灰岩表面に微細な凹凸を形成したり、物性変化をもたらしたりする可能性はある。石灰岩の物理的作用に対する特性を

より明らかにするには、サイクル数を増やした実験や、重量変化だけではなく弾性波などの物性変化も計測するような実験を行う必要がある。

本研究を進めるにあたり、琉球大学法文学部地理学教室の前門 晃教授には、非常に有意義な助言をいただきました。また、琉球大学法文学部地理学教室の先生方にも貴重なアドバイスをいただきました。地理学教室の2年次、3年次、4年次の学生の皆様には現地調査に協力して頂きました。以上の方々に心から感謝いたします。本研究は著者の一人の玉城が行った卒業論文を骨子に加筆・修正したものである。なお、本研究の一部には日本学術振興会・科学研究費（基盤研究C：21501002、研究代表者・前門 晃）を使用した。

（受付 2011年3月31日）

（受理 2011年6月22日）

文 献

- 青木 久 (2009)：琉球列島の完新世サンゴ礁段丘上に形成されるカメニツアの成長速度。地形, 30, 317-329.
- 小林良二・酒井 昇・松木浩二 (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.
- 羽田麻美 (2008)：室内実験による石膏ブロック状のリレンカレンの形成過程。地形, 29, 301-311.
- 松倉公憲 (2008)：『地形変化の科学—風化と侵食—』朝倉書店。
- 藁谷哲也 (1997)：カラコラム山地・フンザバレーに見られる岩石の風化形態、植被と岩石温度。地学雑誌, 106, 426-431.
- 藁谷哲也 (2005)：アンコール・ワットを構成する砂岩およびラテライトの風化環境と風化プロセス。地形, 26, 239-257.
- 藁谷哲也 (2007)：アンコール・ワットにおける砂岩柱の劣化に与える岩石表面温度の効果。日本大学文学部自然科学研究所研究紀要, 42, 15-26.

- 藁谷哲也・松倉公憲 (1993) : 岩石の熱風化に関する研究の展望. 筑波大学水理実験センター報告, 18, 19-27.
- Aries-Barros, L., Graca, R.C. and Velez, A. (1975) : Dry and wet laboratory tests and thermal fatigue of rocks. *Engineering Geol.*, 9, 249-265.
- 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. In Thomas, D. S. G. ed. : *Arid Zone Geomorphology*. Belhaven Press, London.
- Griggs, D. T. (1936) : The factor of fatigue in rock exfoliation. *Jour. Geol.*, 44, 783-796.
- 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.
- 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.