

Syria Palmyra 石造遺跡群の風化状況

池 田 碩*

The Weathering Characteristics of the Palmyra Stone Relics

Hiroshi IKEDA

要 旨

バルミラPalmyraは、シリアサバク中央部のオアシス都市として紀元前1～3世紀にかけて繁栄した。メソポタミアと地中海とを結ぶシルクロードの中継地であったが、274年のローマ軍との戦いに敗れて廃都となる。その後12～14世紀にかけてビザンチン時代に再興が進んだものの、16世紀オスマントルコ時代に入り急速に崩壊し、近年の発掘まで放棄されたままの状態であった¹⁾。

しかし都市遺構の規模が雄大で、石造建築物もかなり残存しており、特にベール神殿や延長1300mに達する石造列柱付きの大通りには750本あった列柱のうち現在も150柱の石灰岩からなるコリント式円柱が林立している。このため貴重な歴史遺産を残す地域として1980年にユネスコの世界文化遺産に指定された²⁾。

ところが、これらの石造建造物も年月の経過に伴って徐々に風化し破壊されてきている。特徴的な風化作用には、主として地表より上部で進むTafoni化と地表下では石灰岩の場合溶蝕Corrosionがあげられる。

バルミラの場合は、極乾のサバク中であるためTafoni化は進んでいないが、遺跡の建造物が石灰岩であるため、地表直下を中心にCorrosionがかなり進んでいることがわかった。それにはこの地域が山地に近い扇状地に位置しているため、廃都後は時折発生する降雨による布状洪水Sheet floodにより搬出されてきた砂礫によって徐々に堆積が進んできており、現在遺跡群の中心部付近では約150～200cm程埋(没)積していることがわかった。さらに、石造遺跡の埋積状況と溶蝕との関係を発掘現場で観察・計測できた。その結果風化破壊の速度が極めて早いことがわかったので、実態を中心に報告する。

【キーワード】Palmyra 世界遺産 石造建築材の風化 Limestone Corrosion

1. バルミラの気候・地形と環境

バルミラは、奈良とほぼ同緯度のN35°付近に位置するが、シリアサバクのほぼ中央部に当たるため、年間平均降水量がわずか100mm程で、多雨年でも300mmにすぎない。わずかな降雨ではあるが、11月～5月が雨季で6月～10月が乾季である。冬雨タイプであり、夏になると日平均気温が30℃近くになり昼間は40℃を越す日が続く。特に7～9月は雨がまったく降らないため、極乾・極暑の厳しい気候となる³⁾。

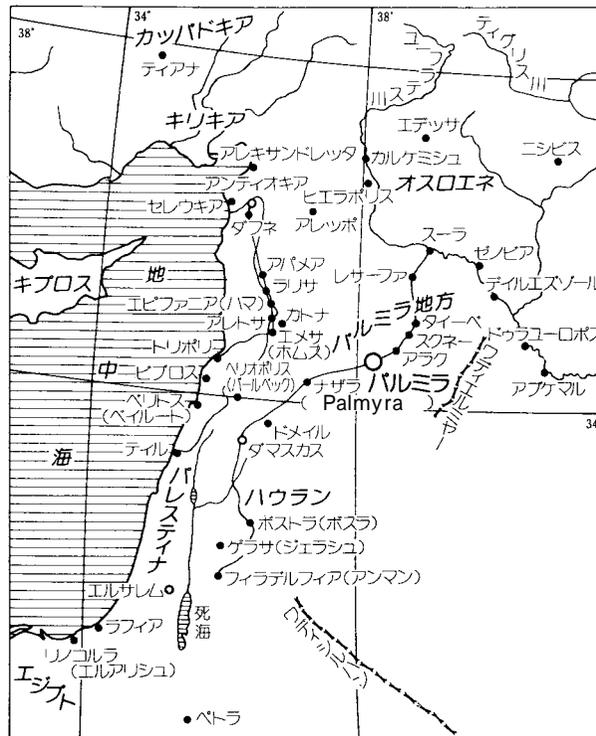


図 - 1 パルミラとその周辺地域¹⁾

Fig-1 The Area of Influence of Ancient Palmyra¹⁾

ところで、筆者がこの地を訪問したのも夏季であった。写真ページ1に見られるように、古代都市の遺跡地域を含む周辺から山地まで樹木はまったく無く、草も少なく赤茶けた土地が広がっていた。しかし東南部一帯にはナツメヤシ（パーム）、オリーブ、ザクロなどの樹木からなる緑の農地が見られた。春から初夏にかけては綿や小麦、大麦も耕作されるとのことで、農業と遺跡観光を主産業とする人口3万程のタドモルTadomorの街が遺跡に接して存在していた。

灌漑用水、生活用水は後述するように現在は遠地からも導水されているが、本来はオアシス都市として発展したところである。この地の湧水源としては、西方の山麓の湧泉洞から湧出している化石水が存在することに起因する。

パルミラ周辺の地形は、北西方にビルアース高原が広がっており、そこには941mのハイヤーン山や808mのアルマザール山が位置する。東南方は、はてしなく広がるサバクである。遺跡地パルミラの西部には500～600m程の主として石灰岩・砂岩からなるムンタル山地が連っており、そこから生じた小規模な緩扇状地の扇中央部にかけて形成された都市遺構地域の標高は400m位である。

オアシス都市パルミラの廃都後は、時折発生する布状洪水Sheet floodによって荒涼とした西方の山地からもたらされた砂礫によって徐々に埋没してきた。現在都市遺構の中心部付近では150～200cm程埋積している。

オアシスとしてのパルミラを潤おしてきたのは、西方のムンタル山の麓に位置し水源を意味

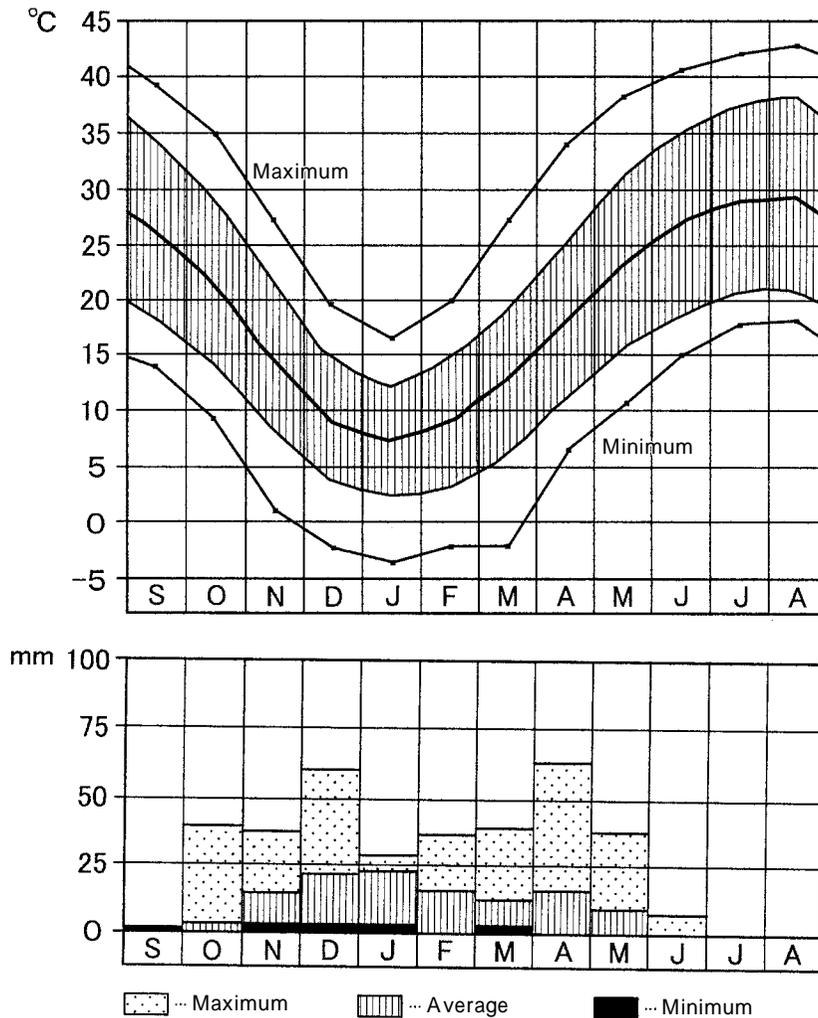


図 - 2 パルミラの気温と雨量³⁾

Fig-2 Temperature and Rainfall in Palmyra (1955 ~ 1966)³⁾

するエフカEfca湧泉洞からの湧水が最多で、現在でも毎分 3 m³を湧出し、主要な灌漑・生活用水源となっている。水温は33 で、放射性硫黄泉として温泉にも使用されている。

その北部で山頂にアラブ城砦を有する山地の麓にも湧泉洞がある。地下水洞カナートで遺跡地中央部の記念門近くまで導水されており、1963年頃までは飲料水にも使用されていたが湧出量は1日に1000m³と少ない。水温は25 で、水質はエフカの泉とほぼ同様である。

さらに、現在はパルミラの北方11kmの湧泉地から1968年以来近代的な設備を供えたアパールアルミー水路によって導水されている。

1963年頃までは、農業用水・生活用水のための井戸も多く存在していた。扇状地のため18~22 mと深く掘鑿が大変であったが、現在は水道が普及し、井戸の使用は減じている。

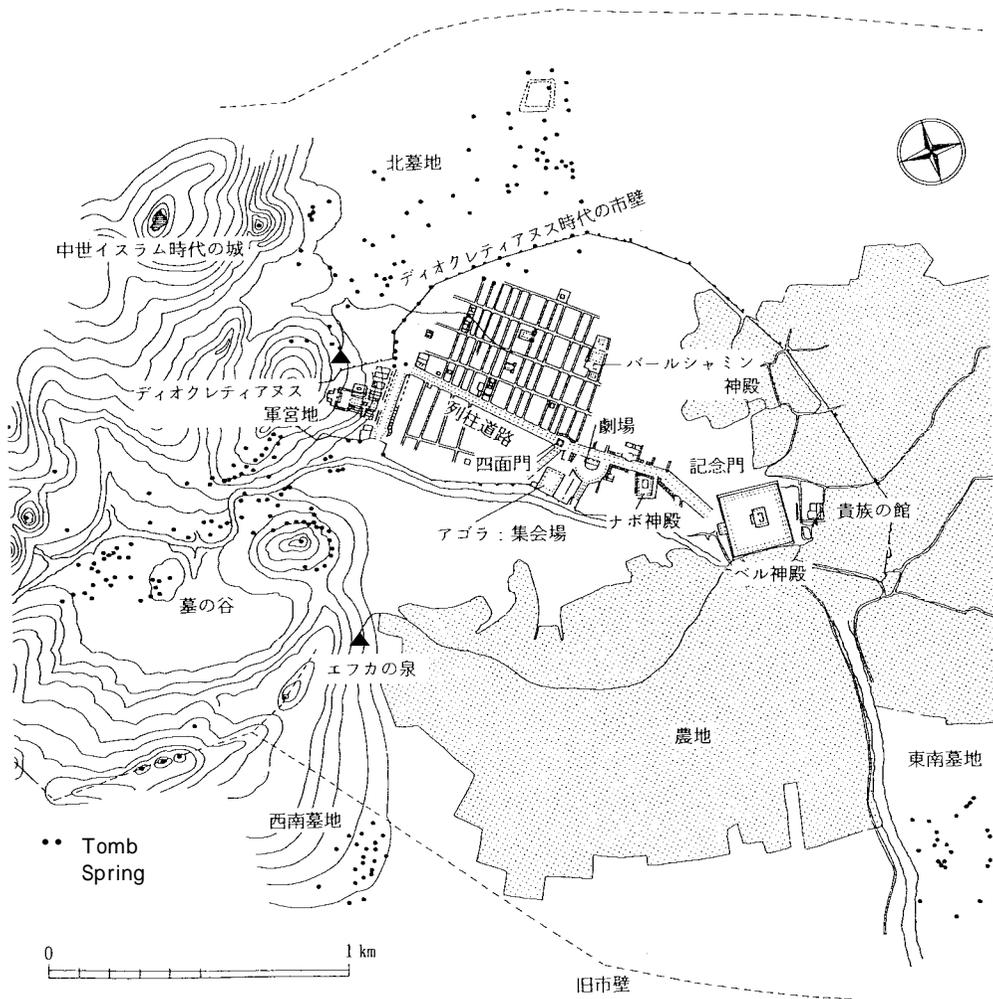


図 - 3 パルミラの遺跡分布図⁴⁾

Fig-3 Distribution Map of Palmyra Stone Relics⁴⁾

2. 岩石・石造建築物の風化

岩石・石材は、地上や地表下で、空気・水と接触することによって、さらに温度差による膨脹・収縮によって風化・変質・破壊されていく。風化の速度には、その地域の気候の影響を強く受けるし、岩石の種類による性質の差も大きい⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

パルミラの場合、気候は前述したようにサバクであり、年間の降雨量は100～300mmにすぎない。このため地表上部に生じるTafoniz化は乾燥しすぎて進んでいない。ところが、この地の遺跡構築に使用されている石材は石灰岩Limestoneである。石灰岩は水に接触すると溶蝕Corrosionするのが特徴である。このため石材が地表に接している部分と地下にかけては溶蝕風化作用による浸蝕

破壊が進んでいることが、遺跡の発掘された地域で観察される。

緩扇状地に位置するパルミラでは、廃都後は徐々に砂礫によって埋積されてきた。現在廃都の中心部に当る地域が、文化財遺跡の調査と観光地としての開発のために繁栄していた市街形成当時の石敷舗装面まで発掘されている。このため、そこでは建物（神殿や競技場など）や列柱群で、扇状地の地表より地下に埋もれていた部分と地上に出ていた部分とが溶蝕による浸蝕破壊部を挟んで明瞭に区分できる。その状況をよく示すのが写真ページ2・3である。繁栄当時の石敷路面までの深さ（150～200cm）が連続的に発掘された延長1300mにわたる列柱群で石柱の風化破壊が進んでいる状況をながめてみると、浸蝕破壊された部分が水平方向に連続的に波打つようにゆるいカーブを示しながら連なっている様子がよくわかる。それは緩扇状地の堆積過程で、その地表面にわずかな高低差を生じ、それが地表面のうねりとなっているのである。

次に、石柱（群）に接近して発掘の結果地上に現われた風化破壊の進んでいた部分を中心に観察し、若干の計測を行なった。さらに、丁度発掘途時の場所（写真ページ3の下）があったので、そこを中心に地表面と列柱の埋没状況と風化の進む状態を観察し、緩扇状地面と風化（溶蝕）部とのかかわりを確認することができた。その実態を次項で写真を示し説明する。

3．風化の実態

風化の状況と実態を具体的にカラー写真ページに沿って説明・解説していく。

写真ページ1

パルミラ遺跡の西北部（本調査地周辺）の全景。写真の右側下方の建物はベル神殿Bel Temple。中央部の左上から右下方にかけて列柱道路Great Colonnadeが続く。列柱道の上端の建物は葬祭殿Funerary Temple。上方の山頂にアラブ城砦Arab Castle。周辺の山地には、まったく樹木が無い。下端一帯の緑地はナツメヤシ（パーム）を中心とするオアシス灌漑農地・農園。現在の市街で人口3万程のタドモルは写真の右方の外側部分に位置している。

写真ページ2

オアシス都市であったパルミラは東部のムンタル山地に続く緩扇状地に位置していた。写真上の左側山地から中央部の谷間を挟んで、右側の斜面がさらに写真中の左側へと続き、アラブ城が山頂に位置する。

都市遺構は、この山地の東側山麓から緩扇状地面上に形成されている。遺跡地域の中心部が位置する扇状地面の標高は400m程であり、山地は500～600mで、高度差は100～200mにすぎない。

廃都後は、写真上に見られるように、布状洪水によってもたらされる砂礫に徐々に埋積されてきた。その状況を南西側から列柱道路に向ってながめたのが写真中である。

写真下は、石柱の下端部が埋積されたままの例である。周辺の発掘現場で観察できる場所の状況から判断すると、この石柱はほぼ150cm程埋もれておりその下端には台座も存在すると推定される。地表面に石柱が接している部分では、地表から30cm程上方に向って風化浸蝕が進んでおり、石柱の根元が浸蝕破壊している状況がわかる（下端部に1mのメジャ）。この状況は、写真中でまだ発掘されていない列柱群の扇状地面に接する部分でも同じ状態を示している。

写真ページ1 パルミラ遺跡の全景（中央部に石造列柱群が連なる）

Photographs Page 1 Topography of Palmyra (Palmyra museum)



写真ページ2 パルミラの石造列柱とその周辺地域

Photographs Page 2 Topography of the Palmyra Great Colonade Area



Upper photo :
Toward the Mountain
Summit from the west

Middle photo :
Toward the Mountain
Summit from the North-
west

Lower photo :
Lower Portion of Stone
Columns Still Buried in
the Alluvial Fan Sedi-
ments

写真ページ3 石造列柱群と発掘地

Photographs Page 3 The Site of the Excavated Stone Colonnade



The 1300 meter Long Stone Colonnade Showing the Almost Constant Height of the Previously Buried Weathered Portion



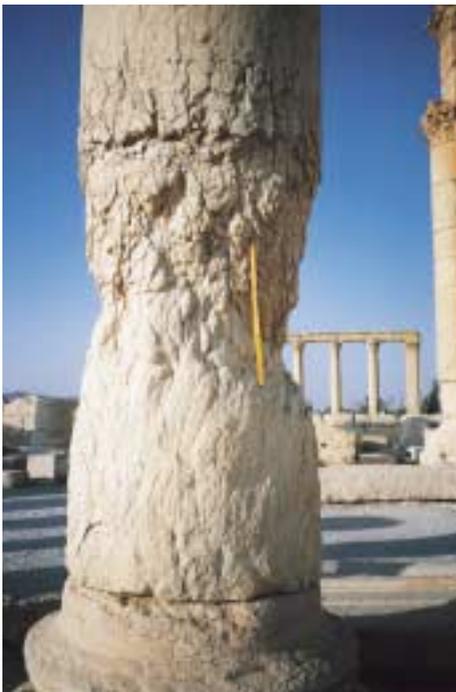
The Surface of the Unexcavated Alluvial Fan is the Same Height as the Already Excavated Weathered Portion of the Stone Columns

写真ページ4 溶蝕による風化破壊の進んでいる部分

Photographs Page 4 The Weathered Portion



The Weathered Portion of the Previously Buried Part of Stone Columns



The Height of the Weathered Portion is Up to the Surface of the Alluvial Fan.
Weathering Caused by Surface and Groundwater.

写真ページ5 ディオクレティアヌス付近・葬祭殿の風化状況、 印まで埋没していた

Photographs Page 5 The Weathering of the Previously Buried Portions of Funerary temple near the Camp de Diocletian Building Columns, Buried Surface



Close-up View of the Weathered Portion of Limestone Columns



Arrows Show the Location of the Previously Buried Portion of the Columns Which Was Weathered

写真ページ3

写真上は、発掘された地域の列柱群に接近し、斜め方向へ連続的にながめた状態である。全体に石柱の下端（石敷道路面）から150～200cmの高さに発掘以前の扇状地の地表面があったことを示す浸蝕破壊部が認められる。しかしその高さを、列柱群全体を通してながめてみると若干波打っている状況がわかる。それは扇状地面での布状洪水による堆積状況の差を示している。

写真下は、まさに発掘されつつある地点であり、堆積と埋没の状況がよくわかる。埋積してきている地表面と石柱（群）の浸蝕破壊部の高さが一致していること。その状況は下端部の石敷道路面まで続いているが、地表上部（上方）へは続いていないこと。さらに埋積している砂礫は、長径20～10cm位の角～垂角礫が目立つが多くは3～1cmの小礫と粗砂で、ほぼ水平に堆積している。

写真ページ4

次に石柱の浸蝕破壊が進む部分の状況から、風化の要因と風化の進み方を調べてみた。写真上下は、共に石柱の風化部を中心に浸蝕破壊部の上方と下方部にかけての状況を示すもので、写真下はその中心部を拡大したものである。すでに写真ページで観察できたように地表から直下にかけての部分が直径100cm程の円柱のうち最大で19cmの深さまで浸蝕破壊し、除去している。それより下方に向っても6cm、2cm、1cmと数値的には徐々に少なくなるが下端部まで浸蝕されている。最も浸蝕破壊が深くまで進んでいる部分ほど白色である。それは岩体内部の未風化部へ攻撃している破壊最前部であることを示している。その上方地表部の風化浸蝕部は黄褐色で、下方は灰白色である。風化色の差によっても風化の進む状況を知ることができる。

風化浸蝕部の状況は、地表水に続く地下水の帯水層部を中心に、まさに硬い岩石が腐食しつつ破壊除去されている状態を示している。このような状況が、石灰岩特有のCorrosionである。

埋没当時の地表より上方へは、毛細管現象が進み約20～25cmの高さまで上方へ向って線（糸）状の風化破壊が進行している状態がよくわかる。その上限は、35～40cmまで追跡できた。

しかも、毛細管上昇による風化部は地表上部で進むので石柱表面の温度の差が大きい。さらに水分を含んでいるため、膨脹・収縮率が高い。その影響の差は石柱の表面より内部に向ってほぼ等間隔に進むため、浸蝕破壊部を観察してみると、約2cm単位で同心円状に2～3層を生じ内部へと進行していることがわかった。この状況は写真にもよく現われている。

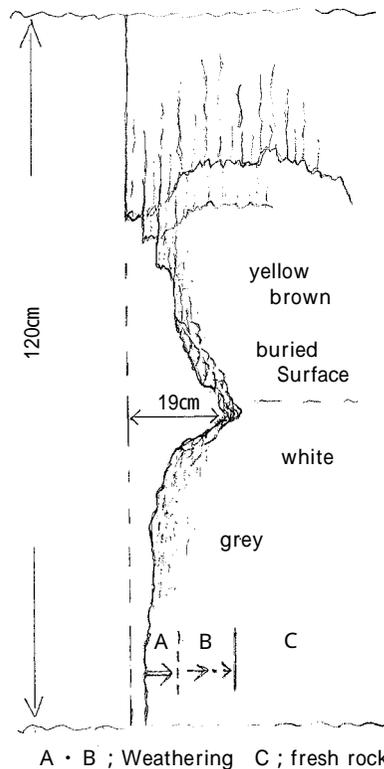


図 - 4 風化破壊の進展

Fig-4 Formation of Weathering
(by H. Ikeda)

写真ページ5

列柱道路の北端に位置する葬祭殿Funerary Templeの表面を飾る6本の石柱群に生じている同様の風化状況を示す。どの石柱も途中 印の高さまで風化浸蝕が進んでいるのがよくわかる。その高さまで布状洪水によって埋積されていたのである。

石柱は、石材である石灰岩の層理面を垂直に使用しているのに対し、石柱最下端部の台座の石盤は石材の層理面を水平に使用しているのが一般的である。このため風化浸蝕の状況も層理面の方向に対応して進んでいる。写真 ページの石柱群の場合も同様に使用されており、風化している状態も同じであることがわかる。

石材の原石である石灰岩が切り出された産出地は、地元に近い北西方約5kmのアトータル山や北方10kmほどの山地に石切場があり、そこには現在も当時の石材の一部が残されている。

4 . TafoniとCorrosionとの風化状況のちがいを

岩石・石材の風化破壊によって生じる原石（石灰岩の場合）の形状変化は、大きくは地上部で生じるTafoni風化浸蝕と地表下で生じるCorrosionによる浸蝕とに分けられる。

筆者は、これまで花崗岩Graniteや砂岩Sandstoneなどの岩種を中心に自然石に生じたTafoni風化について調査してきた⁸⁾⁹⁾、さらにその応用として石造建築物に生じている同様の風化破壊現象について調査してきた¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。

今回の調査は、後者の応用の部に当る。しかもこの地の場合、サバク気候下でありTafoni風化には乾燥しすぎるように進んでいなかった。ところが、遺跡の石材が石灰岩であるため、冬（雨）季に時折発生する布状洪水とオアシスの湧泉水による地下水も加わり、廃都後は遺跡群の埋（没）積と地表面直下を中心とした溶蝕作用が意外に速く進んでいる状況を石造建築物や列柱石群を通して調査することができた。

Tafoni風化の場合は、地上の岩体の表面に円～楕円形の穴状の窪みが生じ、さらにその周辺にも同様な穴が生じて、それらが徐々に拡大しながら深い窪みとなり空洞化しつつ岩体の表面から内部に向かって風化破壊が進んでいく現象である。

これに対し、溶蝕Corrosionによる浸蝕破壊は、地表下に埋没した岩体の表面が地下水の水和作用を受け、徐々に腐食していく現象である。特に石灰岩の溶解すなわち化学的風化は次の段階を追って起こるとされる。(1)石灰岩が $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ と解離（イオン化）する。これによって右辺のイオンが固相から液相（水）に移る。(2)水に溶解した CO_2 と CO_3^{2-} とが水を媒介して HCO_3^- となる。 $\text{CO}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ 、 $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{HCO}_2$ 。これによって石灰岩が継続的に溶解することになる¹³⁾。

このため、浸蝕破壊の状況は地下水の浸透の深さに沿って腐食を深めており、Tafoniの穴状風化浸蝕とはまったく異なる。

今回調査したパルミラの都市遺跡は紀元前後に繁栄しているのではほぼ2000年を経過しているが、前記したようにローマ軍による破壊後4～7世紀のビザンチン時代には再開発が進められたものの、オスマン帝国時代に急速に荒廃している。その頃から急速に堆積も進んだようで、最近はその

れもほぼ安定してきていたのではないだろうか。その結果が、現在の地表直下を中心に溶蝕破壊が進んだのではと推測してみた。しかし詳細な堆積年代を示す資料は得ていないので、今回は、現地での風化状況の報告にとどめておく。

5. さいごに

極乾燥したサバク気候下とオアシスという特異な環境のもとに繁栄していた石造の古代都市遺跡パルミラを訪問し、筆者がこれまで行なってきた種々の気候や諸岩石種に生じる風化破壊地形の研究と比較できる貴重な体験をした。

この地では、乾燥しすぎてTafoniの形成は進んでいなかったが、石灰岩からなる石造遺跡に生じたCorrosionの実態を観察・計測することができた。

この結果を、さらに現在調査を進めている同時代に形成された都市遺跡である地中海岸でレバノンのビブロスByblos, サイダSaida, ティルTyreの石造建築物にみられる風化状況と比較検討したい。

このようなデータが、貴重な石造文化財の保全・保護を進める場合の資料として生かせることを望む次第である。

注

- 1) Adnan bounni; , Khaled Alasad(1982): Palmyra - Histoire, Monument et Musee. 小島新次郎・訳(1988): パルミラの遺跡、東京新聞出版局。
- 2) 日本ユネスコ協会連盟編(2000): ユネスコ世界遺産、平凡社。
- 3) Eugen Wirth(1971): Syrien - Eine Geographische Landeskunde, Darmstadt。
- 4) 樋口隆康(1998): シリアパルミラの遺跡、シルクロード学研究、Vol.5 - 1。
- 5) 盛合禱夫編(2000): アンコール遺跡の地質学、(有)連合出版。
- 6) 町田 貞・貝塚爽平・他(1981): 地形学辞典、二宮書店。
- 7) J.N.Jennings(1968): Tafoni, The Encyclopedia of Geomorphology, Dowden Hutchinson。
- 8) 池田 碩(1989): 地中海Corsica島の花崗岩地形、奈良大学紀要第17号。
- 9) ——— (2001): 韓国の花崗岩地域にみられるTafoniとGnammaの分布、奈良大学総合研究所報第9号。
- 10) ——— (2002): インドの石造寺院に生じているTafoni風化と遺跡の破壊、奈良大学紀要第30号。
- 11) ——— (2004): 明治維新时期構築旧岩崎弥太郎邸赤レンガ壁面に生じているTafoni状風化、奈良大学紀要第32号。
- 12) ——— (1998): 花崗岩地形の世界、古今書院。
- 13) 前掲注6) P621。

謝 辞

現地調査に同行していただいた奈良大学西山要一教授、パルミラ遺跡発掘当時の状報と文献を教示していただいた京都大学泉拓良教授に感謝の意を表します。

THE WEATHERING CHARACTERISTICS OF THE PALMYRA STONE RELICS

BY : Hiroshi Ikeda
Nara University
Nara Japan

Palmyra was an oasis city in the Syrian desert. From the 1st century B.C. until the 3rd century A.D., it served as a stopping point for caravans on the shortest route between Mesopotamia and the Mediterranean Sea. In 274 A.D., after being defeated in a war with the Roman armies, the route of the caravans changed, and the city fell into ruin. All that remains is what we see today. Palmyra was a very large city with numerous stone buildings and structures. Its size can be imagined from the 1300 meter long stone Great Colonnade along its main road, of which some 150 limestone circular-in-section columns remain. In 1980, these relics were designated as a World Cultural Heritage site.

However, with the passage of time, weathering has continued and continues to wear the relics away. Because the columns are made of limestone, weathering above and below ground differs. One might expect to even find tafoni-type weathering of the upper exposed portion of the columns. Because Palmyra is located entirely on a gently sloping, desert, alluvial fan, most of the area has gradually been buried under alluvial sand and gravel. Today, because only the cultural assets of the central portion of that city are being studied and also for tourism, excavation down approximately 2 meters to the ground surface of that period is being undertaken. As a result, the depths of the weathering and parts of the building and columns that were buried can readily be distinguished from the parts that were not buried.

Looking at weathering on the excavated 1300 meter long Great Colonnade, we can see that the weathered portion forms a continuous, slightly wavy, almost horizontal line. This was the area studied by the author in detail. The weathering of the columns that have already been excavated was examined, the depth of weathering was measured, and the distribution of erosion cracks on the weathered portion of each column was noted.

Because the columns were made of limestone, the portion in direct contact with the ground had experienced erosion due to the action of both surface and groundwater. The height of the weathered portion of the excavated columns formed a gently wavy, horizontal line because of their location on an alluvial fan over which sediments have built up at a constant rate.

On the portion of columns above ground where one might expect to find tafoni-type weathering, there was none because the annual rainfall in the area is only about 100mm, too dry for tafoni weathering to occur.

In conclusion, this survey broadly examined the weathering of the buried portion of the limestone columns that had been excavated. Because of their location on a gently sloping, desert, alluvial fan, weathering was virtually the same up to the same height. The author hopes that this study and its results might contribute to the study of the weathering of other stone relics elsewhere.