

# インドの石造寺院に生じている Tafoni風化と遺跡の破壊

池 田 碩\*

## TAFONI WEATHERING AND ITS DESTRUCTION OF STONE TEMPLES IN INDIA

Hiroshi IKEDA

### 要 旨

Aw気候下のインド東南部で1300年前に構築されたことがはっきりしている石造寺院に生じた風化破壊の状況を観察、調査した。

その結果、石造寺院の風化は全体に同速度で進行しているのではなく、風化の状態は上方から下方へかけて4層に分かれ、中央部の2層が速く、上部部と下端部では遅れていることがわかった。

風化の内容も、最も進んでいる中央部では特異な形状を示すタフォニTafoni化タイプの風化を伴いつつ進んでいるのに対し、下方部では剥脱・剥離exfoliationタイプの風化破壊を進行させている。

さらに、この石造寺院に生じているタフォニの成長速度は、自然界で形成している活発なタフォニで実験計測して得た値とほぼ一致することがわかった。

### 1. はじめに

筆者はライフワークである地形学の立場から、自然界で形成される特異な微地形のタフォニTafoni<sup>1), 2)</sup>にも興味をもっている<sup>3)</sup>。そのためフランス・オーストラリア・韓国などの典型的な形成地を訪ね、形成過程や形成速度について観察・実験をおこない報告してきた<sup>4), 5)</sup>。ところが、タフォニを伴う風化破壊は、大型の石造遺跡にも生じていることに気づき、その結果貴重な文化遺産が破壊されている例をインド・エジプト<sup>6)</sup>・ポルトガル<sup>7)</sup>などで気づき観察した。

石造の建造物といえど、当然年代を経過するに従って、表面から徐々に風化が進み破壊していく。しかし、その状態を詳細に観察してみると風化の状況は一様ではなく、表面全体に風化が進みボロボロと岩粉状になって剥脱・剥離しだす場合や、局部的に窪みが生じ、そこを中心に穴状となり、さらに拡大し深く成長していくタフォニ化の場合や、地表下からの水分が毛細管現象によって上昇してき建造物の下端部から急速に風化が進行してくる場合などがある。

そこで本論では、これまで石造建造物との関係ではあまり取りあげられてはいないと思われるタフォニ化による風化破壊の事例を示し、自然界で形成しているタフォニとの比較をおこなって

みた。

報告地は、インド亜大陸東南部で熱帯のサバナ気候Aw下に位置する大都市マドラスMadras（チェンナイ）南部のカーンチープラムKanchipuramとマハーバリプラムMahabalipuramの石造寺院である。

筆者がこれまで調査してきた地域では室内分析用のサンプル採集や現地での実験観測が可能であった。しかし、今回の報告地の場合は世界遺産にも登録されている著名な建造物であり、同様な行為は許されない。このため現地でおこなったフィールドノートへの記録と、50cm×70cmへと拡大した多数の写真をもとにした実態の観察報告という定性的な調査結果となった。しかし、このような遺跡の場合は、建造年が明確であるため、自然界のタフォニで実験して得た形成速度の数値と対比することができる点では大変興味深い。

そこで今回は、石造寺院遺跡にも生じている典型的なタフォニ化による風化破壊の実態と自然界で形成されるタフォニとの対比を中心に報告する。

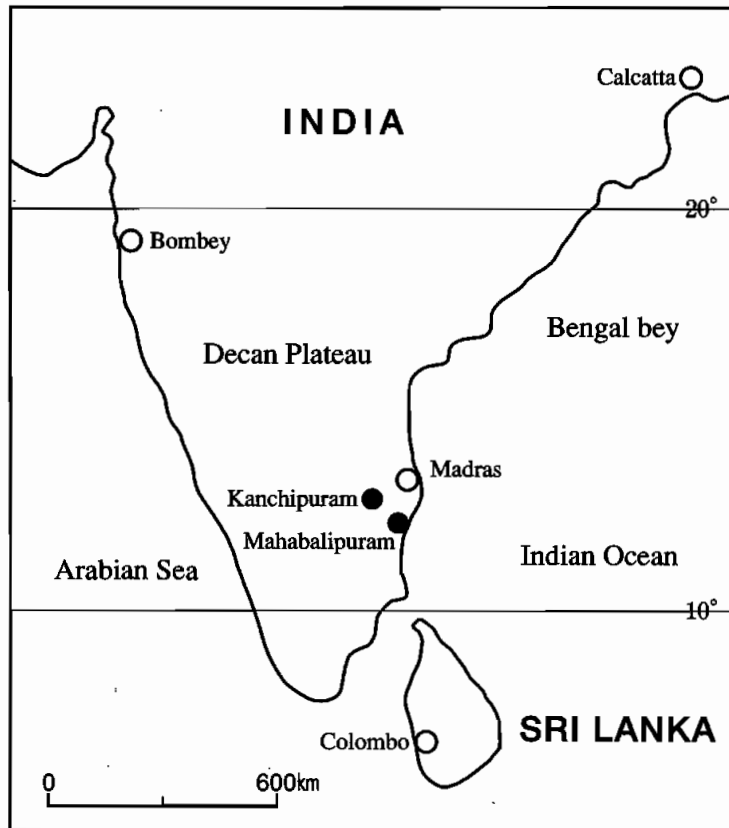


図-1 インドの調査地、カーンチープラムとマハーバリプラム  
Fig-1 Map of the Study Cities, Kanchipuram and Mahabalipuram

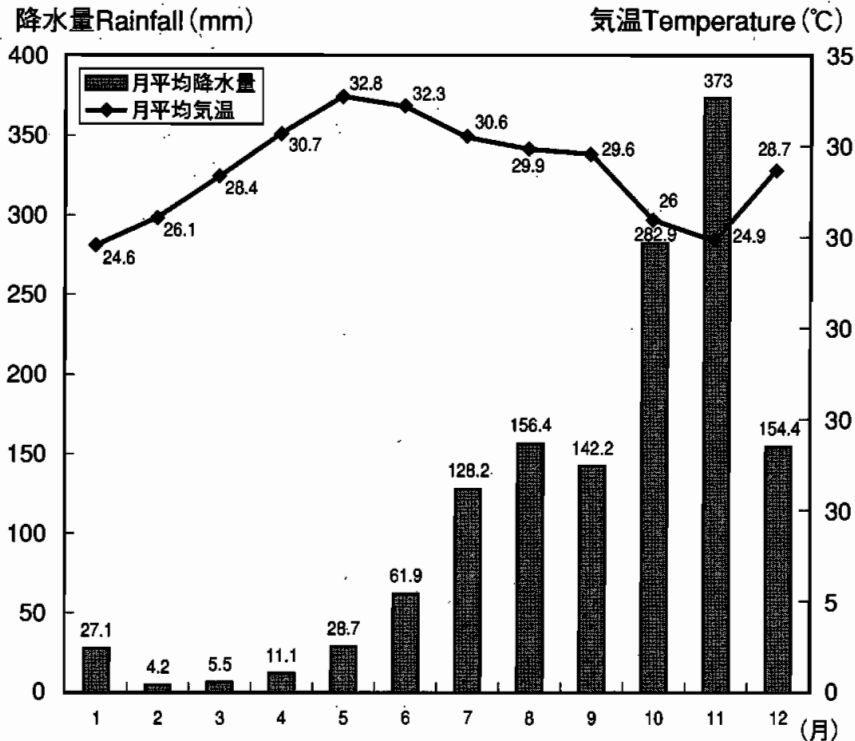


図-2 マドラスにおける降水量と気温

〈資料〉理科年表

Fig-2 Temperature and Rainfall in Madras (near the study cities)

## 2. 自然界で形成されるTafoni

Tafoniは岩盤や岩塊の表面のうち、その側面や下底に生じる風化穴weathering hollowである。その形態は円形か楕円形であるが、拡大しそれらが連結すると複雑な形状となり、横に連なっていくと棚状の大きな窪みとなってくる。

規模は直径・深さ共に10数cm～数10cmのものが多く、成長すると1mを越す例も見られる<sup>9), 10)</sup>。

タフォニは、全ての岩石に同様に形成されるものではない。均質で割れ目の少ない硬い岩石で、しかも風化があまり進んでいない岩面を有していることが形成される岩石の条件としてあげられる。このような条件を満たす岩石としては花崗岩類が最良である。他に安山岩や砂岩、凝灰岩などにも形成される。

さらにタフォニは、周囲の気候・気象と微妙なかかわりをもって形成される。このため岩石・岩盤の条件を満たしていれば、どこにでも分布するものではない。世界的にタフォニが多く形成されている地域は、地中海性気候・Csや、ステップ気候・BS, サバナ気候・Awの地域であるが、寒冷的な気候下でも形成されている。さらに共通点は、1日・年間を通して湿気と乾燥が激しく繰

り返す気象環境が必要であり、降雨や降雪量が少なければ熱帯や寒帯でも形成される。このため年間を通して降雨量のきわめて多い日本には少ないが、近接していても乾燥度が高い韓国には多く分布している<sup>11), 12)</sup>。

さらにタフォニの形成には気象のうちでも周囲の微気象が大きく関係してくる。すなわち形成には適度の湿気が必要であるが、それは降雨が直接タフォニ（穴）に進入するのではなく、湿潤な気流が穴内に入り込み、図3<sup>13), 14), 15)</sup>で示すように岩面に水滴となって付着する必要がある。

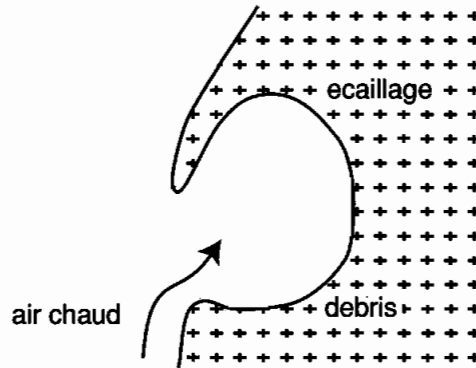


図-3-1 タフォニの形成過程模式図<sup>14)</sup>  
Fig-3-1 Formation of Tafoni (by A. Rondeau)

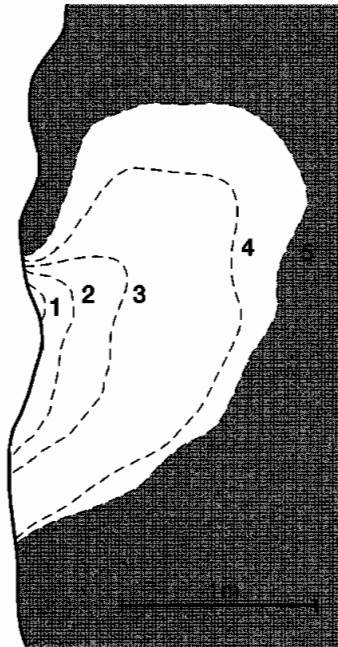


図-3-2 タフォニの形成過程模式図<sup>15)</sup>  
Fig-3-2 Formation of Tafoni (by J. Tricart)

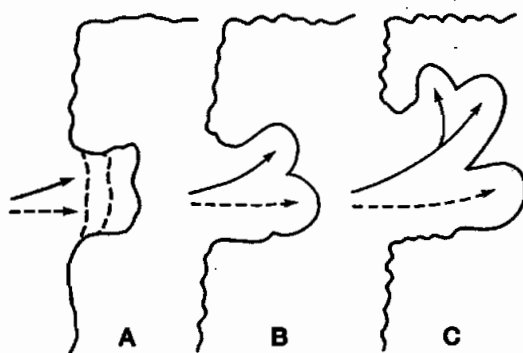


図-3-3 タフォニの形成過程模式図 (池田碩)<sup>3), 4)</sup>  
 Fig-3-3 Formation of Tafoni Model Diagram (by H. Ikeda)

このためには、上昇気流が発生しやすい環境が必要となる。しかも岩盤や岩塊の表面でもタフォニが顕著に形成されている部分には一定の高さを有している場合が多いことから、それぞれの地域の気流の流れ方や方向などの微妙な環境が関係していることがわかる。

以上のことからタフォニは、形成される岩石と形成しやすい気候・気象の条件が重なった地域に生じる大変特異な微地形であり世界的な分布地は限られている。このためタフォニは、気候地形としての指標の1つともなっているのである。

筆者が自然条件下でこれまで調査してきた地域のうちで、現在最も活発に形成している地域の例として取りあげた韓国北東部注文津で長期にわたり実験測定して得た値は、最大1mm/年であった。タフォニ内部全体を平均してみれば、その値は2分の1～3分の1位の速度で拡大しており、小規模なタフォニであれば、ほぼ1000年オーダーで形成されているものと推定した<sup>16)</sup>。

### 3. 石造寺院の風化と破壊の状況

#### A) 位置と環境

北緯13度・東経80度のAw気候区に当る地域で、調査地のマハーバリプラムMahabalipuramはマドラスMadrasより60km南の海岸に位置、さらにこの地より65km程内陸にカーンチープラムKanchipuramが位置している。

カーンチープラムは、パラールPalar川の左岸側に発達したヒンズー教の宗教都市として現在に至っている。今回、調査した砂岩Sandstoneで構築されているカイラーサナータ寺院Kailasanatha Templeは、市街の西端に位置している。マハーバリプラムも宗教・観光都市で、ベンガル湾に臨み、古くはインド洋からスリランカにかけての航路をおさえた商業・港湾都市であった。調査した花崗岩Graniteで構築されている海岸寺院Shore Templeは写真D1で示すように海岸に位置し、海へと突出している。しかも寺院の海に臨む側は1～3m位の大きな石材を高く積み上げ保護されている。海岸侵食が激しいためで、かつては7ヶ所あった塔が、次々と海岸侵食のため倒壊し水没、現在はこの塔のみとなってしまったといわれる。

## B) 石造寺院とその構築年代

6世紀から9世紀にかけては、南インドにヒンドゥ文化が開いた時代であった。中でも東海岸一帯をおさめたパッラヴァ朝は海洋貿易で繁栄したが、その時の首都がカーンチープラムであった。海岸に位置するマハーバリプラムは外港として内陸の首都をささえ、共に宗教・学問・芸術などの全般にわたって豊かな遺産を築いている<sup>17)</sup>。

本論の調査地として取りあげた両石造寺院もナラジンハ・ヴァルマンⅡ世(700-728年)の治世中に構築され、パッラヴァ朝中期を代表する貴重な石造遺跡で、このうち海岸寺院はユネスコの世界遺産としても登録されている<sup>18)</sup>。

## C) 風化の実態

### ◎カーンチープラムのカイラーサナータ寺院

ドラヴィダ様式のシヴァ神を祭る寺院で、全体が砂岩の切り石を積み重ね、彫刻をほどこした寺院である。

写真B1は、正面からながめた全景である。中央に本殿の塔があり、周囲には58の小さな神殿が外壁状に取りまいている。その一部を示したのが写真B2である。遠望した全景写真B1では風化の状況はわからない。しかし、写真B2では良くわかる。そこでこのカラー写真を中心に、詳細な判断がフィールドノートの記録と合わせてできるように写真を50cm×70cmに拡大して観察した。その結果、風化の状況は建物の上端から下端にかけて大きく4段(層)に分けられることがわかった。

中央部の明るい黄褐色部、約170cmがタフォニ化を伴う風化の最も進んでいる部分である。次いで、それに続く下方部のやや明るい灰褐色部、約130cmは剥離exfoliation風化が進んでいる部分である。

これらに対し、上方部の暗灰色部、約3mは風化があまり進んでいない部分である。さらに最下端部の敷石付近の暗褐色部分の風化も進んでいない。

つまり、建造物全体が同様に風化しているのではないこと。風化の内容や速さは風化色の差によって大きく区分されることがわかった。ではなぜこのような風化の4層化を生じているのか。このことを含めてさらに各部分の風化状況をカラー写真のページに沿って観察し、その結果を記しておく。

まず、最も風化の進んでいる中央部の状況から説明する。写真B3は、寺院左側の回廊沿いで、円形や楕円形の穴を生じるタフォニ化タイプの風化が顕著に進んでいる部分とその広がり状況を写したものである。長径15~20cmのタフォニ化穴が上下方向に約1mにわたって複数分布している。

写真B4は、B3の下方である。中央部の下端約50cm位が全体として左右方向にタフォニ化しつつ窪んでいる状況を示す。

写真C5・C6。C5は、C6下部を拡大したものである。B4と同様に、中央部の下端から25~40cmにかけて円形のタフォニ化穴を形成しており、右側ではタフォニ化・左側では剥離による表層落下の様子がみられる。

写真C7とC8は、同場所である。C7は正面から、C8は横から写したものである。奥の壁面

では典型的なタフォニ化による穴状風化が全体に進んでいる状況がよくわかる。タフォニの穴は、長径15～25cm、深さ10～15cmに達している。写真の左側では、タフォニ化により彫刻が破壊されていく状況がよくわかるし、右側では壁面全体が剥離し、そこからタフォニ穴が形成しだす状況がわかる。

下端部の風化状況は、表層の部分が若干剥離している程度であり、また上方部も写真で見える限り上方へ向かう程、風化色が付いていないのも大きな特徴である。

#### ◎マハーバリプラムの海岸寺院

写真D1は、海岸寺院を南方から遠望した全景である。浸食が激しい海岸に位置していることはすでに前記したが、写真D1でも右側ベンガル湾に臨む部分にはテトラポットのかわりに大きな自然石が積み上げられている状況、さらに写真前面の積み石の無い部分は砂浜が大きく後退している状況がよくわかる。

ピラミッド型をした建造物は、花崗岩の切り石積みからなる石塔寺院である。この寺院でも、風化状況は上下四層に区分でき、しかもそれぞれの風化段階は、カイラーサナータ寺院での状況とほぼ同様であることがわかった。

この寺院の場合も石塔上には登れないので全景写真を50cm×70cmに拡大し、フィールドノートの記録と合わせつつ観察した。

石塔の上方が風化がおくれていることは、風化色が暗灰色であることからわかる。これに対し、中央部は明黄色となり、最も風化が進んでいる。しかもその状況は風化穴を連続させており、まさにタフォニタイプの風化ゾーンとなっている。この部分を拡大したのが写真D2である。現場に接して計測できないのが残念であるが、拡大写真から推測すると、穴の直径は数10cm～1mを越すような円形・楕円形で、深さも数10cm～1m位に達しているようであり、すでに何らかの風化防止策が必要と考えられる。この状態は、まさに自然界に形成されている花崗岩タフォニと同形状である。

石塔の下方部には、写真D3下部に見られるように高さ約2.5mの石壁が連なっている。この石壁面は、ほぼ全体が剥脱している。その状況を横の側面からながめたのが写真D4である。D3とD4を詳細に観察してみると、剥脱は切り石と切り石の接合部分よりも切り石面中央部の方が進み、窪んでおり、その深さは5～20cmに達し、写真D4では30cmに達してタフォニ化している部分もみられた。

写真D5で示す壁面には、ヒンズの神像や象などが彫刻されているが、それらも風化による剥脱とタフォニ化により見えなくなっている。象の両側に彫刻されている神像の上半身が剥落し消滅しつつあり、象の上方ではタフォニ化による穴が生じている。

なお、ここでも最下端部の風化は進んでいない。このことから、毛細管現象による地下水上昇の影響は無いこともわかった。

#### D) 風化の4層区分と原因

マハーバリプラムの花崗岩の海岸寺院でも、65km内陸のカーンチープラムの砂岩のカイラーサ

ナータ寺院でも、共に風化の形状は上下4層に区分され、それぞれの層で生じている風化の内容もほぼ一致していることがわかった。

このことから、石造寺院の風化による被害は、寺院全体に同状態・同速度で進行しているのではなく、高さによって大きな差が生じていること。さらに、風化の進行している部分では剥離、剥脱タイプとタフォニ化タイプがあり、前者は面的で周辺全体におよぶ広がり方を示すのに対し、後者は局部的に穴をあけていき、それが拡大しさらに隣接する穴と結合するようになれば、壁面が破壊する危険性を有していることが推察された。

このような寺院の立地の場と構築材としての岩種を異にする建造物でも、同様の風化区分が生じている原因には、寺院遺跡を取りまく周囲の微気象に起因しているとしか考えられない。

この種の風化には、降雨ではなく上昇気流がもたらす湿気が必要であること。しかし、その湿気は風化の進んでいない上方部では空間に対する構造物の面積が小さく、風の影響も受けやすい結果、乾燥が速いこと。同様に風化の進んでいない下端部は、石敷面となっているため毛細管現象による地下からの水の上昇が遮断され、さらに降雨時以外は高温の熱帯でもあり、石敷面とその直上部分の乾燥が速いためと考える。

逆に風化が進んでいる部分のうちの下部は、遺跡の構造自体が壁面又は平らな面の重なりとなっており、それらの面での風化に対する条件はほぼ同一となること。さらにはそのため風化の深さが横方向へと伝わることによって表面に微起伏を作らないと考えられるが、一方では逆に全体が同条件で脆くなっていくものと考えられ、それが下部部であるだけに、一層進めば上方からの重圧も加わり破壊へと向かう危険性がある。

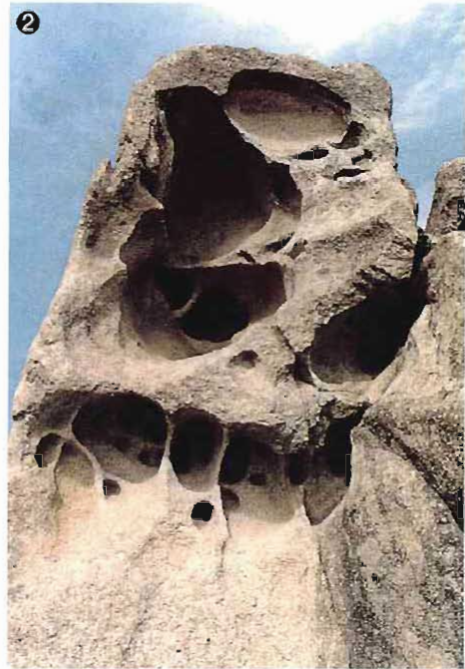
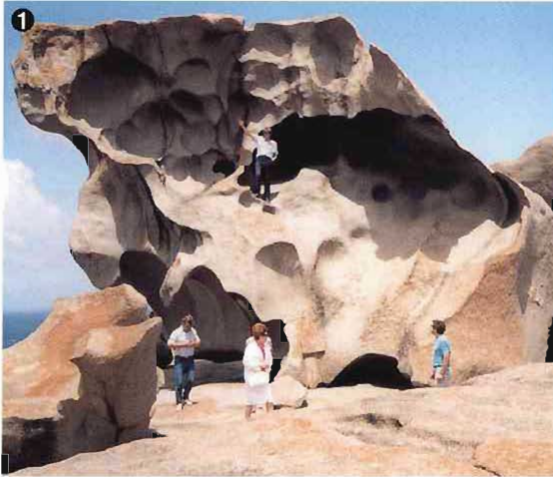
現在、最もタフォニ化風化を進めている中央部では、自然界で形成されているタフォニと同様な形状を示しており、それらが拡大すれば周囲のタフォニが連結しだし異様な形と深さに至るが、この遺跡ではすでにその直前の状況に達していることがわかる。この部分は石積構造や彫刻自体に起伏があるところで、このため微気流の衝突やそれによってもたらされた湿気（水滴）の付着量とその乾燥速度に差を生じることから、局所的な差が穴状の窪みをつくり、その窪みがより大きな穴へと成長し、図3で示すような過程をたどりつつ拡大していくものとする。

しかもこの地の石造遺跡に生じているタフォニの形成速度は寺院の構築が1300年前と明確であり、タフォニ化している最大規模の風化穴群では直径が数10cm～1mに達し、穴の深さも数10cm～1mに達しているものと判断できた。

この数値は、筆者が現在活発な形成途時にある自然界でのタフォニとして取りあげ実験・測定した例である韓国東北部注文津付近で得た数値と一致した。



Aページ：自然界でのタフォニ風化  
Page A : Natural Tafoni Weathering



① オーストラリア、カンガルー島のタフォニ

② 韓国東北部注文津付近のタフォニ

③ 高知県西部ピロウ島のタフォニ

④⑤ 韓国注文津付近の実験中のタフォニ

④ 実験開始2年後の剥離

⑤ 7年後の状況。10年後には全体が剥離した

③



Bページ：カンチープラムの砂岩で構築されたカイラーサナータ寺院－1  
 Page B : The Kailasanatha Temple of Kanchipuram (Built with Sandstone)－1



- ①カイラーサナータ石造寺院の全景
- ②左側回廊部の上下方向全景。明るい中央部程風化が進む
- ③中央部のタフォニ化による風化穴群の形成
- ④下方部の剥離風化とタフォニ化による浸食破壊

Cページ：カイラーサナータ寺院－2

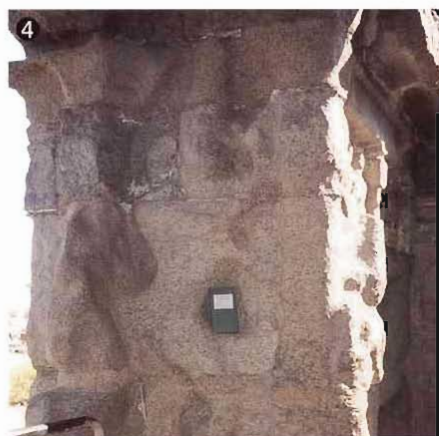
Page C : The Kailasanatha Temple－2



- ⑤⑥下方部のタフォニ化。⑤は⑥の拡大  
⑦⑧中央部奥壁周辺のタフォニ群による破壊  
⑦は正面から、⑧は側面からの状態  
◎スケール・フィールドノート10×16 cm



Dページ：マハーバリプラムの花崗岩で構築された海岸寺院  
 Page D: The Shore Temple of Mahabaripuram (built with Granite)



- ①海岸寺院 ②石塔中央部のタフォニ風化層準  
 ③石塔全景。上方部と下端部の風化は進んでいない  
 ④下方部石壁面の神像彫刻のタフォニ化  
 ⑤下方部石壁面の風化。写真中央の象の頭部分はタフォニ化、その両側神像の頭部は剥蝕破壊が進む

#### 4. さいごに一まとめにかえて一

A) 建造された年代の明確な大型石造遺跡に生じた岩石の風化作用の進行による遺跡の破壊状況について調査し、その実態を明らかにした。さらにその結果を、筆者がすでに調査してきた自然界で形成している同種岩石による風化の状況と比較した。

B) 調査地は、インド亜大陸東南部の熱帯でAw気候区に所属。港湾都市マドラス南方で、カーンチープラムの砂岩の積み石で構築されたカイラーサナータ寺院と、マハーバリプラムの花崗岩の積み石で構築された海岸寺院である。

C) 1300年以前に構築された両石造寺院は共に岩石の風化が進行してきており、すでに壁面の一部や彫像が破壊している。しかし風化状況を詳細に観察してみると、石造遺跡全体が同様に風化を進行させてはいないこと。風化の速い部分と遅れている部分が、石造寺院の上一下方向で4段階(層)に区分でき、そのうち遅れている部分は上方部と下端部で、進んでいるのは中央部とそれに続く下方部であることがわかった。

D) 風化作用が著しく進行している部分を中心に風化状態の特徴を観察すると、下方部では面的な剥脱や板状の剥離タイプが広がっているのに対し、中央部では円形・楕円形の穴ができ、それが拡大し深くなるタフォニタイプの風化であることがわかった。

E) このような風化の形状は、砂岩でも花崗岩でもほぼ同じ状況を示すが、若干の相違は、下方部では層理を内在する砂岩の方が剥離的であるのに対し、花崗岩の方は岩面全体を剥脱させつつ進行していること。最も風化の進む中央部では砂岩・花崗岩共にタフォニを形成させつつ進行しているが、その規模は花崗岩の方が大きいことがわかった。

F) 花崗岩の切り石積海岸寺院の中央部には、典型的なタフォニを多数生じている。そこで、この石造遺跡面に形成しているタフォニの形状と規模から形成速度を推定した結果、最大で1年=1mmと考えた。この数値は、筆者がかつて自然界での典型的な、しかも現在勢力的に形成中と判断したタフォニでの実験と測定で得た値と一致し、この種のタフォニは1000年オーダーで形成可能であると推定しておいたことの裏付けともなった。

G) 今回貴重な石造遺跡の風化による破壊の実態を自然界の同様地形に生じている現象と対比し、その成因や破壊の進行部位とその速度を明らかにし、すでにこの地の石造寺院には何らかの対応が必要な状況に至っていると推察した。これらの結果は、他の石造遺跡の保全・保護への対応を考察する時の基礎資料としても重要であると考ええる。

#### 註

- 1) J.N.Jennings(1968): Tafoni, The Encyclopedia of Geomorphology, Dowden Hutchinson.
- 2) 赤木祥彦(1981): タフォニ、地学辞典、平凡社。
- 3) 池田 碩(1998): 花崗岩地形の世界、古今書院。
- 4) —(1990): 韓国東北部海岸注文津付近にみられるTafoni地形とその形成過程、奈良大学紀要第18号。
- 5) —(1989): 地中海Corsica島の花崗岩地形、奈良大学紀要第17号。
- 6) 修復に関する論文・谷本親伯(1997): 大スフィンクス修復保存学術調査報告、地盤工学会誌45巻6号。

- 7) ポルトガル・エヴォラ、紀元前2世紀末のディアナ神殿。
- 8) 張 昊(1983)：韓国南西部地方の諸岩石に現れる風化穴の成因と形成時期、ソウル大学地理学論叢10。
- 9) 池田 碩(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) — (1996)：オーストラリア、カンガルー島のタフォニ、タフォニ・その1、地理41巻1号。
- 11) 權炯熙(1987)：韓国の山地に発達するTorの研究、東国大学博士論文。
- 12) 池田 碩：前掲9。
- 13) —：前掲3, 4。
- 14) A.Rondeau(1961)：Recherches Geomorphologiques en Corse。
- 15) J.Tricart(1977)：Precis de Geomorphologie. P58. Fig26. Societe D'epition D'enseignement Superieur. Pari.
- 16) 池田 碩(1990)：前掲4。
- 17) 樋口隆康編(1988)：インドの聖域、講談社。
- 18) 地球紀行・世界遺産の旅(1999)、小学館。

#### TAFONI WEATHERING AND ITS DESTRUCTION OF STONE TEMPLES IN INDIA

This study is concerned with the weathering of the stone in large stone temples the age of which is known with certainty. The study area is near the tropical savannah port city of Madras in southeastern India, located at 13° N latitude and 80° E longitude. The relics studied were the sandstone Kanchipram temple and the granitic Mahabalipuram temple, both built by King Varman II (700-728AD), some 1300 years ago. Both stone temples have been experiencing progressive stone weathering. The weathering of both the sandstone and granite is similar, but a closer look at both from top to bottom reveals the fact that the speed of the weathering is not the same, and furthermore, the content and shape of weathering are not the same either.

The weathering of the lower portions is of the exfoliation-type in which the surface is peeling off, while the most severely weathered portions are midway between the bottom and top. These areas are weathered into circular and oval holes, i.e. tafoni-type weathering. A major cause of this weathering is the micro-climate of the area (see Fig. 3), i.e. the speed and direction of air flows.

The shape and scale of this tafoni-type weathering is virtually the same as that observed by the author in other parts of the world. The speed of weathering is likewise almost the same as that seen in experiments by the author in those other countries, a maximum of about 1 mm per year at most. If this kind of weathering continues at this pace for a millenium, the same amount of weathering that appears in the temples could occur.

Comparative research on tafoni weathering in Nature and that seen destroying valuable/priceless stone relics is resulting in basic data that should prove to be of value when it comes to finding/creating ways to protect those and similar stone relics in India and elsewhere in the world.