

自然科学研究 徳島大学総合科学部 (査読論文)
第23巻3号 44-60頁

和歌山県に分布する中新世凝灰岩の急崖に発達する タフォニの分布と形状

西山賢一*・吉田 顕**・横田修一郎***

* 徳島大学大学院ソシオ・アーツ・アンド・サイエンス研究部,
〒770-8502 徳島市南常三島町 1-1, E-mail: nisiyama@ias.tokushima-u.ac.jp

** 株式会社 INAX

*** 島根大学総合理工学部地球資源環境学科

Morphological features of tafoni on cliffs of the Miocene tuff, Wakayama Prefecture, Japan

Ken-ichi NISHIYAMA*, Akira YOSHIDA** and Shuichiro YOKOTA***

* Institute of Socio-Arts and Sciences, University of Tokushima

** INAX Corporation

*** Department of Geosciences, Shimane University

Abstract

Morphological features of tafoni on Miocene tuff cliffs have been studied in the Kozagawa area, Wakayama, Japan. Distribution of tafoni tends to develop on steep slopes characterized by massive fine-grained acidic tuff. Concave roof of tafoni has been formed with high decreasing rate of rock strength under high humid condition. This supports that concave roofs have been formed due to high rate of salt weathering. Piling up of rock blocks on the foot of such cliffs indicates that evolution of tafoni is closely related to rock fall from the cliffs. Development of tafoni makes a sort of canopies overhanging on steep cliff, and such unstable portions fall down as rock fall. In addition to development of tafoni, cracks within acidic tuff are also one of causes of rock fall. Such cracks occurred due to rotational moment of overhanging portion. Consequently, weathering rates of rocks due to salt weathering and spacing of these cracks are control the frequency of rock fall in these cliffs.

Key words: tafoni, rockfall, Kumano acidic tuff, weathering, Wakayama Prefecture

はじめに

筆者等は、西南日本の各地で、凝灰岩・砂岩・礫岩などからなる急崖に、しばしば楕円形を呈する開口部が存在していることを見いだした(横田・竹原, 2001; 西山ほか, 2004; 横田ほか, 2004). こうした凹部には成因が不明なものも存在するが、以下では、松倉(2008)に従い、タフォニ(tafoni)と呼ぶ。タフォニは一般に楕円形をなし、開口部の径・奥行きともに数 10cm~数 m の大きさである。

既存の研究によれば、タフォニは世界各地の砂漠や海岸によく見られる微地形で、その形成には塩類風化が関与すると見なされている(Goudie and Viles, 1997; 松倉, 2008 など). その分布域は海岸だけではなく、我が国でも海岸から 50km 以上離れた標高 600m の山地にタフォニが形成されている例がある(横田・竹原, 2001; 横山, 2002). メートルオーダーのタフォニが急崖の側壁に形成されている場所では、それより上方が突出したオーバーハング斜面となり、下方斜面には急崖から落下した岩石ブロックが散在することが多い。

また、タフォニと類似した微地形に、波食を受ける海食崖によく見られるノッチ(notch)がある。ノッチ状の地形は海岸に限らず、波食および海水飛沫が及ばない内陸の河谷沿いにも事例が知られているが、その場合はタフォニと同様に塩類風化によると考えられている(松倉, 2008). この種のノッチ上方のオーバーハング岩体が不安定となって崩壊するプロセスの検討も行われている(Matsukura, 1988; Matsukura and Kato, 1997; Matsukura et al, 1996).

しかしながら、日本各地における内陸のタフォニの分布の実態はまだ明らかではなく、個々の形態、形成条件も明確ではない。

そこで、タフォニが形成されている急崖の特定と、タフォニの形成過程の検討、ならびにその結果形成される不安定なオーバーハング斜面の安定性評価を行う必要がある。

紀伊半島南端部、和歌山県古座川地域の急崖にはタフォニが多数形成されており(大橋ほか, 2003), 2002 年には、タフォニが形成されている急崖から約 720 ton の岩塊が落下し、ロックシェッドを直撃する事故が発生した(石田ほか, 2003). このため、和歌山県古座川地域を対象とし、タフォニの分布と形状の把握、ならびにタフォニの形成に影響する岩盤の含水比と強度の測定を行い、タフォニの形成過程に関して若干の検討を行ったので、以下に報告する。

地形・地質概要

対象とした紀伊半島南部の和歌山県古座川地域は、比較的定高性のある丘陵(標高 100~300m)からなる(図 1). 古座川の中流には数段の段丘が発達し、下流では古座川に沿った沖積低地が細長く分布するほか、海岸域にはわずかに海成段丘が分布する(立石ほか, 1979; 前杢・坪野, 1990). 海岸線は比較的単調であるが、那智勝浦町浦神~太地町にかけては、海岸線が西南西に向かって約 2km 湾入した形態をなす。

古座川地域には、基盤岩である四万十帯の付加コンプレックスを覆って、陸棚に堆積した砂岩・泥岩からなる熊野層群(下部中新統)が広く分布する(立石ほか, 1979; 久富, 1981; 久富・三宅, 1981). 古座川下流域には、熊野層群を貫く貫入岩体が細長く分布している(荒牧・羽田, 1965; 立石ほか, 1979; 久富, 1981; 久富・三宅, 1981). この貫入岩体は、紀伊半島南東部に広く分布する熊野酸性岩類の一部であり、熊野酸性岩類の火砕流堆積物を噴出した給源火道

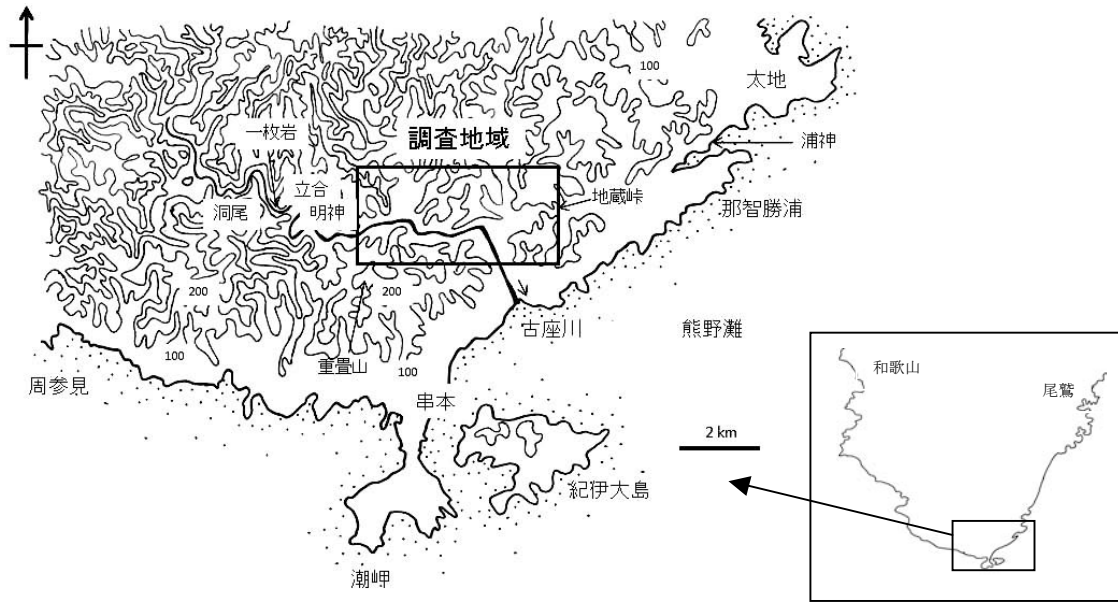


図1 対象とした和歌山県古座川地域の地形概要。等高線間隔は100m。

のひとつと考えられている（荒牧・羽田，1965；Miura, 1999）。古座川地域の貫入岩体は古座川弧状岩脈と呼ばれ，東西約22km，幅0.5～1kmで細長く延びており，全体として南に凸の円弧状を呈する（荒牧・羽田，1965；立石ほか，1979；久富，1981；久富・三宅，1981；Miura, 1999）。岩脈を構成する岩相は，流紋岩質の中粒凝灰岩が約8割を占め，花崗斑岩が約2割である（荒牧・羽田，1965）。花崗斑岩のK-Ar年代は 14.3 ± 0.2 Ma（角井ほか，1998），フィッシュントラック年代は 14.7 ± 0.4 Ma（岩野ほか，2008），凝灰岩のフィッシュントラック年代は 14.6 ± 0.2 Ma（岩野ほか，2008）という値が得られており，いずれも中期中新世の狭いレンジに含まれる。なお，那智勝浦町～太地町にかけて，海岸線が西南西に約2km湾入した形態をなす部分は，古座川弧状岩脈の分布範囲とほぼ一致する。

タフォニ発達地域の岩石

古座川下流域に分布する古座川弧状岩脈

ならびにその周辺の地質図を図2に示す（地質分布は筆者らの調査による）。岩脈は凝灰岩と花崗斑岩とからなり，分布面積は前者が約8割を占める。肉眼観察では，両岩体の境界付近に急冷周縁相は認められず，貫入の前後関係は不明である。凝灰岩は比較的軟質で，全体として節理に乏しい塊状無層理の岩体であり，しばしば高さ10～50mの急崖ないし絶壁をなし，一部はオーバーハングしている。この凝灰岩は径1～2mmの石英や長石の粒子を主体とし，径数mmの小岩片（軽石や堆積岩）を多く含む。一方，花崗斑岩は，岩脈の中部～南端に細長く分布し，径5～10mmの大型の石英と長石を多く含み，数mmの黒雲母を伴う斑状組織を呈する。花崗斑岩は硬質で急崖をなすことが多く，全体として高角の節理面が密に発達した亀裂質の岩盤である。このほか，地質図の範囲より南にある重畳山（図1参照）付近には，北北西～南南東に延びる幅10m程度の石英斑岩の岩脈が存在する。

古座川弧状岩脈をはさんだ両側に分布する熊野層群は，主に砂岩・泥岩およびそ

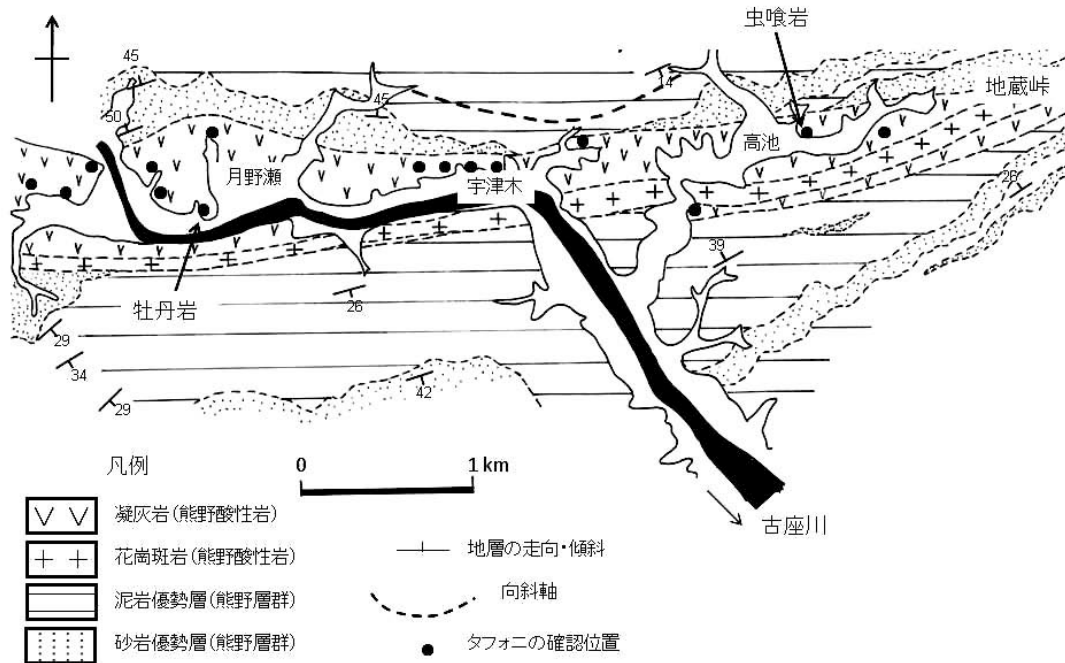


図2 調査地域の地質分布とタフォニの確認位置

これらの互層からなり、北西または南東へ傾斜している。塊状ないし成層した砂岩層もしくは泥岩層が主体であり、砂岩泥岩細互層は少ない。熊野層群には、東北東-西南西方向に褶曲軸を持った緩い褶曲構造が何列か繰り返している。図2で、南東へ流下する古座川の西方と東方とでは傾斜方向が異なり、岩相も連続しないことから、河谷に沿った断層の存在が推定される。岩脈近傍の熊野層群は、接触変成作用により硬化している。また、重畳山周辺でも熊野層群に褐色化や硬化が認められることから、弱い熱水変質作用が及んでいると考えられる。

タフォニの分布

現地調査によって、岩脈の露岩斜面に多くのタフォニを確認した。それらの位置を図2に示す。タフォニが確認されたのは凝灰岩の岩盤表面のみであり、花崗斑岩、な

らびに岩脈周囲の熊野層群には全く確認されなかった。タフォニには、国指定天然記念物の「虫喰岩」(図3)をはじめ、「牡丹岩」(図4)や「古座の一枚岩」(図5、位置は図1)のように、特異な景観を活かした景勝地となっている場所もある。タフォニの分布は、古座川弧状岩脈の凝灰岩分布域に沿って、現海岸線から内陸へ約8km離れた丘陵(古座川町洞尾)にまでわたる。それらの形成場所は、海岸の海食崖、縄文海進時の旧汀線に位置する沖積面付近の急崖の基部、海水飛沫が達しない急崖の中部・頂部など、凝灰岩分布域の全域に及んでおり、分布標高は0~約100mに及ぶ。すなわち、特定の地形場や標高に集中する傾向は認められない。タフォニの開口方位は、南向きの斜面に卓越する。また、急崖直下にはしばしば径数mにも達する凝灰岩の落石ブロックが分布し、これらの表面にもタフォニやハニカムが形成されていることが多い。



図3 天然記念物・虫喰岩の全景. 高さ約30m.



図4 牡丹岩の全景. 高さ約25m.

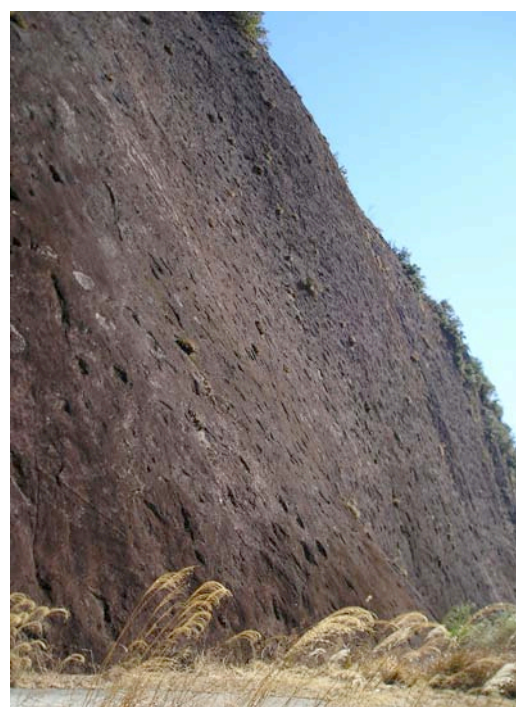


図5 一枚岩の全景. 高さ約60m.

タフォニの形態

いくつかのタフォニについて、タフォニの開口部の長径・短径・奥行き、開口方位などの形状指標を計測し、内部のハニカム、内壁の形状、析出物・剥離物等の有無を調査した。一方、タフォニが多数形成されている急崖については、レーザー距離計を用いた断面測量を行った。用いたレーザー距離計はノンプリズムレーザー距離計インパルス 200（レーザーテクノロジー社）である。

代表的なタフォニが観察できる虫喰岩で行った急崖の地形測量結果を図 6 に示す。虫喰岩は、高さ 30m ほどのほぼ直立した岩壁の表面に、径数 m 程度のタフォニが多数開口して連結した形態をなす。岩盤面の向きは南南東である。タフォニの内壁には無数のハニカムが形成されている。急崖の下端部は沖積面（標高約 15m）であり、急崖直下の沖積面には径 1m 程度の落石が散在する。急崖の地形測量の結果、3 箇所の突出したオーバーハング部が存在する。この部分の水平方向への突出量は 2~3m にも達し、開口部は「ひさし (visor)」状に近い形状をなす。オーバーハング部は、その斜め上方に向かって深く凹んだ形状をなす。内壁には、径数 10cm 以下・深さ 10cm 以下の楕円形をなすハニカムが無数に形成されている。内壁の一部にはしばしば白色の析出物が認められるほか、コケ類が付着した場所もある。白色の析出物が認められる内壁の一部は、厚さ数 mm の板状をなして剥離しつつある。また、タフォニの下端付近のほぼ水平の岩盤上面には、内壁から剥離した砂サイズの堆積物 (rock meal) が薄く堆積している。

牡丹岩の地形測量結果を図 7 に示す。タフォニが形成されているのは比高 25m を越える露岩からなる急崖で、下端部の標高は

約 10m の沖積面で、岩盤面の向きはほぼ南である。急崖下端から比高 15m 付近に突出したオーバーハング部があり、ここより斜面下端に至る広い範囲がタフォニの開口部となっている。虫喰岩と同様に、この突出したオーバーハング部の斜め上方が最も深く凹んでいる。オーバーハング部の水平方向への突出量は 3m ほどである。タフォニ内壁の全域にわたって、径数 10cm 以下・深さ 10cm 以下の楕円形をなすハニカムが無数に形成されている。内壁表面に白色の付着物が認められる場所があり、一部ではコケ類も付着している。白色の付着物が認められる内壁の一部は、厚さ数 mm の板状をなして剥離しつつある。急崖基部の岩盤の上面には、内壁から剥離した砂サイズの堆積物が薄く堆積している。

以上のように、大規模なタフォニは、比高 30m 程度の急崖をなす露岩のほぼ全面にわたって、径数 m の孔が無数に開口・連結した形態をなし、孔の上方はオーバーハングしている。個々のタフォニには、開口部の上部に「ひさし」状の突出部、タフォニの基部にはほぼ水平な床部、内壁には無数のハニカムが、それぞれ形成されている。内壁の一部には白色の析出物、その周囲では岩盤表面の剥離、タフォニ基部では剥離物の堆積が、それぞれ認められる。また、タフォニを伴う急崖の基部には、径 1m 程度の落石ブロックが散在する。

タフォニ内壁の強度と含水比の測定

タフォニは、一般には塩類風化による岩石表面の劣化・破壊により成長していくと考えられている (Goudie and Viles, 1997 ; 松倉, 2008)。当地域でも、タフォニ内壁で観察された白色の析出物とその周囲の岩盤の剥離から、塩類風化の進行が考え得る。そこで、いくつかのタフォニの内壁を構成す

和歌山県に分布する中新世凝灰岩の急崖に発達するタフォニの分布と形状

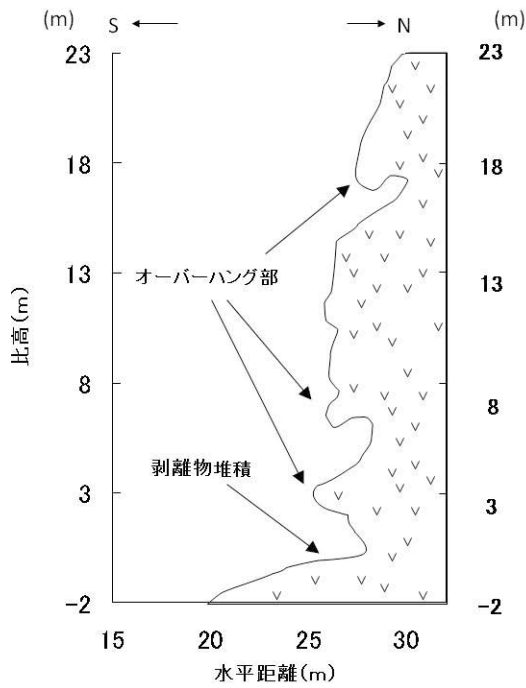


図6 虫喰岩の地形測量結果

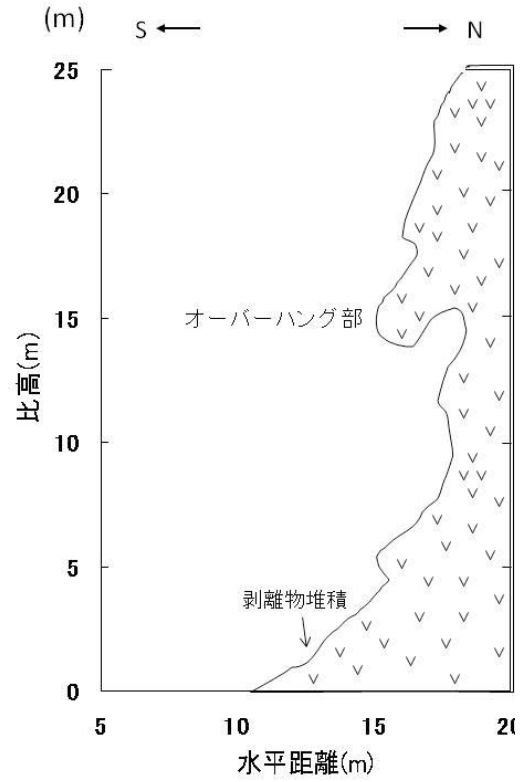


図7 牡丹岩の地形測量結果

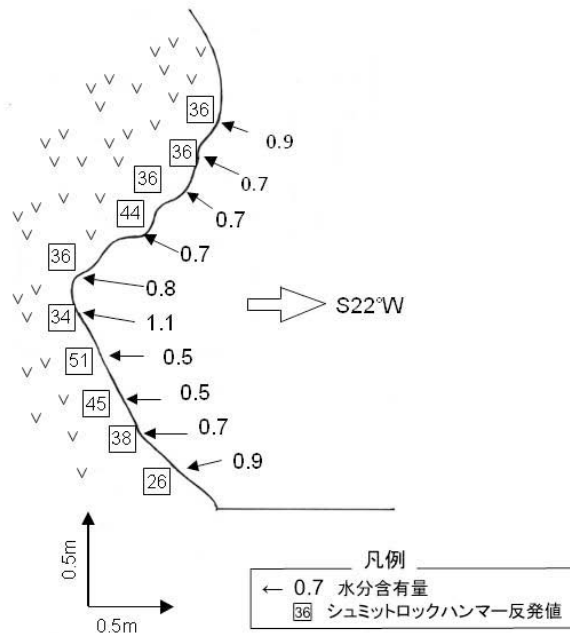


図8 虫喰岩側部におけるタフォニの形態と、強度・水分含有量

る岩石表面の強度（硬さ）と水分含有量を調べた。すなわち、シュミットハンマーによる反発度（ R 値）測定を行うとともに、携帯型赤外線水分計（KJT-100, JT 製）による計測から含水比（ w 値, %）を計算した。 R 値の計測は、岩盤表面を 1 回打撃し、打撃位置をずらしながら測定する単打法（松倉・青木, 2005）による。 w 値は、水分計を岩盤表面に当てて求めた吸光度を含水比に換算したものである（Matsukura and Takahashi, 1999）。これは、照射した赤外線が水分子に吸収される性質を用いて、物質表面の赤外線吸光度を非破壊で測定するもので、得られる吸光度の大小は水分量の大小を表す。この吸光度を、一般に用いられる岩石物性値である含水比（%）に換算した。この換算のために採取した 6 試料の凝灰岩の有効間隙率（すなわち飽和含水比）は 5.6~11.8（%）である。強度と赤外線水分計による測定は、いずれも晴天時の日中に行った。両者の測定は、節理面を避け、平滑な岩盤表面で実施した。両者の測定は基本的に同じ場所で両方行ったが、赤外線水分計の計測のみの箇所がある。

虫喰岩の側方の小規模なタフォニ内壁で実施した測定結果を図 8 に示す。急崖下端付近に形成されている小規模なタフォニであり、ほぼ鉛直の岩盤表面から約 0.5m 凹んだ形状をなす。開口部の方位は S22°W である。シュミットハンマーによる強度（ R 値）は 26~51 の範囲にあり、タフォニの基部付近で最低値 26、その上方で最大値 51 となる。タフォニの凹んだ部分では 34~36 と低めである。一方、赤外線吸光度から求めた含水比 w は、タフォニ内壁の R 値 34 となった凹部で、最大値 1.1（%）とやや高く、それ以外の箇所では 0.5~0.9（%）と低い。

牡丹岩の側部に形成されている径 1m 程度の小規模なタフォニの含水比と強度の測定結果を図 9 に示す。ほぼ鉛直をなす平滑

な岩盤表面を基準として、タフォニの深さをポールとメジャーで計測した結果をコンター図として併記した。測定間隔は 20cm、コンター間隔は 10cm である。タフォニの平面形はやや縦長で、下部ほど深く凹んでいる。一方、断面では、タフォニ上端に「ひさし状」の突出部が認められ、その斜め上方が深く凹んだ形状をなす。一方、最も凹んだタフォニ下端部の直下は、水平に近い「床状」をなす。シュミットハンマーによる強度値（ R 値）と、赤外線水分計に基づく含水比（ w 値）の結果は、 R 値は 17~34 の範囲をとり、タフォニ内の中部付近で最低値 17、タフォニ上端の凹部付近で最大値 36 となる。一方、 w 値は、ひさし状突出部の裏側（凹部）で最大値 1.7、タフォニ下部の凹部で 1.6 と高く、タフォニ内部では 1.3 程度、タフォニ下方では 1.1 と低い。

図 2 の地質図外の丘陵斜面に分布するタフォニ（古座川町地蔵峠, 位置は図 1 参照。標高約 55m）で計測した結果を図 10 に示す。道路脇の南東向きの露岩に開口した横長の楕円形を呈するタフォニであり、横幅 6.0m、高さ 4.0m、奥行き 1.5m に達する。タフォニ上端付近に「ひさし状」突出部があり、その斜め上方が凹んだ形状をなす。このタフォニ内部では w 値の計測だけを実施した。その結果、 w 値は 1.4~2.9（%）と全体に高く、タフォニ中部付近で最大値をとる。

海水飛沫を日常的に受ける海食崖に形成されているタフォニの例として、那智勝浦町浦神（位置は図 1 参照）で計測した結果を図 11 に示す。このタフォニは、比高 3m 程度の南東向きの海食崖に開口しており、タフォニの直下は離水した波食棚に連続する。タフォニの外形は、横幅 2.0m、高さ 1.0m、奥行き 1.4m である。タフォニ上端には高角度の開口亀裂が存在し、亀裂に沿った凹部が形成されている。タフォニ下部は比較的平滑であり、天井部から剥離した岩石片が

和歌山県に分布する中新世凝灰岩の急崖に発達するタフォニの分布と形状

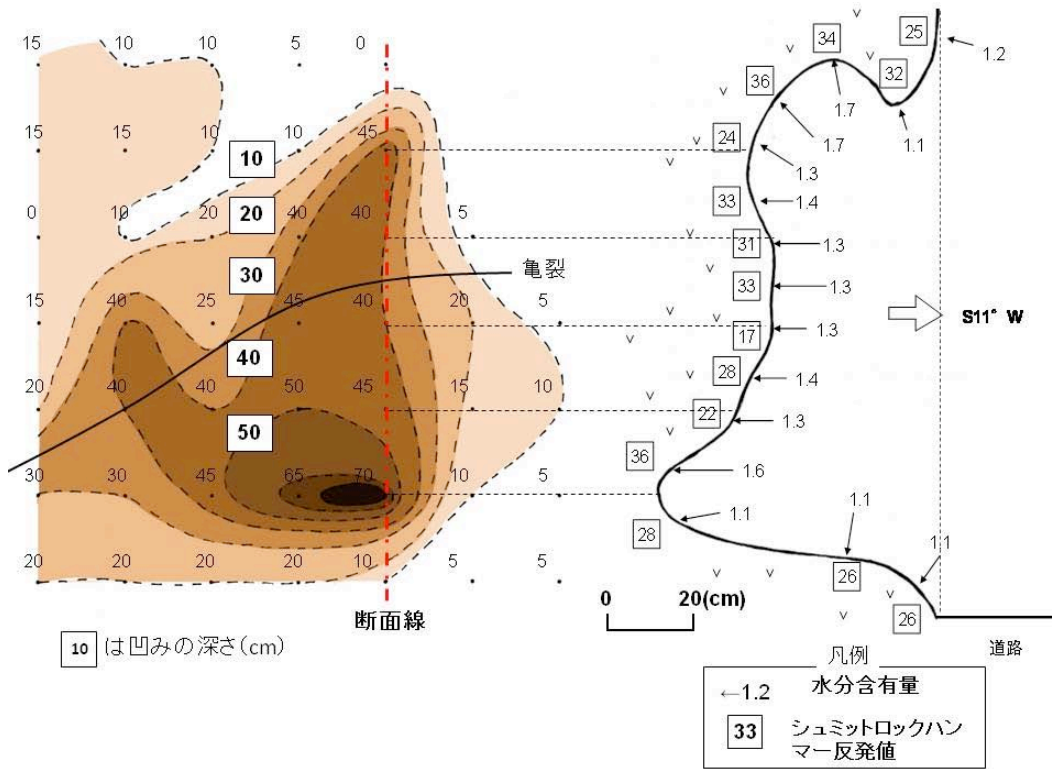


図9 牡丹岩側方のタフォニの形態と強度・水分含有量. 左は凹みの深さを10cm 間隔のコンターで表したものの. 右はその断面形.

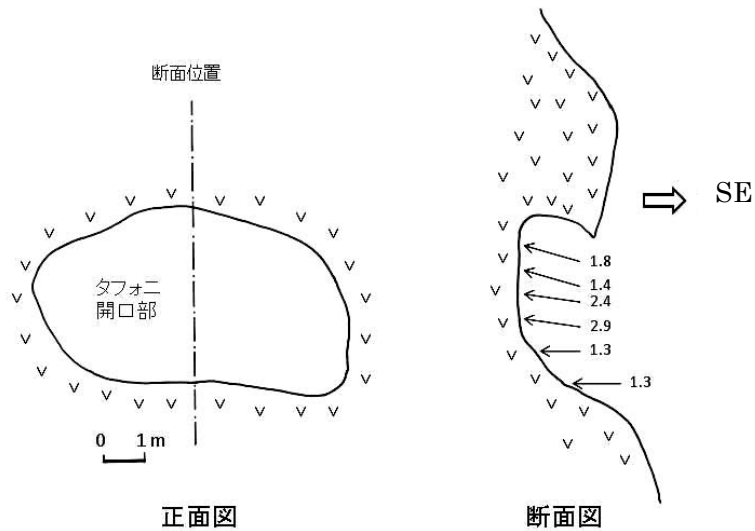


図10 丘陵の露岩(地蔵峠, 標高 55m)に見られるタフォニの形態と水分含有量. 断面の数値は含水比(%), スケールは左右同じ.

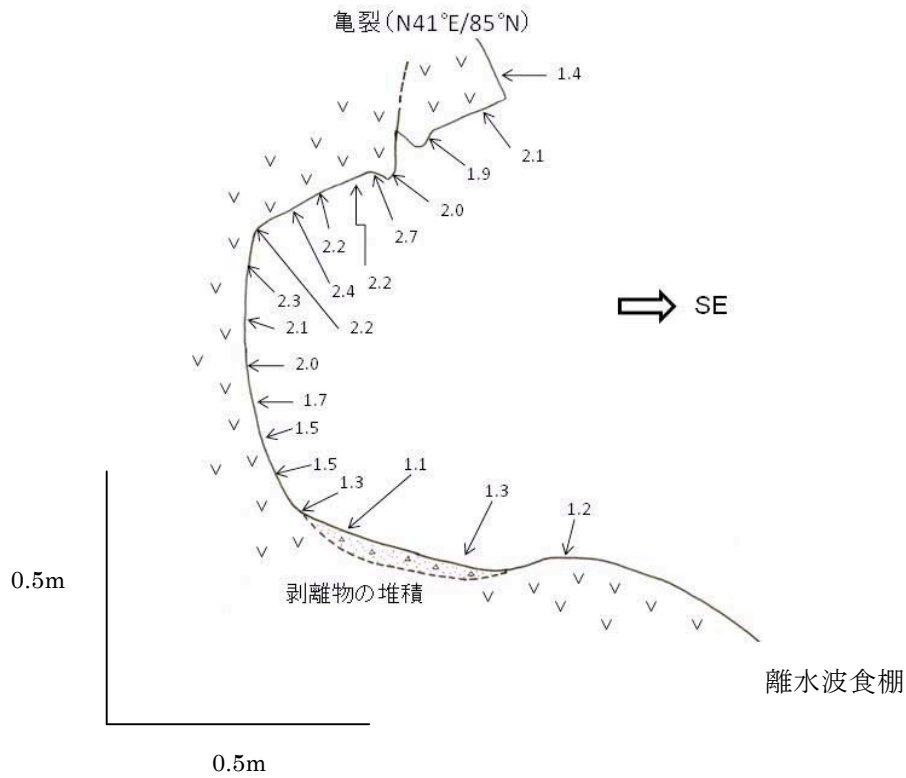


図 11 海食崖に発達するタフォニの形態と水分含有率（那智勝浦町浦神）.

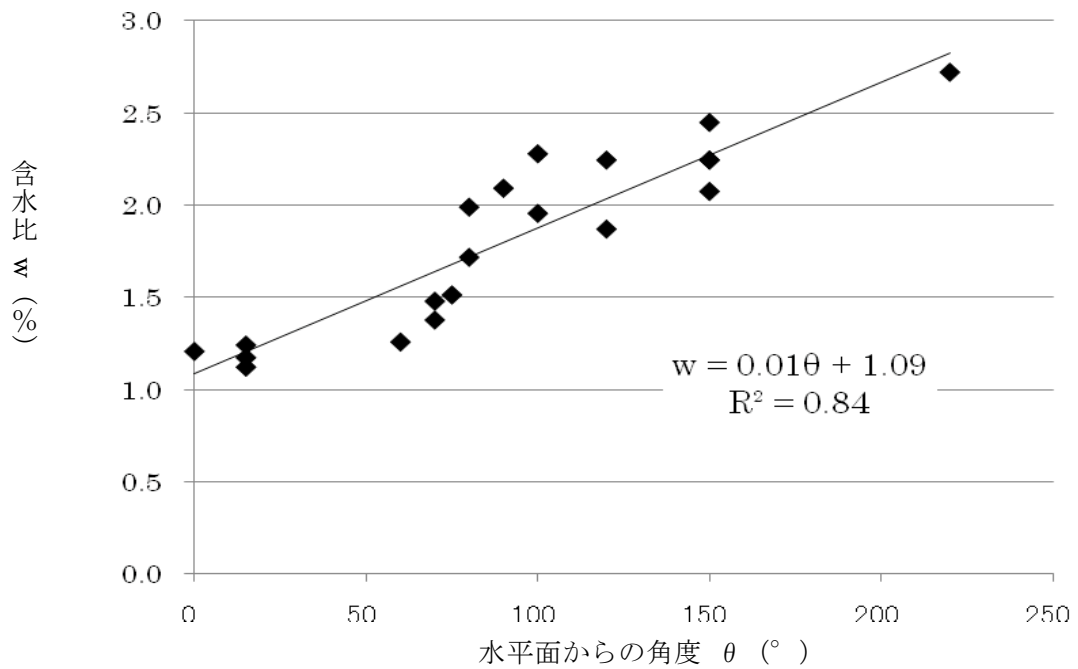


図 12 タフォニ内壁の水平面からの角度と水分含有量の関係. 測定面は水平を 0° , 水平の天井を 180° とする. 180° 以上はオーバーハング部である.

厚さ数 cm 堆積している。このタフォニ内部では w 値の計測だけを実施した。その結果、 w 値は 1.1~2.7 (%) となり、タフォニの凹部~上端にかけて 2%程度の高い値をとり、下端部は 1%程度と低い。

このようなタフォニ内部の含水比の変化は、タフォニ内壁に達する直達日射量に大きく影響することが予想される。そこで、水分を計測した内壁面の水平面からの角度 θ (°) と、含水比 w (%) との関係について整理した。タフォニ外部から内部へ向かう水平方向を 0°とし、内壁面の南傾斜角を正として表示したもので、180°以上はオーバーハング部である。結果を図 12 に示す。タフォニの天井は 180°、「ひさし状」突出部の裏側は最大で 220°に達する。図のように、両者にはある程度の相関があり、最も決定係数が高かった一次式では次のように表せる。

$$w = 0.01\theta + 1.09, R^2 = 0.84$$

(R^2 は決定係数) . . . (1)

すなわち、タフォニの天井~ひさしの裏側で含水比がやや大きい。

以上のように、当地域の複数のタフォニにおける計測結果はいずれも類似しており、タフォニの凹部では強度がやや低く、含水比がやや高い傾向が認められることから、これらはタフォニの形成に密接に関連する岩石物性といえる。

タフォニの形成に及ぼす 塩類風化の影響

今回計測したタフォニの形状は、タフォニ上端に「ひさし状」の突出部が、下端部に「床状」の緩斜面が、それぞれ形成されていることが多い。この形態は、熊本県天草地域・島根県大田地域の砂岩(横田ほか、

2004)をはじめ、韓国の花崗岩(松倉・田中, 1999)や、世界各地のタフォニ(Goudie and Viles, 1997)と類似している。これらのタフォニでは、内壁に石膏などの塩類が析出し、内壁の剥離が進行している例があることから、塩類の結晶成長圧力による岩盤表面の劣化・剥離の継続による孔の拡大(塩類風化)が、タフォニの成長に関与すると考えられている(Goudie and Viles, 1997; 松倉, 2008)。今回検討したタフォニ内壁でも、しばしば白色の析出物が観察されたものの、析出量が微量であったため、予察的に実施した X 線回折分析では鉱物種が特定できなかった。しかし、形状の類似性に加えて、内壁に白色の析出物と剥離物が見られることも他地域のタフォニと共通していることから、当地域のタフォニの形成にも塩類風化が関与するとともに、タフォニは現在も成長しているとみてよいであろう。

塩類風化をもたらす塩類の供給源を検討する。海岸域の露岩には日常的に海水飛沫が達するため、日射などによる乾燥に伴って海塩が結晶として岩盤表面に析出し、その際の結晶成長圧力がタフォニ形成に関与すると考えられる(Matsukura and Matsuoka, 1996)。今回の調査地域では、海食崖のタフォニ(那智勝浦町浦神)がこの条件を満たす。これに関して、那智勝浦町付近の海岸線が約 2km にわたって湾入した形態を示す(図 1)ことは、凝灰岩が海水飛沫による塩類風化を受けやすく、侵食に対する抵抗性が小さいことを示す。一方、他のタフォニは海岸線から 2~8km ほど内陸に分布し、かつ、分布標高も 10~100m の範囲に及ぶことから、縄文海進時の旧汀線に位置していた沖積面付近のタフォニを除けば、日常的な海水飛沫を受けた履歴はないと考えられる。ただし、台風などの暴浪時には、海塩が飛沫として内陸へ供給されることは考え得る。例えば、日本各地に暴風被害をも

たらした 1991 年台風 19 号では、平均風速 25~35m の暴風により、広島県の沿岸では $0.3\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度、海岸から 5~10km 離れた内陸では $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度の塩分が地表に降下したと推定されている(田中・鳥羽, 1993)。

一方、海岸から数 10km 離れた内陸の山地に分布する海成砂岩にもタフォニが形成されている例が複数報告され(横田・竹原, 2001; 横山, 2002), タフォニの内壁に石膏が析出している例もある(横田ほか, 2004)。この場合、海成砂岩に普遍的に含まれる微細な黄鉄鉱の酸化分解と、それに起因する石膏の結晶成長圧による塩類風化が考え得る。今回対象とした凝灰岩中の硫化鉱物の同定はできていないが、(1) 鏡下観察では、凝灰岩の基質に微細な塊状の不透明鉱物が多く含まれること、(2) 古座川弧状岩脈に沿った四万十帯の堆積岩類に熱水変質帯が形成されており、黄鉄鉱・黄銅鉱などを含む複数の割れ目充填鉱床が存在すること(立石ほか, 1979)、(3) 岩脈周囲の熊野層群の一部にも、熱水変質によると思われる変色と硬化が認められること、などから、熊野酸性岩の火成活動・熱水変質に伴う黄鉄鉱が凝灰岩に含まれる可能性が高い。したがって、塩類風化をもたらす塩の供給源は、凝灰岩中の黄鉄鉱の酸化分解とともに、暴風時の海塩も考えられる。前者であれば、タフォニは海岸とは無関係に形成されうる。

タフォニ形成に及ぼす水分含有状態と強度の影響

タフォニ形成に及ぼす岩石物性について検討する。タフォニの天井部は概してやや高い含水状態であり、かつ岩石表面の強度がやや低い場合が多い。この部分では岩石表面で構成粒子が分離している箇所があり、肉眼でも強度低下が推定できる。強度低下は高含水状態と対応していることから、

両者が岩石の風化と密接に関連すると考えてよいであろう。天井部の高含水状態は、急崖を構成する上部の岩体中を浸透した水が天井部分から浸出したものと考えられる。また、那智勝浦町浦神でのタフォニ内壁における含水比の変化パターン(図 13)は、タフォニ内壁への直達日射による岩盤表面の乾燥・水分蒸発の受けやすさを反映したものと考えられる。したがって、タフォニの凹部は、塩類風化による強度低下が最も進行していると考えられる。

塩類が析出するには、まわりの湿度が塩類の平衡相対湿度よりも低くなることが必要とされており(朽津ほか, 2003)、高含水状態にある岩盤表面周囲の湿度低下と、それに伴う蒸発の促進が塩類風化の進行に関与すると考えられる。日本の場合、冬~春の乾燥した気候条件下で塩類の析出が進行し、春に生じる塩類の潮解に伴って岩盤表面の剥離が進行する事例が知られている(朽津・尾崎, 1999; 堀口ほか, 2000; 川野・小坂, 2002)。このことから、熊野酸性岩でも、タフォニ内壁の高含水状態の岩盤表面において、湿度が顕著に低下する冬~春に塩類が析出し、春の塩類潮解に伴って岩盤表面の剥離が進行した結果、岩石強度の低下に至ったものと考えられる。

今回の検討では、塊状の凝灰岩斜面にタフォニが形成されていく過程の詳細は明らかではないが、次のようなプロセスが考えられる。すなわち、凝灰岩は節理に乏しい塊状無層理の岩体からなるが、しばしば径 1cm 以下の岩片を含んでいる。この種の岩片が岩盤表面から脱落した小孔などがきっかけとなり、孔に浸透水が集中するなどにより塩類風化が進行し、凹部が拡大した可能性がある。したがって、強度・透水性・スレーキング特性などが異なる岩石が累積する砂岩泥岩互層によく見られる差別侵食地形とは異なる風化プロセスといえよう。

なお、古座川弧状岩脈のうち、凝灰岩だけにタフォニが形成されており、同一のマグマに由来する花崗斑岩には全く形成されていない。このことは、今回調査した古座川地域に限らず、予察的に調査した三重県熊野地域に広く分布する熊野酸性岩主部を構成する凝灰岩と花崗斑岩でも同様となった。すなわち、熊野地域でもタフォニは凝灰岩のみに形成され、分布範囲は海岸線～内陸約 3km、分布標高は 5m（熊野市木本）～約 450m（熊野市札立峠付近）の範囲に及ぶ。海塩の供給条件ならびに硫化鉱物の含有は、同一地域に分布し、同一マグマに由来する両者で異なるとは考えにくいことから、凝灰岩のみにタフォニが形成される原因は、両者の引張強度・間隙径分布・亀裂密度などの岩石物性の差に関連すると考えられる。

タフォニを伴うオーバーハングした急崖の不安定化

急崖に形成されたタフォニのうち、奥行きが 1m を越える部分には突出したオーバーハング斜面が形成されていることが多く（図 13）、この種の急崖の下方には、径数 m もの岩塊が点在している（図 14）。したがって、急崖でのタフォニの成長がオーバーハング斜面の形成につながり、ひいては急崖での岩盤崩壊の発生に影響することが考え得る。2002 年 1 月に発生した岩盤崩壊は、古座川町立合の古座川沿いの攻撃斜面で発生したもので、日雨量 157mm、最大時間雨量 39mm の大雨の後、高さ 20m、幅 6m、奥行き 4m の岩塊（約 720ton）が、タフォニを伴う急崖から落下してロックシェッドを直撃した（石田ほか、2003；図 15）。古座川地域は、21 世紀前半に発生が予測されている南海・東南海地震の震源域に隣接することから、岩盤崩壊危険箇所を事前に抽出

することが必要である。

タフォニの一部では、内壁の上端付近に、図 16 のような開口クラックが認められる場所がある。同様の例は、那智勝浦町浦神のタフォニでも小規模ながら認められる（図 11）。この種の開口クラックの形成には、オーバーハング部の突出がある程度大きくなるが必要であり、タフォニの成長・拡大につれて転倒モーメントが増大し、岩石の引張強度を上回ると突出部の背面に引張クラックが形成されると考えられる（図 17）。このため、突出部の背面に引張クラックが形成されている部分が、特に岩盤崩壊の危険性が高い場所といえる。しかし、現地調査でこの種のクラック分布を把握することは容易ではない。

一方、それ以外の斜面での長期的な不安定化を評価するためには、岩石・岩盤の引張強度と、タフォニの成長速度を求める必要がある。タフォニの成長速度はこれまでにいくつか推定されており、1m オーダーのタフォニの成長に要する時間は、海岸でも内陸でも大差はなく、 $10^2 \sim 10^4$ 年のオーダーである（Matsukura and Matsuoka, 1991, 1996；Sunamura, 1996；Matsukura et al., 1999；池田, 2001；Thomas, 2002）。したがって、個々のタフォニの成長・拡大に伴う急崖の不安定化は、上記の時間スケールで進んでいくと考えられる。こうして形成された不安定な突出部の背面に引張クラックが生じ、それに沿って岩塊が落下する。その後、平滑な岩盤表面に再びタフォニの開口・成長が始まり、孔の拡大により不安定部分が形成され、同様の崩壊を繰り返すことになる。従って、長期的に見た岩盤斜面の後退速度は、塩類風化によるタフォニの発達速度と、新たに生じる引張クラックの間隔に規制される。これらの値を具体的に推定できれば、こうした斜面の不安定性評価に取り入れることができる。

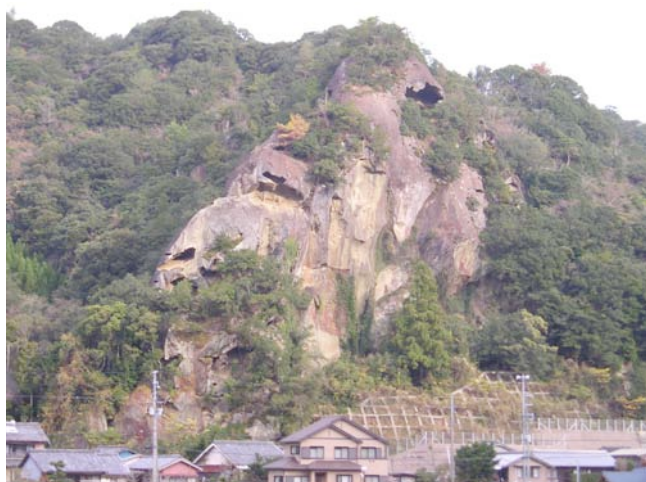


図 13 集落背後の急崖に形成されているタフォニ（古座川町明神）



図 14 タフォニを伴う急崖直下に分布する落石ブロック（古座川町宇津木）



図 15 ロックシェッドを直撃した岩塊（古座川町立合，2002年11月撮影）．左：ロックシェッド部分，右：上方の急崖部分．



図 16 タフォニ内壁の上端に見られる開口クラック（牡丹岩）

まとめ

急崖に分布するタフォニの分布と形状を把握するとともに、タフォニ内壁の含水比と強度の測定を行い、タフォニの形成過程に関して若干の検討を行った。対象とした和歌山県古座川地域では、古座川弧状岩脈の凝灰岩のみにタフォニが形成されており、同一のマグマ由来する花崗斑岩には確認されなかった。凝灰岩は節理に乏しい塊状無層理の岩体であり、形成されているタフォニの形態はいずれも類似している。すなわち、比高数 10m の露岩からなる急崖表面にタフォニが多数形成されており、しばしば数 m も突出したオーバーハング部が形成され、急崖下端には落石ブロックが散在することが多い。タフォニ内壁には白色の析出物が、タフォニ下部には剥離物の堆積が認められる。タフォニ内壁での強度および含水比の計測に基づけば、内壁は相対的にやや含水比が高く、かつ、やや強度が低いことが多い。このことは、岩盤表面からの

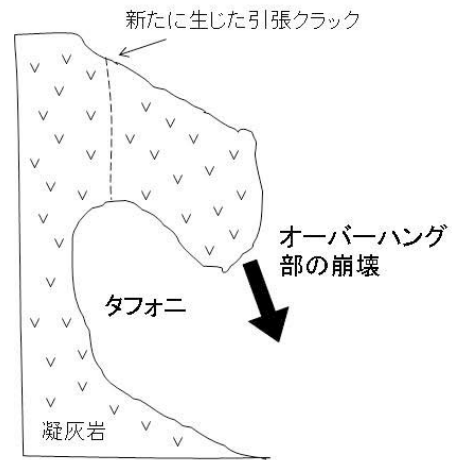


図 17 タフォニの成長・拡大に伴う岩盤崩壊の発生プロセス

水分の蒸発と、それに伴う塩類の析出による強度低下の進行を示唆する。塩類風化をもたらす塩の供給源としては、凝灰岩に含まれる黄鉄鉱の酸化分解とともに、暴風時の海塩も考えられる。

タフォニは急崖に突出したオーバーハング部を形成しやすいこと、また、タフォニ内壁上部には引張クラックが形成されている場所があることから、地震などを誘因とする岩盤崩壊の発生が懸念される。こういった不安定なオーバーハング部は、2002年に発生した岩盤崩壊事故と同様の崩壊を今後も起こす可能性がある。特に、タフォニ内壁の上端に引張クラックが生じている斜面は要注意である。長期的に見た岩盤斜面の後退速度は、塩類風化などによるタフォニの発達速度と、新たに生じる引張クラックの間隔に規制されることになる。これらの値を具体的に推定できれば、こうした斜面の不安定性評価に取り入れることができるであろう。

謝辞 筑波大学の松倉公憲教授，大阪経済法科大学の大橋 健教授には，熊野地域のタフォニの分布についてご教示いただいた。電力中央研究所の三浦大助博士には，熊野酸性岩の地質に関してご教示いただいた。徳島大学の村田明広教授には，査読者として多くの貴重なご意見をいただいた。以上の方々に記してお礼申し上げます。

文献

- 荒牧重雄・羽田 忍，1965，熊野酸性火成岩類の中部および南部の地質。地質学雑誌，**71**，494-512。
- Goudie, A. and Viles, H., 1997, Salt Weathering Hazards. *John Wiley and sons*, 241p.
- 久富邦彦，1981，紀伊半島東南部の熊野層群の地質と堆積。地質学雑誌，**87**，157-174。
- 久富邦彦・三宅康幸，1981，紀伊半島・潮岬地域の隆起運動と火成活動。地質学雑誌，**87**，629-639。
- 堀口隆士・中田正隆・鹿園直建・本間久英，2000，凝灰岩表面での塩類集積現象にみられるアルノーゲンの産状および生成過程—埼玉県吉見丘陵を例として—。鉱物学雑誌，**29**，3-16。
- 池田 碩，2001，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，**30**，83-96。
- 石田勇人・藤原啓一・守随治雄，2003，和歌山県古座川町におけるロックシェッドを直撃した岩盤崩壊についての災害事例報告。第42回日本地すべり学会研究発表会講演集，37-40。
- 岩野英樹・檀原 徹・星 博幸・川上 裕・角井朝昭・新正裕尚・和田穰隆，2008，ジルコンのフィッシュトラック年代と特徴からみた室生火砕流堆積物と熊野酸性岩類の同時性と類似性。地質学雑誌，**113**，326-339。
- 川野辰康・小坂和夫，2002，中世石窟遺構の塩類風化—鎌倉のやぐらの例—。応用地質，**43**，124-133。
- 朽津信明・尾崎哲二，1999，史跡・吉見百穴における蒸発岩。地質学雑誌，**105**，266-272。
- 朽津信明・高 東亮・秋山純子・森井順之，2003，鎌倉のやぐらに見る凝灰質砂岩の風化とそれに与える温度・湿度の影響。地形，**24**，169-181。
- 前杵英明・坪野賢一郎，1990，紀伊半島南部の完新世地殻変動。地学雑誌，**99**，349-369。
- Matsukura, Y., 1988, Cliff instability in pumice flow deposits due to notch formation on the Asama mountain slope, Japan. *Z. Geomorph. N.F.*, **32**, 118-124.
- 松倉公憲，2008，地形変化の科学。朝倉書店，242p。
- 松倉公憲・青木 久，2005，シュミットハンマー：地形学における使用例と使用方法にまつわる諸問題。地形，**25**，175-196。
- Matsukura, Y. and Kato M., 1997, Notch formation due to salt fretting on valley cliffs in an inland region of Japan. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Tsukuba*, **23**, 7-10.
- Matsukura, Y., Kondo, M. and Takaya, Y., 1996, Salt fretting on the valley cliff at To-no-hetsuri, Aizu region. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Tsukuba*, **22**, 21-24.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N., 1991, Rate of tafoni weathering on uplifted shore platforms in Nojima-Zaki, Boso Peninsula, Japan. *Earth Surf. Processes Landf.*, **16**, 51-56.
- Matsukura, Y. and Matsuoka, N., 1996, The effect of rock properties on rates of tafoni growth in coastal environments. *Z. Geomorph. N. F.*, **106**, 57-72.
- Matsukura, Y. and Takahashi, K., 1999, A new technique for rapid and non-destructive measurement of rock-surface moisture

- content: preliminary application to weathering studies of sandstone blocks. *Engineering Geology*, **55**, 113-120.
- 松倉公憲・田中幸哉, 1999, 韓国, 徳崇山の花崗岩トアに発達するタフォニやナマの形成・拡大に関する岩石強度と含水比. *地学雑誌*, **108**, 1-17.
- Mastukura, Y., Waragai, T. and Oguchi, C., 1999, Estimation of growth rates of coastal tafoni in tuff at Oku-Matsushima. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Tsukuba*, **25**, 19-22.
- Miura, D., 1999, Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumano caldera, Southwest Honshu, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **92**, 271-294.
- 西山賢一・横田修一郎・菅原大介・長谷川修一, 2004, 中新世凝灰角礫岩斜面に発達するタフォニ・ノッチの特徴と岩盤崩落. 地球惑星科学関連学会合同大会 2004年合同大会要旨 (CD-ROM).
- 大橋 健・在仲 勤・沢 勲, 2003, 紀伊半島, 古座川流域のタフォニ (風化洞窟) の特質とその形成. *大阪経法大学論集*, **85**, 37-65.
- 角井朝昭・内海 茂・新正裕尚・下田 玄, 1998, K-Ar 法による熊野酸性火成岩類の年代の再検討. *地質学雑誌*, **104**, 387-394.
- Sunamura, T., 1996, A physical model for the rate of coastal tafoni development, *Jour. of Geology*, **104**, 741-748.
- 田中正昭・鳥羽良明, 1993, 台風 9119 号による塩害と内陸への塩分供給量について. *京都大学防災研究所年報*, **36B**, 103-119.
- 立石雅昭・別所考範・原田哲朗・久富邦彦・井内美郎・石上知良・公文富士夫・中屋志津男・坂本隆彦・鈴木博之・徳岡孝夫, 1979, 江住地域の地質. *地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)*, 地質調査所, 65p.
- Thomas, R.T., 2002, Sandstone weathering and aspect in Petra, Jordan. *Z. Geomorph. N. F.*, **46**, 1-17.
- 横田修一郎・増本 清・西山賢一, 2004, 岩盤崩落予測に向けた急崖露岩の風化プロセス研究. 文科省科学研究費補助金 (基盤研究(B)(2))研究成果報告書, 58p.
- 横田修一郎・竹原和也, 2001, 島根県大田市の砂岩斜面に見られるタフォニとオーバーハング斜面の形成. *日本応用地質学会中国四国支部平成 13 年度研究発表会論文集*, 75-80.
- 横山勝三, 2002, 熊本県下のタフォニ. *熊本地学会誌*, **132**, 22.

原稿受付 : 2009 年 9 月 16 日

改訂論文受付 : 2009 年 9 月 27 日

論文受理 : 2009 年 9 月 28 日