

# P-1. レーザースキャナで得られたタフォニ急崖の微地形

## Detail concave-convex structures on steep slope related to tafoni developments by laser scanner survey

坂田聖二・横田修一郎（島根大学） 佐名木哲二（大隆設計）

Seiji SAKATA and Shuichiro YOKOTA(Shimane Univ.) Tetsuji SANAKI (Dairyu Sekkei Co.)

### 1. はじめに

急崖を不安定化させる地形的素因の 1 つにタフォニ (tafoni) による凹凸が挙げられる。急崖に形成されるタフォニの拡大に伴って急崖の凹みは深くなり、上部にオーバーハング部が形成される。これは重力下で不安定であるため、地震動などによってやがて崩落する<sup>1)</sup>。このため、塩類風化によるタフォニは急崖の不安定化・崩落の発生という点から注目されるようになってきた<sup>2)</sup>。しかし、それらは比高の高い急崖にみられることが多いうえ、複雑な形状をもった様々な大きさのタフォニが無数に分布するため、調査は困難なことが多い。このため、いまだタフォニの拡大過程や上部オーバーハング部崩落の機構解明の基礎となる正確な形状把握にいたっていない。

調査の困難な急崖での斜面地形の計測事例として、北海道層雲峡の柱状節理の詳細な形態をレーザースキャナ測量によって得た例があるが<sup>3)</sup>、こうした手法は上記のタフォニ急崖でも有効であろう。そこで、今回数多くのタフォニが確認されている島根県大田市の五十猛海岸と鬼岩の 2 地点 (図-1) の新第三系火砕岩急崖を対象としてレーザースキャナ測量を実施し、タフォニを含めた急崖の詳細な 3 次元的形状を得た。これによって個々のタフォニの詳細な形状、急崖全体におけるそれらの分布、相互関係など、タフォニの拡大過程や急崖の後退過程などの検討が可能になった。

### 2. 複雑な形状で密集して分布するタフォニ

急崖に形成されたタフォニの例として、今回対象とした五十猛海岸の急崖のものを示す (図-2)。これは海に突出した標高約 18m のやせ尾根の西側側面であり、火山礫凝灰岩で構成されている。周囲はほぼ全面が露岩で急傾斜しており、急崖のいたるところにタフォニが形成されている。大きさは幅 10cm 程度のものから幅 10m 近くに及び、円形のもの、縦長のもの、半月型をなすものなど様々である。また巨大なタフォニの直下には巨転石の散在しており、タフォニの拡大による上部オーバーハング部の崩落を裏付けている<sup>4)</sup>。また、タフォニ内の露岩表面にて gypsum などの塩類の析出が確認でき、塩類風化がタフォニの発生・成長の主要因であることを物語っている。

### 3. レーザースキャナ測量で得た急崖上の詳細な凹凸

測量にはライカ・ジオシステムズ社製の HDS3000 を用いた。これは測定対象物の表面にレーザーを照射し、戻ってくるまでの時間を距離に換算して計測を行うものであり、計測速度は 1800 ポイント/秒で、最低 1mm の間隔で測量データを取得することができる。位置精度は 6mm、距離制度は 4mm である。計測はメッシュ間隔数 cm で実施している。レーザースキャナ測量では植生のあるところも計測することができるが、この部分は結局ノイズとなってしまう。今回、その部分はデータの内挿をせず、データなし(No data)として表現した。また、識別したタフォニには色を付けて表現してある。



図-1 レーザースキャナ測量をした急崖の位置（島根県大田市）． 図-2 五十猛海岸の急崖と比較的大きなタフォニの分布．

### 3.1.五十猛海岸の急崖

五十猛海岸では急崖全体を対象領域とするため、約 50m 離れた対岸から急崖全体をカバーするように 50×20mの広い範囲を計測した．測量によって得た立面コンター図を図-3 に示す．対象領域は図-2 の写真で示した箇所とほぼ同範囲である．図-3 にみられるようにレーザースキャナ測量によって急崖地形を正確に捉え、タフォニの分布やその形状を数十 cm 程度のものまで正確に識別できた．

急崖は全体的に急傾斜しているが、標高 0.2~0.5m と 2m あたりに平坦な面がみられ、その隆起した離水波食棚と推定されている<sup>5)</sup>．図に示すように、急崖には部分的には急傾斜した比較的平滑な面を識別できる．これらは急崖の中でも相対的に後退したゾーンにみられ、直下に巨転石や崩壊堆積物がみられることから、タフォニ上部のオーバーハング部が節理面に沿って崩落した際の破断面と推定される．なお、離水波食棚の背後にも急傾斜した平滑面があるが、これは波の営力で形成された小崖である．

タフォニは急崖全体にわたって無数にみられる．小さなものもあわせて 242 個識別された．ただし、これらのタフォニの分布には傾向があり、前述した急崖上の微地形に規制されているようにみえる．これに関しては後述する．

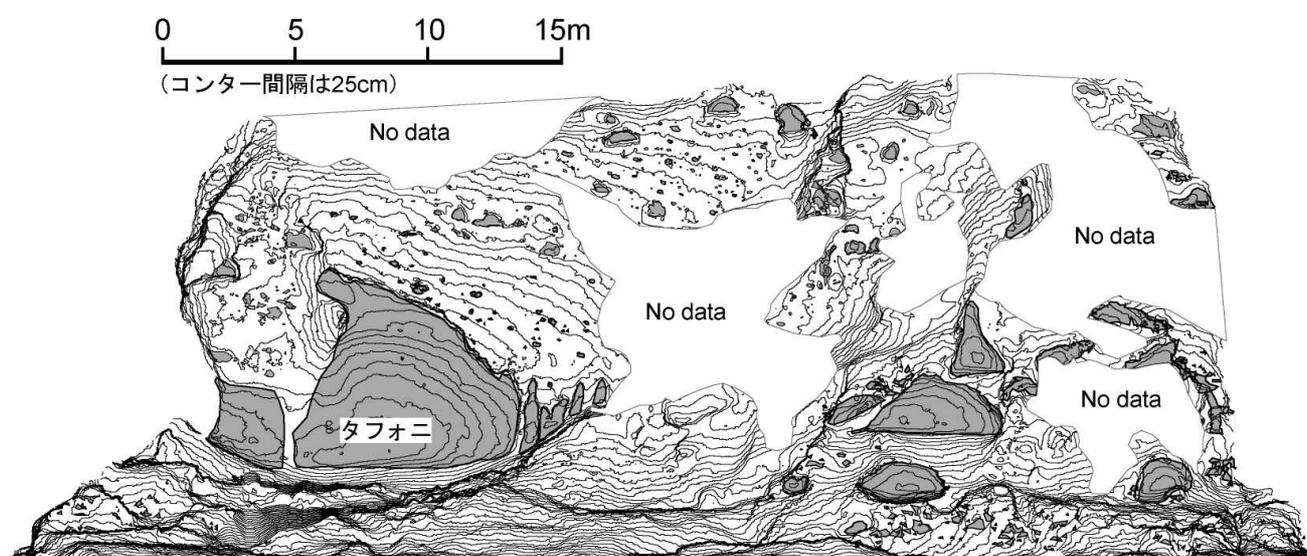


図-3 レーザースキャナによって得られた五十猛海岸急崖の詳細な凹凸（25cm コンター）．

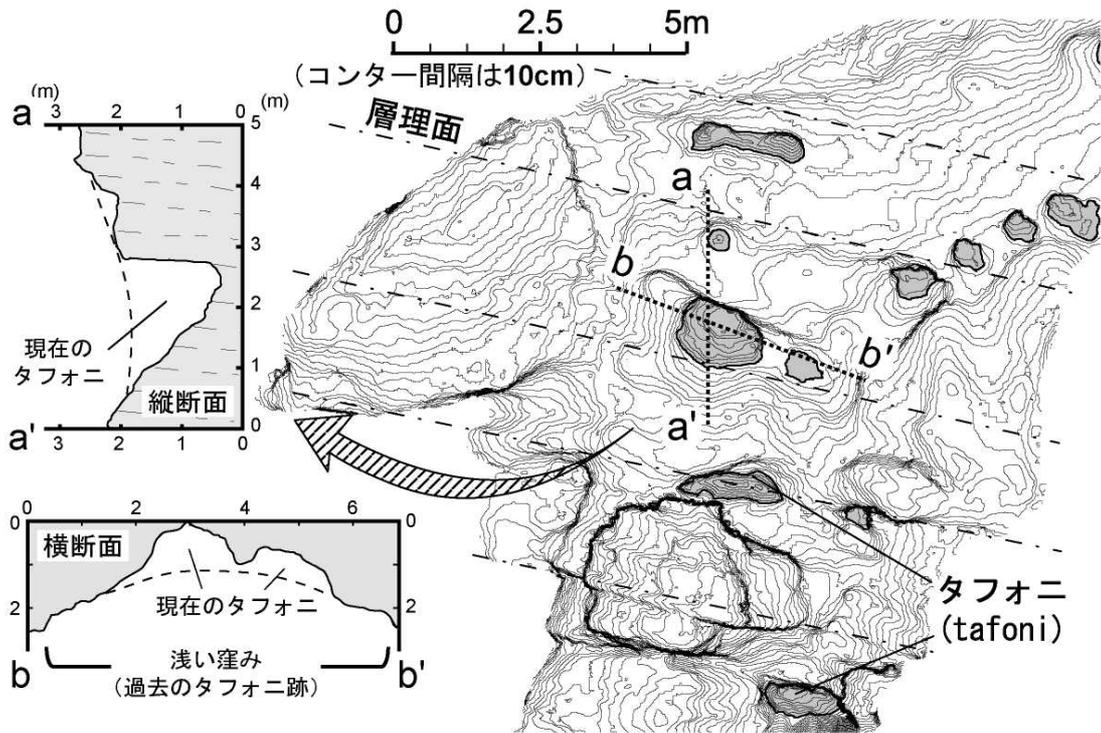


図-4 レーザースキャナによって得られた鬼村の急崖（鬼岩）の詳細な凹凸（10cm コンター）。

### 3.2. 鬼村の急崖

鬼村の急崖は全体が突出した岩体であり、急崖が様々な方向を向いていることから、15×15m程度のやや狭い範囲であるが、多方向から測量し、詳細な3次元データを得た。立面コンターを図-4に示す。この急崖も火山礫凝灰岩などの火砕岩類で構成されている。ここでは図に示すように、層理面が顕著に識別でき、図では手前から奥に向かって緩く傾斜しており、この側面は受け盤となっている。

タフォニについては幅0.5～1.5m程度のものがいくつか識別できる。ある程度大きなタフォニはいずれも層理面に調和する方向に横断形状が伸び、その凹みは層理面の傾斜方向に向かって深くなっているため、タフォニの形状は地質構造にも規制されていることがうかがえる。また、図の中央あたりにあるタフォニは、立面コンター図や横断面（b-b'断面）からわかるように、その周辺の一回り大きな範囲に浅い凹みがみられ、その内部に形成されている形になっている。縦断面（a-a'断面）でみると、この浅い窪みには上部に破断面のような平滑面があることから、オーバーハング部の崩落によって消滅した過去のタフォニ跡と推定される。現在のタフォニは消滅後に残ったわずかな窪みの内部に形成されている。

これは恐らく、崩落によってタフォニが消滅しても、その部分はタフォニの形成されやすい場所であるため、全く同じ箇所に再びタフォニが形成されたものと考えられる。こうした二重の窪みはここだけでなく、五十猛の急崖でもいくつかみられたことから、タフォニは凹みの形成・拡大 上部の崩落・凹みの消滅 凹みの再形成...といったサイクルを繰り返すと推定される。

### 4. 急崖上での凹凸に基づいたタフォニ群のグルーピング

ところで、3.1で述べたように、五十猛海岸の急崖全体におけるタフォニの分布傾向は、急崖の地形に依存しているようである。測量結果と現地の調査に基づいて急崖上にて区分した地形を図-5に示す。図にみられるように、尾根斜面上には大きなタフォニがみられ、節理に沿った崩落跡や離水波食棚の背後の小崖には多数の小さなものが密集している。そこで、個々のタフォニの大きさを

その横断形状の平面的な面積として計測し、地形別にグルーピングして個数をカウントした。その結果を図-6に示す。図-6(a)は急崖全体のタフォニを対象としたものであるが、急崖全体としては小さなタフォニの数は多く、大きなものほど少なくなる傾向がみられる。しかし、図-6(b)(c)のように、破断面上のものと尾根斜面上のものに分けてみると、前者は小さなタフォニの数が比較的多く、大きなタフォニは少ないのに対し、後者で大きなタフォニが目立ち、逆に小さなタフォニは少ない傾向がある。

このように微地形に基づいて急崖のタフォニをグルーピングすることでその形状分布が異なるのは、それぞれの場所に対応してタフォニの形成段階が異なるためと考えられる。例えば、崩落後の破断面には小さなタフォニが多いが、それらは破断面に新たなタフォニが形成され始めた初期段階であるためであろう。逆に尾根斜面の大きなタフォニは継続的に凹みが拡大し、拡大が進行中の段階と考えられる。このことから、タフォニを擁する急崖全体にはこういった形成段階の異なるタフォニが混在して分布していると考えられる。また、図-6で示した急崖全体におけるタフォニの度数分布は、小さいものが多く、大きいものが少ないことから、一種のフラクタルになっている。

なお、離水波食棚の背後の小崖にも小さなタフォニしかみられないが、これもこの急崖露岩の離水時期の違いによるタフォニの経過時間の違いか、もしくは波の削剥によりタフォニが大きく拡大できないことが影響していると考えられる。

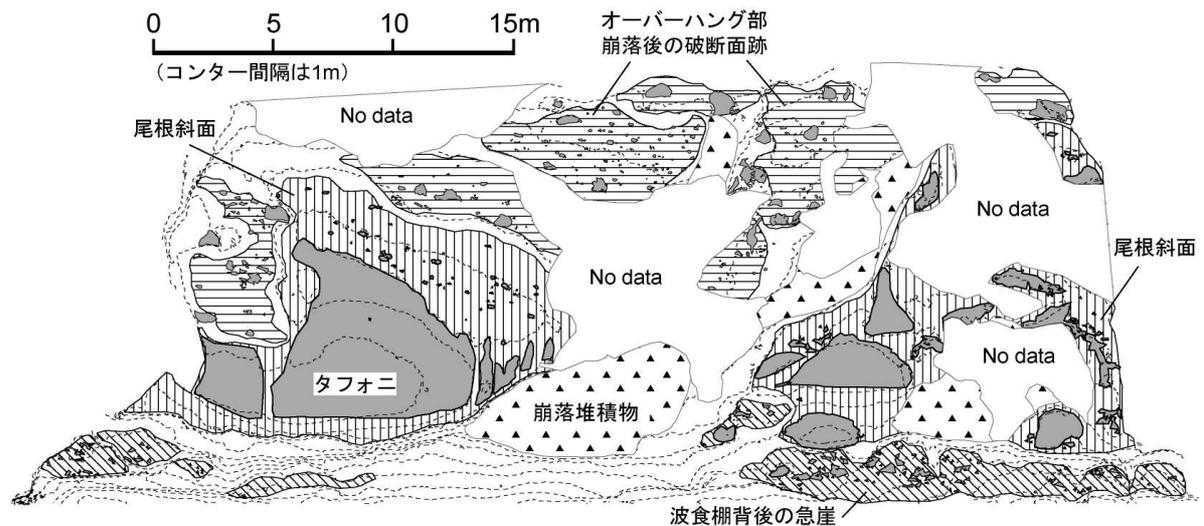


図-5 タフォニの分布形状と破断面（節理面に沿った崩落跡）に基づいたタフォニのグルーピング。

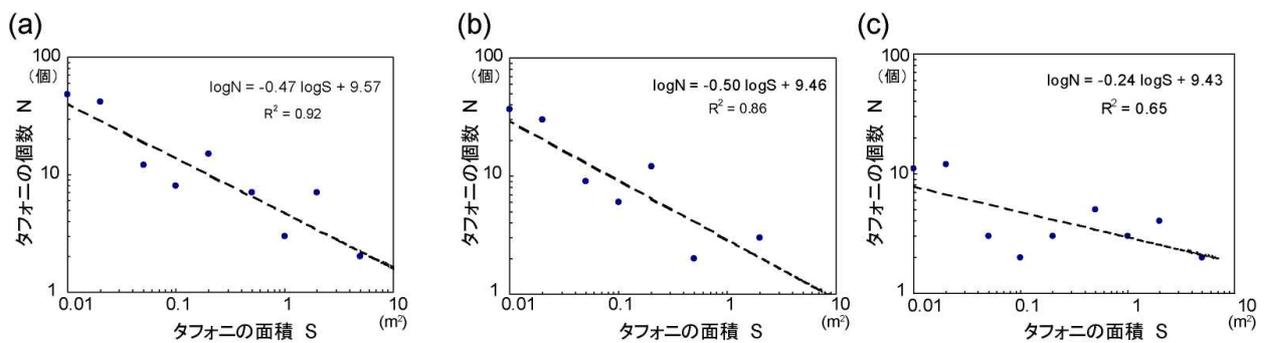


図-6 五十猛海岸急崖上の大きさ（面積）別にみたタフォニの個数の度数分布。

- (a) 対象急崖全域のタフォニ。
- (b) 破断面上のタフォニの分布形状。
- (c) 尾根斜面上のタフォニの分布形状。

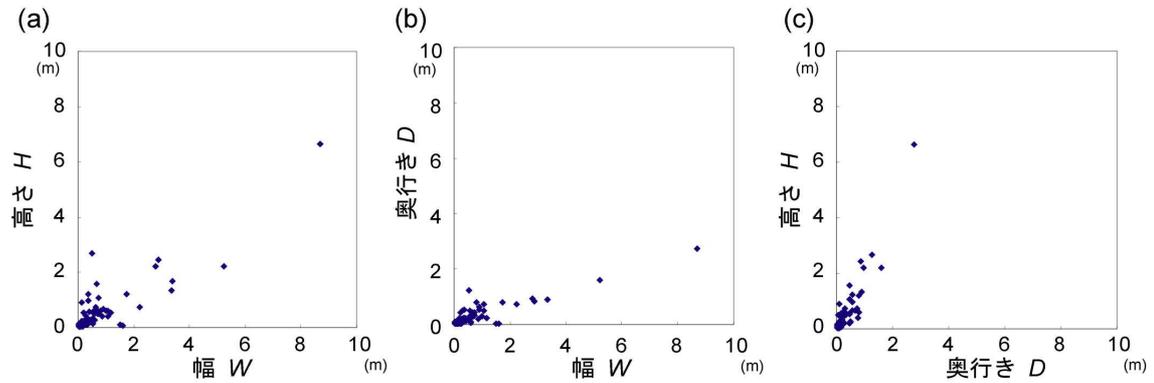


図-7 タフォニの形状の特徴を示す各指標間の関係．

- (a) 幅  $W$  と高さ  $H$  の関係． (b) 幅  $W$  と奥行き  $D$  の関係．  
 (c) 奥行き  $D$  と高さ  $H$  の関係．

### 5. タフォニの形成・拡大と急崖の後退

タフォニの拡大過程を推定するために、今回五十猛の急崖において識別された 242 個のタフォニほぼすべてから高さ  $H$ 、幅  $W$ 、および奥行き  $D$  をから抽出し、それら指標間の関係を確認した．それを示すと図-7 のようになる．図にみられるように、各指標 ( $D, W, H$ ) の間に正の相関性がみられた．これはタフォニがある程度の相似性があることを示している．ただし、相関性を示す近似直線は厳密には原点より少し上を通るため、完全な相似形ではない．そこで、図-8 のように横軸に幅  $W$  を、縦軸に高さとの比  $H/W$  をとると、 $H/W$  比は一定ではなく、幅  $W$  が大きいものほど小さくなっている．これは大きなタフォニほど横に細長い傾向を示している．

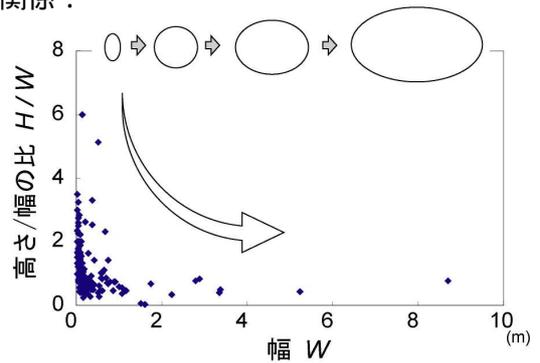


図-8 タフォニにおける幅  $W$  と高さ/幅比  $H/W$  の関係．

この形状の違いを時系列的に扱えば、タフォニは単に奥行き方向だけに進行するのではなく、高さ方向、幅方向にも進行し、大きくなるにしたがって横断形状は横長になっていくものと推定される．ただし、タフォニの横断形状は、小さなときは縦長の楕円形であったり、円形に近かったりするが、ある程度以上の大きさのあるものは上に凸のアーチ型 (crescent moon 型<sup>5)</sup>) をなすようになる．恐らくこれには天井部や側壁部の部分的崩落なども関わってくるであろう．

これらの知識から形成・拡大、急崖の後退がわかるようになってきた．そのイメージは図-9 のようになるだろう．タフォニを擁する急崖は時系列的にタフォニの拡大することで大きな凹凸が形成される．こうした凹凸は不安定化であるため、中にはオーバーハングに耐えられず崩落してしまうものもある．そうした崩落によってタフォニは一旦消滅するが、その後に残った浅い窪みの部分から再びタフォニの拡大が始まる．また、崩落後の破断面には新たにタフォニが形成され

これらの知識から形成・拡大、急崖の後退がわかるようになってきた．そのイメージは図-9 のようになるだろう．タフォニを擁する急崖は時系列的にタフォニの拡大することで大きな凹凸が形成される．こうした凹凸は不安定化であるため、中にはオーバーハングに耐えられず崩落してしまうものもある．そうした崩落によってタフォニは一旦消滅するが、その後に残った浅い窪みの部分から再びタフォニの拡大が始まる．また、崩落後の破断面には新たにタフォニが形成され

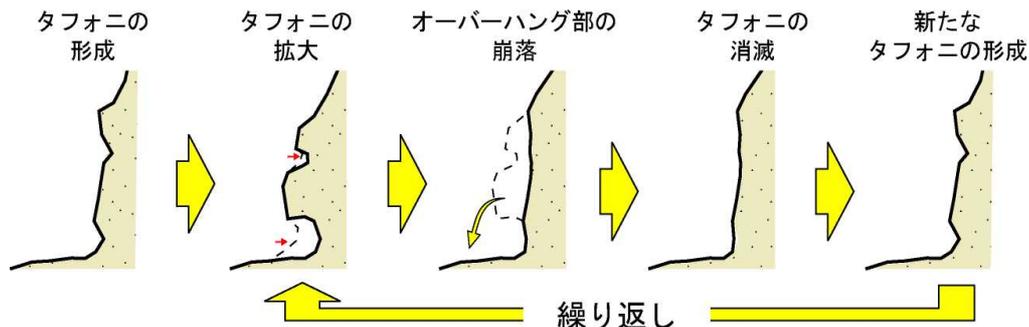


図-9 タフォニの形成・拡大、オーバーハング部崩落の繰り返しによる急崖拡大のイメージ．

始める．こうして急崖全体に形成段階の異なるタフォニが混在して様々な大きさのものが分布することになる．さらにそれぞれがタフォニの形成・拡大 上部の崩落・消滅 タフォニの再形成という一連のサイクルを繰り返しており，それによって急崖全体が徐々に後退していくと考えられる．今後，塩類風化を含めたタフォニの拡大速度が明確になれば，崩落の発生頻度や急崖の後退速度などの議論に寄与することができるようになると考えられる．

## 6.まとめ

島根県大田市のタフォニを含む2箇所の急崖を対象として，レーザースキャナ測量によって急崖の詳細な凹凸を得，さらにそれをもとにタフォニの形成・拡大課程，急崖の後退などを推定した．まとめると，以下のようなになる．

レーザ測量によって容易に複雑な凹凸を精度高く得ることができ，得られた凹凸から無数のタフォニについての個々の形状と急崖全体での分布などを読み取ることができた．

鬼岩の例では，詳細な凹凸図から層理面を識別できた．また個々のタフォニ形状と層理面との関係から，それらは層理面などの地質構造に規制されて形成されたことが明らかとなった．急傾斜した節理面上にも微小なタフォニの形成されていることが確認でき，タフォニ形成の初期段階のものと考えられた．

急崖全体としてみると，タフォニの大きさ分布はそれが一種のフラクタルであることを示している．

多数のタフォニ形状に基づけば，タフォニの幅，高さ，奥行きなどの指標間にもある程度の相似性が確認された．これを時系列と見なせば，ある程度相似性を保ちつつ，幅方向，高さ方向，奥方向に拡大していくと考えられる．

ただし，高さ/幅の比は，幅の拡大とともに小さくなる傾向があるため，タフォニが小さな段階では縦長であるが，大きくなるとしだいに横長になっていくと推定される．

タフォニを擁する急崖では個々のものが，凹み形成・拡大 上部の崩落・凹み消滅 凹みの再形成というサイクルを繰り返しつつ，急崖全体として後退していくと推定される．

## 引用文献

- 1) 横田修一郎・竹原和也，2001，島根県大田市の砂岩斜面にみ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年度研究発表論文集，pp.75-80．
- 2) 西山賢一・横田修一郎・横山勝三，2003，砂岩斜面に見られるタフォニの形態とその形成過程，日本応用地質学会，平成15年度研究発表論文集，pp.271-274．
- 3) 原口 強・中田 賢・矢橋潤一郎，2005，航空/地上レーザ計測による大規模岩盤崩落斜面の三次元モデリング．地盤工学会誌，Vol.53，No.4，pp.8-10．
- 4) 横田修一郎・増本 清・西山賢一，2003，岩盤崩落予測に向けた急崖露岩の風化プロセス研究，平成14年度～平成15年度科学研究費補助金〔基盤研究(B)(2)〕研究成果報告書，58p．
- 5) 坂田聖二・横田修一郎，2004，島根県大田市海岸における波食棚（ベンチ）とそれに規制されたタフォニの発達，日本応用地質学会中国四国支部，平成16年度研究発表論文集，pp.1-6．
- 6) E.F.McBride and M.D.Picard, 2000, Origin and development of tafoni in tunnel spring tuff, Crystal Peak, Utah, USA, Earth surf. Process. Landforms, Vol.25, pp869-879.