

急崖に発達するタフォニと岩盤崩落

横田修一郎（元島根大学）

1. はじめに—急崖（急傾斜面）の不安定化

急崖の露岩面が凹凸をなしていれば、その崖下では不安定な凸部からの岩盤崩落が日常的に懸念される。急崖の凹凸形成は一般には構成岩石・岩盤の違いや風化程度の違い、あるいは小断層や節理等の力学的弱面を反映した被侵食性の違いによるが、均質・等方的な岩石でも形成されることがあり（図-1）、その場合、何らかの外的要因あるいはそれと構成岩石・岩盤との相互作用によると考えられる。岩石海岸に見られるノッチとともに種々の露岩表面に見られる“タフォニ（tafoni）”とよばれる凹みもそのような相互作用の下に形成されたものであり、一般には降雨と日射の繰り返しによる塩類風化（salt weathering）が主要因と考えられている（Bradley *et al.*,1978; Goudier and Viles,1997）。

タフォニの存在は乾燥地帯では古くから知られていたが、湿潤気候帯のわが国では日射の強い海岸の例（Matsukura and Matsuoka,1991; Sunamura,1996 等）を除いてほとんど報告されていなかった。しかし、この約 10 年間、筆者らの調査等によって様々な岩石地域でも存在することが確認され（横田他, 2004; 西山・横田, 2010 等）、とくに熱水変質した岩石の多い山陰地域ではいたるところに存在することが明らかとなってきた（横田・竹原, 2001; 坂田・横田, 2006 等）。

塩類風化による岩石の劣化は他の風化に比較して急速であることから、その作用下で急崖露岩面に凹みが形成されていれば、拡大に伴う岩盤崩落の頻発が懸念される。現実にタフォニ密集域の崖下には巨大な転石の散在していることが多く、落石発生による災害も少なくない。そこで、以下では島根県中部を中心としたタフォニの事例を紹介し、形成・拡大から岩盤崩落発生への過程と機構とともにタフォニ出現の諸条件を検討する。

2. 急崖露岩に発達したタフォニの事例

図-2 は島根県大田市忍原峡の急崖の実測形状とタフォニの確認場所を示したものである（横田他, 2004）。崖下には径数 m 以上の巨大な転石が散在しており、高標高部から継続的に崩落があったものと推定される。

本急崖の露岩（中新世川合層の粗粒砂岩）にはいくつかのタフォニが認められる。図に示す 2 つのタフォニでは正面から見た凹部（開口部）は楕円形に近く、縦断面でみると斜め上方に延びた半楕円形をなしている。また、タフォニの上方は相対的に突出してオーバーハング状態となっている。一方、凹部内の平坦な底面には天井から剥離・落下した砂粒子や岩石片が散在している。

これらのタフォニを構成する中粒～粗粒砂岩は斜面に対して受け盤をなす。図には赤外線水分計による含水比（%）を示しており、降雨直後での測定を反映して値は全般に高く、とくに内壁の天井から側面の上半部にかけては高い。

図-3 は上記に隣接した露岩面上に見られる小規模なタフォニ群であり、高さ数 10cm 以下のものが幅約 8m にわたって連なっている。砂岩中の礫岩薄層に沿っていることから、礫岩の存在がタフォニ形成の一要因である可能性を示唆している（横田他, 2004）。

図-2,3 はいずれも礫混じり粗粒砂岩であり、火山岩起源の物質を多量に含んだ長石質アレナイトであるが、他では様々な火砕岩（火山礫凝灰岩等）や火山岩でもタフォニの形成されているこ

とを確認した。

図-4には上記を含め、大田市と周辺地域におけるタフォニの密集した急崖と個々のタフォニの例を示す。(a)は大田市の五十猛海岸、(b)は大田市鬼村の鬼岩、(c)は温泉津の龍御前神社裏の急崖である。また、(d)～(f)は忍原峡の、(g)は五十猛海岸のそれぞれタフォニ凹部(開口部)の形状を示したものである。形状には若干の違いがあるが、急崖に凹部が形成されている点では同様である。

3. 考え得るタフォニの形成過程と要因

(1)凹部の形状特性

大田市とその周辺にみられるタフォニ形状に基づけば、タフォニの開口部は一般にも円形ないし楕円形を呈し、径1m以内～数m以上、奥行きは数10cm～1m以上とレンジは広い。縦断面形状でみると、天井の凹部は半楕円形が斜め上方に延びており、前面はそれから取り残されて“ひさし(visor)”となっている。いずれも前述した忍原峡と同様である。

正面からみた開口部の形状に関しては、一般に幅と高さはある程度正の相関があるようである(横田・竹原, 2001; 西山・横田, 2010)。ただし、忍原峡では、高さ/幅比は大きさによって変化することから、開口部は時系列変化として当初の小さな縦長楕円形がしだいに大きく扁平な横長楕円形になっていくと推定されている(図-5, 横田他, 2012)。さらに、実際には複数のものが左右や上下に連結していたり、大きなタフォニの中に無数の小さな入れ子状になったものも存在する。

(2)凹部の形成過程を機構、要因

形成場所の特徴として、忍原峡では、①地下水位の低い場所、②粗粒の長石アテナイト砂岩に加え礫岩薄層の存在する場所、さらに③急崖に対して層理面が受け盤をなす場所が挙げられているが(横田他, 2012)、①に関しては火山岩や火砕岩地帯でも共通しているようである。多くのタフォニでは内壁の軟質化した岩石表面に石膏 Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)等の析出が確認されており、凹部形成は塩類風化を主要因としたものと考えられる。石膏(硫酸塩)成分の起源には構成岩石と浸透水のいずれも考え得るが、タフォニ確認地点の構成岩石をみると、火山岩や火砕岩、あるいは火山岩片を含んだアテナイト砂岩といった岩石の方に原因があると考えられる。

忍原峡の砂岩急崖におけるタフォニ形成・拡大過程の概念図を図-6に示す。急崖表面から内部への浸透水が内壁の天井部と側壁に塩類を析出させるであろうから、天井の大きな凹みとともに水平方向への拡大といったタフォニ形状の特徴はこのような過程によって説明可能である。他の火山岩、火砕岩地域での形成・拡大過程もこれに類似したものと考えられる。したがって、定常的に地下水位が低く、塩類風化が容易に進行するような箇所であれば形成されやすく、急崖上部に頻繁に見られるのはこのためと考えられる。

(3)開口部が上下非対称になる原因

タフォニの開口部は大局的には楕円形であるが、五十猛海岸(図-4(a))のように上下非対称な三日月型のところも少なくない(坂田・横田, 2006)。これは、開口部は基本的に塩類風化によって拡大するが、上端部は拡大に伴って不安定化し、不安定な部分が崩落したためと考えられる。

上端部の安定性は基本的に上端部の開口形状によるアーチ支持力と風化岩石の引張強度とのバランスによると考えられる。開口幅が小さい段階ではアーチ支持力によって安定しているが、開口幅が大きくなり、開口形状の曲率が小さくなると、支持力が低下して不安定化するであろう。その結果、相対的に安定なアーチ形状になるまで繰り返し崩落していくと考えられる(図-7)。

また、図-7の下に示すように、いくつかのタフォニでは開口部上端が不規則なノコギリ型を呈しているが、これは、局所的な崩落によって小規模な鋭角アーチ構造(三角形)が複数形成され

ることによって上端を一時的に支持するためと考えられる。ただし、この場合でも最終的には大きく崩落して、安定した単一のアーチ構造になるであろう。こうした開口部の形状と大きさの限界は風化岩石の引張強度などにも依存すると考えられる。

4. オーバーハング部の不安定化岩盤崩落

タフォニの凹部の拡大に伴ってその上方の凸部は突出してオーバーハング状態となる。縦断面上で奥行きに対する突出長が大きくなれば、重力による回転モーメントが増大し、突出部は不安定化するであろう。ただし、この場合、凹部形状全体を3次的に考える必要がある。広い崖面の中に小さな開口部がわずかに現れている段階では突出部は安定しているであろうが、開口部が拡大し、崖面の残存面積が小さくなれば、支持力が低下してオーバーハング部は不安定化すると考えられる。その結果、地震動などの誘因にて容易に崩落が発生しうることになる。この場合、オーバーハング部全体が崩落することになるから、概して大規模となる。

崩落には節理面が関与することもある。砂岩層が受け盤をなしていれば、層理面に直交した節理面は斜面外側に急傾斜することになるため、これに沿って崩落しやすい。また、オーバーハング部の基部に引張節理が新たに形成されることが予想されるが、その場合には突出部は急崖から分離して崩落しやすくなる(図-8)。

オーバーハング部の崩落発生頻度は、タフォニ形状に加えて塩類風化の進行速度やタフォニの拡大速度に規制されるであろう。1m前後の凹みの形成に要する時間は海岸、内陸を問わず $10^2 \sim 10^4$ 年と推定されている(松倉, 2008等)。節理面間隔などによっては、個々の場所で数100年に1回の割合で崩落が発生することになるし、地震動などの誘因によってはさらに短い時間間隔で崩落が発生する可能性もある。これに伴い谷壁も後退していくと考えられる。

5. まとめ

- (1) 急崖に凹凸が形成されれば、タフォニ形成と拡大は岩盤崩落発生の要因となりうる。現実にタフォニが密集した急崖の裾部には巨大な転石の散在していることが多く、崩落による災害も発生している。
- (2) この場合、岩盤崩落としては、拡大過程における開口部上端の崩落とオーバーハング部の崩落が考え得る。前者では開口部上端の不安定化に伴って継続的に崩落するであろうし、後者では地震動等の誘因によって大規模な崩落となるであろう。
- (3) タフォニの形成は特定の岩石に限ったことではなく、様々な岩石でも形成される。熱水変質を受けた岩石が多く、タフォニ形成に適した環境の多い島根県下では長期的な防災に際してはこういった視点も必要であろう。

文 献

- Bradley, W.C., Hutton, J.T. and Twidale, C.R., 1978, Role of salts in development of granite tafoni, south Australia, *Jour. Geol.*, **86**, pp.647-654.
- Goudier, A. and Viles, H., 1997, *Salt weathering*, John Wiley and Sons, 241p.
- Matsukura, Y., 1991, : Notch formation processes and cliff instability in pumice flow deposits on the Asama volcano region, Japan, *Sci. Rep., Inst. Geosci, Tsukuba*, no.12, 37-63.
- Matsukura and Masuoka, 1991, Rate of tafoni weathering on uplifted shore platforms in Nojima-zaki, boso Peninsula, Japan, *Earth Surface Processes and Landform*, **16**, 51-56.
- Matsukura, Y., 2001, Rockfall at Toyohama Tunnel, Japan, in 1996: effect of notch growth on instability of a

- coastal cliff, *Bull Engineering Geology and the Environment*, **60**, 285-286.
- 松倉公憲, 2008, 地形変化の科学. 朝倉書店, 242p.
- 西山賢一・横田修一郎, 2010, 熊本県天草上島の古第三系砂岩の急崖に分布するタフォニの形状, 応用地質, **51**,122-129.
- 坂田聖二・横田修一郎, 2006, 島根県大田市の火砕岩急崖におけるタフォニの拡大過程と上部オーバーハング斜面の不安定化, 平成 18 年度日本応用地質学会研究発表会講演論文集, 37-40.
- Sunamura,T.,1996,A physical model for the rate of coastal tafoni development, *Jour. Geol.*, **104**, 41-748.
- 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 年度研究発表論文集, 75-80.
- 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, 科学研究費補助金研究成果報告書 (no.14310149, 研究代表者 横田修一郎) , 58p
- 横田修一郎・竹原和也・佐藤路明・坂田聖二・西山賢一, 2012, 島根県の砂岩急崖に発達するタフォニ群の形状特性とそれに基づいたタフォニ拡大から岩盤崩落への過程, 応用地質, **53**, 245-256.

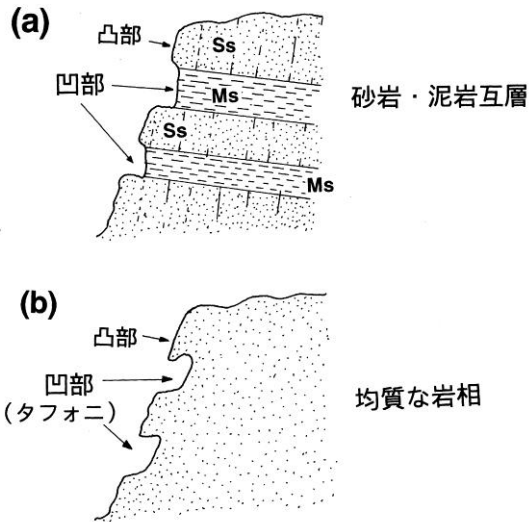


図-1 急崖における凹部形成の例. (a) 砂岩・泥岩等の被侵食性の違いに起因した凹凸, (b)均質な岩盤に使用ずるタフォニの凹部.

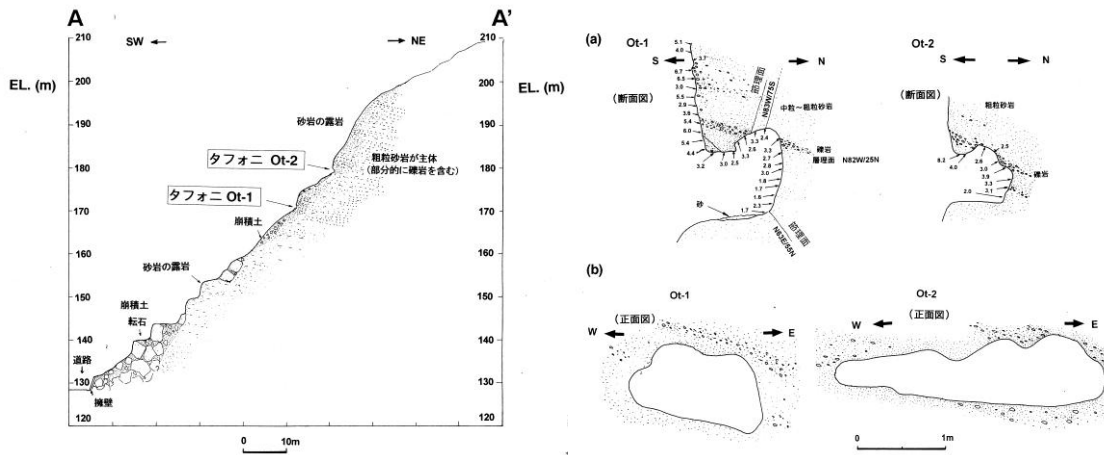


図-2 急崖に形成されているタフォニの事例. (横田他, 2012)
大田市忍原峡. 急崖麓に巨大な転石が散在している.

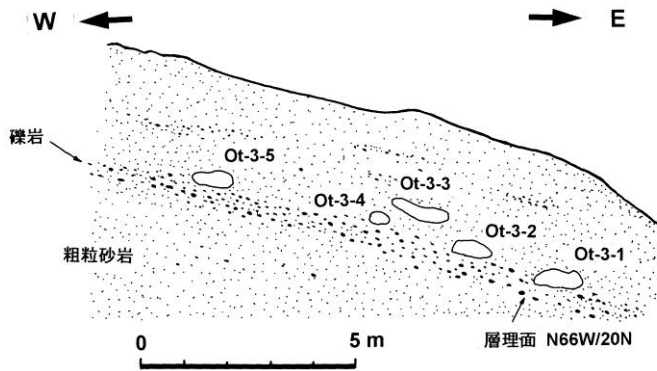


図-3 礫岩薄層に沿って形成されている微小なタフォニ (横田他, 2012)

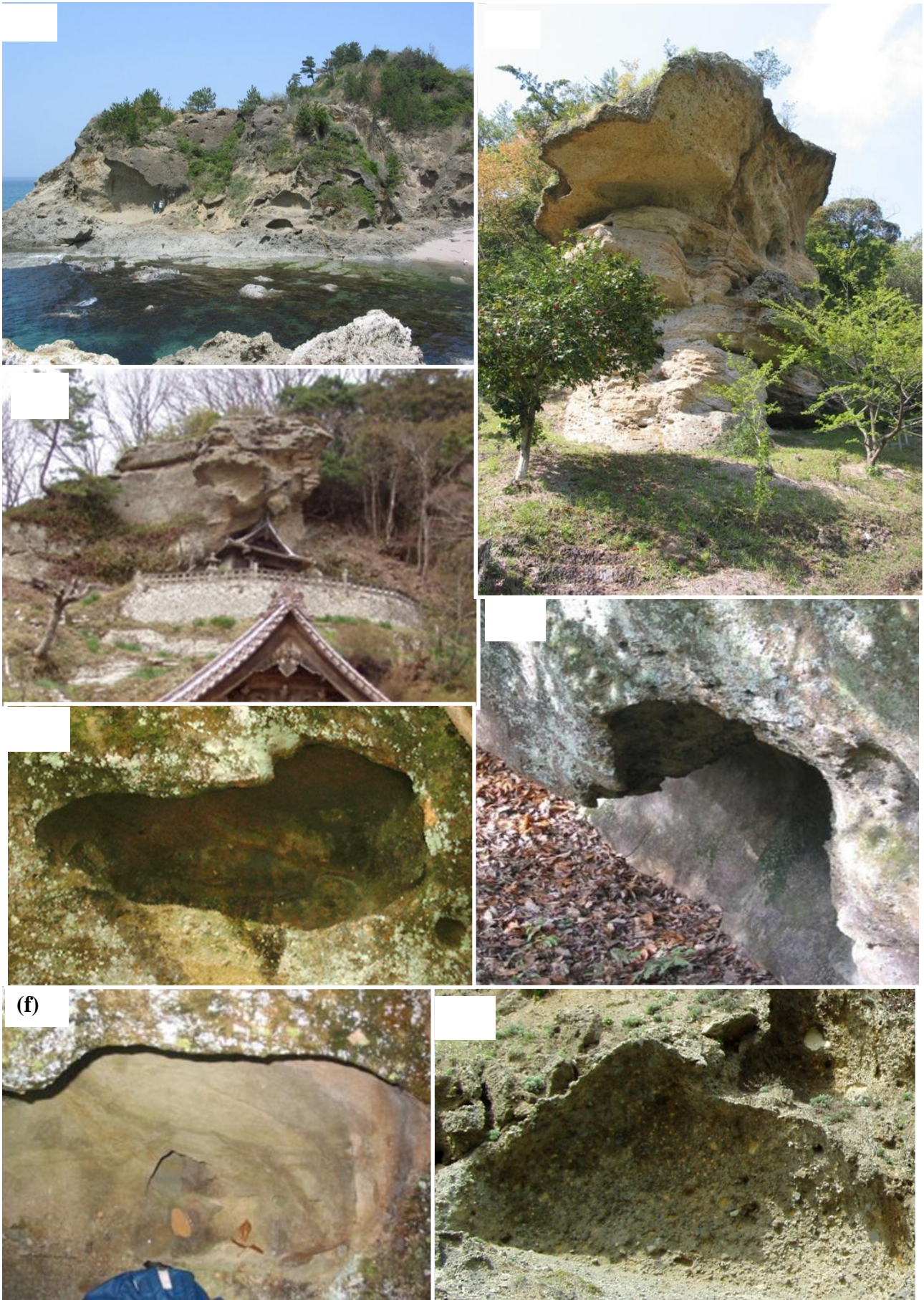


図-4 大田市とその周辺でみられるタフォニの事例。
 (a)五十猛海岸, (b)鬼村の鬼岩, (c)温泉津の龍御前神社裏, (d)~(f)忍原峡のタフォニ,
 (g)五十猛海岸のタフォニ

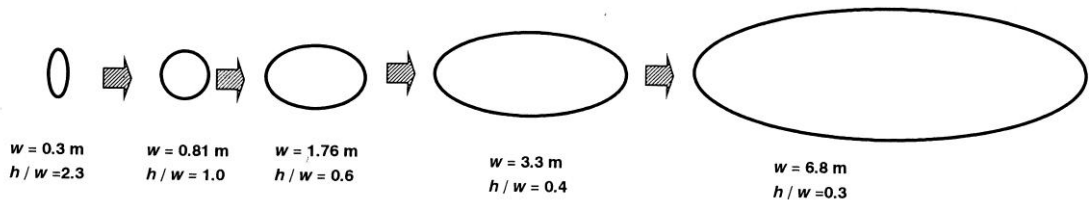
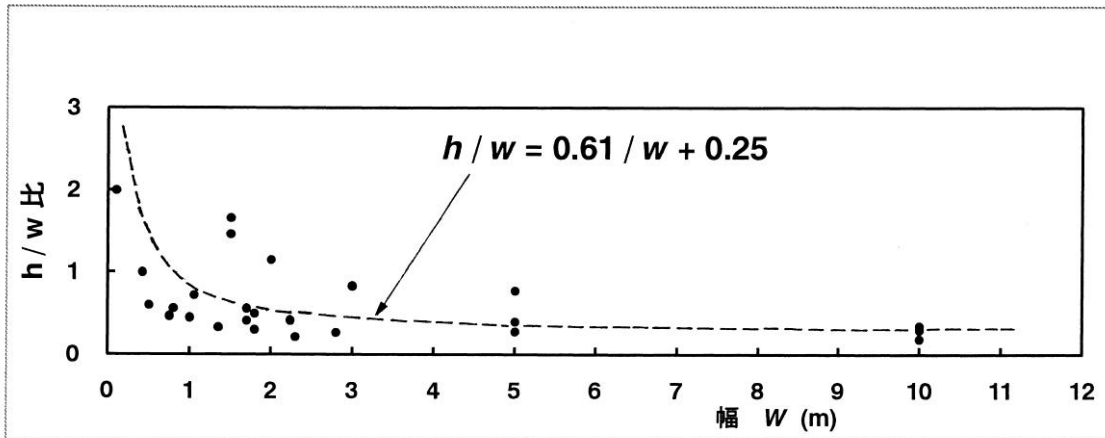


図-5 タフォニ開口部における幅 w と高さ／幅 (h/w) 比の関係 (横田他, 2012)

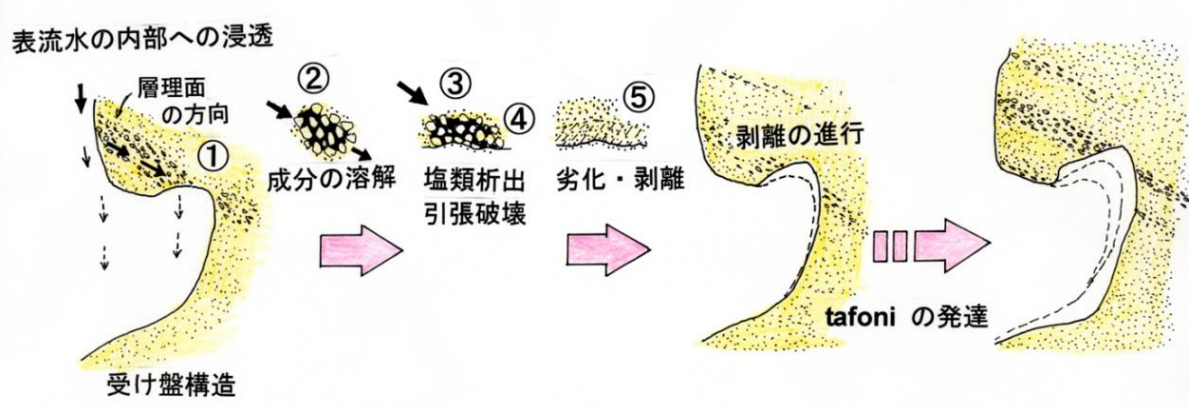


図-6 堆積岩の受け盤斜面におけるタフォニ拡大過程のイメージ (横田他, 2004)

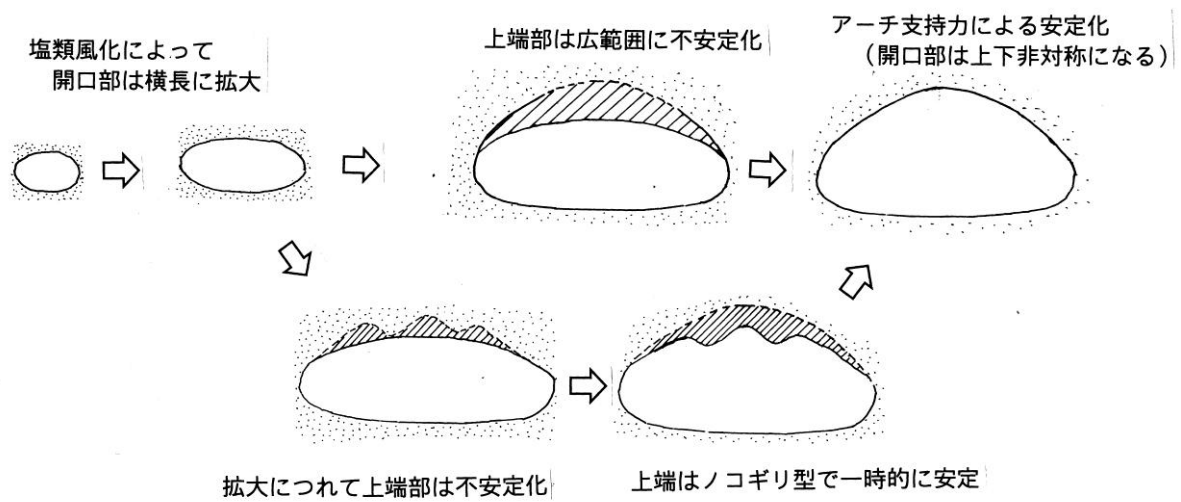


図-7 開口部の拡大に伴う上端部の崩落と形成変化

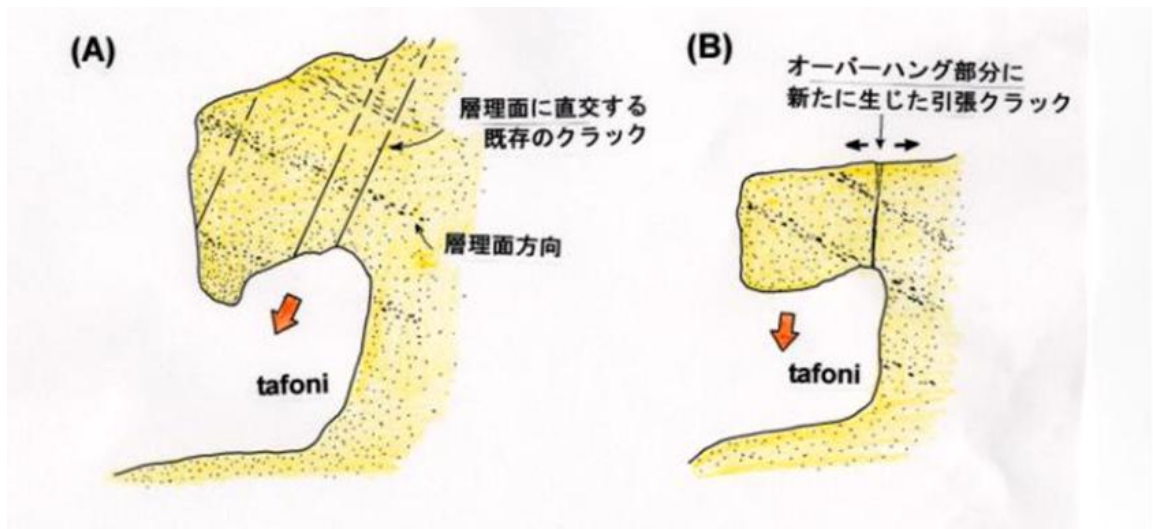


図-8 オーバーハング部の不安定化のイメージ (横田他, 2004)