

# オーストラリア シドニー湾マンリー海岸に生じている風化微地形

Micro-Topographic Weathering of the Manly Island Coast in Sydney Bay, Australia

池田 碩\*

Hiroshi Ikeda\*

## 1 はじめに

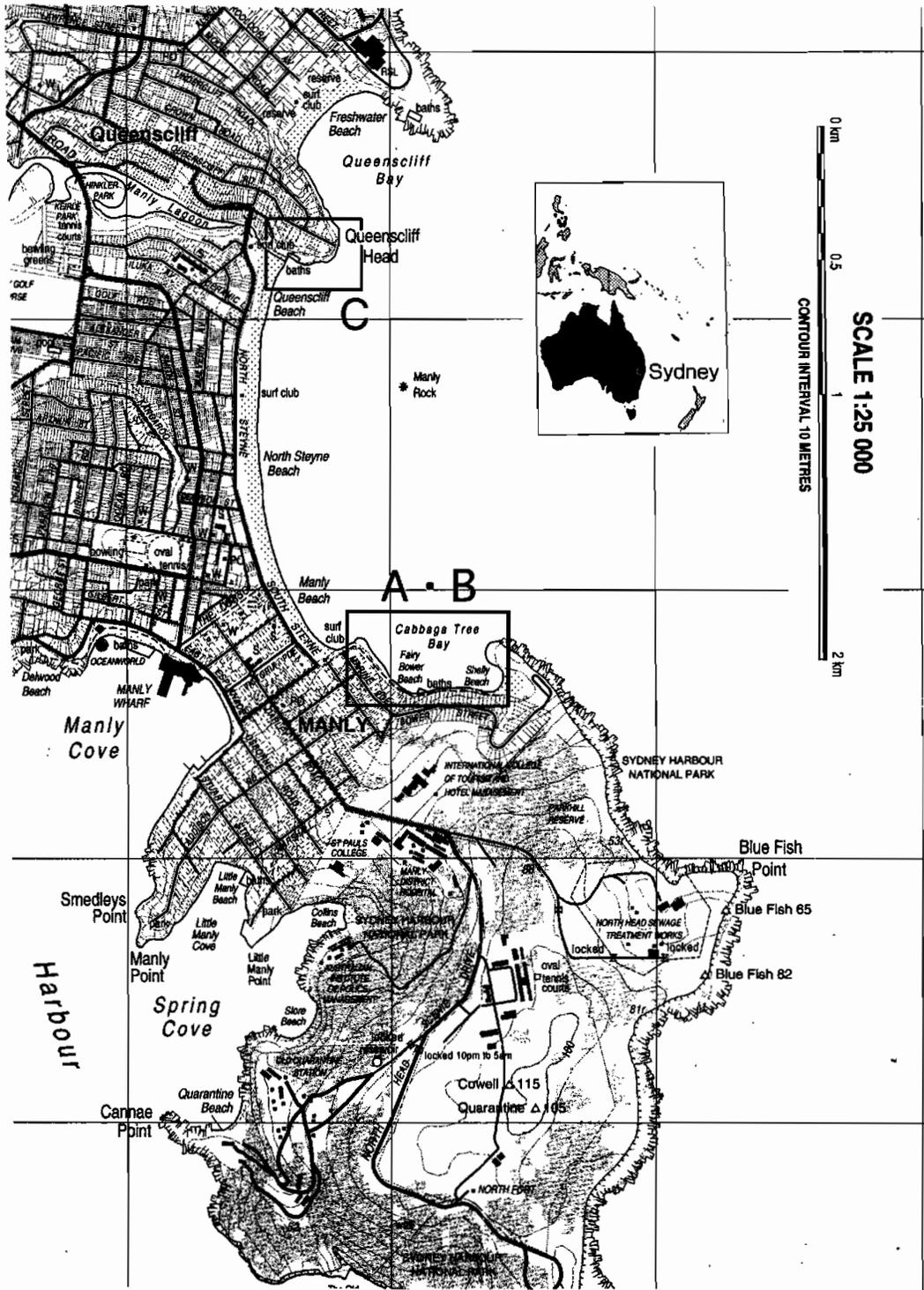
筆者のライフワークである「地形学」の立場より、これまで「岩石」の風化過程やその速度と、その結果出現する「微地形」について調査してきた。その場合、岩石表面の変状や変形は、風化・剥離・侵食破壊の順で進行する。その結果形成される侵食微地形は、蜂の巣状多穴型・皿状窪み型・のっぺり窪み型などの形状を示す。しかもその差は、それぞれの地域の気象・気候や岩種・岩質の相異によって変わってくるし、さらにはその形成速度も変わる。

そこで筆者は、これまで上記のような特徴（差）が良く現れる地域を世界各地から選定し、可能な限り現地を訪ね、現場で観察・測定を行いつつ調査を続けてきた。今回は、オーストラリア シドニー湾の太平洋に臨むマンリー Manly海岸で、2002年・2004年夏季と2005年冬季に調査を行ったのでその結果を報告する<sup>1)~6)</sup>。

## 2 調査地域周辺の自然環境と開発状況

### A. マンリー海岸の位置

シドニーは、南緯35° 52′，東経151° 12′ に位置し、太平洋側に臨む。マンリーは、シドニー湾（ポートジャクソン）の入口の陸繋島Landtied Islandで、面積4 km程、標高は115mにすぎない。しかし、外洋に臨む側の海岸には、図-1の地形図に見られるように、海食崖が連なる見事な岩石海岸が続き、その間に砂浜を点在させている。きれいな砂浜の広がる陸繋砂州Tombolosの外洋側は、海水浴場として、さらに波乗りサーフィンの絶好地として賑わっている。調査地には陸繋砂州の北側に突出する海食崖の部分も含めた。この周辺一帯は、シドニー湾自然公園地域に指定されている。



図一. 調査地マンリー周辺地形図 (A・B・C = 調査地)  
 Fig. 1: Topographic Map of the Manly Island Study Area

B. 気象・気候

大陸の東側に位置するが、南半球側であるため西岸海洋性気候Cfb地域である<sup>7)8)</sup>。シドニーの月毎の平均降水量と気温については図-2に示したが、東京と比較してみると、気温も降水量も年間を通して変化の幅が小さい。冬季でも雪は降らず、極めて温和な気象環境にあることがわかる。

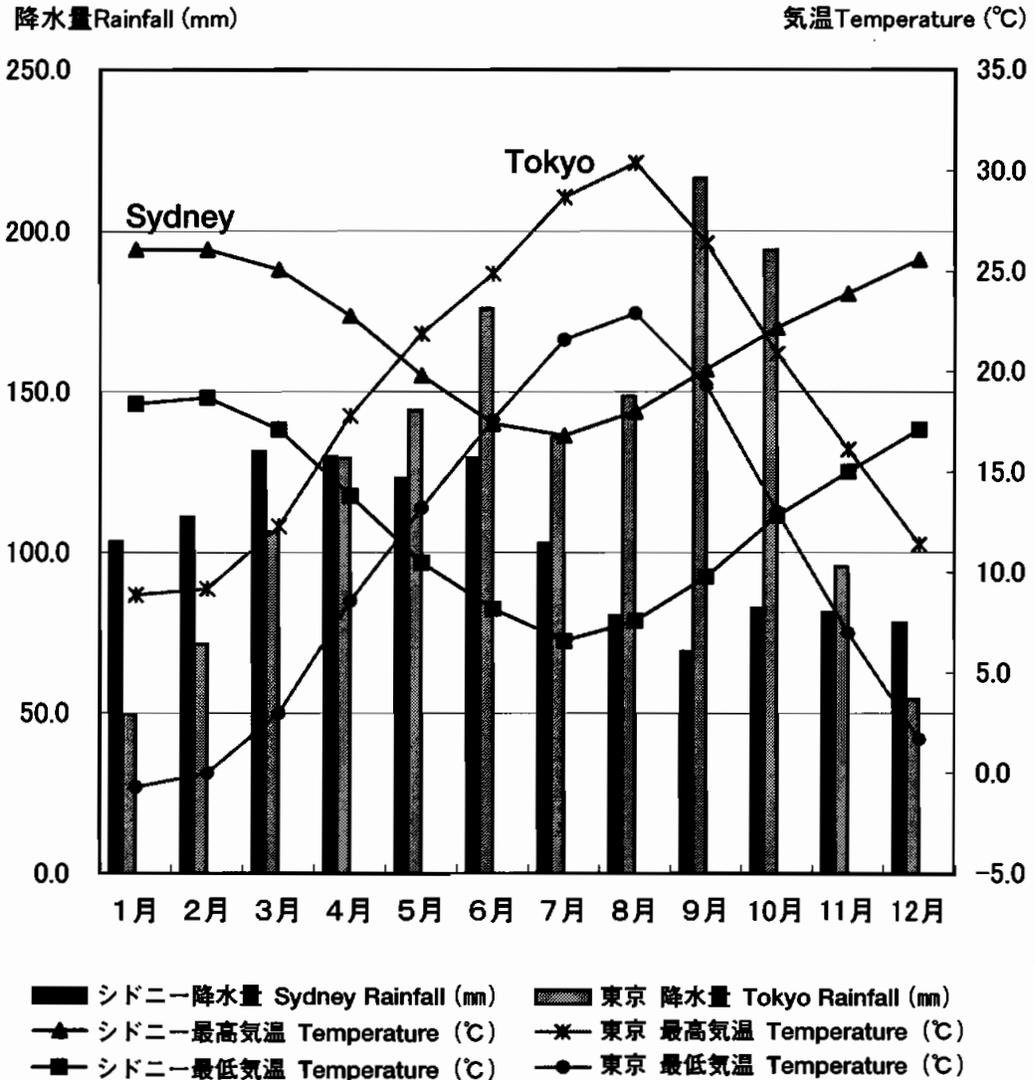


図-2. シドニーと東京の降水量と気温  
Fig. 2: Precipitation and Temperature in Sydney and Tokyo

C. 岩種・岩質と地形

中生代三畳紀の海底に堆積した主として砂岩(図-3)からなり、クロスラミナは多いが広域的にはほぼ単純な水平層である。このため、周辺各地の地形、特に微地形の比較研究には好都合である。

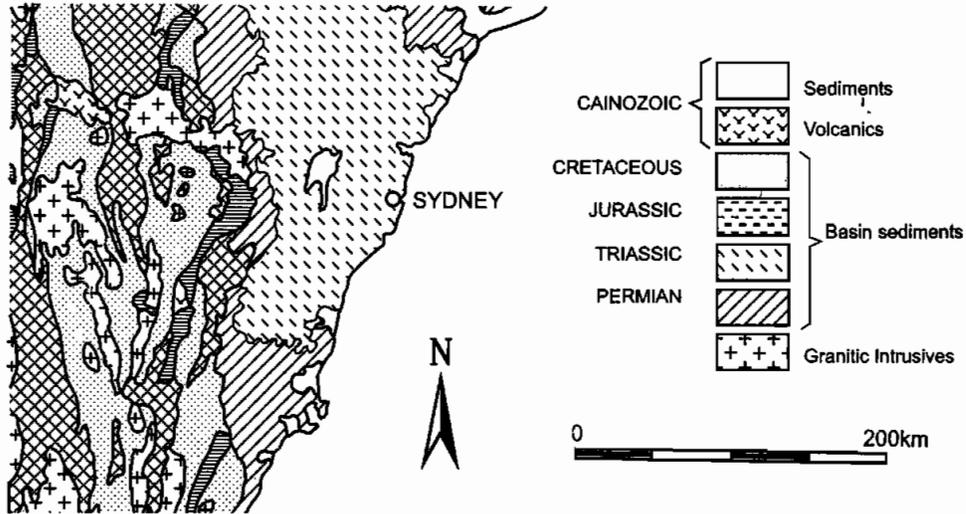


図-3. シドニー周辺地質図  
Fig. 3: Geology Map of the Sydney Area

周辺には、標高100m程の極めてなだらかな平坦面が発達している。外洋に臨む海岸側では、50~70mの高さに達するほどの海食崖が連続している。潮風にさらされる岩石の表面には、風食による剥離くぼ地や波食穴などの種々の微地形を生じている。今回の調査では、特にこのオーダーの微地形の形状とその形成過程および形成速度を現場の環境を踏まえ観察し測定した結果を報告する。

D. 開発・土地利用の状況

地形図で見られるように北側を中心に開発が進み、南側は海岸に臨む部分を除き公共用地や公園として保存されている。開発は第2次大戦後、海を望むリゾート地域・住宅地域として急速に進められてきた。それに伴って海岸沿いでは、散策道の拡幅や新道が敷設されている。このうち、最も海岸に近い道路の法面の風化・剥離浸食の状況を調査した。さらに陸繋砂州の北端の海食崖も調査地に含めた。

E. 微地形調査地

南側の調査地マンリー海岸は、自然状態の岩石表面に生じている微地形と戦後拡幅された道路の新鮮な法面に生じている微地形の両者を近接地点で観察できる大変恵まれたフィールドで

ある。特に道路法面に生じている微地形の場合、その形成速度を推測するのに極めて有効なデータとなる。

陸繋砂州北側の調査地も、基本的には南側と地質・地形共に同様な状況を呈している。しかし、ここでは海食崖中に散策用にのみ使用するごく小規模のトンネルが掘削されており、トンネル入口から内部にかけての岩盤表面の剥離浸食の状況を観測できた。これらの点を踏まえた現段階までの調査の経過と結果を報告し、今後の追跡調査の基礎資料としたい。

### 3 風化・剥離浸食の実態と微地形

A. 海岸に形成されているTafoni<sup>9)10)</sup>とその形成過程。B. 海岸道路拡幅工事に伴って出現した新鮮な岩盤法面に生じている剥離浸食の状況。C. 海食崖に掘り込まれた散策用トンネルの周辺とトンネル内部に生じている剥離浸食の状況。の順に現場の状況を示したカラー写真ページに沿って具体的にできるだけ多角度から現場の状況・実態を示し解説していく。

#### A. 海岸に形成されているTafoniとその形成過程

写真A-1ページ

①ほぼ水平に近い砂岩層が続き、低平な浸食平坦面からなるManly島部をシドニー湾内から臨む。左端が陸繋砂州に続く。調査地は写真の向う側で太平洋側の海食崖である。

②海食崖下の海岸に沿う狭い道路（海水面より4m・道路幅4m）下端部に形成されているTafoni（矢印部分）を含む調査地域周辺の状況。

③・④均質の中粒の砂岩に生じているTafoni。その規模・形状・形成過程がよくわかる例。メジャーは1mの折尺。

写真A-2ページ

①典型的なTafoniの形状から、その形成過程を捉えてみる。Tafoniの規模=高さ160cm、幅300cm、全体に中央部がくぼみ半円形状を呈している。

②は①の左側部分の拡大。③は①の右側部分の拡大。

②は蜂の巣状多穴型で、形成初期の若い段階を示す。

③は多穴の部分が取れ、のっぺりした形に至った形成後期の状況を示す。つまり、このTafoniは左側の小さい多穴部分が若く、右側へ向かう程徐々に大きい穴へと拡大し、さらに隣接する穴を結合しながら拡大していくと穴の壁が完全に取れてしまい、のっぺりとした底面となり、Tafoni穴状窪み形成の1サイクルを終える。その後こののっぺりした窪みの底面に再度蜂の巣状多穴が出現しだすと2サイクル段階に入り、サイクルを重ねる毎に奥の深い見事なTafoniが形成されていくものと考え、その形成過程を模式図化（図-4）してみた。1サイクルで生じる深さは、測深の結果このTafoniの場合20cmである。

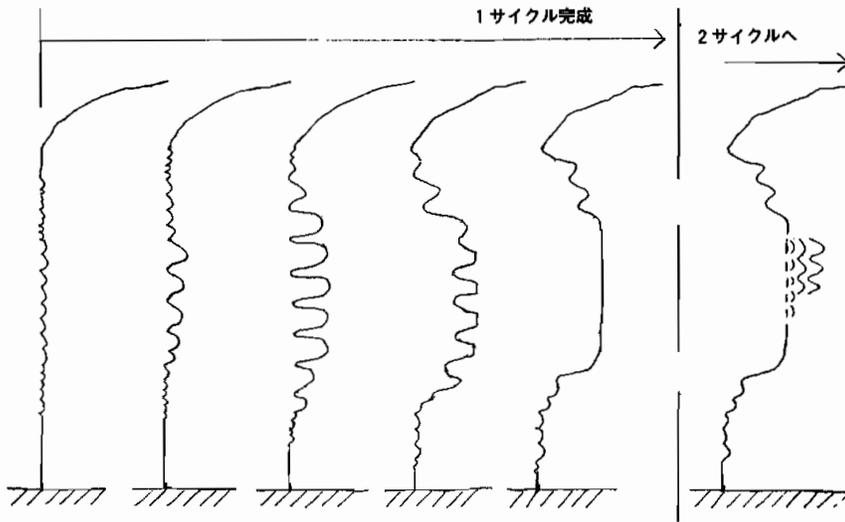


図-4. 蜂の巣状タフォニの拡大過程模式図  
Fig. 4: Honeycomb Tafoni Expansion Process Diagram

**B. 海食崖下の道路拡幅工事に伴って出現した新鮮な岩盤法面に生じている剥離浸食の状況**

写真B-1ページ

①海食崖直下の散策道（海水面より4m）に沿う調査地（矢印部分）とその周辺。

②50年程前の道路拡幅部で、さらに駐車スペースのために再拡幅された部分。海食崖下端の部分が、さらに人為的に削り取られ、人工露岩法面となっている。この人工法面部分（路面から高さ2～3mまで）が、現在急速に剥離浸食されている。波打ち際からは、アスファルト道路（幅3m）と駐車スペース（幅5m）を合わせると8mを挟んだ法面で、波浪の直撃は受けない。

③・④剥離浸食が進行している状況がよくわかる部分の拡大。人工法面直下の地表上には、剥離によって落下した岩粉が厚く溜まっている状況とその色調が②の下端部でよくわかる。メジャーは1mの折尺。

写真B-2ページ

①・②海波が直撃する切石積み法面に生じている剥離浸食。海水面よりの比高2～4m。①は剥離が進み、すでに切石のサイズがわからなくなっている。剥離浸食深は、砂岩の層理に沿って5～10cmに達している。

③・④海岸道路と駐車スペースを挟んだ海波の直撃を受けない切石積み法面の剥離浸食の状況。切石積み接合部のつなぎのセメント部分の方が剥離せず突出している。この石積み法面構築年（50年程前）から、砂岩の切石の表面は5～10cmが剥離侵食したことがわかる。

**C. 海食崖に掘り込まれた散策用トンネルの周辺とトンネル内部に生じている剥離浸食の状況**

写真C-1ページ

①平坦な浸食面と海食崖先端部の調査地（矢印部分）。写真の手前下部は陸繋砂州の砂堆部分で、海水浴場でもある。

②陸繋砂州を挟んで下（南）側がマンリー島、上（北）側矢印が調査地。

③調査地の海食崖。崖面には、砂岩の水平層が黒い部分と白い部分の互層となっていることがわかる。写真中央の左よりにトンネルの入り口が見える。

④崖面の黒い部分は、小礫や貝混じりの砂層である。この部分は硬くコンクリート化しており、表面には苔が付着しやすくそれが年月を経て黒くなり表面をコーティングしているため、剥離が白い部分より進まない。

写真C-2ページ

トンネルの外側とトンネル内部の状況。散策道として海食崖中に掘り込まれたトンネルの規模は、高さ2m・幅1m・長さ20mで、丁度人がひとり立った状態で通れるだけのスペースに過ぎない。

①トンネル北側入り口。②トンネル南側入り口。

トンネル上端の天井は黒い硬い砂岩層の部分であり、トンネルの中心部は白い砂岩層の軟らかい部分に掘られていることがわかる。

③トンネルの内部。左右両側の白い部分は、軟らかい均質の砂層部。この部分にはすでに掘り込まれたときの掘り跡の様子を示す部分は見られず、掘削後の剥離浸食が左右両側共に20cm位進んでいるため、側面が丸くなっている状況がよくわかる。

④白い部分は、均質の砂岩のみの層である。この部分は剥離が進んでおり、近接してみると浸食の進む状況や形状がよくわかる。その下端部には岩粉が厚く溜まっている（サンプル採取）。砂岩層はほぼ水平であるが、地層内にはクロスラミナがみられ堆積時の状況をよく示している。

#### 4 微地形の特徴と形成速度

##### A. 調査地としての恵まれた条件

海岸の微地形を調査するに当たってManly周辺各地のフィールドとしての条件は、西岸海洋性気候下で、同じ地質構造からなる砂岩地域であるという共通の自然環境のもとに位置しているため種々な微地形を比較研究するには、極めて恵まれた場所である。その上、同一地域の海食崖の側面内で、自然状態の崖の法面と、そこへ土木工事に伴ってできた人工法面との両者に生じている微地形を比較しつつ、その形成過程や形成速度について観測し考察できた。

特にこの地域には、興味深い微地形である蜂の巣状の典型的なTafoniが多数形成されている。さらにTafoniと同様条件のもとで形成されていると推測される線状・板状の剥離浸食、すなわちTafoni（化・類似した）微地形も各地で見られた。しかも共に現在勢いよく生育している状況を確認できた。

B. 剥離浸食による微地形の特徴

この地には、典型的なTafoni微地形が形成されている。その形状は写真ページで示したように、Tafoniとしての完全な形態・景観を呈している。しかも周辺地域のものを含め、それらをじっくり観察・測定することによって、その生長の状況や形成過程と形成速度も推察できた。そこで、その模式図(図-5)を作成してみた。Tafoni(化)風化・剥離浸食微地形も、道路沿いの人工法面とトンネル内部と外側の状況を、同様にじっくり観察できた。

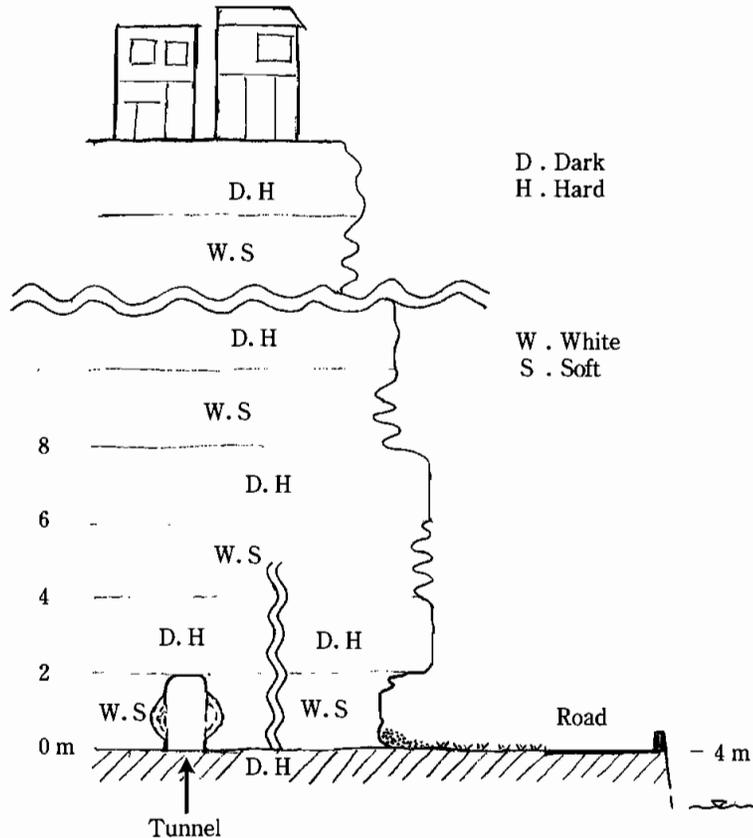


図-5. 海食崖の浸食地形模式断面図  
Fig. 5: Topographical Section Through an Eroded Coastal Cliff

その結果、蜂の巣状のTafoniは、写真ページA-2の①事例にも示したように、この地の自然環境のもとで、かなりの年月を経ながら形成されている。それに対し、Tafoni(化)による浸食は、人為的な新鮮な裸岩の露頭が造られた初期段階では苔などによるコーティングも無いため、何らの障害(物・作用)も無く剥離浸食は強風や塩分を含む外気に触れて現在も勢いよく、特に砂岩のうちの浸食に弱い部分の白い砂層を中心に剥離を進めていることがわかった。しかし、いずれはここでも浸食の平衡状態に達してくると、剥離浸食の進行も衰えそれに従って苔などの微生物が付着しだし、それらが生長して表面をコーティングし、周辺地域に見られるような自然環境下の法面と同様状態となっていくものと考えた。

### C. Tafoni・Tafoni (化) 微地形の形成速度

この地域の場合、戦後急速にリゾート的都市開発が進んできたのに伴って、海食崖下にあった散策用の狭い道路も徐々に拡幅されてきた。その工事によって生じた新鮮な人工露岩法面と、切石積みの法面、さらにトンネル掘削によるトンネル内部の法面等での剥離浸食深を測定することによって、微地形の形成過程や形成速度を算出した。

その結果：

- 道路拡幅に伴う新鮮な人工法面のうち、やわらかい白い砂岩層の部分の剥離浸食深は、約50年間で50~100cm = 10~20mm/年。
- 道路拡幅に伴う人工法面のうち、切石積み部分の切石表面に進んでいる剥離浸食深は、約50年間で5~10cm = 1~2mm/年。
- 海食崖中に掘り込まれたトンネル内部の剥離浸食深は、約50年間で10~20cm = 2~4mm/年。トンネル外側では現地で観察した状況からは2倍位の4~8mm/年。
- 蜂の巣状Tafoniの場合、形成初期の若い段階での剥離浸食深は、穴内底部に落下し溜まっている岩粉量よりかなり速いことが推察されるが、進行は徐々に遅くなり、1サイクルが終了する時期の剥離浸食深は、数100年間で20cm = 数年で2mmと推定。

以上のような値となった。すなわち、各場所によって環境差・岩質差はあるが、かなり具体的な調査ポイント毎の剥離浸食深の値を得ることができた。

### D. これまでの研究地域で得られている値との対比

筆者がすでに同様調査を行って得ている地点の場合<sup>11)~15)</sup>、

- 自然状況下での、韓国東北部海岸注文津の花崗岩Tafoniでは1mm/年。
- 石造寺院の屋外でのインド東南部マハーバリプラム（花崗岩）・カンチープラム（砂岩）では、1300年間で10~100cmなので0.1~1mm/年。
- 東京上野のレンガ壁面では、100年間で10cmなので1mm/年。
- カンボジア・アンコールワット石造寺院の屋内石柱では、800年間で7~10cmなので0.1mm/年。

さらに、高橋・松倉・鈴木などによる宮崎県青島海岸の波食を受ける弥生橋の橋脚では、5mm/年。などの値が得られている<sup>16)17)</sup>。

## 5 さいごに

オーストラリア大陸東岸、西岸海洋性気候下のシドニー湾口で太平洋に臨むマンリー陸繋島の外洋側海食崖に生じている風化・浸食による微地形の調査を行った。マンリー島周辺は、中生代三畳紀の主として砂岩の水平層からなり、地形は標高100~200m程の極めてなだらかな平坦面が発達している。一方周囲の海岸には海食崖が連なり、特に外洋側には直立するような断崖が続き、崖下には海食台プラットフォームが発達している。

海食崖は、遠望すれば直立するように見えても、近接して眺めてみると砂岩の硬軟層に応じた浸食を受け、ノコギリの歯状となった切り立っている崖であることがわかる。さらに海食崖の側面では、下方の直接波浪や暴浪を受ける部分と、海食崖側面上方の強風と塩分を含んだ海霧の付着による風化浸食部とに分けられる。

今回は、このような海食崖周辺に生じている微地形について現地調査を行った。マンリー島の外洋側では、自然状況下の海食崖側面露頭と、大戦後の50年程前に形成された道路法面やトンネル構築による人工法面露頭が存在しており、人工法面にも風化と剥離浸食が現在勢いよく進んでいる状況を現地で確認した。このため人工法面の形成年代と、その後の剥離浸食深と形状や形成過程を観察・観測し、自然状況下で形成されている微地形との対比を行うことができた。

海食崖下の側面には、風化浸食微地形の代表である典型的な蜂の巣状多穴のTafoniが形成されているところと、砂岩の層理に沿って剥離が進み線状～板状に掘り込まれたTafoni化浸食が進んでいるところがあり、両者共に現在活発に成長していることがわかった。このうち前者の蜂の巣状Tafoniの場合、その形成初期の多穴段階から徐々に成長していくと穴が拡大し、さらに進むと穴が連結してのっぺりとした面となり、成長が一端停止して1サイクルを終了する段階に至る過程を観察できた。その結果をもとに一連の形成過程について模式図を作成した。

海食崖下端部での道路拡幅工事に伴い50年程前にできた人工法面露頭では、後者の砂岩の水平な層理に沿って線状・板状の剥離浸食が盛んに進んでいる状況を観測できた。切石積法面の場合、それらをつなぐセメントの部分が突出するほど活発に剥離浸食している状況が観察できた。さらに海食崖中に掘り込まれた散策用のトンネル部分では、外気や暴浪の直接当たるトンネル入口・出口周辺部と気流のみが進入するトンネル内部の剥離浸食の状況を比較できた。

以上の結果から、今回の調査地の場合、道路拡幅部の人工法面の露岩部に生じている剥離浸食深は、50年間で150～200cm、道路拡幅部の切石積法面の切石面に生じている剥離浸食深は、50年間で5～10cm、トンネル内部の露岩部に生じている剥離浸食深は、50年間で10～20cm、蜂の巣状Tafoniの1サイクルの成長は、数100年間で20～25cm、という測定値を得た。これらの値をこれまでの調査による測定値と比較すると、韓国北東部の注文津海岸の典型的Tafoniでは1mm/年、インド東南部の石造寺院では1300年間で10～100cm、松倉公憲等による宮崎県青島の弥生橋の橋脚側面の浸食の場合5mm/年、の値が得られている。

今後、さらに各地でのこの種のデータを収集・比較し、各気候・岩種やその他の環境に即したより一般的な数値を得ることに努めたい。さらには石造文化財の保全・保護のためのデータとしても応用できるようにしたいと願っている。

## 註

- 1) C.R.Stone (1984) : Australian Landforms.Pioneer Wrem.
- 2) C.R.Twidale E.M.Campbell (1993) : Australian Landforms. Structure, Process and Time. Gleneagles Publishing.
- 3) David Johnson (2004) : The Geology of Australia. Cambridge University Press.

- 4) J.T.Jutson (1939) :Shore platforms Near Sydney,New south Wales. Journal of Geomorphology,Vol2・No3.
- 5) Branagan David・Chris Herbert (1976) :An outline of the geology and geomorphology of the Sydney Basin.Trevor Longford-Smith.
- 6) Branagan David・Paokman Gorden (2000) :Field Geology of New South Wales.Mineral Resources Sydney.
- 7) 理科年表 (2005) :丸善書店.
- 8) [http://tabi.nikkeibp.co.jp/tab/t\\_asia.html](http://tabi.nikkeibp.co.jp/tab/t_asia.html)
- 9) J.N.Jennings (1968) :Tafoni, The Encyclopedia of Geomorphology, Dowden Hutchinson.
- 10) 赤木 祥彦 (1981) :タフォニ.地学辞典.平凡社.
- 11) 池田 碩 (1989) :地中海コルシカ島の花崗岩地形.奈良大学紀要 第17号.
- 12) —— (1990) :韓国東北部海岸 注文津付近にみられるTafoni地形.奈良大学紀要 第10号.
- 13) —— (1998) :『花崗岩地形の世界』Tafoniの項p44-55.古今書院.
- 14) —— (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.
- 15) —— (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.
- 16) 高橋 健一・松倉 公憲・鈴木 隆介 (1993) :海水飛沫帯における砂岩の浸食速度.-日南海岸・青島の弥生橋橋脚の浸食形状-.地形 第14巻 2号.
- 17) 松倉 公憲 (1996) :石造文化財の保存-石材における風化作用と速度-.土と基礎 第44号.

## 謝辞

2004年の調査時には、大学院生の待鳥良治君が現地での観測を手伝ってくれた。2005年の調査時には、Adelaide大学のC.R.Twidale教授に会い、海岸の侵食地形について、さらに今回の報告について貴重な意見を聞かせてもらったことに対し、感謝の意を表します。なお、本研究費の一部は、2005年度奈良大学研究助成金を使用させてもらった。

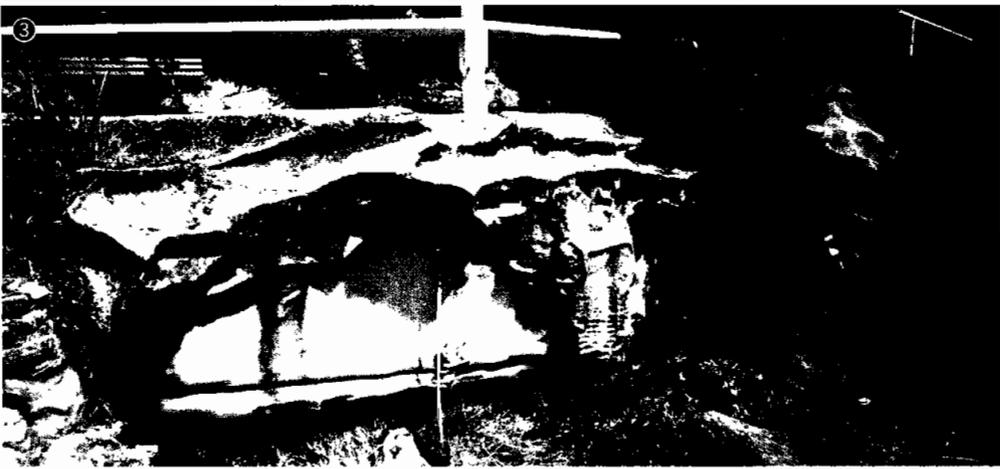
①



②



③



④



写真A-2ページ

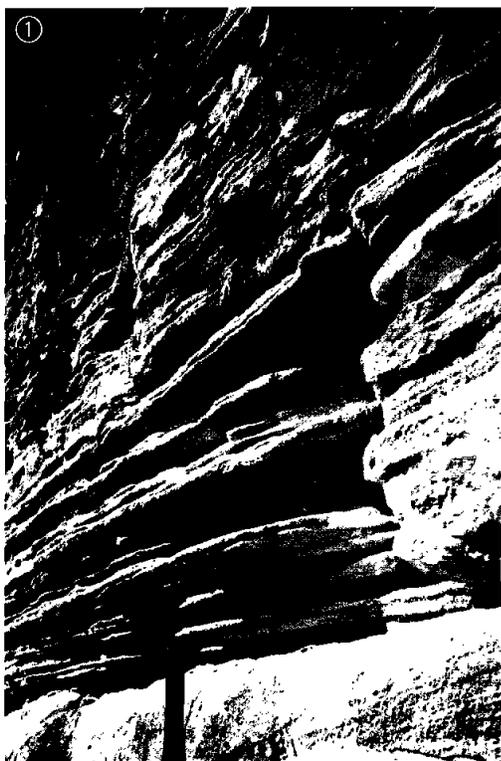


B. 海食崖下の道路拡幅工事に伴って出現した新鮮な岩盤法面に生じている剥離浸食の状況  
PageB: Exfoliation-erosion of Exposed Rock Surfaces and of Stone Road Retainer Walls

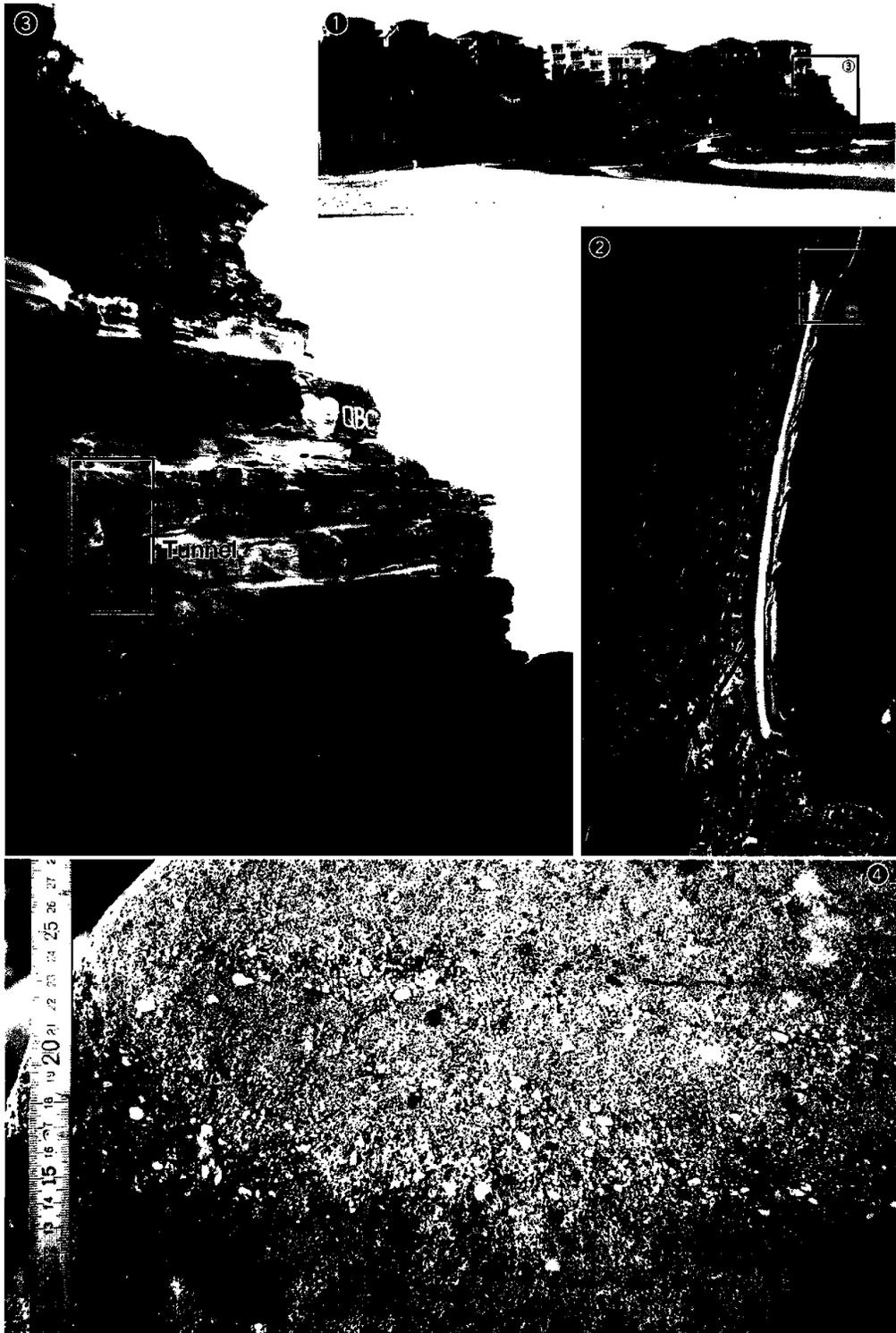
写真B-1ページ



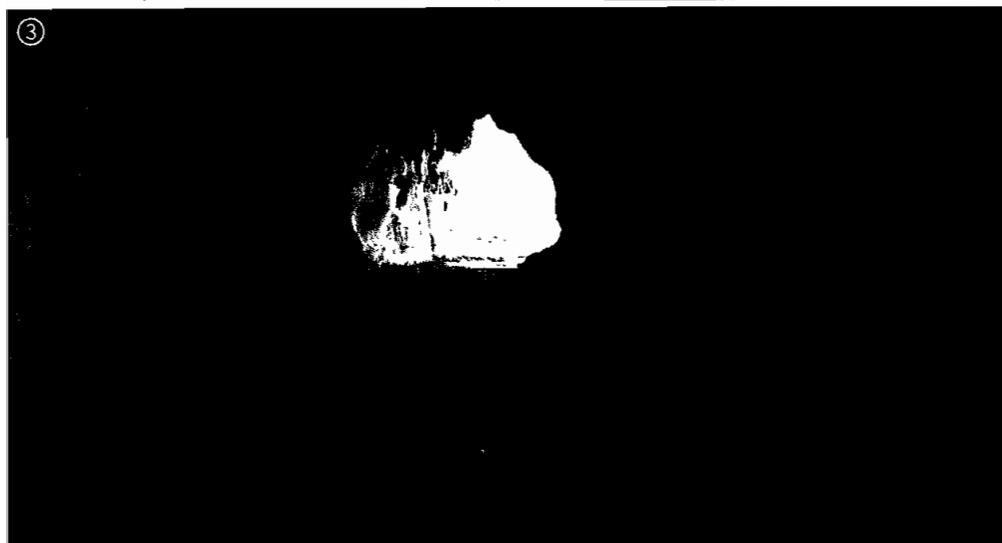
写真B-2ページ



C. 海食崖に掘り込まれた散策用トンネルの周辺とトンネル内部に生じている剥離浸食の状況 写真C-1ページ  
PageC: Exfoliation-erosion of the Stone Walls Inside and Outside a Coastal Tunnel



写真C-2ページ



Micro-Topographic Weathering of the Manly Island Coast in Sydney Bay, Australia

by Hiroshi Ikeda  
Nara University  
Nara, Japan

The author did a survey of the microtopographic weathering and erosion of the ocean-facing coast of Manly, a land-tied island facing the Pacific Ocean and located at the mouth of Sydney Bay in the coastal climate zone (Cfb) of eastern Australia. The geology of the Manly Island area is mainly Mesozoic Triassic very flat-lying sandstone that forms a very flat topography 100-200m in elevation. The coast is continuous coastal cliffs. In particular, on the ocean side, these vertical cliffs have developed abrasion platforms.

This survey is concerned with the microtopography of the cliffs on the ocean-facing side of Manly Island. There are two types of cliffs there: One is made up of naturally eroded exposed outcrops. The other is made up of man-altered surfaces the result of tunnel and road-widening construction done over 50 years or so following the end of World War II. Those surfaces have undergone continuous weathering and exfoliation erosion. Since it is roughly known when the weathering and erosion of those man-made cliffs began, the author observed their erosion depths and development process. He then could compare those to naturally-occurring Tafoni microtopography.

The results of these observations are as follows: the rate of erosion depth in the soft sandstone exposed during road expansion is 10-20mm/yr. The erosion rate depth of the cut sandstone used to make the retainer wall below the road is 1-2mm/yr. The erosion rate of the exposed sandstone walls inside the tunnel is 2-4mm/yr. Natural tafoni erodes away completely at a rate of 20cm/several centuries or 2mm/several years.

In comparison with these erosion rates, the author found Tafoni on the coast in northeastern Republic of Korea to be eroding at a rate of 1mm/yr, and he found stone temples in southeastern India to be eroding likewise at a rate of 1mm/yr. Prof. Kiminori Matsukura's group determined that the stone supports of a bridge in Aoshima, Miyazaki Prefecture on the southern island of Kyusyu were eroding by wave action at a rate of 5mm/yr.

Finally, the author plans to collect data from all over Japan and elsewhere and compare erosion rates under different climatic conditions for various kinds of stone in various environments in order to determine a generally applicable erosion rate. Furthermore, I hopes that this data will prove useful in the protection of stone relics all over the world.