

## 第2 白糸トンネル岩盤崩落と渡島半島西縁部の地質

渡辺暉夫

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

WATANABE, Teruo

Division of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science,  
Hokkaido University, 060-0810, Sapporo, Japan

### Abstract

In Late August of 1997, a large collapse of sea-cliff (56,000m<sup>3</sup> in volume) occurred twice (25th and 28th) at the southern entrance of the Dai-Ni (No.2) Shiraito Tunnel of No.229 National Highway which runs along the western coast (Japan sea side) of Oshima Peninsula, SW Hokkaido. Fortunately, no one was injured/killed, although the shelter part (114m in length) and the fence of southern entrance (12m in length) were destroyed.

The author emphasizes its steep topography from the Japan sea bottom to the peak of the east of the tunnel. The average slope is 8.5° which is steeper than that of the Japanese Southern Alps area, rapid uplifted area in Quaternary. The steep slope has been produced by the plate boundary activity between the Eurasia and Okhotsk plates. The coast line is not only a part of the steep topography, but also a rapidly eroded zone shown by erosion surface along the coast.

The collapsed site is composed of Neogene (ca.4.9Ma) andesitic hyaloclastites (Okotsunai formation) which are divided into three units (Lower, Middle, and Upper). The thickness of the Lower unit is 25m+ and that of lower Middle unit vary from 20m to 50m with rapid lateral lithological change. A small amount of celadonite and smectite occur in the lower part of the Middle hyaloclastite unit. The thickness of the main (upper) part of the Middle unit is especially variable from 20m to 120m. The Upper unit includes reworked hyaloclastite and the thickness is 50m+. Judging from the fresh broken surface was recognized only in the lowest part of the collapsed cliff, concealed and subparallel cracks for the cliff before the collapse had developed extensively inside of the cliff in the Middle unit of the Okotsunai formation.

The cause of the collapse is 1) development of concealed cracks with nearly

virtical dip inside of the cliff, 2) heavy rain fall in Early August and 3) Overpressure for the lower Middle unit of the Okotsunai formation which was weakened in the water-saturated state for about 20days.

**Key words :** Sea-cliff collapse, Dai-Ni Shiraito Tunnel, Hokkaido, Japan sea coast, plate boundary, hyaloclastite, concealed cracks

## 1. はじめに

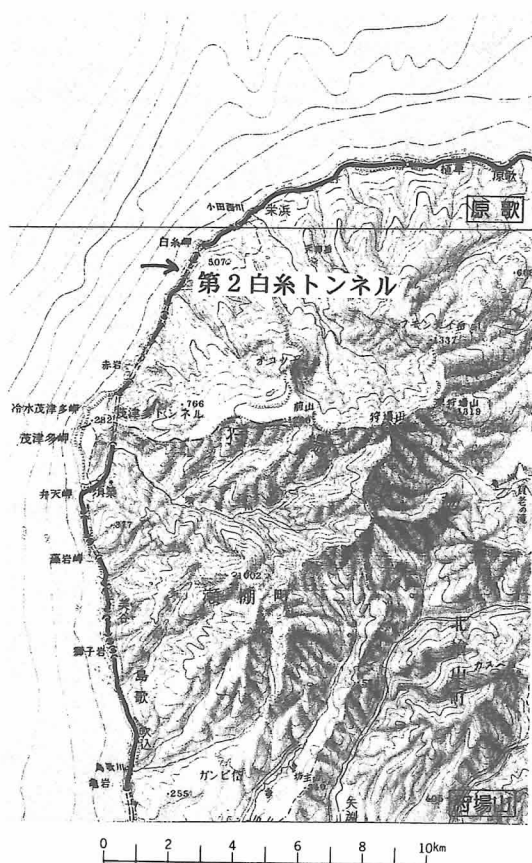
1997年8月25日に発生した第2白糸トンネル坑口南部（瀬棚側）の岩盤崩落は、第2回目の崩落が同28日にも発生し、崩落岩体の総体積は約 $56,000\text{m}^3$ に達した（1回目 $42,000\text{m}^3$ 、2回目 $14,000\text{m}^3$ ）。1995年2月の豊浜トンネル岩盤崩落の規模を上回ること5倍である。トンネル巻出し部約114m、擁壁部約12mを破壊したが、幸いにも被災者はいなかった。

直ちに一般国道229号第2白糸トンネル崩落事故調査委員会（委員長 佐藤寿一北海道大学大学院工学研究科教授）が設置され、翌1998年2月に報告書が公表された<sup>1)</sup>。筆者も委員の一人として事故調査に参加した。本論文では調査報告書に基づき事故の概要を紹介するとともに報告書では十分に触れられなかった地形の特徴とテクトニクスとの関係および崩落岩盤背後に発達した深い亀裂の生んだ岩石について記載し、亀裂の発達について考察する。

## 2. 地形の特徴

第2白糸トンネルは島牧郡島牧村の海岸沿いを走る国道229号線にあって西南背後に標高1520mの狩場山を最高峰とする狩場山地が迫っている（第1図）。国道から狩場山までは約8.1kmで平均勾配は186m/km（傾斜 $10^\circ$ ）であるが、前衛のオコツナイ岳（1170m）までは272m/km（傾斜 $15^\circ$ ）とさらに急勾配となる。これらの頂は第四紀更新世の狩場山溶岩（角閃石デイサイト）よりなるが、その下位にはやはり第四紀更新世のカンラン石玄武岩よりなる穴床前溶岩が分布し、第2白糸トンネル東方では300m前後以上の高度に台地状地形を作っている<sup>2)</sup>。海岸からこの台地の先端まではわずか400mであって、750m/kmつまり、平均傾斜 $36^\circ$ という急勾配である。事故現場では200mを越えるリッジが海岸にそびえ、その平均勾配は $62^\circ$ で、国道の平坦部を除くとほぼ垂直に近い200mの崖が連なっている。一方、目を海底に向けると約22km沖で水深3000mの海洋性地殻の海底に達する。平均傾斜は $8^\circ$ ほどであるが、日本の海岸線でこれほど海岸の近くに深海が発達する例はない。

平均傾斜 $8^\circ$ は3000m級の山地を例に考えると急峻な山脈に相当する。具体例を南アルプスにとろう。糸魚川－静岡構造線が走る富士川流域の身延から最も



第1図 第2白糸トンネルと狩場山地の地形概要  
 国土地理院発行20万分の1地形図より  
 原歌，狩場山は当該地域の5万分の1地形図区分

近い3000m級の山である聖岳までの平均勾配は約 $6^{\circ}$ 。日本海海底から海岸までは身延周辺の富士川から南アルプスを見上げた場合よりも急俊である。上述のオコツナイ岳山頂までを考えると平均勾配は $8.5^{\circ}$ に近く、さらに急俊となる。つまり、第2白糸トンネル周辺の海底から山頂までの地形の急俊さは日本では他に例が無く、世界的に急な地形地帯の上部を国道が走っていると考えべきである。

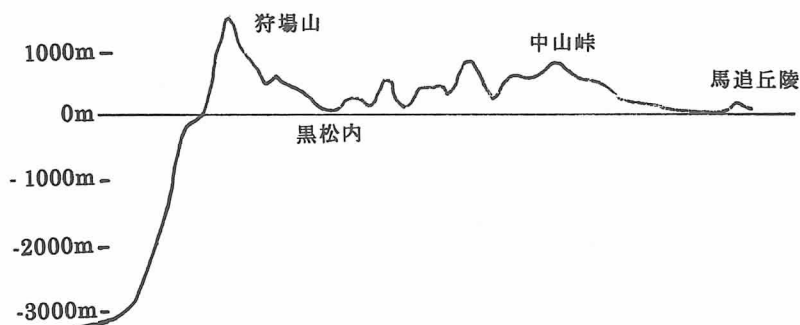
この地形変化を第2白糸トンネルー狩場山ー中山峠ー石狩低地帯を越えて馬追丘陵にいたる地域について、地形断面図を作成した(第2図)。第2図の西側の海底はアムール・プレートの東縁である。これ以东はオホーツク・プレー

トに属するが、黒松内の低地帯内と石狩低地帯の東縁には活断層がある。石狩低地帯の西縁は支笏火山の噴出物に覆われなだらかな地形をなっているが、その基盤の変位は明らかではない。第2図では細かい地形変化は捉えていないが、注目すべき点は上述の4500mの高度さに加え、海蝕台から西に続く緩い勾配である。この地形の屈曲点は第2白糸トンネルのある海岸線が急地形の一部でありながら、さらに急勾配を形成しつつある新たな浸食域であることを示している。比喩的に表現することを許されるなら、4500m級の大山脈の上部にあらたな浸食地形が形成されているのに等しく、地形だけ取り上げても、急崖の崩壊の可能性が高く、特別に注意が必要な地域であった。

加えて、プレート境界に位置する本地域は全般的上昇地帯であった。奥尻島の海岸段丘の研究によれば、 $0.6 - 1\text{m}/1000\text{年 (ka)}$  の割合で上昇している(宮内, 1988<sup>3)</sup>より算出)。傾動していて、北部ほど上昇速度は速い。渡島半島西部は海岸段丘の発達する地域として知られているが、約12.5万年前の中位段丘(最終間氷期最盛期の段丘)は寿都段丘とよばれ、20-30mの高度に発達する<sup>4)</sup>。この段丘は内陸側が高く、傾動している。積丹半島地域はブロック運動によって最近の5-6000年間でも2mほどの上昇量の差が生じており<sup>5)</sup>、第2白糸トンネルの南約45km(直線距離)の大成町貝取澗ではブロック隆起は10m前後に及ぶと考えられている<sup>6)</sup>。宮内<sup>3)</sup>によれば50-100m+に達する中位段丘面もある。最終間氷期最盛期の海水面の高さはどう見積もるかにもよるが、上昇の割合はおおまかには寿都段丘が $0.15\text{ m/ka}$ 、上昇量の大きいところでは $0.8\text{m/ka}$ 以上である。この上昇率は小さいところで100万年で800mの上昇であり、第2白糸トンネルの200mを越える急崖は、単純に見積もれば、第四紀(160~180万年前以降)更新世の末期20万年間のの上昇の結果である。この新しい上昇地塊には急崖面に垂直方向の応力解放が地質学的タイムスケールで行われてきたと考えるべきであろう。今後の渡部ら(1990)<sup>7)</sup>の指摘したブロック運動の特性を明らかにするとともに、隆起によって形成された旧崖の応力解放過程の定量的解析が望まれる。

20m以浅の海蝕台の広がり第2白糸トンネル近傍では沖合い400mまでであって周辺地域の中では狭くなっているが、この値は古平-余市間の豊浜トンネル地域など高い海蝕崖が海岸に迫っている地域も同様である。しかし、現在のほぼ海水面になってから進んだと考えられる浸食の影響を示す波蝕前縁は広くて、オコツナイの岩礁までと考えると凡そ150mと見積もられる。現在の海水面が約3000年前以降大きく変化していないと考えたときの海岸の後退速度は $5\text{cm/year}$ である。これは渡辺他(1997)<sup>8)</sup>で見積もった豊浜トンネル周辺での岬先端部以外での海蝕崖の後退速度とほぼ同じである。

今回の崩落では急崖は約20m後退しているので、200年分の崩壊と表現するこ



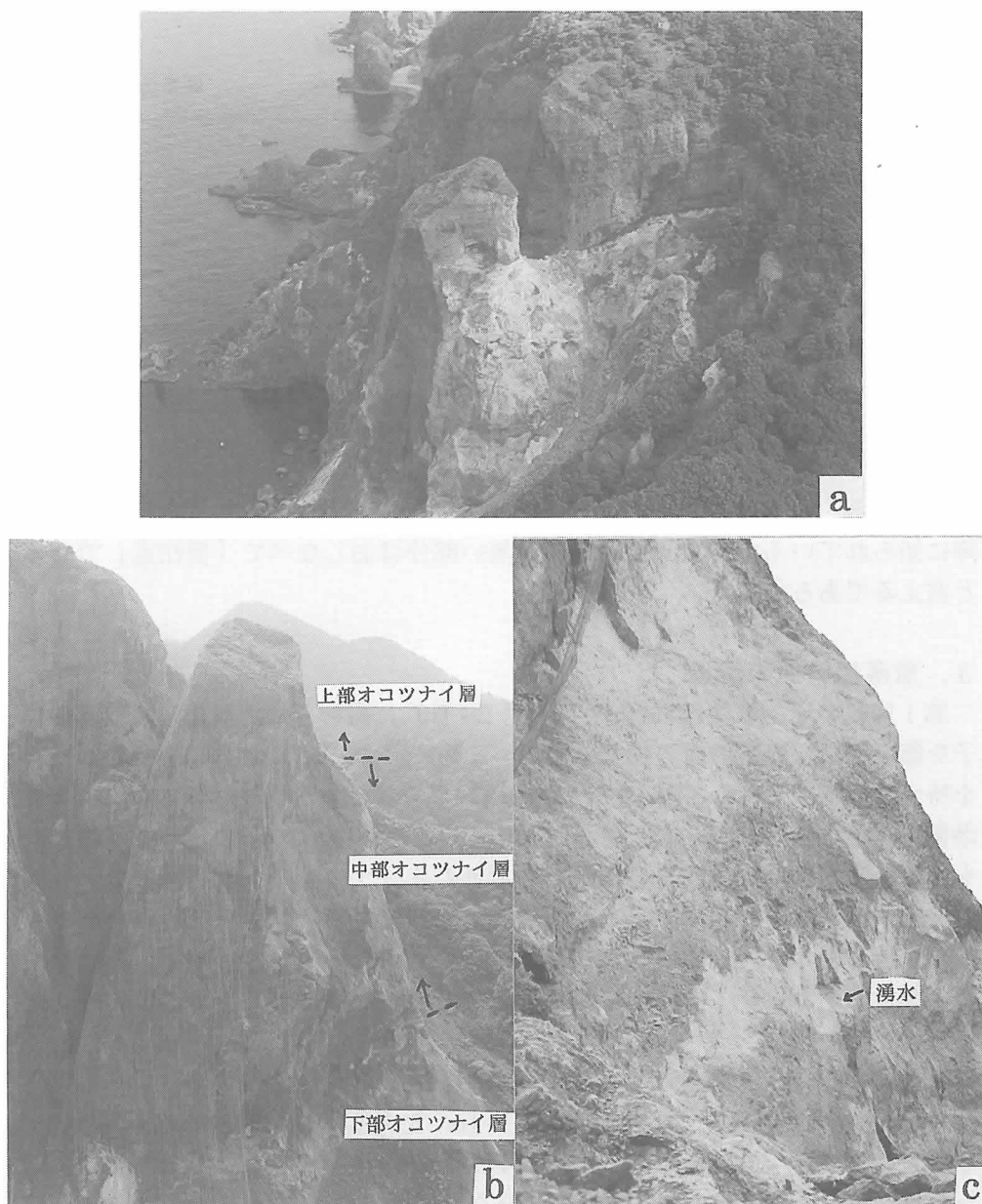
第2図 日本海底から第2白糸トンネル，狩場山，中山峠を経て馬追丘陵にいたる地域の地形東西断面（縦軸が誇張されている）

とも出来る．今回の規模の崩壊が200年毎に起こるとすると，江戸時代末期以降に知られている急崖で大規模崩落が無い部分はおしなべて「要注意」であると言えるであろう．

### 3. 崩落崖壁面の構造

第1回目の崩落の翌日（1997年8月26日）に撮影された崩落崖の壁面の様子を第3図に，崩落壁面の様子を第4～6図に示す．崩落は198.5mのピークを持つ岩塔状地形（第3図，a, b：丸山副知事を長とする事故対策本部によって準備されたヘリコプターより撮影）の西壁が最大厚さ約20mに渡って崩落したものである．岩塔の構成岩石は後期中新世のオコツナイ層（4.9Ma）で，崩落岩塊は中部オコツナイ層の最下部を残した部分と上部オコツナイ層の一部であった．地形上のオーバーハングが下部オコツナイ層（浸食されやすい凝灰岩質層）と中部オコツナイ層の間に認められたが，崩壊は中部オコツナイ層の最下部を残して発生した．

8月25日の1回目の崩落では北側の一部（突出部）を残している．岩塔の東側は北北西にのびる断層であり，1993年7月の北海道南西沖地震で崩落が起こった場所であり，事故防止のためのネットが周辺に張られていた．崩落面は大部分が赤褐色をした風化面であった．新鮮な剥離面（高さ15m，長さ50m）は崩落後に現われた崖面の下部（中部オコツナイ層の最下部）に認められるたにすぎない（第3図c 矢印）．そして，第3図c，第4図aからわかるようにその上部は比較的なめらかであって，流水による浸食作用の影響をうかがわせるものであった．このことは1回目42,000m<sup>3</sup>を最終的に支えていたのは凡そ750m<sup>2</sup>の部分であったことを示す．崩落岩石の平均密度を2.0・2.5kg/m<sup>3</sup>とすると，崩落直前に作用した剪断応力は約110・140kg/m<sup>2</sup>であった．事故調査委員会報告



第3図 第2白糸トンネル崩落崖 I

a,b は事故対策本部ヘリコプターより撮影 (1997年8月26日)

c は崩落崖北側より崩落面下部 (1997年8月26日撮影), 亀裂から湧水が認められる。

書によれば中部オコツナイ層の下部の一軸圧縮強度は乾燥状態で  $200\text{kg/m}^2$  以上、自然状態で  $77\sim 196\text{kg/m}^2$  (中部オコツナイ層最下部の平均値は  $105\text{kg/m}^2$ , 中部オコツナイ層下部のそれは  $140\text{kg/m}^2$  である), 強制湿潤状態では中部オコツナイ層最下部の平均値は  $109\text{kg/m}^2$ , 中部オコツナイ層下部のそれは  $134\text{kg/m}^2$  と低下する。この結果は強制湿潤状態が続き上部の岩盤剥離が進めば岩盤は崩落することを示す。

加えて、第4図b (または第6図) にはキレツに沿って水が浸みだしている (矢印) 様子が示されている。崩落面は崩落翌日には全体として濡れてはいたが、はっきりとした浸みだしは2回目の崩落岩体に沿う割れ目からのものとこの一箇所であった。この水の出てきたキレツは長くは続いていないが西側に傾斜しており、明らかに岩盤下部での支持強度を弱くしていた。また、水は周辺岩石が強制湿潤状態に近い状態であったことを語っている。

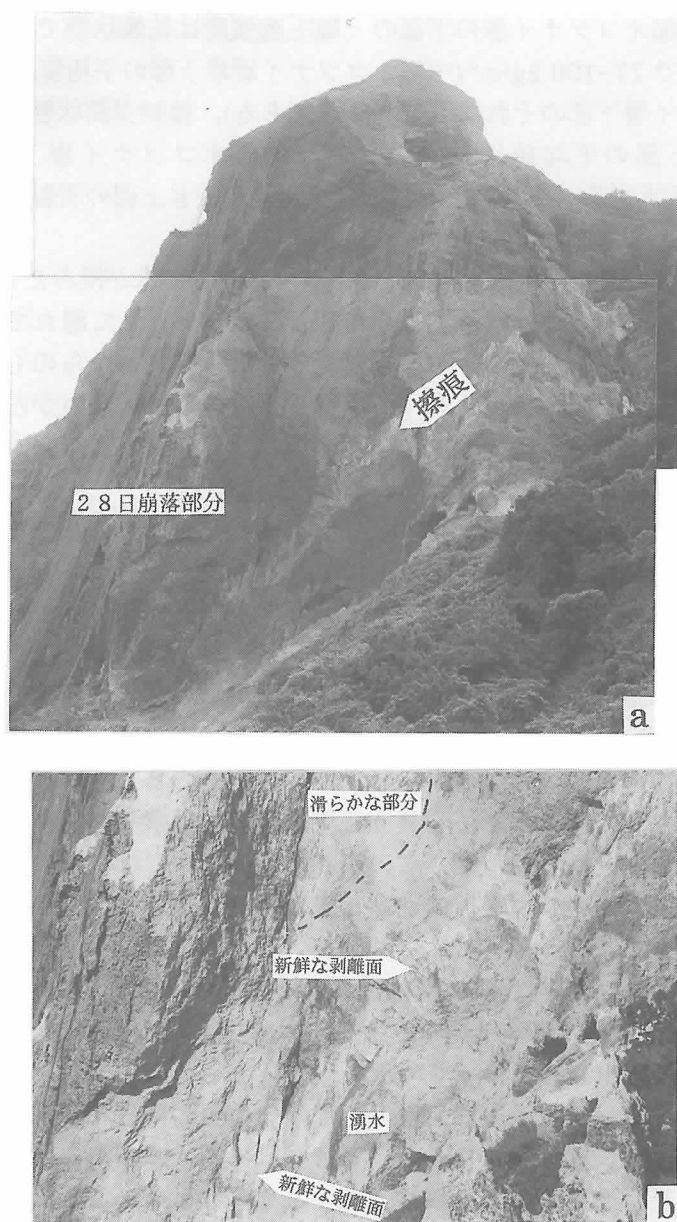
第4図aとbは崩落面右下側に岩盤滑落によって生じた擦痕をも写している (右の矢印部分)。この擦痕のある面は中部オコツナイ層最下部と中部オコツナイ層下部の境界であって、不規則なこの境界が一部で流れ板となって岩盤支持強度を弱めていたことを示す。第4図aとbは28日に崩落した岩体 ( $14,000\text{m}^3$ ) に沿うキレツは岩体上部にしか見られないことを写しているが、第3図bではネットの背後でわかりにくいキレツが岩体全面に沿っていることがわかる。このキレツは以前からわかっていたものとして事故直後マスコミにも取り上げられた。管理責任を負う北海道開発局は事故直後キレツは浅いものと判断していたと回答したが、この限りでは間違っていない。しかし、今後は急崖全面に及ぶキレツを推定させるものとして判断すべきであることを今回の崩落は教えている。

第5図a,bは崩落壁面上部の風化した比較的なめらかな面の存在を写している。第5図cは崩落崖下部の様子で、浸食されやすい凝灰質砂岩 (下部オコツナイ層) の上に崖錐堆積物が覆っている。

第6図は中部オコツナイ層最下部と下部の角礫質の部分と層状でありながら不規則な境界を持つ部分のクローズ・アップである。水の浸みだしている手前に傾斜した面を見せているキレツは連続するものではないこと、垂直に近いキレツとの交わる部分から水が出ていることから、ここではm規模のキレツが水の流路は支配していることがわかる。

#### 4. 岩石

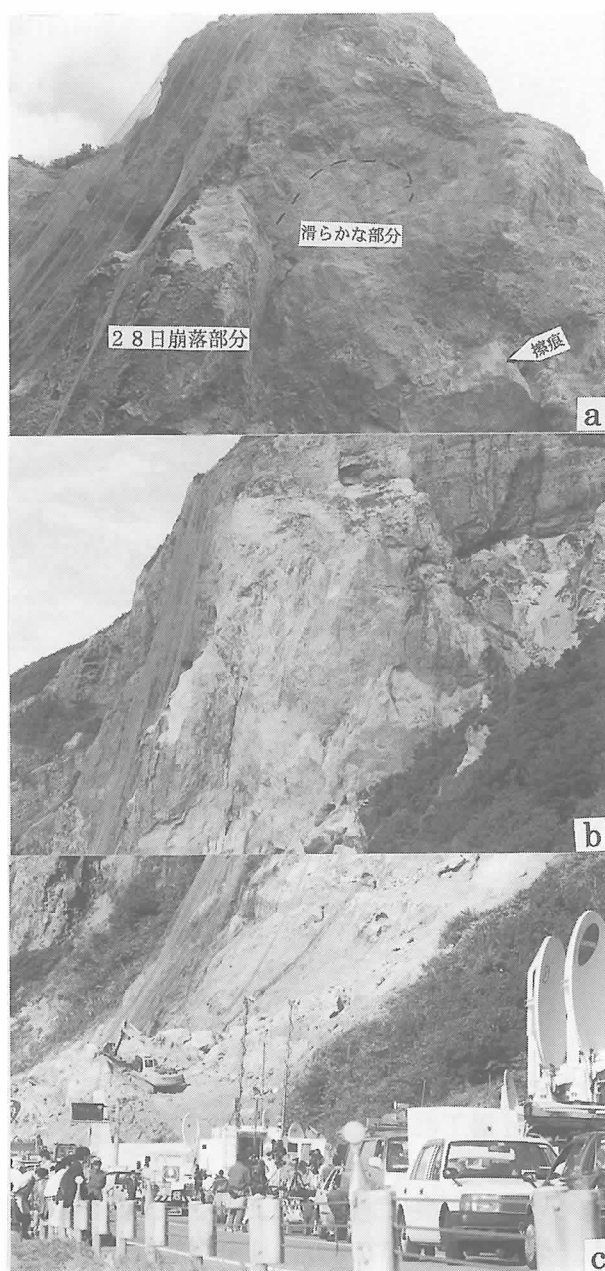
事故調査委員会報告書<sup>1)</sup>は崩落岩塊の岩石を記載し、中部オコツナイ層が角閃石安山岩質の hyaloclastite からなること、最下部層には黒雲母が見られ、変質が比較的進んでいることを記載した。その上位の岩石 (中部オコツナイ層中



第4図 第2白糸トンネル崩落崖 II

(1997年8月26日撮影)

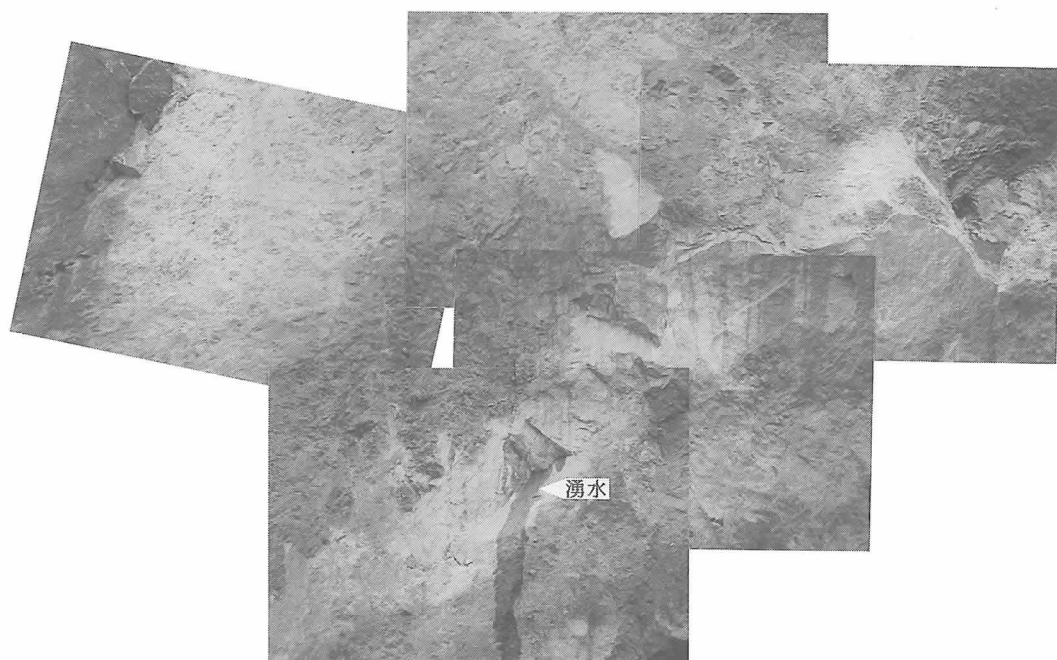
- a: 崩落面左下に28日に崩落した岩塊が残っている。擦痕(矢印)の見える流れ盤状の部分柱面に注意
- b: 下部のクローブアップ。新鮮な割れ目は少なく、平滑な面が右側上部にひろがる。



第5図 第2白糸トンネル崩落崖 III

a & b：崩落崖上部に相対的に滑らかな，流水活動があった面が見えている。

c：下部オコツナイ層の凝灰岩質の部分（遠景）と片付け作業。  
国道には作業を見守る報道陣。



第6図 第2白糸トンネル崩落崖 IV

中部オコツナイ層下部と最下部のクローズ・アップ。

湧水の認められる亀裂は連続性はよくないが亀裂面は流れ盤であることに注意。岩質は不均質であり，細かな亀裂が多く，崖面全体が透水性が高いと思われる。

中央部または上部)には黒雲母は見られず、両輝石が含まれるようになり、またクロソバライトが石基にみられ、セラドナイトの変質があること、オパサイト化が著しいことを報告した。しかし、岩石は概して新鮮であった。ここでは重複を避けるために基礎的記載は行わず、その後の顕微鏡下の検討に基づく、微細なスメクタイト脈の産状に注目して記述する。

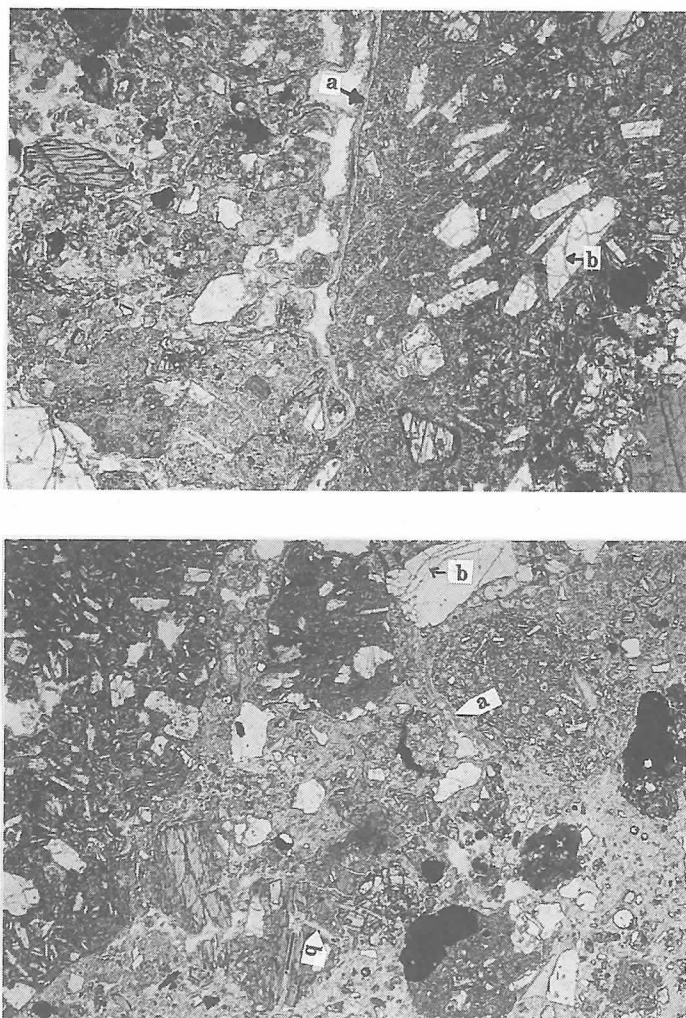
鏡下写真を第7図に示す。水中での急冷を伴う Hyaloclastite の特徴と考えらる微細なクラックが基質や半晶を貫いている。そして、一部ではそのクラックが開口し、スメクタイトが形成されている。そして、この変質はクラック内に限られているので、隣接するガラス基質が新鮮である。したがって、局所的にせよ、いわゆる熱水の作用による変質とは考えにくい。この変質鉱物の産状は長期にわたる地表水の流入によってスメクタイトが生成された可能性を推測させる。また、鏡下でみられる岩質境界に沿って相対的に幅のあるスメクタイト脈が見られる。角礫岩質に部分、つまり中部オコツナイ層上部（または中央部）にはこのような変質が卓越することを示す。

以上の観察は hyaloclastite のクラックや岩質境界は水の流入があり、これがキレツを広げてゆく一つの要因になりうることを暗示しており、顕微鏡サイズの観察と露頭オーダーとの観察を直接結び付けるのは飛躍はあるが、中部オコツナイ層上部（または中央部）を中心に流水の活動と岩盤剥離が進んでいたことと調和的である。

## 5. 考察とまとめ

事故調査委員会は地質・岩石物性・モデル計算などの点から岩盤崩落のメカニズムを解明し、崩落岩盤背後に発達した剥離面によって岩塊の荷重が湿潤状態にあった中部オコツナイ層の最下部一下部にかかり、強度限界を越えて崩落にいたったものであることを指摘した。赤外放射温度計の観察によれば、剥離していた壁面の中央部は長期にわたって相対的に低温であった（報告書<sup>1)</sup>、図 3-3-4）。これは湿潤状態にあったためであろう。また、岩盤崩落後2週間余のあいだ、崩落壁面からは降雨量に関係なく湧水が続いていたことを明らかにした（第8図：オリジナルな図の番号は報告書<sup>1)</sup>の図 3-3-5）。8月5日の本巻地区における最大日雨量は 100mm を越えており、その影響が一ヶ月以上続いていたと考えられる。

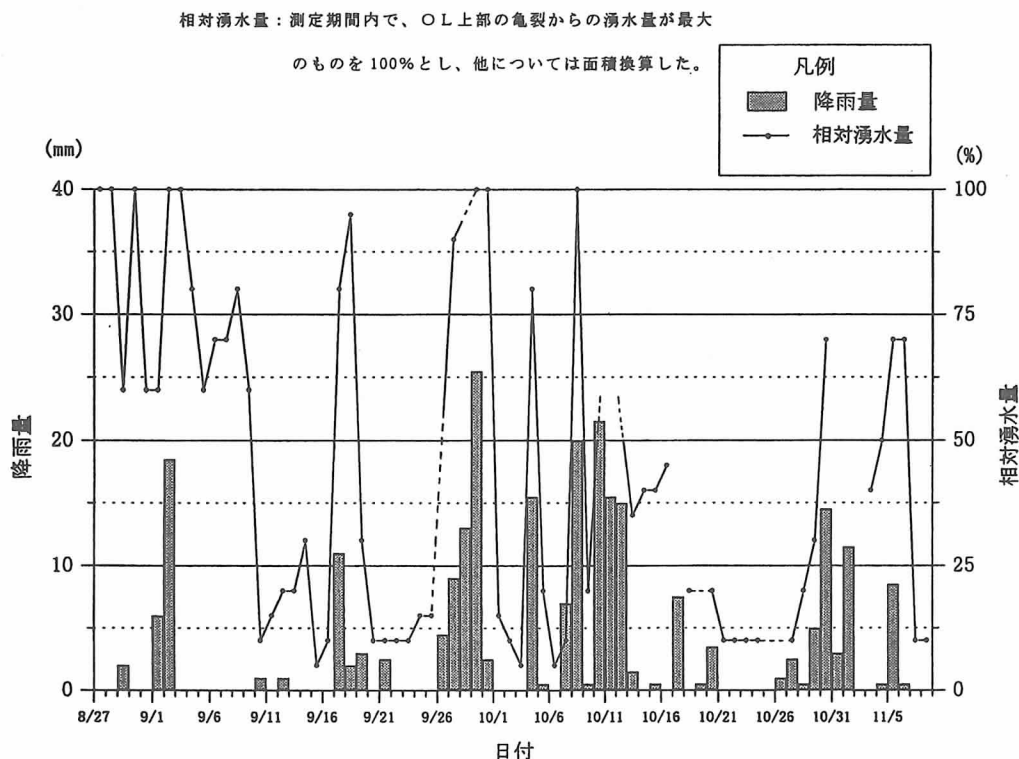
本報告では上記の岩盤崩落のメカニズムは補強する観察結果を記述した。外からは確認できない剥離面が存在していたことは豊浜トンネルの岩盤崩落事故と同じである。剥離面の形成には断層運動や地震の影響、長期にわたる応力解放は無関係ではないし、凍結・融解作用の繰り返しは重要である。しかし、本報告では、水の浸透しうる hyaloclastite 中の微細なクラックや角礫質岩の岩相境



第7図 ハイアロクラスタイトの顕微鏡写真（横 6mm）

岩質境界にスメクタイトが形成されている（矢印 a）。また、鉱物中にも細かい亀裂が形成されている（矢印 b）。

界のクラックに端を発するものがあるであろうことを述べた。つまり、岩相変化の著しい hyaloclastite 自体が北海道においては亀裂の進展しやすいものであるという認識が重要である。このことは亀裂の伸長によって岩石強度が時間や



第8図 日降雨量と崩落壁面の相対湧水量（第6図の亀裂からの湧水量が最大であった時のものを100とし、面積計算）との関係  
 9月10日までは壁面からの湧水量は降雨量に関係無いことに注意  
 （第2白糸トンネル崩落事故調査報告書から引用）

場所とともに変化することを意味するから、岩石強度試験による岩石強度だけ岩盤強度を判断していると見落としやすい点であるかもしれない。

豊浜トンネル岩盤崩落などの事故と併せて包括的検討は別に行なわなければならないが、今後、岩盤崩落の予測に向けて以下のことを指摘しておきたい。

- 1) 国道229号線沿いの急崖は200年前後の間隔で厚さ20mほどの岩盤が崩落があってもおかしくはない。
- 2) 急崖自体に亀裂が発達しやすく、浅いものとはいえ連続性の良い亀裂があれば、内部に広く亀裂が発達しうると考えるべきである。特に岩相変化の著しいhyaloclastitesについては亀裂の形成過程について今後の研究が重要であろう。
- 3) 上の2)のまとめと関係するが、水の湧出経路に関する調査、水と岩石の相互作用と亀裂の形成について検討が必要であり、湿潤状態が長く続く場合がある

ことを考えれば、集中豪雨から 20 -30 日は崩落の要注意期間である。

## 謝辞

本報告をまとめるに当たり、第2白糸トンネル岩盤崩落事故調査委員会の佐藤寿一委員長はじめ委員の各先生、事務局の方々には報告書作成を通してご協力・お教えいただいた点が多く、この場をお借りして、関係者の皆様に御礼を申し上げます。北海道開拓記念館の赤松守雄先生には積丹半島の第四系についてご教示いただいた。事故対策本部の方々には現地で種々ご援助いただいた。北海道地区自然災害科学資料センターの板倉忠興、藤田睦博先生には投稿に当たり、親切なご配慮をしていただいた。理学部地球科学科の田島貴裕技官および鈴木裕子さん、北海道地区自然災害科学資料センターの納谷裕子さんにもお世話になった。記して以上の方々に謝意を表する。

## 文献

- 1) 第2白糸トンネル崩落事故調査委員会 1998 第2白糸トンネル崩落事故調査報告書
- 2) 山岸宏光・黒沢邦彦 1987 5 万分の 1 地質図幅「原歌および狩場山」および同説明書 p36. 地下資源調査所
- 3) 宮脇嵩裕 1988 東北日本北部における後期更新世海成面の対比と編年 地理学評論 61, 404-422.
- 4) 山田悟郎・渡部真人・赤松守雄 1992 積丹半島の第四系について 北海道開拓記念館研究報告 12, 19-34.
- 5) 右代啓視・赤松守雄・山田悟郎 1992 積丹半島における洞窟・岩陰遺跡とその地質学的意義 北海道開拓記念館 12, 93-106.
- 6) 右代啓視・下川浩一 1997 大成町貝取潤 2 洞窟遺跡の年代とその特性. 北海道開拓記念館調査報告 36, 141 - 150.
- 7) 渡部真人・赤松守雄・山田悟郎 1990 北海道の日本海岸に分布する海成段丘面の対比とそれに伴う第四系の層序. および積丹半島の第四系における構造地質学的性格. 北海道開拓記念館調査報告 29, 157 - 159.
- 8) 渡辺暉夫・高橋伸幸・高橋輝明・藤原嘉樹・橋本善孝 1997 積丹半島豊浜トンネル周辺の手蝕崖の変化 北海道地区自然災害科学資料センター報告号外 63-68. 北海道地区自然災害科学資料センター (北海道大学工学部)