

豊浜トンネル西側坑口岩盤崩落： 壁面観察と落石から何を学ぶか？

A collapse of the sea-cliff at the western entrance of
Toyohama Tunnel : What do the observation of the collapsed
surface and falling rocks tell us ?

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

渡辺 晉夫・箕浦名知男

Earth & Planetary Sciences, Graduate School of Science,

Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo, 060

Teruo WATANABE and Nachio MINOURA

Abstract

The collapse of the sea-cliff at the western entrance of Toyohama Tunnel occurred in the morning of 10th of February, 1996 and 20 people including a bus driver, passengers and one car drives were the victims of the disaster. Geological observation of the collapsed cliff-surface of Miocene hyaloclastites tells us that a deep and nearly vertical fracture had been formed by extension of discontinuous fractures along the cliff. Groundwater supply and related weathering processes were essentially important for the development of fractures. The main outlets of groundwater occurred along the gently declined unit-boundary between the middle unit, composed of hyaloclastite unit (lava flow proximal debris flow), and the upper unit of reworked hyaloclastite. It tells us also that the outlets developed as pipe-paths in every ca. 20 m interval along the unit boundary. The main outlets of ground water was unfortunately not cropped out on the surface. Therefore, the past episode of falling rocks of hundreds cubic meters, which occurred in front of one of the groundwater outlets, could not lead to a prediction that the next groundwater outlets inside of the cliff, 20 m away, was preparing a subsequent peeling-off of the cliff. Unusual climate change, such as a rapid change of average day-temperatures from -10°C to nearly 0°C and the thickest snow-fall, suggesting a large amount of water supply, may have generated high interstitial water-

pressure, and accelerated fracture-extension.

Key words : Toyohama tunnel, hyaloclastite, collapse, sea-cliff, groundwater, fracture

北海道古平町の国道229号線豊浜トンネル古平側（西側）坑口斜面崩落は1996年2月10日8時10分頃発生し（8分と推定される、藤原、1996），20名の犠牲者を出した。同年9月14日に豊浜トンネル崩落事故調査委員会が報告書を開発局に提出し，崩落の機構が推測され，事故の全体像の詳細が明らかにされた（豊浜トンネル崩落事故調査委員会、1996）。委員会の最終結論は「豊浜トンネルの大規模な岩盤崩落を予知予測することは困難であったと判断される」ということであった。ここでは開発局の管理責任は特に言及されていないが，その後，国は遺族に対し国家賠償法に基づく補償を行うことにした。

裁判も起きている事故の責任問題とは距離をおいて，岩盤崩落という自然現象の解明に限ってみても，「大規模な岩盤崩落の予知予測は困難であった」と言ってしまう限りでは，安全であるべき国道やトンネルを使う住民は恐怖にさらされたままあって，問題は何も解決されてはいない。何故，大規模崩落が起こったのか？，その状況をここで更に検討して見たい。また，岩盤崩落の数年前に起こったのではないかとされるトンネル坑口付近側での落石については，どう考えたら良いのであろうかも検討しておきたい？

落石については，事故調査委員会の報告書の中では「比較的新しい時期の崩壊」跡と記すにとどまり，詳しい解説を行なっていない。落石と大崩落の間に一体どんな因果関係が成立しているのか？予兆ととらえるには何がわかつていなければいけないのか？

一体，何が大崩落の素因で，何が誘因なのか？答えは容易には出ないが，地質学的立場から，出来るだけのアプローチを試みたい。以下に，記憶を新たにするために，既に報告済みではあるが，まず地質・地形・気象の概況を整理し，さらに，落石と割れ目系の問題について検討を加えたい。地質・地形は箕浦ほか（1996）を基本にし，気象は豊浜トンネル崩落事故調査委員会の報告書を基本にした。

1 地質・地形・気象

地質：豊浜トンネル古平側坑口付近の海蝕崖は海側（NE）に10–20°傾いた新第三紀中新世根内層（山岸、1986）のハイアロクラスタイト/水冷火碎岩（あるいは水冷破碎岩）より構成されており，岩相によって，3つの層に分けられる（図1）。下部層は輝石安山岩質の火山角礫を主体とし，平行葉理の発達した Reworked hyaloclastite（再堆積した水冷火碎岩）であり，disitalなdepositsである。層厚（崩落崖でもっとも厚いところを計測；以下同様）70m+の上

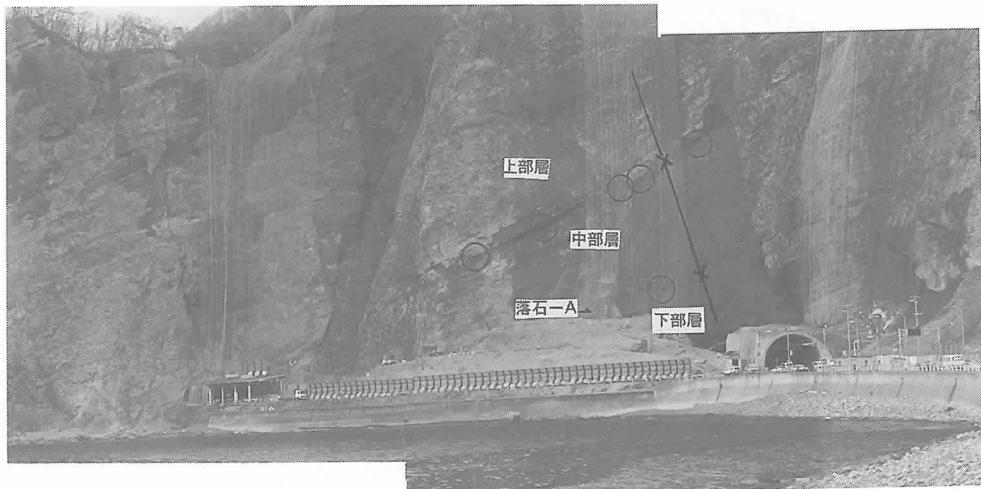


図1 豊浜トンネル古平側坑口周辺の急崖。左側トンネルは旧道。
○印は地下水の集中的湧出口

部層は頻繁に火山性砂岩を挟むが、層厚30m+の下部層にはほとんど認められない。中部層は厚さ約25m、主にデイサイト質水冷破碎（溶）岩で、地層境界と20–30°斜交するフォアセットした何枚ものユニットからなり、proximalなdepositsである。崩落崖の西方80mの急崖中部にはlava lobeタイプのフィーダーダイク（feeder dike）も見られるが、中部層をもたらしたフィーダーダイクは他にもあったであろう。今回の崩落岩塊の頂部は、薄く剝がれた最上部を除けば、ちょうど中部層と上部層との境界にあたり、道路面よりの高さ約60mである（山岸1966）。崩落崖の周辺部には、方向・間隔の不規則な亀裂10数本が、植生から推定されるが、剥離亀裂はほとんど発達していないことから、均質にみえる。上部・中部、中部・下部の部層境界は、崩落後に大きな氷柱が発達したことからわかるように、「水みち」であった。豊浜トンネル崩落事故調査委員会の報告では上中部境界と中下部境界付近の水圧はそれぞれ最大 1.37kgf/cm^2 、 1.16kgf/cm^2 であった（1996年春測定）。

地形：トンネルはこの海蝕崖に対して約35°斜交して掘削されている。崩落したトンネル巻き立て部は実際には半トンネルといわれている部分からトンネル部にかけてである。すなわち崩落岩塊のほとんどは、斜交することによって生じた山側のみが急崖に連なる被覆岩盤（oveburden）部分、および海側支持部が5mかそれ以下の部分である。支持部の薄かった部分すぐ左には窪み地形が形成されており（図2）、さらに上部には、急崖にはほぼ平行な割れ目が存在していたと判断される。この割れ目の一部は、崩落面左側および上部の褐色変色部となつて出現した。また、トンネル掘削時には海側に崖錐が現れている。これも窪み地形の一つであつたろう。

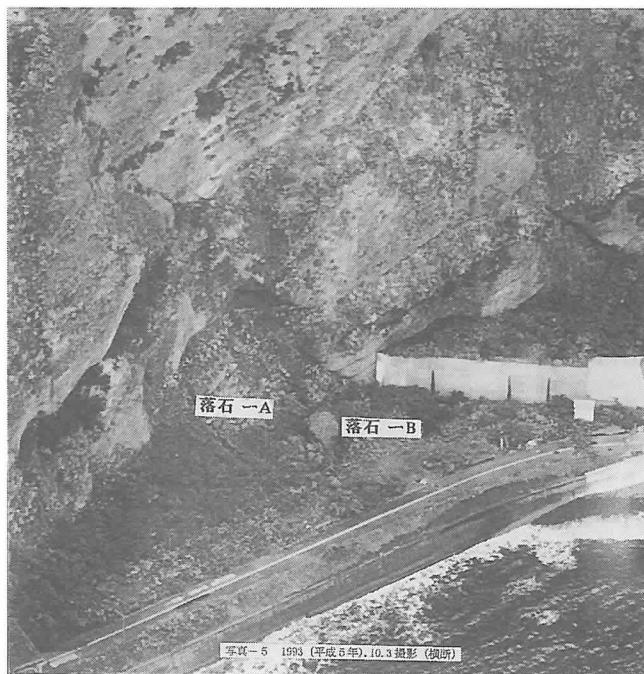


図2 豊浜トンネル付近の斜め空中写真（1993年10月撮影）
北海道開発局資料

気象：事故調査委員会の資料は余市と美国の気象庁地域気象観測所のデータを用いて以下の事を明らかにしている。1985—1995年の10年間の冬期間の日平均気温の変化によれば、0℃以下の平均気温になるのは12月初旬以降で1月の下旬に最も冷え込み、3月中旬には再び0℃以上になる（図3）。図には10年間の最大値、最小値を示してあるほか、日降水量、積雪量も10年間の分を示した。昨年は日平均気温では1月の8日、11日、12日に10年間の最大値を越える温度となり、その直前には降水量、積雪量とも1985～1995年の最大値を越えている。この時期に、水みちへの多量の地下水の供給が想定される。その後、2月1日にかけて平均気温はさがり、1月31日、2月1日にもっとも低い日平均気温を記録した。日平均気温はその後急速に上昇し、2月6日には10年間の最大値に一致する（一般には、この間に、凍結した岩盤表面では膨張が進んだと予想される）。さらに事故当日にかけて、日平均気温は下がる。同時に6日から10日にかけて積雪量（日）は余市で過去最高となり、特に10日にはこれまでの最大積雪170cm弱を記録している。積雪深は2月1日から5日までの間でも最大値にほぼ一致している。また、凍結—融解は岩石を脆くさせるが、この冬には、凍結—融解を効果的に起すであろう最高温度が+4℃以上、最低温度が-4℃以下の変化が24時間以内に生じた日は事故当日までに4回あった（福田ほか、1996）。このような、温度変化、降水量変化、積雪深の変化は事故当日に

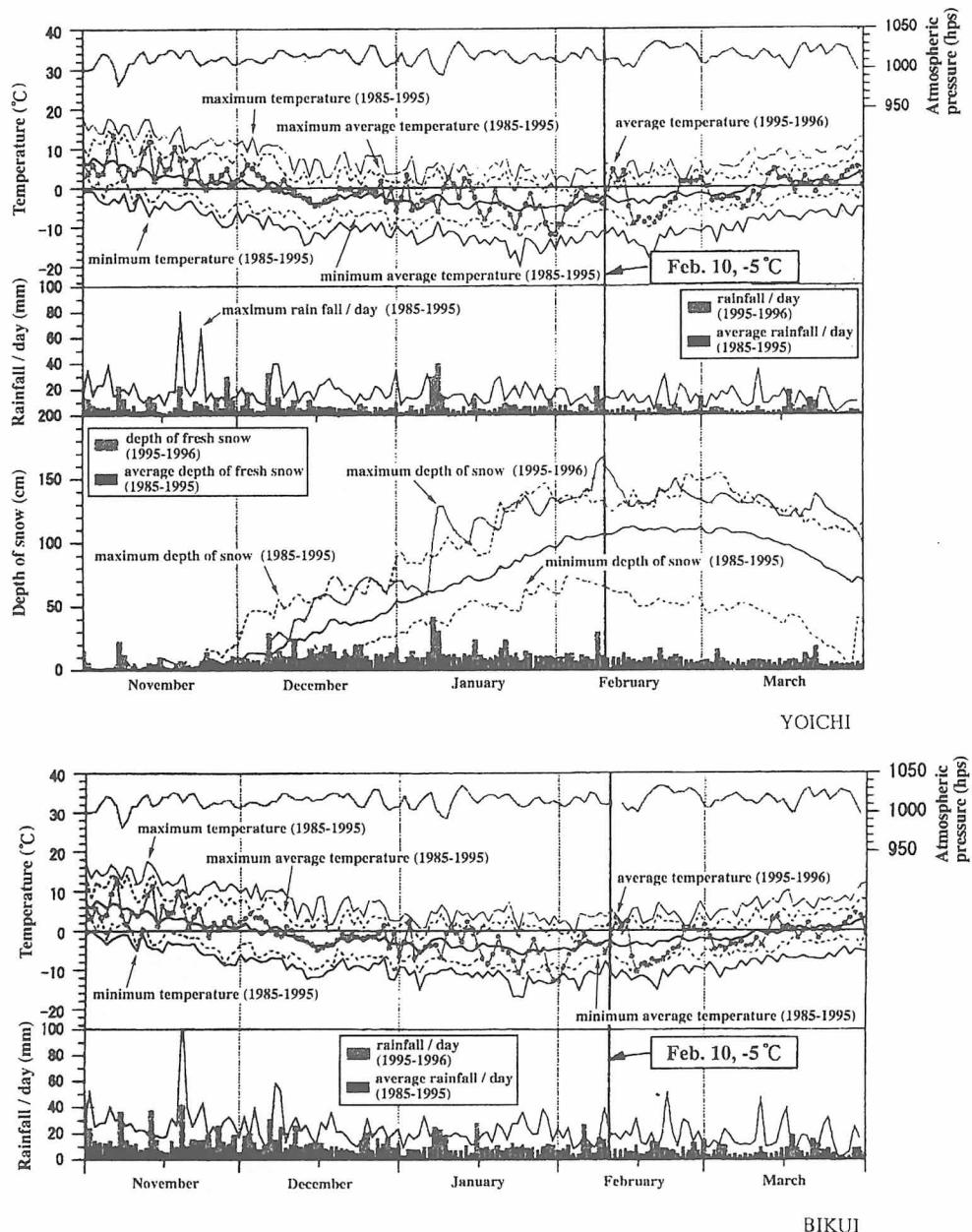


図3 余市及びアメリカの観測所の気象データ
(豊浜トンネル崩落事故調査委員会, 1996)

向かって、岩石中への供給水量の増大（間隙水圧の上昇）、壁面の凍結深度の増大や膨張などの変化を予想させるが、諸課程の岩盤崩壊への影響については十分な定量的なデータはまだない。岩石の脆弱化は繰り返される凍結一融解によって時間をかけて少しづつ進んで行ったであろう。

2 落石について

図2はトンネル巻出し口海側にあった落石の様子を写し出している。径数10cmの岩石のほか、100m³級以上の落石2個を写し出している。各々に落石-A、落石-Bの名称をここで与える。落石は1992年12月以前にあって、落石跡は図2では窪みの上の黒い部分に相当する。この落石跡は図2の右側（古平側）の落石-Bが剥がれた跡だと考えられる。落石-Aはさらに以前に落ちている。この落石はすでに1996年の大場の写真（図4；渡辺・大場, 1996）に写っているものと判断されるが、遠景であるため、尚慎重な判断を持ちたい。図2にはこれらとは別に崩落岩盤左上（古平側からの観察）の位置に岩盤の剥離跡と思われる弧を描いた大きな段差が見られる。これは図4の大場の写真にも、少なくとも割れ目として写っている。図5は大場の写真のこの部分を拡大し、コンピューターで画像処理をし、「割れ目」を浮かび上がらせたものである。1996年の時点では単なる割れ目であったのか、既に落石した跡なのかは判断に苦しむ。



図4 1996年撮影の豊浜トンネル掘削前の写真（大場与志男撮影）



図5 図4の耳タブ状岩体上の割れ目
(コンピューターによる画像処理)

いずれにしろ、2～3回の比較的大きな落石が1992年12月以前にあったことになる。なお、落石-Aは夏期は植生に覆われ、落石であることを見極めにくくなる。落石-Aの上部にはスメクタイト変質層が認められていたから、後述する崩落面の上部に続く部分が落石-Aの元の位置であると思われる。すなわち、崩落面左上部の氷柱の成長する窪みの手前に落石-Aはあったものと推定される。窪みは地下水の湧出口であって、その手前の岩石が崩落したことになる。

ところで、岩石は大崩落の予兆であろうか？ 残念ながら、落石があったから大崩落が必ず予見できる、というものではない。セタカムイトンネルは数100m³規模の落石が繰り返し起こっているが、だからといって、現時点で二桁も堆積の違う10,000m³規模の巨大岩盤崩落が起ると予測することは難しい。むしろ、割れ目の発達状態や地質からは、今回の豊浜トンネルの場合と同じ様式の岩盤崩落は起きそうもないと言える。豊浜トンネル復旧工法技術委員会（1996）では大崩落は予測していない。これが研究の現状であろうと考えられる。

しかし、地質学的にはあの急崖はいずれ浸食され、なくなるはずである。その時に、どの程

度の崩壊が一度に起るかはよくわからない。千年を「短い」、あるいは時には「一瞬」と表現するような地質学的時間センス（これは地殻の変動の時間スケールが人間の生活感覚をはるかに越えたものであることによるのだが）では、セタカムイトンネル周辺には巨大岩盤崩落が起こると言っておいたほうが無難である。しかし、その岩盤崩落「予測」は、現時点のデータでは、リアリティーが乏しい。また、問題の落石については、危なっかしい岩塊が崩落したので、当面は安全であるはず、という見解も論理上は取りうるものもある。豊浜トンネル古平側坑口の場合には落石と巨大岩盤崩落の関係は地下水の湧出口/窪み地形についての正確な理解、地質構造の理解なしにはとらえきれないものである。

3 崩落面の構造

崩落面の大部分はENE-WSW方向からE-W方向へと緩やかな弧を描く。面は道路面より高さ25cmのところにやや突き出たリッジ部を持ち、その上下は浅く凹んだ形態であり、全体として垂直ないしややオーバーハングしている。リッジ部上部は浅い凹状を呈し、まだら状の弱い変色が認められる。この面上部にはFr-7（事故調査報告書にしたがう）とよばれる割れ目が面を左右の二つに分けている（図6）。Fr-7より右側にある崩落主面はわずかに凹凸があり、割れ目や段差によって幾つかの面が認められるが、連続性の良い割れ目や段差はない。崩落直



図6 崩落崖全景（1996年2月14日）
北海道開発局

後（10日午後）の写真によれば、薄く剥がれたと思われる微妙な構造が崩落表面に残されていたことがわかる（図7、○内）。この微妙な構造をもつ剥離面は4回の発破の作業で崩落岩塊を除去するまでには失われてしまっている。このような面の構造からは、同じような方向性をもった面が相互の成長して、連続した面を形成したという説明がもっとも合理的なもののように思われる。Fr-7は左側の褐色風化の目だった面を切って、奥に入っている。Fr-7は崩落壁面の最上部には続かない。これは壁面最上部と風化の進んだ部分を含む左上部が剥離面となつておらず、その後、中央部から剥離面が下部に連続し、Fr-7が形成されたことを暗示する。Fr-7は氷柱の成長した中央部のすぐ左から左下に伸びており、Fr-7の形成場所は地下水の供給場所の端にあたる。Fr-7の右側の面は崩落岩盤の主体、岩体A、Bの付いていた部分で、この部分の面の形成が岩盤崩落にとってもっとも重大であった。この氷柱の成長した壁面中央上端には新しい剥離面がみられる（図8）。ここは岩盤崩落前は岩が覆っていた。



図7 崩落現場写真（1996年2月10日午後）

○印内の微細構造は図6では見られなくなっている。北海道開発局

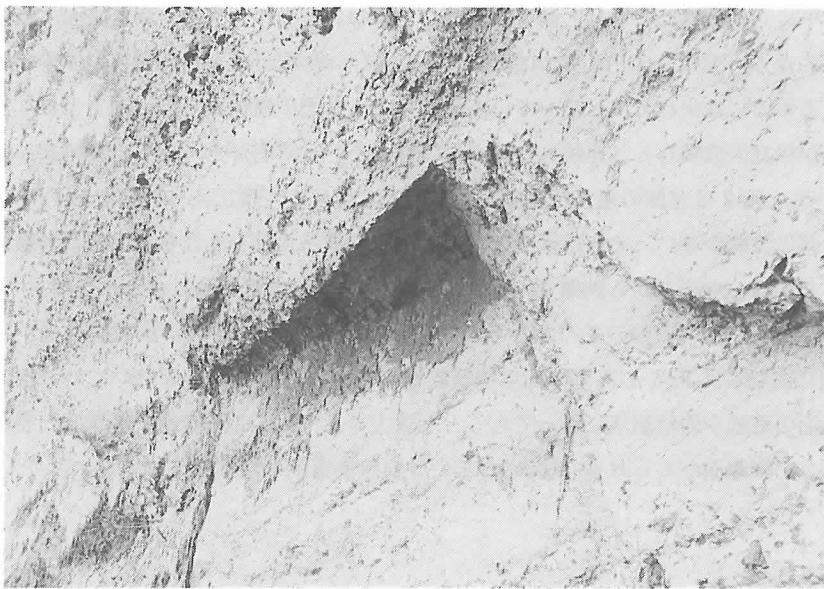


図8 氷柱の見られた崩落崖中央最上部の地下水湧出口の前面天井に観察された新しい破断割れ目

4 崩落の要因

崩落以前の1993年10月の斜め空中写真や、それ以前のトンネル正面の写真から、崩落面とほぼ平行な割れ目の存在が、植生の付着によって推定できるが、開口していたものか、もし開口していたならばどの程度開口していたのか、また深さ等については推定すら不可能である。開口亀裂端の周囲では岩盤強度の劣化が急速に進むことを、福田ほか（1996）や豊浜トンネル崩落事故調査委員会（1996）が指摘している。割れ目の進展には、この他に、風化・地下水圧・凍結圧・地震動等いろいろ考えられる。これら諸作用がそれぞれがどのように亀裂の発達・進展に寄与したかを定量的に把握することはできない。従って崩壊にいたった課程を正確に描き出すことは現在のところできないが、「亀裂がすでにあって、岩盤の付着力と下部だけで支えていた」わけではない。また、前述したような気象変化は、1996年の1～2月に通常の年とは違った温度変化や降水量や積雪量があったことを示している。通常ではほとんど起きない岩盤の凍結状態の変化や間隙水圧の上昇があった可能性が高い。深く発達した割れ目は岩盤の剥離を促進させた。トンネルに上部から加重される場合、片側支持部の強度が十分でなければ、トンネルは荷重に耐えられなかった。トンネル掘削は「亀裂の進展に影響を及ぼさなかった」とは事故調査委員会の報告だが、報告は同時に、割れ目があの場所で形成・進展した場合にはト

ンネルが十分な強度を持たなかったことも示している。トンネルの存在のほか、オーバーハングした急崖、部分的に開口した割れ目、特異な気象、3層に分かれた地層とマッシュな中部層、地下水の長期にわたる活動などは崩落素因の一つである。誘因は今のところ、間隙水圧の上昇による岩盤剥離がもっとも有力である。

地下水の主要供給源は地質構造と深く結び付いている。氷柱の位置が示すように地層（あるいはユニット）境界から地下水が集中的に湧出している。山岸（1996）は地下水の湧出場所が窪みになることを指摘した（山岸はパイピングと呼んだ）。管状の水みちが地層境界に発達していることを予想させる。図1によって窪みの分布を見てみると、特に中部層と上部層の境界はある一定間隔で地下水が湧出している（図1の○）。その間隔は約20mである。

以上の検討結果からは、地下水が集中的に湧出する場所が地層境界、とくに hyaloclastic debris flow あるいは lava flow ユニットの上部にあるが、地層境界にそって連続的にあるのではなく、水平方向に約20mほどの間隔をおいて発達する。崩落前にはこのような規則性は岩盤が覆っていて観察できないため、考えられていない。落石あるいは岩盤崩落を今振り返れば、湧出口を中心に岩盤背後で剥離が進み、不安定になった岩盤は崩落する、という規則性が浮かび上がってくる。つまり、落石の現象をこの規則性の中で捉えない限り、大崩落の予測にはつながってこない。ただし、この報告では中部層・上部層の間の不透水層の広がりや供給水域についての考察はまだ十分ではない。また、管状水路の成因にも何も触れてはいない。また、割れ目の進展は顕微鏡スケールのものから徐々に肉眼的に観察できるオーダーに発展するものと考えられるが、この点についても十分な検討はまだ行っていない。

まとめにかえて

崩落以前に撮影された斜め空中写真や正面の写真から、今回の崩落岩盤の崩落面とほぼ平行する亀裂を推定することはできる。しかしながら、すでに崩落が起こったという事実を踏まえての上ではないと、確信を持って肯定できる者がどれほどいるであろうか。本崩壊について言えることの一つは、一見均質で表面に亀裂も見られない岩盤といえども、その背後に不連続な亀裂が存在すれば、それらの亀裂が伸長し容易に連続し、やがて剥離、崩落することがあるという事実を、初めて明確に認識できた点にある。従来の地質調査の際に、このような認識を漠然とではなく、明確に持っていたかを、地質学者を含めて、真剣に反省する必要があろう。特に凍結した岩盤の挙動については氷の膨張などの状態変化を考慮した考察が重要であろう。このような理解が進んでいない状態では、トンネル掘削が地圧に耐えられない状況が生ずるとは考えもしなかったことなのであろう。結果をみれば、岩石強度があれば被覆岩塊は自重や地下水の関係する諸作用などでは崩落するものではないと思い込んでいたのである。「自然の摂理」

を深く理解すること、基礎科学の発展と調和のとれた技術の発展が不可欠であることを痛感させられる。

謝　　辞

調査および報告書にあたっては北海道大学工学部自然災害科学資料室および自然災害科学総合班北海道地区の援助をいただいた、板倉忠興工学部教授以下関係者の皆様に厚く御礼を申し上げる。また、本報告には平成8年度基盤研究（C）、1996年北海道古平町豊浜トンネル斜面崩落とその災害に関する調査研究（代表者、渡辺暉夫）の経費を使用した。研究費の申請に当たり、自然災害総合班の高木不折名古屋大学教授ほかの方々に大変お世話になった。また、本基盤研究（C）の研究グループの宇井忠英、川村信人、藤原嘉樹、松枝大治、笠原稔（以上地質班）、福田正己、播磨屋敏生、藤井義明（以上雪氷計測班）の方々には種々ご協力をいただいた。また、工学部の石島洋二教授からは貴重なご指摘をいただいた。さらに豊浜トンネル崩落事故調査委員会の関係者の皆さんにもデータの提供等でご協力をいただいた。理学部の斎藤陽子さんには本報告作成に当たり、ご援助いただいた。記して以上の方々に謝意を表明する。

文　　献

- 福田正己・播磨屋敏生・原田鉱一郎 1996 岩石の凍結-融解による風化が基礎崩落 月刊地球 18巻 574-578.
- 藤原嘉樹 1996 1996年北海道古平町豊浜斜面崩落に関する予兆について。北海道地区自然災害科学資料センター報告11号 53-56.
- 箕浦名知男・渡辺暉夫・宇井忠英・藤原嘉樹・川村信人・松枝大治 1996 豊浜トンネル古平側坑口斜面崩落の地質学的・地形学的特徴・背景。第33回自然災害科学総合シンポジウム 要旨集 25-28.
- 豊浜トンネル岩盤崩落事故調査委員会 1996 豊浜トンネル崩落事故調査報告書
- 豊浜トンネル復旧工法技術委員会 1996 豊浜トンネル復旧工法 報告書
- 渡辺暉夫・大場与志男 1996 豊浜トンネル崩落崖の30年の変化。北海道地区自然災害科学資料センター報告11号 49-52.
- 山岸宏光 1986 島弧横断ルートNo. 3（積丹岬・茅沼-古平），地質図地質断面図および同説明書。北村信編「新生代東北日本弧地質資料集」第1巻，宝文堂，p. 6.
- 山岸宏光 1996 ハイアロクスタイトと岩盤崩落
- 北海道地区自然災害科学資料センター報告11号 9-24.