

論文

越前海岸玉川崩落災害の 地質学的側面

— 長周期過程と崩落の再来周期の推定 —

服部 勇*・福井卓雄**・水谷伸治郎***・大矢芳彦****・山本博文*

Geological Aspects of the 1989 Rock-Fall Disaster at Tamagawa, Echizen Coast, Fukui, Japan — Long-range processes and estimation of recurrence time —

Isamu HATTORI*, Takuo FUKUI**, Shinjiro MIZUTANI***,
Yoshihiko OOYA**** and Hirofumi YAMAMOTO*

Abstract

The geological aspects of the 1989 rock-fall disaster at Tamagawa, the Niu Mountains, Fukui Prefecture, were investigated. In order to know what kind of geologic processes prevails in the Tamagawa area, we analyzed the topographic characteristics of the Niu Mountains and the adjacent sea-bottom and the petrologic properties of rocks at the rock-fall site. This area was currently uplifted by geodynamic compression with a very high speed (the average speed during the last 125,000 years is about 0.08cm/yr). Under-cutting of the coastal topography (0.2cm/yr) by the erosive action of sea waves formed steep high cliffs (100m or taller). At the cliffs, rocks were released from the confining pressure, and many joints parallel to the cliff formed. The cohesive forces along joints are gradually lowered by water-rock interaction. Consequently, rock blocks are successively truncated at the joints. A simple calculation suggests that rock-fall events with similar volume to the 1989 event will take place every 10 years or more along the distance of 1 km of the cliff of this area and that the recurrence time of rock-fall event with this volume is nearly 2,000 years or more at every site. Knowledge of weathering rates of rocks is necessary to predict when and where future rock-fall events will take place.

キーワード：トッピング，海食，続成作用，上昇速度，地殻変動

Key words: toppling, coastal erosion, diagenesis, uplift rate, tectonics

* 福井大学教育学部地学教室
Geological Laboratory, Fukui University

** 福井大学工学部環境設計工学教室
Department of Architecture and Civil Engineering,
Fukui University

本論文に対する討論は平成6年4月末日まで受付ける。

*** 名古屋大学理学部地球惑星科学教室
Department of Earth and Planetary Sciences,
Nagoya University

**** 愛知女子短期大学一般教育学科
Department of General Education, Aichi
Women College.

1. はじめに

1989年7月16日(日)の午後3時30分頃、越前海岸のほぼ中央部に位置する福井県丹生郡越前町玉川北方約200m地点で、比高約100mの海成(海岸)段丘崖の脚部の岩盤のうち道路に向かってオーバーハングしていた部分が突然転倒崩壊した。推定約1,100~1,500m³の岩塊が崩落崖から約15m離れた国道305号線に設置されていたロックシェッドを直撃し、通過中のマイクロバスの乗員15名が圧死するという災害(以下、玉川災害)が発生した。この災害は本邦では稀な岩塊のトップリングが原因であるとされ、関係者の注目を集めた。災害発生直後からいくつかの研究グループが崩落メカニズムの究明のために調査・研究を開始した。例えば、文部省科学研究費補助金を受けた総合研究グループ¹⁾、福井県が組織した一般国道305号岩石崩落災害調査委員会(以下調査委員会)²⁾、等があり、また福井県警察本部の調査は継続中である^{注1)}。個別的な調査研究として、平野ら³⁾が岩石崩壊過程を考察している。

服部、福井、水谷、大矢の4名は総合研究グループのメンバーとして調査に参加した。その後も、服部、福井、水谷の3名は1992年の重点領域研究の経費補助を受け研究を継続してきた。この小論では、公表された報告書を参考にして、我々の研究成果のうち現在までに得られた崩落に至る地質プロセスに関する部分を報告する。本論では、上記の総合研究グループによる報告との重複を避けながら、2. 崩落災害の概要、3. 崩落災害が発生した背景とその背景を作った原因、の順に話を進める。特に、3.においては、広域的地殻変動、局地的理由、岩石学的要因について述べる。最後に、4. 急崖斜面崩壊の予測の可能性について触れる。なお、ここでは崩落災害という表現を用いるが、それは一連の災害のうち岩盤崩壊に関係する自然現象を指し、必ずしも人的災害の意味を含まない。

本研究の研究経費の一部に平成4年度文部省科学研究費補助金(重点領域研究(1), 課題番号04201122, 代表者服部勇)を充てた。

2. 玉川崩落災害の概要

玉川災害についての概要と目撃者の証言は調査委員会²⁾と平野ら³⁾によつて的確に述べられている。崩落物の崩落過程(崩落順序)については服部⁴⁾や調査委員会²⁾が解析している。ここでは、本論の重要な研究対象である岩石をやや詳しく記載し、引続き、崩落災害の概要について略述する。

(1) 地質学的・岩石学的背景

玉川地域の地質基盤は中新世の火山性堆積物からなる⁴⁾。問題の崩落壁は凝灰角礫岩、凝灰質砂岩、および凝灰岩から構成されている。凝灰角礫岩は人頭大を越える安山岩の角礫よりなる。崩落壁下部の凝灰角礫岩はクラストとマトリックスの膠着状態も不完全になっている。その隙間や節理に沿って著しく沸石化作用を受けている。凝灰質砂岩は極粗粒ないし細礫質であり、淘汰度は比較的よいが、しばしば、拳大あるいはそれ以上のクラストが混ざり込んでいる。この岩石を構成する物質はすべて火山岩起源であり、碎屑物として安山岩の岩片や斜長石、単斜輝石が含まれる。斜長石は累帯構造を残したまま沸石化あるいは緑泥石化している。火山ガラス(現在は脱ガラス作用を受けている)は例外なく多量に含まれ、それらは沸石化(おそらく方沸石化)している。層状の細粒凝灰岩は極細粒の火山灰起源であり、顕微鏡下では殆ど火山ガラスのみが認められ、シルトサイズより大きい碎屑物は希である。火山ガラスは方向性をもって配列していることがある。沸石化の程度は弱い。塊状の粗粒凝灰岩はスコリアを含む厚層の凝灰岩であり、安山岩の岩片や斜長石の破片を含む。火山ガラスは多量に含まれる。沸石が著しく発達する場合もあり、特に斜長石は著しく沸石化を受けている。細粒凝灰岩や粗粒凝灰岩を偏光顕微鏡で観察すると、開放ニコルでは構成物の輪郭がはっきり見えるが、直交ニコルでは斜長石や岩片を除いて構成物の輪郭が不鮮明になり、かつ全体に複屈折が弱い。このことは、複屈折の弱い変質鉱物、例えば、方沸石や粘土鉱物などが著しく多量に形成されていることを意味する。全ての凝灰岩や凝灰質砂岩は著しく緑泥石化や沸石化を受けている。X線解析の結果、次の沸石類が

同定された：方沸石、濁沸石、輝沸石、束沸石、モルデン沸石⁴⁾。

(2) 崩落災害の概要

崩落災害は、上述の岩石類により構成されていた、比高100mを越える急崖の下部の突出部が巨大岩塊（岩板）としてトッピングすることによって発生した。崩落規模としては、最大高さ25m、最大幅30m、崩落量 $1,100\text{m}^3$ ないし $1,500\text{m}^3$ であり^{1), 2), 3)}、全重量は2,500トン程度と見積もられている。崩落地点に残っている最大ブロックは $11.0\text{m} \times 5.7\text{m} \times 4.0\text{m}$ のサイズを持つ³⁾。この最大ブロックは着地時に分断されているので、崩落中にはもっと大きなブロックであった可能性がある。

災害の1週間程前から、かなり激しい降雨が断続的にあった。7月9日から18日までに218mmの降雨があった。統計上、この降雨量は特筆するような異常値ではなかった⁵⁾。なお、崩落した岩石の破壊実験から求められた岩石強度は十分大きく^{2), 6)}、単純な圧縮性破壊（座屈）が原因でないことが指摘されている。崩落以前には急崖の一部はオーバハング状態にあり、その部分が急崖に平行する節理から分離するようにして倒れた。玉川災害発生以前から節理が開口状態になっていたことも判明している。

(3) 崩落災害が発生した誘因・要因

災害発生後の調査により、崩落を導いた誘因や要因のいくつかが指摘されている。それらを列挙すると、

- 1) 急崖が発達していた（多数の意見）
- 2) オーバハングしていた（多数の意見）
- 3) 崩落壁に平行な断層が走っていた²⁾
- 4) 開口割れ目が存在した（多数の意見）
- 5) 崖面下部に旧崩落物が堆積していた²⁾
- 6) 亀裂内の地下水の水頭変動により繰り返し荷重がかかっていた²⁾
- 7) 風圧により開口割れ目の下部に繰り返し荷重がかかっていた^{2), 3)}
- 8) 冬期の結氷等により亀裂の拡大が進行していた²⁾
- 9) 崩落直前までの降雨により、岩盤の力学強度が低下した^{2), 7)}

10) 岩石自体が風化に抵抗力を持たなかった⁴⁾等が挙げられている。

これらの誘因、要因が重なって、崩落災害に至った。ここでは、そのうち、1. 何故急崖がこの地域に発達しているか、2. 崩落壁に関係する断層や節理の性格、3. この地域の岩石は風化作用の中でどのようにして力学的強度を低下していくか、について検討する。なお、上記10項目のうち、2)から9)までについては、意見の違いは認められるが、既に上記の報告書の中で詳しく触れられているので、それらを参照されたい。

3. 崩落にいたる背景

3.1 越前岬地域に急崖が発達している理由

この地域は若狭湾の北東、丹生山地（日本海と福井平野に挟まれた山地）のほぼ中西部にあたり、越前岬を中心に日本海に突き出た地域（以下、越前岬地域）である（図1）。丹生山地はほぼ南北に延びた高度200–600mのかなり起伏に富んだ山地であるが、その地形面は福井平野から西に徐々に高度をあげてゆき、日本海岸近くで最高点に達し、分水嶺を越えると、急激に高度を下げ日本海と接するという全体的に東に傾動した形になっている⁸⁾。特に、越前岬地域は山地が海岸まで張り出したような形態をとっている。

丹生山地が日本海に接するところ（越前海岸）では、傾斜角約 60° 以上の急斜面（崖）が長く続き、特に、越前岬地域では 80° を超える急崖斜面が発達する。また多くの場合、斜面の上部より下部の方が斜度が増す傾向にある⁸⁾。崖錐は数カ所を除いてほとんど認められず、逆に海岸に転石としての巨大ブロックが分布していることから、この付近の急斜面はブロックの崩落とともに後退していると推定される。岩石が露出している斜面に明確なりニエーション（断層に関係した線状構造）が認められないことから、一部を除いて急斜面そのものが断層面からなる急崖であるとは考えにくく、急斜面は場所々々の節理、あるいは弱線に沿って形成されていると思われる。

越前海岸には何段かの海成段丘が発達する。そのうち、12.5万年前以前に形成された高位段丘が

標高30–120mの所に発達し¹⁰⁾、完新世段丘（低位段丘）が8mの所に発達している。これらの分布とその年代から、平均隆起速度の最大値はそれぞれ0.09cm/yr, 0.1cm/yrと見積られている⁹⁾。越前岬地域では高位段丘が80–115m, 完新世段丘が5–10mの高度をもっている。高位段丘は南部の梅浦～玉川間でよく連続しており、95–105mの高度をもつ。玉川の北北西では連続性が悪くなると同時に高度が10m程度上昇し、本地域最大

の高度（約120m）をもつ。さらに北側の左右地域では段丘が発達せず、越前岬地域北部で再び段丘が存在するが高度は低下し、80–95mとなる。災害現場の上位にも高位段丘が存在し、この地域の最大高度をもつことから災害現場は高位段丘形成以後の間で最も基盤上昇速度が速かった場所であると推察される。一般に、海成段丘面はゆるく海側に傾斜しているが、玉川災害の現場の段丘はややきつく海側に傾斜している。特に災害現場直

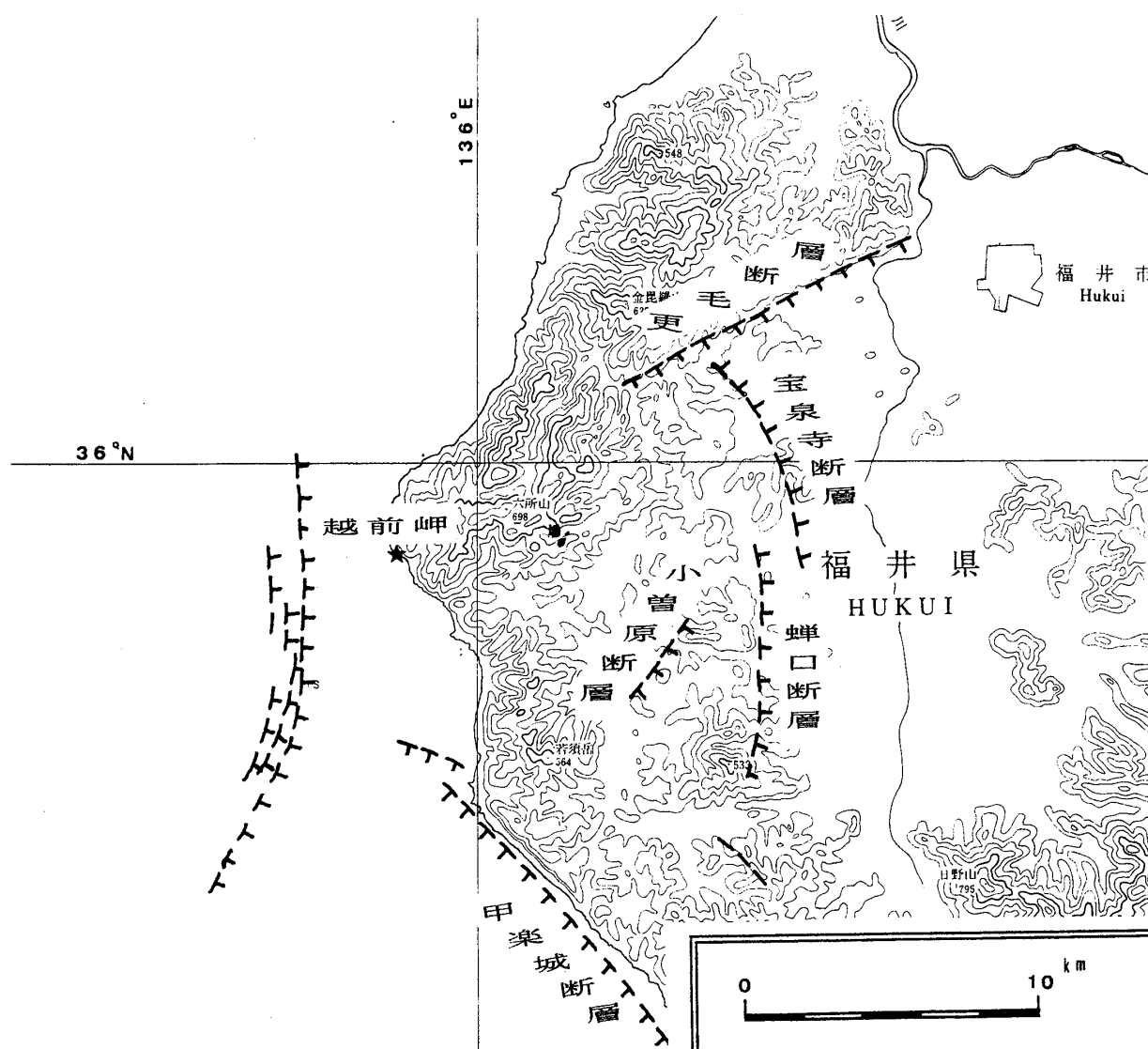


図1 玉川崩落地点（星印）を示す図。丹生山地（海岸線から東側の山地）内とその周辺の主な活断層も記入してある。地図は20万分の1海底地形図ゲンタツ瀬（海上保安庁）を用い、活断層については、新編「日本の活断層。分布図と資料」（活断層研究会編²²⁾）を参考にした。海底の断層については「若狭湾東部海底地質構造図¹¹⁾」を参考にした。

上の段丘面は 5° 程度海側に傾斜しており、後述するように、この地点では丹生山地全体の基盤運動以外の変形作用が進行していることを物語る。

この地形学的事実から、越前岬地域は過去15万年の間、海水面に対して著しく上昇傾向にあることがわかる。問題は、なぜ上昇傾向にあるか、ということになる。それでは、海域を含むこの地域

全体の地形を見てみよう。海上保安庁¹¹⁾によって作成された若狭湾東部海域の地形図と海底基盤深度図には越前岬地域を含む陸域の地形も示されている。図2はその一部である。図3は図2のAとA'を通り、福井平野に至る範囲の東西地形断面（以下、A-A'断面）である。これらの図には基盤の深さ（高さ）と海底堆積物の厚さも表現され

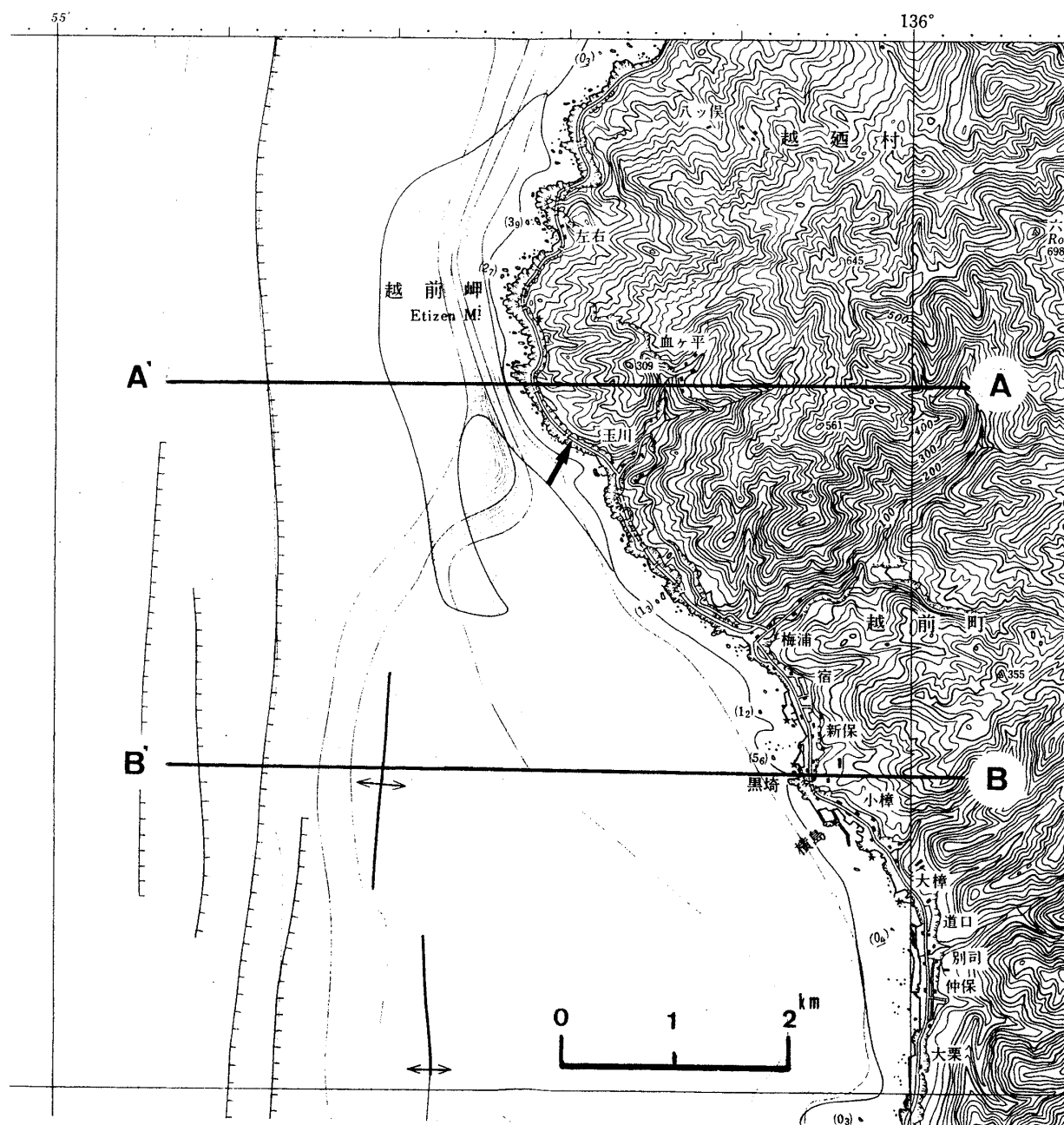


図2 越前岬地域の陸上地形と海底地形¹¹⁾。A-A'は図3の地形断面図の位置。A-A'の断面とB-B'断面とでは海底地形が大きく異なる。矢印は玉川崩落災害地点。

ている。A-A'断面では海岸から2 km沖合いまで奇妙な基盤の凹地があり、新しい堆積物がそれらを完全に埋積している。約3.5 km南の基盤地形（例えば、BとB'を通る断面、以下B-B'断面）では、深さ80~130 mの緩やかな斜面が沖合い4 km程度まで続き、引き続き小さな凹地を介して、さらにその2 km沖合いまで連続している。これらの凹地は一連の南北性凹地の一部であり、越前岬沖では幅が広がって、海岸線まで到達している。越前岬から玉川の沖合い200~300 mには、崩落災害が起きた急斜面より大きな高度差のある基盤のギャップ（高度差約200 m）が発達している。この事実は、かつて高度差300 mの斜面が現在の海岸線より200~300 m程沖合いに存在しており、海食によりその急斜面の上部100 mの部分が250 m程後退していった、現在の陸上急斜面が出現したことを示す。

越前岬沖の海底には鮮新世以降の未固結堆積物が堆積しているが、それらの基盤は、丹生山地の場合と同様に中新世の堆積物よりなっている^{12), 13)}。その上面は一般に大変平坦であり、水没した侵食準平原であると考えられており¹⁰⁾、その平坦化の

時期は前期鮮新世（約400万年前）である¹³⁾。一方、丹生山地においては、分水嶺の東側に準平原化作用により形成された平坦面が認められている（図3）。この平坦面と海底基盤の平坦面は同時期に形成され、その当時は一連の平坦面であった可能性が強い。以下にその論拠を述べ、丹生山地の基盤平坦面の形成時期と丹生山地の上昇速度について検討してみよう。

丹生山地・東尋坊地域の基盤岩の最も若い年代は1,300万年前である。丹生山地・東尋坊地域の周辺地域（勝山、大野地域）では、300万年前~400万年前に著しい火山活動があった^{10), 14), 15)}。すなわち、この地域一帯では1,300万年前から400万年前の間の堆積物や火山岩は全く知られておらず、多分この時期は構造運動が平穏な侵食期であったと思われる、平坦面もこの期間に形成され、400万年前に完成したとみなすことができる。上述したように、越前岬沖の海底地質調査によれば、海底下の侵食平坦面は400万年前ないし300万年前頃に形成され、300万年前頃から地殻変動が活発化し、現在の海底地形の骨組み（基盤地形の凹凸）ができたとされている¹²⁾ので、基盤平坦面の形成

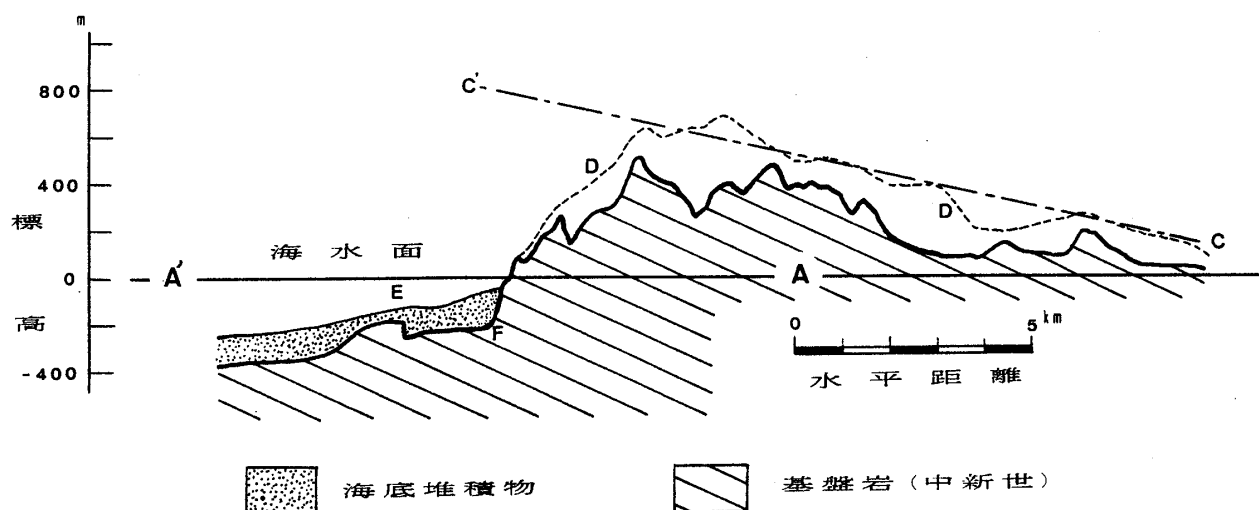


図3 越前岬を通る丹生山地全体と日本海の東西断面図（縦横比5：1）。AとA'の位置は図2の場合と同じ。点線Dは遠望したときの地形であり、それに沿う線C-C'はこの地域の前期鮮新世（約400~300万年前）の平坦面に当たる。C'とFの高差は約1,000 m。Eの高まりは逆断層運動に関連していると予想されている¹¹⁾。F付近を通過する東に傾く逆断層が推定される。

時期は海底のものも陸上のものも同時期であったといえる。分水嶺東側の平坦面をそのまま西方に延長すると、それと海底の平坦面の垂直変位は約1,000mである(図3)。丹生山地の上昇が300万年前頃から始まったとすると、この高度差1,000mをつくる変位は30年に1cm(0.033cm/yr)程度の割合の変位速度で形成されたと見積られる。ところで、崩落地点における高位段丘の標高は約120mであり、それらの形成が終了したのは約12.5万年程前である¹⁰⁾。約12.5万年間に120m上昇しているので、この間の平均上昇速度は約0.096cm/yrである。この二つの数値は、300万年前から12.5万年前までは比較的ゆっくりと、その後急速に陸側が上昇したことを示す。この議論には海水準変動等が無視されているし、完新世段丘等を形成した停滞期も無視されているが、全体の傾向はつかんでいるであろう。この運動は現在も進行中と思われ、事実、約6,000年前の縄文海進時に形成されたオーバハングが現海面より約10m以上高い位置にあり⁴⁾、その後の海退による海面低下(約5m¹⁶⁾)を考慮しても、この6,000年間に5m(0.083cm/yr)以上の陸側上昇が認められる。

海底堆積物の年代調査¹³⁾から、中期鮮新世(300~400万年前)以降に日本海側は沈降を始めたことがわかる。その沈降は一樣ではなかった。例えば、B-B'断面では、海底の凹地がA-A'断面の場合より幅が狭く、また、場所も沖合いにある。このような性格、すなわち、陥没位置が場所によって異なる性格は、地殻の深部が沈み込み、それに応じて表層部の海底にもいくつかの陥没構造が形成されたことを示す。その一方で、陸側は著しい上昇運動を受けている。この現象は海底部の地殻が沈み込みながら陸側を圧迫している、あるいは陸側に移動していくと考えれば説明がつく。表面的には、海側が陸側の下に移動していく圧縮応力場で形成されていると思われる。事実、海底地質構造図¹¹⁾には凹地に接する基盤に褶曲構造が描かれている(図2)。圧縮応力場でこの凹地ができたとすれば、玉川災害地点の海岸側すぐ近くの急斜面(図3のF)に東に傾斜する逆断層あるいは衝上断層が存在している可能性が強い。海底地

質調査でもこの位置に逆断層性の断層を推定している¹¹⁾。そしてこの断層運動が原因して、この地域が著しく大きい上昇速度を持っていると説明できる。

300万年ほど前から始まり、最近活発化している地殻変動とはなんであろう。Kanaori et al¹⁷⁾によれば、近畿中部地域の大地震の発生機構は新たな圧縮性プレート境界が玉川の沖合い近くに形成されつつあると考えると説明がつくとしている。Yamamoto¹⁸⁾も日本海底の海洋地質の研究に基づき、山陰地方沖の日本海は、アムールプレートの東進が原因して、300万年前頃より圧縮応力場におかれ始めたとしている(越前海岸沖の新プレート境界の議論については、金折¹⁸⁾に詳しく述べられている)。これらの解釈と今回の検討結果を総合すると、越前岬沖には最近新しい圧縮性応力場が出現しつつあり、その結果が急崖斜面となって現れているとみなすことができる。

3.2 崩落に係る断層と節理の性格

海底地形図において、上記凹地が海岸に最も接近しているのは玉川を含む越前岬地域である。越前岬地域から南でも北でも凹地は海岸から沖の方へ離れている。凹地が海岸から離れていると、陸域の上昇傾向は認められるが、越前岬地域ほどの急崖斜面は形成されていない。越前岬地域以外では、侵食作用による地形の平坦化の効果と上昇速度のかねあいでは斜面勾配60°未満の斜面が形成されているのに対し、越前岬地区では侵食による斜面の平坦化作用が殆ど効果を発揮していない。それよりも、斜面が刺身のように順次切りとられて、急崖斜面が永続的に残るような侵食を受けている。その刺身の一片が今回崩落したのである。水谷¹⁹⁾はこの種の側方侵食をNタイプと呼んでいる。ここで問題になるのは、何故、越前岬地域においてNタイプの侵食が進行するのか、ということである。

ここで、もう一度崩落現場を観察してみよう。崩落現場付近には、露頭規模の小さな断層や破断面が多く発達する。例えば、崩落壁近くに、三角錘状の巨大ブロックが立っている(写真1)。このブロックは、崩落災害時に岩盤から離れたが、

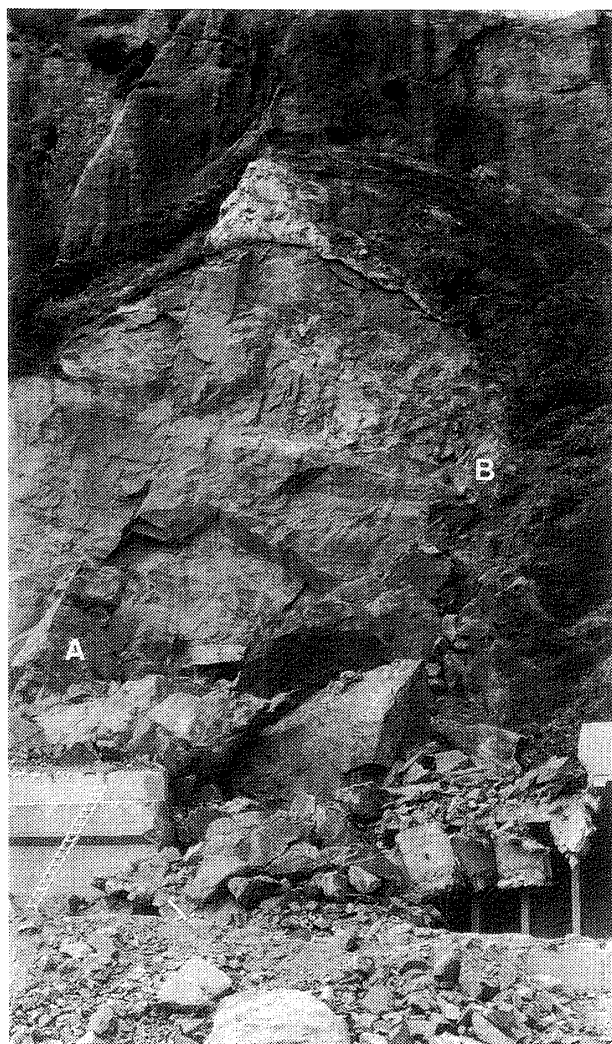


写真1 玉川崩落災害現場。半円状に新しい壁が出現している部分が崩落した。三角錘状のブロックが中央やや右に残っている。三角錘の一つの錘面Aには沸石脈が張り付いている（写真2）。錘面Aは断層面であり、その延長部は崩落壁の右肩Bを通る。崩落した半円状の部分には白色のモルタルが吹き付けてあった。崩落壁の最大高さは約25m。

ほんの少し（垂直軸周りに反時計方向に約25°程度）回転しただけで倒壊を免れたブロックである。このブロックの錘面の一つに鏡肌が残っている（写真2）。鏡肌上の削痕はほぼ水平であり、横ずれ断層によりこの鏡肌ができたことを示している。その鏡肌には所々に沸石脈が付着しているが、沸石脈の側面も鏡肌になっている。このことは、断

層が脈状沸石ができる前とできた後の少なくとも2回活動したことを示している。この断層の南方延長は崩落壁の向かって右肩を通る。この断層のため、崩落壁の右肩は細かく破断しており、バラバラになって、一見ゆるんだ様に見える。この断層が最後に動いたときにはこの部分はすでに地表近くであってゆるみかけていたが、地表から数m下ではまだ風化が進行していないので、見事な鏡肌を持つ断層面が形成されるだけの堅硬な強度をもっていたと考えらる。

不思議なことに、三角錘面内においてこの断層の左延長部と下延長部では、全く変位が認められない。つまり、このような断層は岩体内部の局部的な破断であり、構造的な断層ではないと思われる。一つの可能性として、岩体のクリープによる差別運動が原因かとも思われる。福井⁷⁾は室内実験により、この地点の岩石は湿潤状態では著しくクリープしやすいことを見いだしており、この解釈と調和的である。

ここで興味深いのは、調査委員会²⁾によるボーリング調査である。調査委員会は崩落壁にはほぼ垂直に5本のボーリング調査を実施し、内部の亀裂（節理）の分布を調べた。その報告書によると、亀裂の発達頻度は崩落壁から内部に向かって減少し、崩落壁から20m奥では殆ど亀裂が認められていない。従って、“本来新鮮な凝灰角礫岩には亀裂が少ないが、地表に近い部分では亀裂が発達している可能性がある”²⁾。

この種の亀裂・小断層の年代を明確に決定できない。ところで、三角錘面には安山岩大礫が破断されて残っている^{注2)}。破断面は薄く変質し、表面は黒茶褐色になっている。この黒茶褐色の膜の厚さはほんの1mm程度であり、最終運動があまり古くないことを示す。もし、古い時代のものであるならば、膜はもっと厚くなっているであろう。

このようなデータを勘案すると、次のようにいえる。斜面表面に近い部分と内部とでは岩石物性と応力状態が異なり、表面から20m程度より内部では殆ど破断変形が起きていないが、表面に近いところでは、亀裂、節理、局部的断層などができる。大局的にみれば、封圧の存在

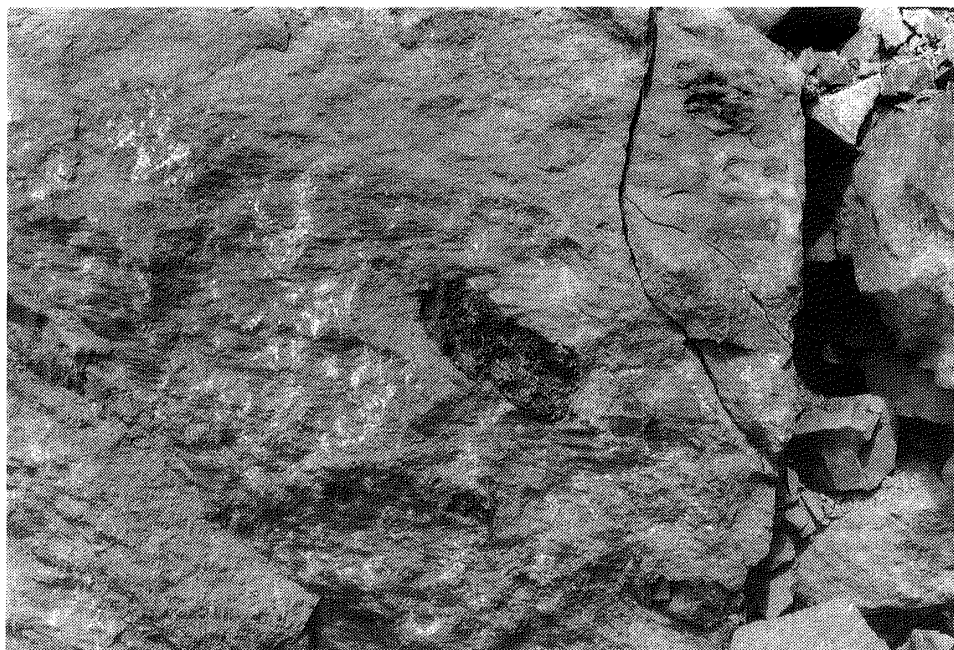


写真2 崩落地点に残っている三角錘状ブロックの一つの錘面(写真1のA)。この面には断層を示す条痕がついている。中央の安山岩クラストの長径は約70cm。

しない自由表面の斜面近くでの岩石のゆるみとクリープが発生しているといえよう。これらによる変形量が小さいと面無し節理や潜在節理が形成され、変形量が大きいと局部的断層が形成される。

まとめれば、クリープしやすい岩石の劣化と側方荷重の順次解消、降雨等による岩石物性の変化の繰り返しにより、鏡餅の側面が乾燥により剥がれ落ちるように、斜面が切りとられていくであろう。斜面に沿った部分の岩石がクリープし、外側へはみだしていくと、斜面の上に発達している段丘面は海側に傾いていく。3.1で記述したような、崩落地点の高位段丘面が数度海側に傾いている現象もこのようにして説明できる。

越前海岸地域ではリニアメントはほぼ全域にわたって分布しており、それらの方向(走向)にある傾向が認められている。玉川地域南部に分布する82本のリニアメントを15°間隔のローズダイアグラムにより整理すると図4のようになる。ほぼ全ての方向に分布するが、頻度分布をみると北西-南東方向が全体の約25%を占める。北西-南東方向のリニアメントは、Kanaori et al.¹⁷⁾の考える甲楽城トランスフォーム断層にほぼ平行であり、

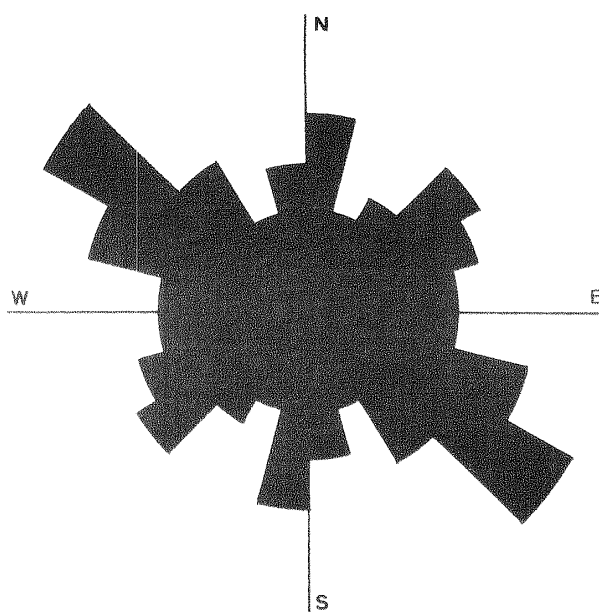


図4 越前岬地域に発達するリニアメントの走向方向の頻度を示すローズダイアグラム⁸⁾。

広範囲な地殻変動に関連している破碎の可能性が強い。岩盤内部でも、ボーリング調査によっては確かめられない面無し節理や潜在的弱線(面)がこの方向に発達しているに違いない。そして、そ

の節理の方向に斜面が刺身片状に切りとられ、岩板が落下していくのであろう。

3.3 岩石の風化に伴う強度低下について

(1) 沸石の変化・乾燥・湿潤の繰り返しによる岩石の変化

崩落ブロックのなかには、崩落時には茶褐色をしていたが、しばらくすると表面に白いものが浮き出してくるものがある。雨が降ると、洗い流されてしまい、その後しばらく晴天が続くと再び白くなる。内部からいろいろな成分が水に溶けて表面にしみ出し、水が蒸発するとそこに沈澱するのであろう（写真3）。このような現象はこの地域一帯で認められ、とくに、凝灰質粗粒砂岩で著しい。すなわち、この地域の岩石が化学的に大変反応しやすい（不安定である）ことを示す。

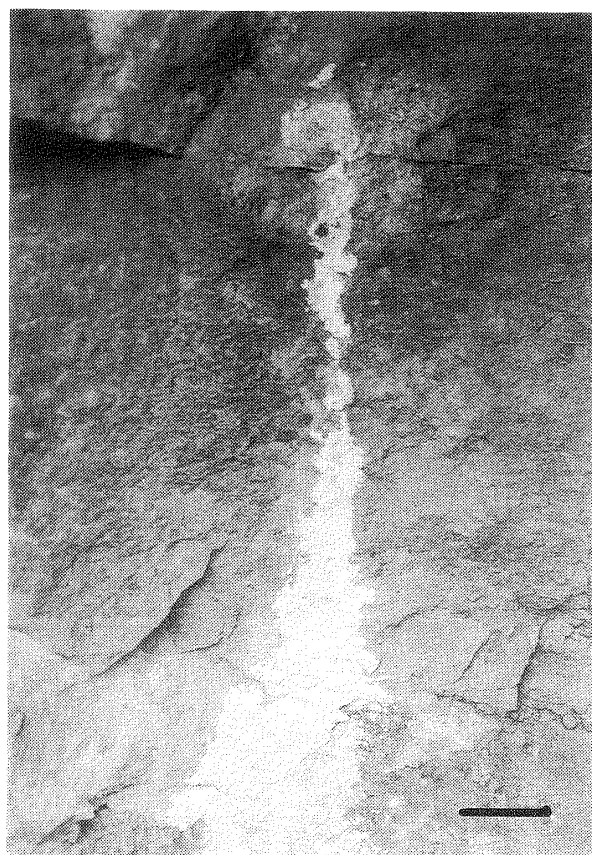


写真3 崩落ブロック内を流れてきた溶液が流れ出ながら乾燥・蒸発することにより、沈澱した石膏。同じプロセスにより岩石全体の表面が白くなることもある⁴⁾。スケール約10cm。

このことを実験室で再現してみた。方法は関ら^{20), 21)}と同じである。すなわち、いくつかの岩石を持ち帰り、適当な大きさに切断した後、試料の下半分を水（水道水）につけて約4ヶ月放置した。蒸発により水が減少したときは補給した。1ヶ月程度で粗粒砂岩の表面に白色の物が浮き出してきた（写真4）。4ヶ月後に白色物を削り取り、X線解析をすると、石膏（ $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）が検出できた。同じような実験を海水を用いて行くと、蒸発析出する白色物は著しく多量になり、今度は岩塩（ NaCl ）と石膏が検出できた。このことは、水あるいは海水が岩石中を浸透して鉱物等と反応し、石膏の成分を溶かし込みながら表面にたどり着き、そこで蒸発し、石膏が晶出したことを意味する。溶液が海水であるとその反応は著しく促進されることも示された。

この実験後、岩石を100°Cで乾燥させたところ、5個の試料のうち、2個は触れただけで破断した。それらは細粒凝灰質泥岩である。乾燥した岩石は粘着力をなくしている。この実験は岩石の粘着力を保持するためには乾燥しない方がよいことを意味する。

採取した岩石のいくつかからカバーガラスをかぶせない顕微鏡用薄片を作成し、顕微鏡観察後約

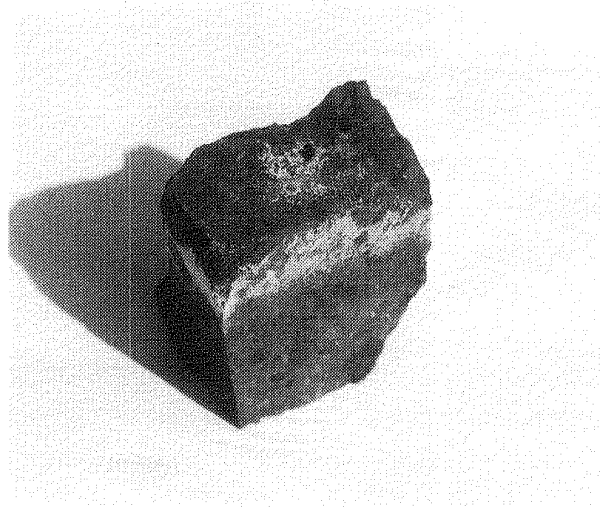


写真4 実験室で下半分を水道水につけておいた粗粒砂岩。上半分の表面に白い石膏が付着している。砂岩の横幅はおおよそ7cm。

4ヶ月間水道水に浸し、放置した。4ヶ月後取り出し、再度顕微鏡観察をした。この実験は化学的に不安定な岩石が水と触れることにより、どのように変化するかを視覚的に確かめるためである。とくに、沸石脈ができている節理で岩石が分離している場合があるので、沸石に注意して実験を行った。実験前に撮影した写真と4ヶ月後の状態とを丹念に比較すると、いろいろな細かい変化が認められ、特に沸石の一部に新しい割れ目ができていることも判明した(写真5)。この新しい割れ目の壁にあたる沸石の鉱物的変化(鉱物種の変化)はまだ認められない。しかし、古い割れ目や一部のへき開の両側の沸石には明瞭な変化が認められる。光学的に言えば、消光位が変化し、波動消光する(写真6)。この事実は、微細な割れ目に沿って溶液が浸透し、鉱物と反応していることを意味する。そして、水と接することにより、新しい割れ目も出現することも意味する。常温下での水-岩石相互反応は、一般には岩石の強度低下の原因となり、節理などの水の通路は急激に強度が低下していくことが確認できた。

ところで、玉川災害地点周辺は従来からしばしば崩落事件があったこと、越前海岸で最も観光価値のある場所でもあること、岩石の露出もよかったことなどからいくつかの写真記録が残っている。昭和62年に南側から撮影した写真によると、崩落

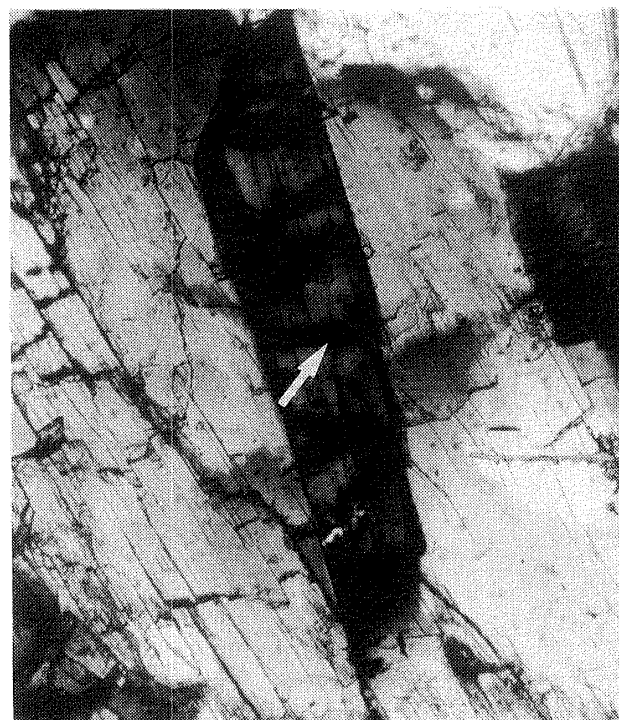


写真6 細かい割れ目に沿って波動消光する沸石(矢印)。割れ目に沿って水と反応していることを示す。

壁の上半分に白色のモルタルが吹き付けられている。写真には白色のモルタルの以外にも茶褐色のモルタルも写っている。今回の崩落では白色モルタルを吹き付けた部分がほぼ完全にはずれており、モルタル吹き付けの影響があるのではないかと推

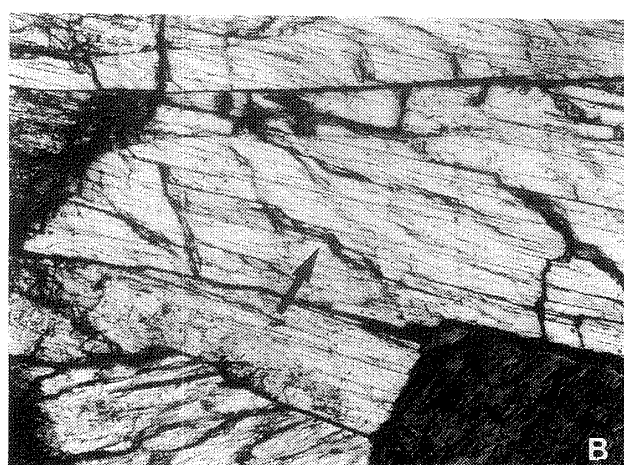
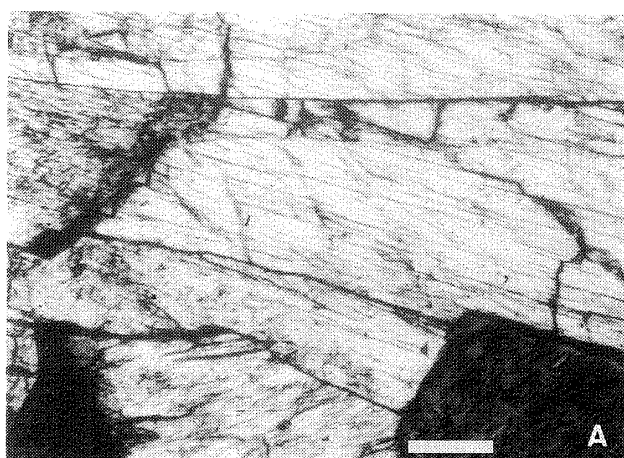


写真5 カバーガラスをつけないで4ヶ月間水に浸した薄片中の沸石。A：水に浸す前。B：4ヶ月間水に浸した後。BにはAでは存在しなかった新しい割れ目(矢印)が出現している。写真Aの中央下部のスケール、0.1mm。

定される。今回の場合、モルタルの吹き付けが岩盤を乾燥させたかあるいは乾燥を防ぎ、湿った状態を作りだしたかが不明である。モルタル吹き付けが岩石の劣化とどのように関係しているか、今後、十分検討する必要がある。

このモルタル吹き付けの効果については次のようにはいえるであろう。モルタルを吹き付けたため、本来なら小さなブロックとして落下するものが、そのまま斜面に固定されて、崩落現場の臨界値を高めた。そして、大きなブロックが一体として倒壊しやすい状況にあった。また、モルタルが吹き付けてあったため、崩落ブロックの状態の変化の観察が阻害された。もし、金網で防御されていれば、何年も前に斜面の変化が注目されたかもしれない。

(2) 崩落岩石の経年変化

崩落地点には崩落した岩塊がそのままの状態で放置されている。それらの岩塊の状態を崩落時

(1989年)と現在(1992年)とで比較した。崩落時の状態は多数の写真に収録されているので、写真に写っている状態と現在の状態とを比較すれば、崩落岩塊に起きた3年間の変化が読み取れる。

まず、最も大きな変化は、崩落時に完全な塊であった岩塊にいくつかの細かい割れ目が発生していたり、崩落時に密着していた割れ目が開口していることである(写真7)。新たに出現した細かい割れ目は、崩落以前から存在していた内部歪や崩落時に受けた岩石の内部の歪が時間の経過と共に、封圧がない条件下で、割れることにより開放されてできたのであろう³。崩落時に密着していた割れ目が開口したのは、割れ目に水が浸透し、内部の粘着性を低下させたためであろう。後者の変化は緑色凝灰質粗粒砂岩に顕著である。また、いくつかの凝灰角礫岩では、礫とマトリックスが分離しかけている。

次に目につくのは、崩落当時には岩石の表面に

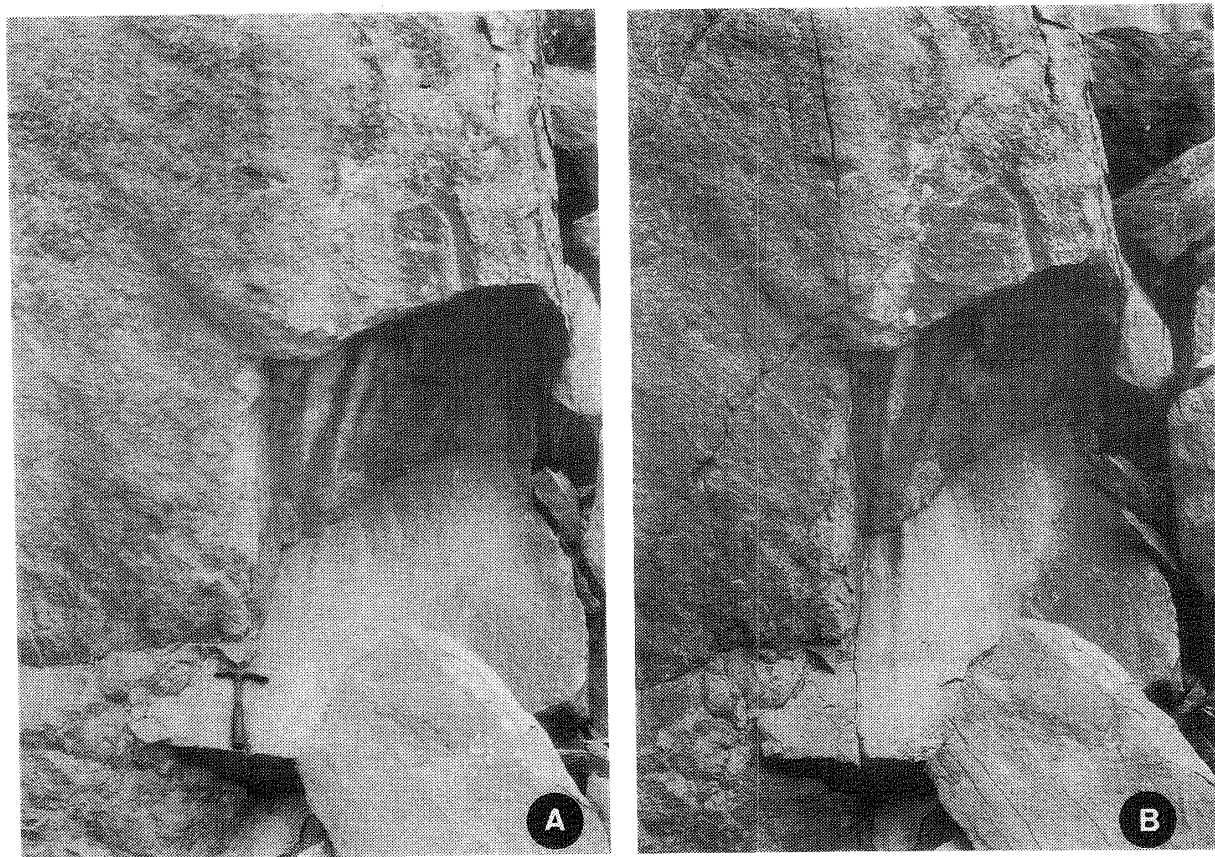


写真7 崩落したブロックの変化。崩落直後(A)には認められなかった割れ目が3年後(B)にははっきりと認められる。Aのハンマーの長さは約30cm。

付着していた沸石脈や水酸化鉄などからなる風化膜（厚さ数mm）が剥がれ落ちかけていることである。特に水酸化鉄風化膜の剥離は、日光に直接当たるようになって、内部の岩石と表面の風化膜の膨張係数の違いが効果的になったことと、直接風雨にさらされるようになったことの両方が原因であろう。

また、崩落時の岩塊の角はきわめて鋭利に角ばっていたが、現在は丸みを帯びており、時間の経過により、角がとれていくことがわかる。なお、一般的ではあるが、崩落時にはたいへん新鮮であった岩塊の表面がうす汚くなってきている。

4. 急崖斜面崩壊の予測の可能性

玉川地区では海岸線の後退が避けられないことは明らかである。対処法としては崩落時期を予測し、被害を少しでも軽減化することしか手がない。今回程度の規模の崩落周期を現在の知識から見積ってみよう。

既に述べたように、この地域の陸上急斜面は海底の急斜面の陸上延長部が後退していったものである可能性が強い。そこで次のような計算ができる。崩落壁と海底急斜面の水平距離が約250m、斜面の後退が高位段丘形成直後から始まるとすると、現在まで、約12.5万年経過しているので、平均後退速度は0.2cm/yrとなる。崩落地点と同じ地質的、地形的環境にある玉川とその北1kmの区間を対象としてとりあげる。この区間を走る道路（国道であったが現在は廃道になった）に沿って、斜面勾配が小さい所や小さな沢があるが、ざっと見て、この1kmの区間では高度差100mの急斜面が発達しているとみなせる。この急斜面が5年に1cm後退していくと、毎年200m³の岩壁が削られていることになる。このうち、ぼろぼろと剥がれ落ちていく中・小ブロックや砂粒もある。その量は何年かに1度大量に落下、崩落する量よりはるかに小さいであろう。200m³がすべて今回のような崩落によって剥がれ落ちるとすると（斜面の上部で発生するか、下部で発生するかは問わない）、崩落量が1,100~1,500m³である今回の崩落災害では5年から8年分の削剥量が1度に

崩落したのである。小規模の崩落が頻繁に起こっていることを考慮すると、問題の道路1km当たり20~30年に1回位の確率で今回程度の崩落が発生すると思えばよいであろう。

今回新たに出現した崩落壁の切取り面積は、最大高さ25m、最大幅30mとされているので、約375m²（=25×30÷2）程度の面積と見積ることができる。道路に沿う急斜面の全面積は1,000m×100mであるので、その1/266が剥がれたことになる。今回程度の切取り面積をもつ崩落が繰り返すとなると、266回の崩落で全面積を一巡する。すなわち、今回の崩落現場が再度崩落するのは266回後である。この計算から、同じ所で、同じサイズの崩落災害が発生するのは1,300年（5年×266）ないし、2,000年（8年×266）周期という期待値が得られる。当然のことながら、この期待値は今回の崩落岩体の平均の厚さ（=崩落量÷崩落による切取り面積）を斜面の平均後退速度で除した商と一致する（例えば、1,500m³÷375m²=4m、4m÷0.2cm/yr=2,000年）。今回の崩落災害は、多分この区間で発生する最大級の崩落であり、より小さな崩落が頻繁に起きていると思われる。事実、この区間の北端に近いところで、この3年の間に長径1.5mのブロックを最大とする崩落が起きている。このように途中に小規模崩落を何度も挟むと、この周期は2,000年よりもっと長くなる。

2,000年という期間は人間の社会生活に取って充分長い。しかし、逆に20~30年という時間は十分に短い。そのため、今回と異なるどの部分の斜面が、次に何時ごろ崩落するかということを予測する必要がある。この地域の大規模崩落は基本的には節理（や断層面）に沿って分離するという性格がつかめているので、節理の接着力の低下を見積ってやる必要がある。その目的のためには、節理に水が浸透し始めて、そこにできている沸石類がどの程度の速度で変質していくか（脆くなっていくか）を定性的にでも求め、それを手掛かりにすることは可能であろう。今回の研究で注目したこの種の研究は全く行われておらず、今後重点的に研究を進める価値があると思われる。

5. まとめ — 防災と予測

越前海岸玉川の崩落災害は人為の及ばない広域的な地質プロセスを反映した現象であった。その地質プロセスは今後も人為的にコントロールできないものである。そのため、崩落の防止はできないので、崩落時期を予測し、被害を最小限にとどめるように対策を立てるべきである。玉川地域で今回と同じ程度の崩落が発生する周期は短くておおよそ5～8年に1回である。同じ場所で今回と同じ規模の崩落災害が再来する周期の期待値は短くて2,000年である。

玉川地域では岩塊が節理から分離するようにして崩落災害が発生する。岩石そのものが化学的に不安定であり、湿った状態では岩石の内部の鉱物の変化し、乾燥すると粘着力がなくなる。また、この地域の岩石は封圧のない自由斜面では反る性質も有する。この性質は岩板を斜面から分離させるように働く。また、斜面を構成する岩石の性質によってはモルタル吹き付けが、防災上、効果的か逆効果的かを吟味する必要がある。

今後この岩石内部の経年変化について研究を進めれば、崩落時期の予測がもう少し精度良く決まるであろう。

注

- 1) 本原稿投稿後に調査終結が発表された。
- 2) 三角錘面から分離・落下したブロックにもこの安山岩礫の半分が残っている。このことは、三角錘面に鏡肌を残した断層の変位が大変小さいことを示す。
- 3) 一般に、顕微鏡観察用プレパラートを作成するとき、厚さ1～2 mmの薄片を切り出す。これをスライドガラスに接着する。このとき、越前岬地域の岩石のみならず中新世やそれより若い岩石は接着してあるにもかかわらずスライドガラスから分離して、時にはスライドガラスと一緒に割れることが多い。中生代やそれ以前の岩石では一部のものを除いてこのような現象は見られない。この事実、若い岩石には内部歪が相当蓄積していること、ならびに鉱物学的な変化が今なお徐々に進行していることを示し、このような内部的な

安定性は続成作用が途中の段階であることを意味する。

参考文献

- 1) 三浦 静(代表者)：越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究。平成元年度文部省科学研究費補助金、総合研究(A)研究成果報告書. 128p., 1990.
- 2) 一般国道305号岩石崩落災害調査委員会：一般国道305号岩石崩落災害調査報告書, 108p., 1990.
- 3) 平野昌繁・諏訪 浩・藤田 崇・奥西一夫・石井孝行：1989年越前海岸落石災害における岩盤崩壊過程の考察, 京大防災研年報, No. 33 (B-1), pp. 219-236, 1990.
- 4) 服部 勇：越前海岸玉川地域の地質学的・岩石学的検討。文部省科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書「越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究」, pp. 39-72, 1990.
- 5) 福原輝幸：越前海岸玉川における崖崩れと風及び降雨の因果関係, 文部省科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書「越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究」, pp. 13-26, 1990.
- 6) 足立紀尚・荒井克彦：越前海岸玉川の崖崩れに関する岩石強度・岩盤斜面安定性の検討。文部省科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書「越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究」, pp. 73-91, 1990.
- 7) 福井卓雄：越前海岸崖崩れ崩落岩石の力学的特性。文部省科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書「越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究」, pp. 92-104, 1990.
- 8) 大矢芳彦：越前海岸崖崩れ付近の地形。文部省科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書「越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究」, pp. 27-38, 1990.
- 9) 太田陽子・成瀬 洋：日本の海成段丘, 科学, 47, pp. 281-292, 1977.
- 10) 三浦 静：福井県の地形・地質概観, 三浦 静教授退官記念論文集, pp. 1-9, 1991.
- 11) 海上保安庁：沿岸の海の基本図(5万分の1), 若狭湾東部(海図第6336号)海底地形図, 海底地質構造図, および調査報告書(33p), 1990.
- 12) 山本博文・上嶋正人・岸本清行：20万分の1海洋地質図「経ヶ岬沖海底地質図」及び同説明書, 地質調査所, (印刷中).
- 13) Yamamoto, H.: Submarine geology and post-opening tectonic movements in the southern region of the Sea of Japan, Marine Geology, 112, pp. 133-150 1993.
- 14) 中島正志・沢田順弘・中川登美雄・林 昌代・板谷徹丸：福井県北部新第三系のK-Ar年代と古地磁

- 気 - 西南日本ブロックの回転に関して-, 岩鉾, 85, pp. 45-59, 1990.
- 15) 清水 智・山崎正男・板谷徹丸: 両白 - 飛騨地域に分布する鮮新 - 更新世火山岩の K-Ar 年代, 岡山理科大学蒜山研究所報告, no. 14, pp. 1-36, 1988.
- 16) 藤 則雄: 北陸の海岸砂丘, 第四紀研究, 14, pp. 195-220, 1975.
- 17) Kanaori, Y., Kawakami, S., and Yairi, K.: Space-time correlations between inland earth-quakes in central Japan and great offshore earth-quakes along the Nankai trough: Implication for destructive earth-quake prediction, Eng. Geology, 33, pp. 289-303.
- 18) 金折裕司: 甦る断層 - テクトニクスと地震の予知 -, 近未来社, 220p., 1993.
- 19) 水谷伸治郎: 越前海岸崖崩れと飛騨川バス転落事故, 文部省科学研究費補助金(総合研究A)研究成果報告書「越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究」, pp. 105-116, 1990.
- 20) 関陽太郎・酒井 均: 千葉県館山市船形磨崖仏十一面観音像の劣化の水・岩石相互作用, 岩鉾, 82, pp. 230-238, 1987.
- 21) 関陽太郎・平野富雄・渡辺邦夫: 福島県小高町葉師堂石仏群の劣化と水・岩石相互作用, 岩鉾, 82, pp. 269-279, 1987.
- 22) 活断層研究会編: 新編「日本の活断層. 分布図と資料」, 東京大学出版会, 437p., 1991.

(原稿受理 平成5年2月3日
訂正受理 平成5年8月22日)