

豊浜トンネル岩盤崩落にともなう地震動について

Note on no seismic signals recorded at routine seismic stations caused by large scale rock fall of Toyohama road tunnel on February 10, 1996

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, 地震予知観測地域センター

笠原 稔

Research Center for Earthquake Prediction, Graduate School of Science, Hokkaido University

Minoru KASAHARA

Abstract

Two seismic routine stations with high-gain short period seismometers were operating 20 km far from Toyohama tunnel at the moment of large scale rock fall. No seismic signals were recorded at the both stations. This means the seismic signal generated by this event is not over magnitude 1.0. Possible seismic signal estimated from the total volume and maximum height of falling rocks is in the range between magnitude 0.5 and -0.2.

キーワード：岩盤崩落地震動

1. はじめに

1996年2月10日, 午前8時10分ころ(新聞報道), 積丹半島東海岸の国道229号線豊浜トンネルは, 高さ48m, 幅23mの岩盤崩落により, 長さ約15mに渡り押しつぶされた。ちょうど, 通りかかった定期バスと乗用車が下敷きになり, 20名が犠牲となった。

この岩盤崩落の発生メカニズム考察の1助として, この周辺に展開している高感度微小地震観測点の地震記録を検討して見た。崩落地点に最も近い観測点の距離が20kmであったが, 崩落

に伴う地震動は観測されなかった。他の場所での土石流、山体崩壊による地震動と比較検討した結果、今回の崩壊による相当マグニチュード（M）は、最大でも0.5に達することではなく、検知レベル以下であったことが結論された。

2. 地震記録

北海道大学理学部地震予知観測地域センターでは、微小地震観測のために、北海道内に、現在、約30点の高感度短周期地震観測点を維持している。豊浜トンネル周辺には、石狩湾内の地震活動を観測する目的で、1985年に、SYJ（積丹岬）、AKA（小樽赤岩）、HAM（浜益）が設置された。HSSは、札幌地震観測所で、1974年設置、HRUは島牧原歌で1993年北海道南西沖地震以後に設置されたものである。豊浜トンネルから最も近い観測点は、SYJおよびAKAであるが、いずれも約20km離れている。これらの観測点の検地能力としては、20km離れたマグニチュードM～1相当の地震ならば観測可能である。

ここでは、SYJ、AKA、HSSの3観測点の記録を中心に見てみる。HSSは、30m垂直孔内に地震計が設置されているが、他2点は地表設置である。当日の、08時00分から08時30分に渡って地震記録を検討してみたが、地震記録のみから崩壊によると思われるシグナルを判読することはできなかった。図2に、08時06分から12分までのこの3点の1分毎の地震記録をならべて示してある。3点に共通したシグナルを判読することはできない。SYJに見られる、A、

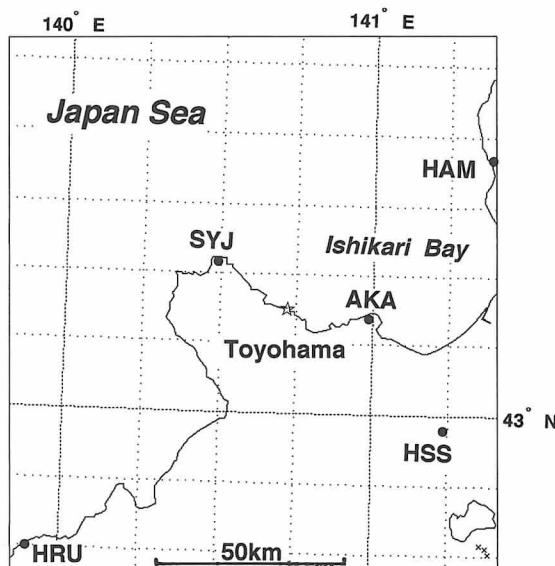


図1 豊浜トンネル周辺の高感度短周期地震観測点分布

February 10, 1996

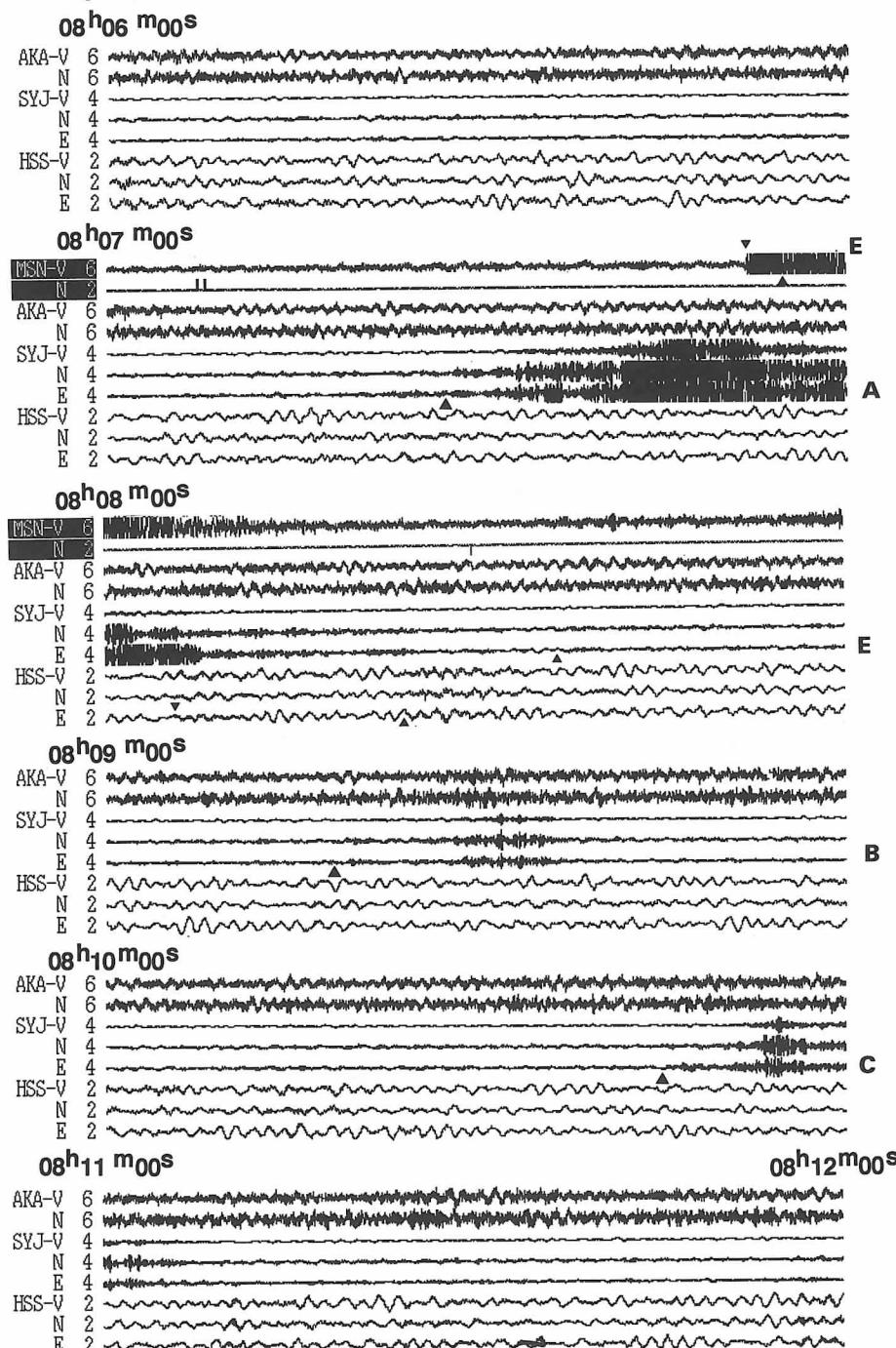


図 2 AKA (小樽赤岩), SYJ (積丹) および HSS (みすまい) 観測点の 2月10日午前 8時6分～12分までの3成分記録。SYJ 観測点の A, B, C で示した記象は車の通過によるもの, E は, 08 h 07 m 静内町御園付近の地震によるもの。

B, C で示した記象は、一見土石流によるものと似ている。しかし、AKA では、同時に振幅の増大は見られないし、後から示すように、近くの道路を通過する車による震動である。また、08時07分50秒に、静内町御園付近を震源とする微小地震が発生しており、図 2 に E で示してあるが、その震動が、08時08分台に、HSS に先に現われ、次いで SYJ に現われている。

さらに詳しく検討するために、崩壊発生時刻の確認を行って見た。小樽開発建設部道路課、渋谷元氏に問い合わせたところ、トンネル内部の電気断線の時刻が、2月10日08時08分51秒と記録されている。この時計を、2月13日に、NTT の時刻と合わせたところ、十数秒進んでいたようだ、との返事をもらっている。つまり、08時08分31秒から41秒の間が、崩落発生時刻と推定出来る。この時間帯以降に、特別な地震動が記録されているならば、それが崩落に伴うものと言えよう。そこで、図 3 に、最も可能性の高い08時08分28秒～60秒の SYJ 3 成分の拡大記録を示す。38～40秒付近に、振幅のわずかな増大が認められ、このシグナルは比較的長周期で、2～4 Hz の周波数帯に最大のパワーを示している。しかし、これは、先にも示したように、08時07分50秒頃に、静内町御園付近で発生した、M 2.5 の浅い地震の S 波を見ているものである。しかし、たとえば、この震動が豊浜に原因があったとすれば、M～1 に相当し、これが SYJ の20km離れた地震動の検知レベルである。HSS は、SYJ より観測条件が良く、豊浜で M～1 のシグナルを発生していれば、検知出来るはずであるが、この時刻には振幅の増大は見られない。

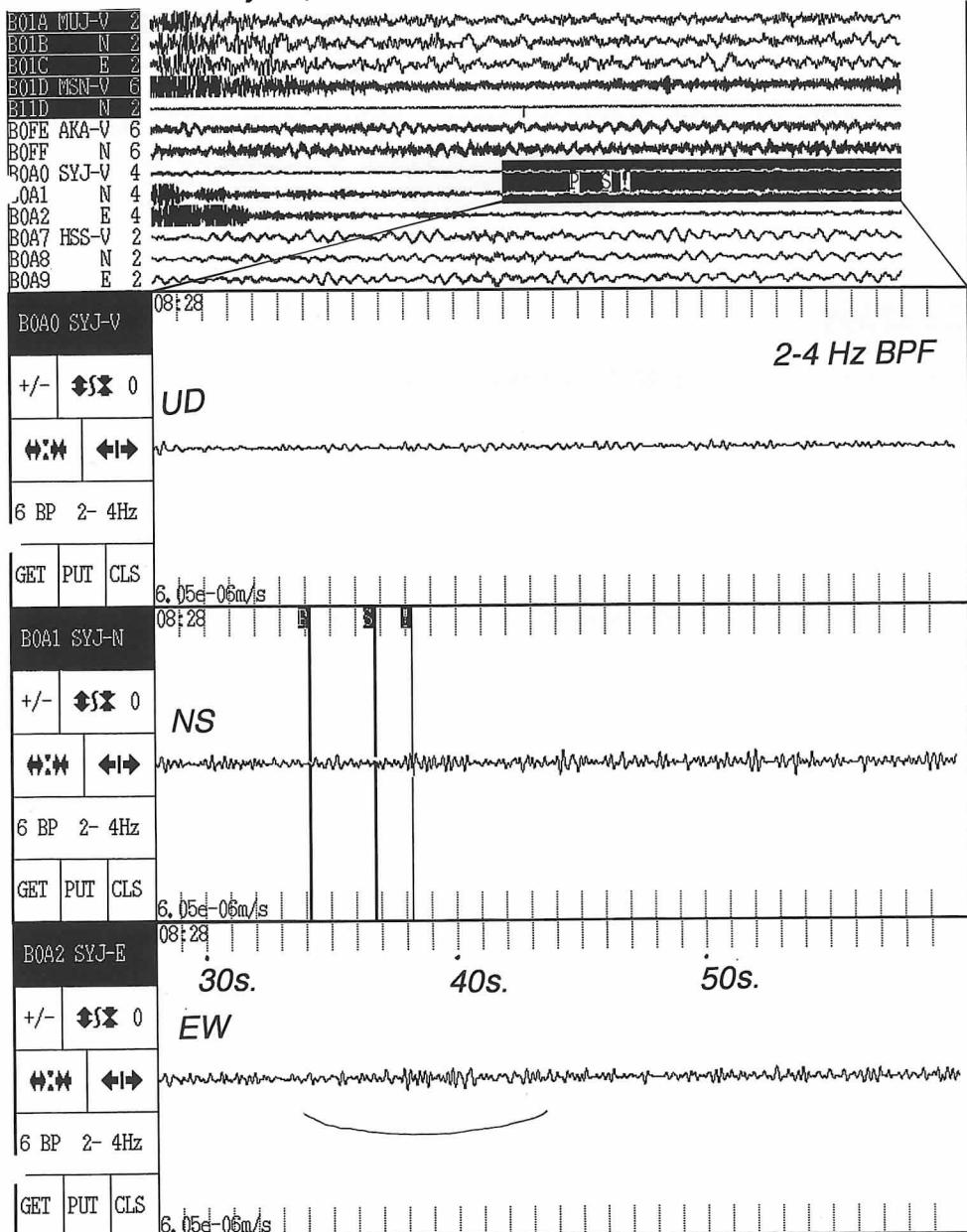
豊浜の岩盤崩落による地震動は、高感度地震定常観測点の記録を元にして、M～1 程度のパワーを持っていなかったと結論される。

なお、図 2 に示した SYJ のいくつかの特徴的な震動について、車の通過によるものとの確認を4月21日午後に行った。観測点近傍の道路をジープが走行した記録を2月のものと比較したものを、図 4 に示した。2月10日08時10分台後半に見られる記録と4月21日16時37分のジープの通過した記録とを並べて示してある。両者は良く似ており、SYJ で見られる1見、土石流的な震動は車によるものである。

3. 土石流、雪崩による地震記録の例と豊浜トンネル岩盤崩落による地震動の推定

岡田（1993）は火山地域での火砕流や土石流さらに雪崩による地震記録を総合報告している。これから、岩盤崩落等による地震動の特徴の紹介と崩落規模と地震動としての大きさの関係について検討してみる。図 5 に、岡田（1993）が紹介している4つのケースを示す。それらは、
(a) 1991年5月24日、08時07分に雲仙岳に発生した火砕流の記録である。観測点は、火口から4 km の地点で、倍率2000倍、固有周期1秒の変位型地震計の記録である。火砕流は、約1 km 流下したもので、約72秒継続しており、流下速度が、13.9 m/s がえられている。

08h08m February 10, 1996



Seismic signals on time of electricity cutting in the tunnel

図3 08時08分の拡大地震記象。08時08分28秒～60秒、2～4 Hz のバンドパスフィルターを通したもの。

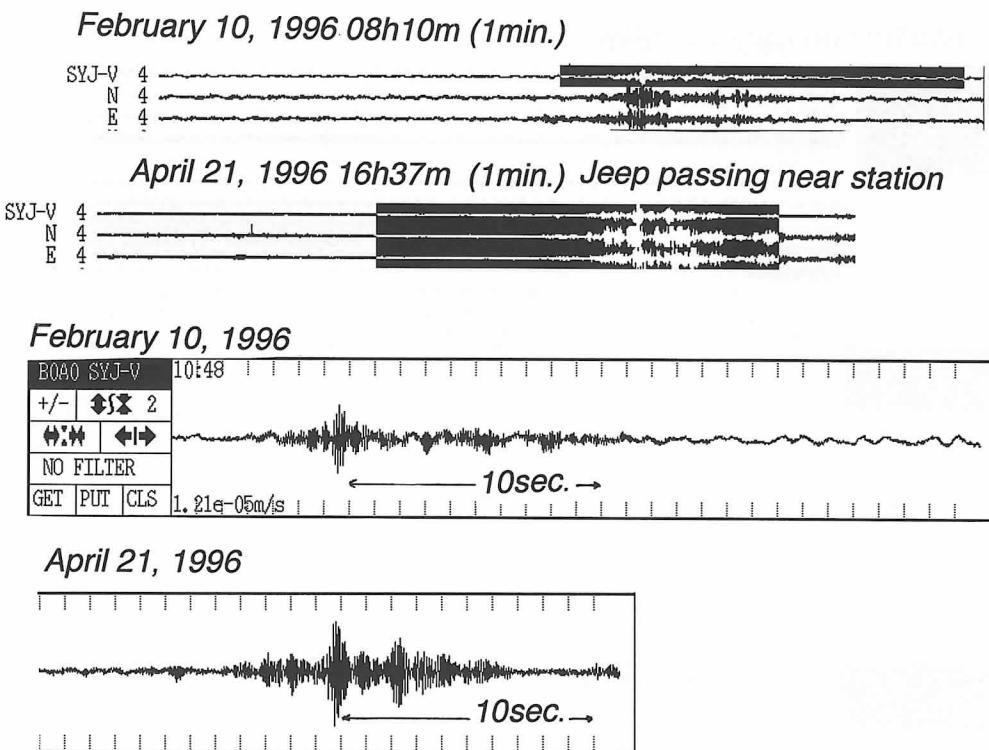
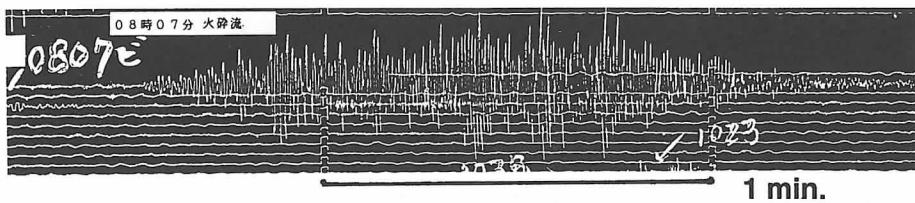
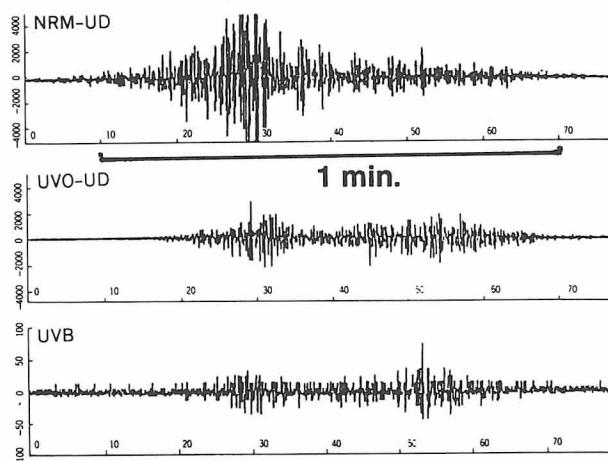


図4 車の通過によるSYJ地震記録の比較、2月10日と4月21日

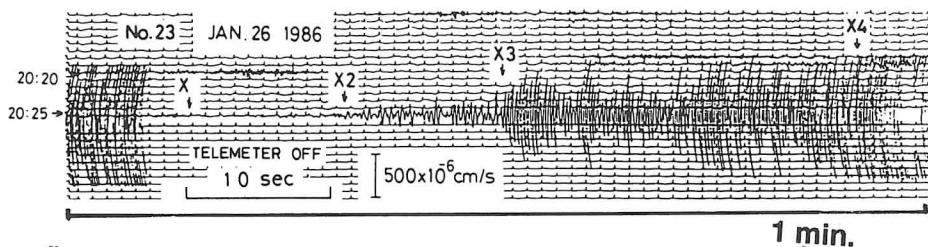
a) Volcano Unzen : Pyroclastic flow (JMA) $\Delta=4\text{km}$



b) Volcano Usu : Mud flow (UVO, Hokkaido Univ.,) $\Delta=\sim 1\text{km}$



c) Nou : Snow avalanche (ERI, Univ., of Tokyo) $\Delta<1\text{km}$



d) Mt. Cook : Rock avalanche (IGSN, New Zealand) $\Delta=75\text{km}$

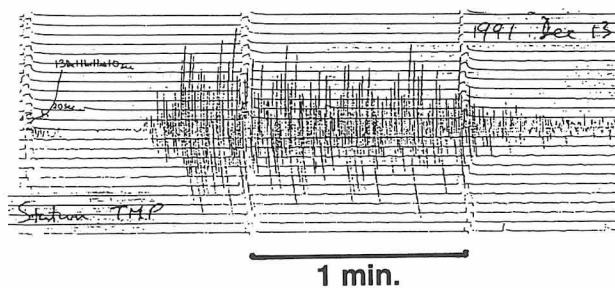


図5 (a)火碎流, (b)小規模土石流, (c)雪崩, (d)大規模山体崩落による地震記録の例 (岡田, 1993)

(b) 1981年4月24日に有珠山で発生した小規模土石流の記録である。約 $6,000\text{m}^3$ の土石が比高差約300m, 距離825mを流下したものである。この時の地盤震動は、マグニチュード1.1に相当し、10km離れた点でも観測されている。

(c) 新潟県能生市における1986年1月26日の雪崩の例である。雪崩の量は、 $30,000\text{m}^3$, 比高差約400m, 距離1,300mを流下したものである。観測点は、流下する雪崩の直下にあり、図に示したX, X2, X3, X4は、流下する雪崩が傾斜の急変地やダムなどの障害物に当たったときのものと推定している。最後に、地震計自身が雪崩により、動作不能になって止まった。

(d) 1991年12月13日のニュージーランド、クック山での大規模山体崩壊の記録である。地震観測点は75kmも離れていたが、崩壊物の量は、1億4百万 m^3 , 比高差2720m, 距離約7kmを流下したもので、マグニチュード3.9相当の地震動を記録している。崩壊が大規模の割には、震動継続時間が短く、これを元に、この岩なだれの平均流下速度を、 300km/h と推定している。

いずれの地震計も、高感度短周期地震計と分類されるものであり、それぞれの震央距離と崩壊の規模をまとめ、今回の豊浜トンネルの場合も含めて表1に示した。

ここで、土石流等と地震動の大きさの関係を検討して見るが、土石流等の規模、あるいはエネルギーは、実際にはその流下のメカニズムをも考慮する必要があることは言うまでもない。しかし、ここでは、簡単のために、最も基本でもあるので、土石流のエネルギーとしては、位置エネルギーをとる。それぞれの土石流等の体積と落下高と密度 2 g/cm^3 を仮定して求めた。

また、地震波のエネルギーは、マグニチュードとエネルギーの関係、

$$\log E = 11.8 + 1.5 M$$

(E : 地震波として出されたエネルギー、単位は、erg) より求めた。

(b), (d)の例から、地震エネルギーと土石流のエネルギーの比を求めてみると、0.000084と0.000004になる。大きく異なる2つのケースで、変換効率に1桁の違いしか出ないことは、注目に値する。この値から、変換効率は、少し大きめに見積もって、0.0001~0.00001にあるも

表1 土石流、雪崩の地震計による観測例の規模一覧

例	Δ	Volume	落下高	距離	M
(a)	4km				1,000m
(b)	1km	$6,000\text{m}^3$	300m	825m	1.1
(c)	0.1km	$30,000\text{m}^3$	400m	1,300m	
(d)	75km	$104,000,000\text{m}^3$	2,720m	7,000m	3.9
豊浜	20km	$22,000\text{m}^3$	7m		20m

(a), (b), (c), (d)は、本文参照

のとして、豊浜トンネルの岩盤崩落による地震波エネルギーの推定を行って見る。崩落の、体積 $22,000\text{m}^3$ と落下高 7 m と密度 2 g/cm^3 を用いて、位置エネルギーを計算し、相当マグニチュードを求めるとき、 $0.5\sim-0.2$ になる。この大きさは、先に述べたように、 20km 離れた観測点では観測不可能な大きさである。また、観測可能な最小マグニチュードは、 1 程度であり、これに相当するためには、変換効率がもう 1 桁大きくなるといけないことになる。衝撃の強さが要求される崩落様式、すなわち、自由落下に近いものであれば可能かも知れないが、「押し潰し」崩落、あるいは「滑り（流下）」崩落では無理であろう。

4. おわりに

今回の豊浜トンネルの岩盤崩落に伴う地震動の可能性について検討して見た。高感度短周期地震観測点は、豊浜トンネルから約 20km 離れたところが最も近かったが、岩盤崩落の時刻には特別な地震動は観測されなかった。検知レベルは、 $M \sim 1$ 程度であるから、これ以下の地震動しか発生しなかったという結論になる。

また、岡田（1993）の報告している土石流等の現象による地震動の例から、今回の豊浜トンネルの崩落により発生可能な地震動の大きさを推定してみると、 $M, 0.5\sim-0.2$ となり、観測とも調和する。この推定は、少なくとも、今回の岩盤崩落が「衝撃」力を持つようなものではなかったことを示唆している。

参考文献

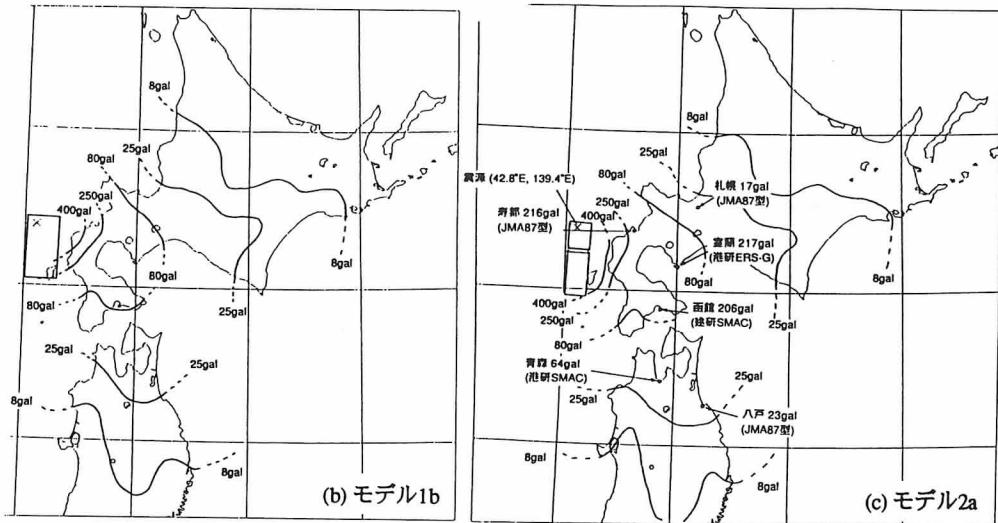
- 岡田 弘, 1993. 火碎流噴火の観測と予知, 月刊地球, 15, 492-505.

付録：1993年北海道南西沖地震による積丹半島の震度分布

今回の岩盤崩落の原因の主たるものは、長期的な広い意味での風化による岩盤剥離で有ると言える。その促進の1つの原因として、大地震による強震動の影響も考えられる。そこで、ここでは、2年前に発生した1993年北海道南西沖地震により、積丹半島がどの程度の強震動にさらされたか、いくつかのデータを参考まで示しておく。

まず、土岐・他（1994）は、1993年北海道南西沖地震による北海道および東北北部の最大加速度を計算している。ここでは、6例の断層モデルによる計算結果のうち、積丹半島での最大加速度が最も大きくなるものと、実測と最も良く似ているという2つの結果を付図1に示した。

左は、1枚の断層モデルで地震モーメント $3.6 \times 10^{27}\text{ dynecm}$ を仮定したもの、右は、2枚の断層モデルで合計の地震モーメント $4.8 \times 10^{27}\text{ dynecm}$ を仮定したものである。ここでは、地質



付図 1 断層モデルによる最大加速度の推定。左：1枚の断層モデル、地震モーメント 3.6×10^{27} dyne cmを仮定、右：2枚の断層モデル、合計の地震モーメント 4.8×10^{27} dyne cmを仮定。

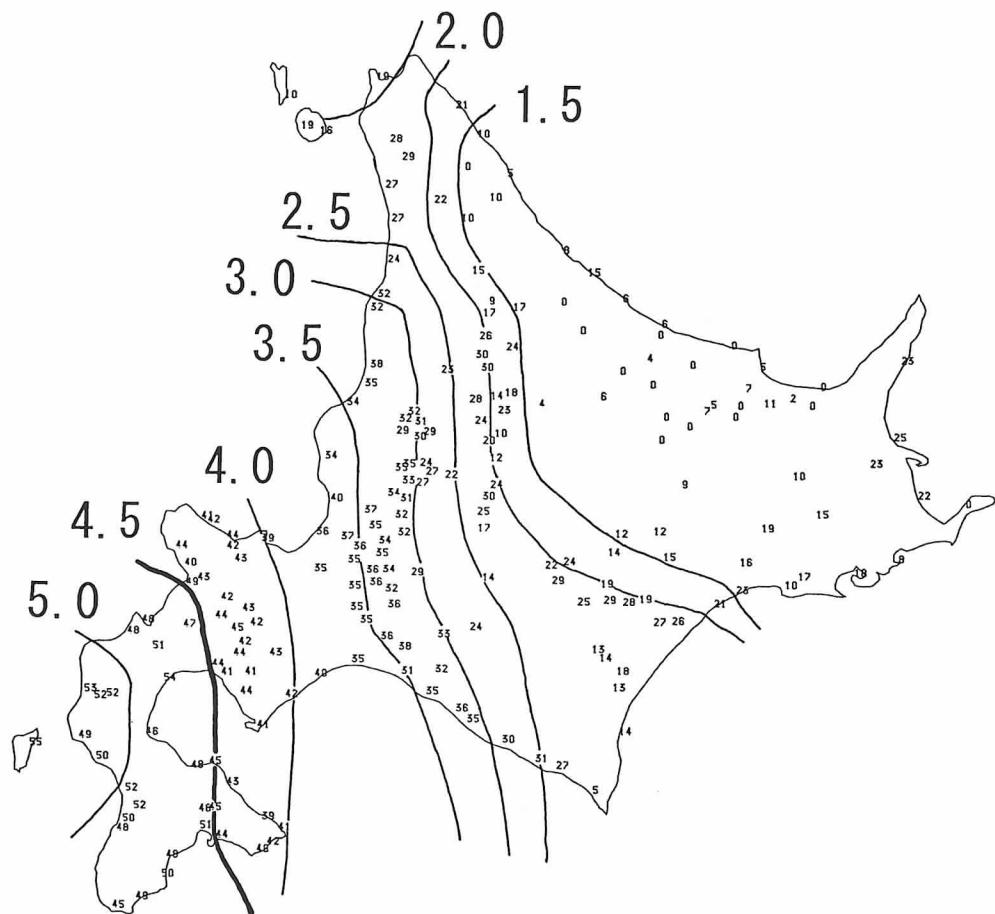
地質条件に基づく増幅度を考慮して最大加速度の期待値が計算されている。図中のコンターラインは、気象庁の震度階に対応させて描いてある。8~25 gal (Ⅲ), 25~80 gal (Ⅳ), 80~250 gal (Ⅴ), 250~400 gal (Ⅵ), 400 gal ~ (Ⅶ) (土岐・他, 1994)

条件に基づく増幅度を考慮して最大加速度の期待値が計算されている。図中のコンターラインは、気象庁の震度階に対応させて描いてある。8~25 gal が震度 3, 25~80 gal が震度 4, 80~250 gal が震度 5, 250~400 gal が震度 6, 400 gal 以上が震度 7 (土岐・他, 1994)。

積丹半島付近の最大加速度は1枚モデルのほうが大きく、震度 5 相当が得られている。実際の観測量とは、2枚モデルのほうが合っていると土岐・他 (1994) は述べている。これによれば、積丹半島地域では、震度 5 に近い震度 4 以上の最大加速度で揺れたことが示される。

実際の観測量としての震度分布のうち、鏡味・他 (1994) によるアンケート震度分布を付図 2 に示す。これは、市町村単位で実施したアンケート結果から各市町村の震度を決定したものである。さらに、この図の等震度線は、半径100kmの範囲のデータに対して平滑化を行い自動作図したものである。これは、局所的な揺らぎをハイカットしたもので、震度の減衰の大まかな傾向を見ることに適している。この図の震度 4 が、土岐・他 (1994) の 80 gal の線に相当しており、震度 5 が 250 gal に相当している。

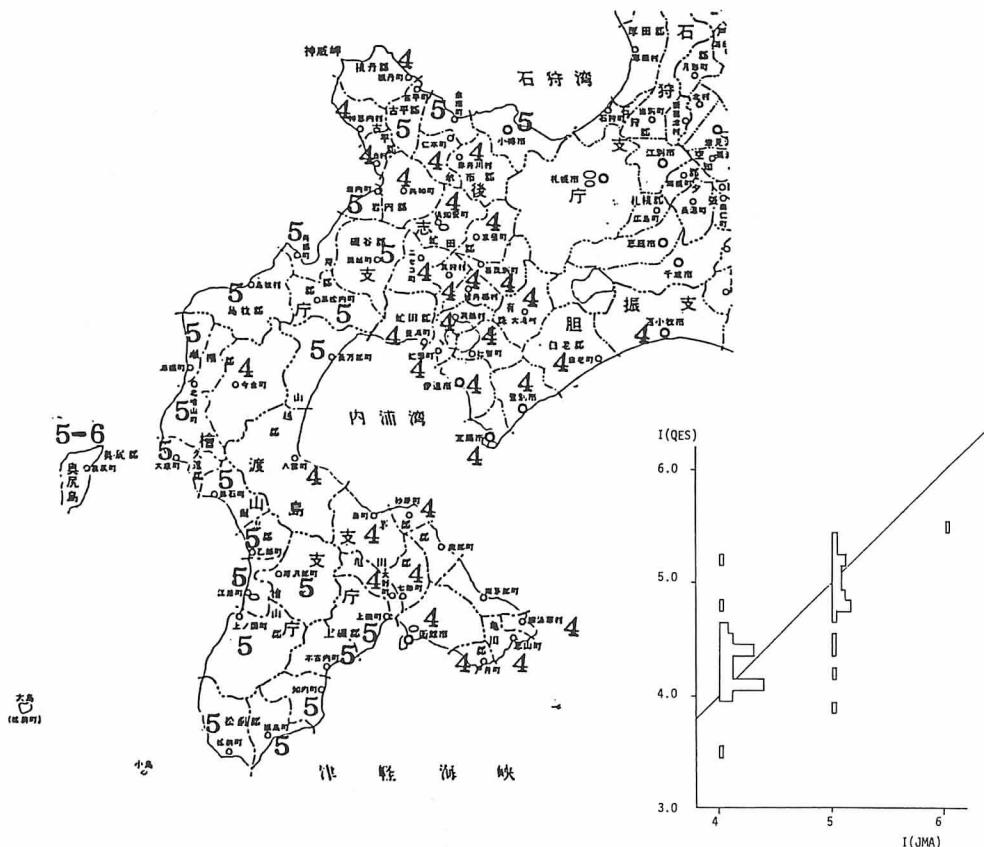
札幌管区気象台 (1993) も、地震後 7月13~16日かけて、聞き取り調査を行い、震度 4 以上の市町村別震度を発表している (付図 3)。この結果を、鏡味・他 (1994) のアンケート調査と比較すると、付図 3 右図に示すように、気象庁決定の震度 4 と 5 のグループでは、明瞭な差



付図2 1993年北海道南西沖地震のアンケート震度分布（鏡味・他, 1994）

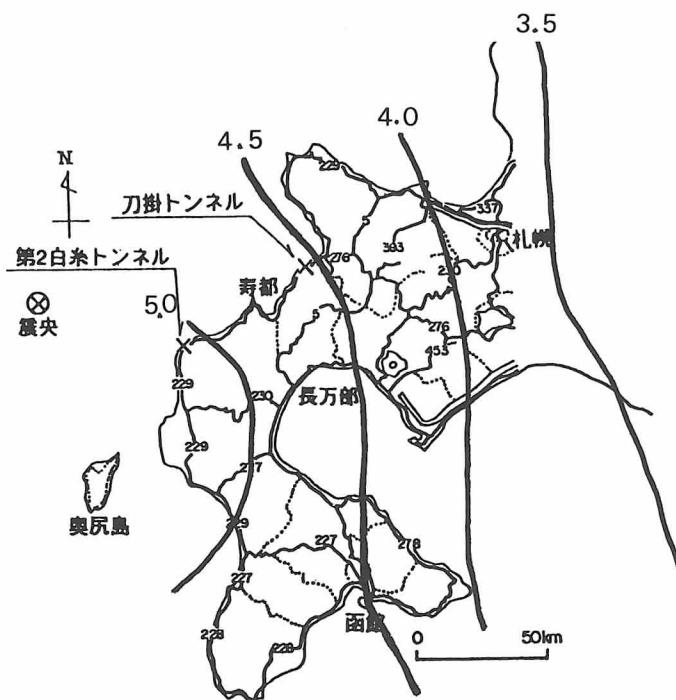
があるものの分布は拡がっており、「震度」に強い局地性があることを示している。そのために、豊浜付近の震度がどれほどであったかを考へる際には注意が必要であろう。少なくとも、局地的には、余市町・古平町で震度5相当の揺れの有ったことを示している。

この地震により、付図4に示すように、国道229号線では大規模な岩盤斜面の崩壊が見られた（三田地・渋谷, 1994）。この図には、鏡味・他（1994）による等震度線を重ねて示してあるが、これらが震度4.5以上の地域（気象庁震度階で5に相当）で発生していることがわかる。このうち、刀掛トンネルでは、地震時に一部崩壊し、その後（7月23日）の本格的な斜面調査で、巨大岩体の母岩からの遊離が発見されたもので、10月7日転倒発破により不安定岩体を処理している。この遊離は、長期的には、風化の促進によるものであるが、短期的には地震による強震動が十分に考えられる、と述べている。なお、この不安定岩体の大きさは、高さ25m、幅8m、奥行き10mであった。



付図3 左：聞き取り調査による各市町村の気象庁発表震度（札幌管区気象台, 1993）と、
右：鏡味・他（1994）によるアンケート震度分布との比較

1993年北海道南西沖地震の際の、岩盤崩壊が教えることは、地震時の強震動による岩盤遊離の点検地域を、震度5（アンケート震度ならば、4.5）以上を対象にするべきである、といえる。しかしながら、震度の局地性、さらに、地形的增幅効果を考えれば、少なくとも震度4の地域でも、危険箇所の慎重な点検が不可欠であろう。さらに、クリープ的変形を考慮するならば地震時に明らかに大きな変形を受ける震度5以上の地域以上に、震度4の地域における点検のフォローの必要性を示唆しているのではなかろうか。



付図4 1993年北海道南西沖地震による岩盤崩壊地点とアンケート
震度等震度線（三田地・渋谷，1994に加筆）

参考文献

- 鏡味洋史・岡田成幸・村上公一・高井伸雄, 1994. 1993年北海道南西沖地震の北海道内市町村別震度分布調査, 平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する調査研究, 石山祐二編, 39-42.
- 三田地利之・渋谷 啓, 1994. 1993年北海道南西沖地震による国道229号線岩盤斜面の崩壊および5号線盛土崩壊の原因と対策, 平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する調査研究, 石山祐二編, 139-148.
- 札幌管区気象台(1993), 北海道及び北海道海域の地震活動情況(1992.7~1993.7), 北海道防災会議資料
- 土岐憲三・佐藤忠信・清野純史, 1994. 1993年北海道南西沖地震による地盤震動強度の推定, 平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する調査研究, 石山祐二編, 35-38.