

研究ノート

2011 年 3 月 12 日に発生した長野県北部地震による 雪崩発生状況と地震の影響

上 石 勲¹, 本 吉 弘 岐¹, 石 坂 雅 昭¹, 佐 藤 威¹

要 旨

2011 年 3 月 12 日午前 3 時 59 分に長野県北部を震源として発生したマグニチュード 6.7 の地震によって、表層雪崩や全層雪崩、土砂崩壊を伴った雪崩、ブロック状の積雪の崩落、平坦部の積雪表面のクラックなどが広範囲に多数誘発された。雪崩の破断面は、階段状になるなど不規則な形状となっていたものが多かった。通常雪崩が発生しない雪崩予防柵設置斜面上部からも雪崩が発生していた。また、土砂崩壊を伴った雪崩は流動性が高く流下距離が長かった。地震によって発生した雪崩は、道路を各所で一時通行止めにした。地震による雪崩発生や積雪の崩壊状況を広域的に調査した結果、長野県栄村や新潟県十日町市松代、松之山地区など震度 6 弱以上を観測した範囲で、地震の震動による影響が大きかった。表層雪崩は、脆弱なぬれざらめ雪をすべり層としたものが多く、その剪断強度と上載荷重を測定した。このデータを用い、地震時の地盤の安定解析の考え方を応用して、地震を考慮した積雪安定度解析を行った。その結果、積雪安定度が 2.3 と積雪が比較的安定な斜面でも、地震の水平加速度を加えることによって、積雪安定度が 1.5 以下と不安定となる結果が得られた。今後は、観測結果をさらに詳細に検討するとともに、地震の影響を実験などの手法により定量的に把握する必要がある。

キーワード：長野県北部地震、雪崩、積雪、クラック

Key words: North Nagano Prefecture earthquake, avalanche, snowpack, crack

1. はじめに

2011 年 3 月 12 日午前 3 時 59 分に長野県北部を震源としたマグニチュード 6.7 の地震が発生した。最大震度は長野県栄村北信の震度 6 強で、新潟県津南町下船渡、十日町市松代、十日町市松之山、十日町市上山町では震度 6 弱を記録した（気象庁, 2011）。この地域は日本有数の豪雪地帯で、平成 18 年豪雪では、新潟県津南町の国道が雪崩によって通行止めになった（新潟県, 2006）。2010 - 11 冬期も大雪で地震発生時は十日町市内、津南町内のほとんどの積雪観測点で約 2 m 以上の積雪があった。

この地震によって雪崩が多数発生し、道路や建

物に被害をもたらした。その現状を把握するために、2011 年 3 月 12 ~ 14 日に雪崩発生状況調査、ならびに 19 ~ 21 日に広域調査、4 ~ 6 月にかけて融雪後の状況調査を実施した。

Podolskiy *et al.* (2010a) は、アメリカ、ロシア、日本、インドなど世界各国の地震によって発生した雪崩の記録から、地震のマグニチュードと雪崩の規模の関係などを解析している。日本国内では、地震によって発生した雪崩や積雪の亀裂について、東浦ら (1979)、小杉ら (2006)、小倉ら (2001) の調査例があるが、今回のように大雪時に発生した地震によって広域的に多くの雪崩が同時に誘発された報告例はない。

2. 地震による雪崩発生状況

地震発生直後の 3 月 12 ~ 14 日、長野県栄村、新

¹ 独立行政法人防災科学技術研究所

雪氷防災研究センター

〒940-0821 新潟県長岡市栖吉町前山 187-16

新潟県十日町市, 津南町を中心に調査を実施した(図1)。地震によって斜面では表層雪崩や全層雪崩, 土砂崩壊に伴った雪崩, ブロック状の積雪の崩壊が発生し, 平地でも積雪表面のクラックが多発した。雪崩の破断面や崩落したデブリは新鮮であり, 地震によって発生したことは明らかだった。今回観測された雪崩の自然発生と異なる点は以下のとおりである。

- ① 斜面では表層雪崩, 全層雪崩, 積雪のクラックが同時に多数発生(図2, 3)
- ② 雪崩の破断面は自然発生雪崩と異なり, 直線状ではなく, 階段状になるなど不規則な形状(図2, 3)

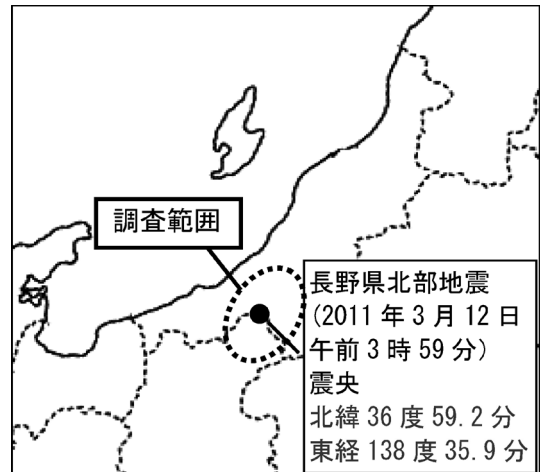


図1 地震による雪崩発生調査範囲。

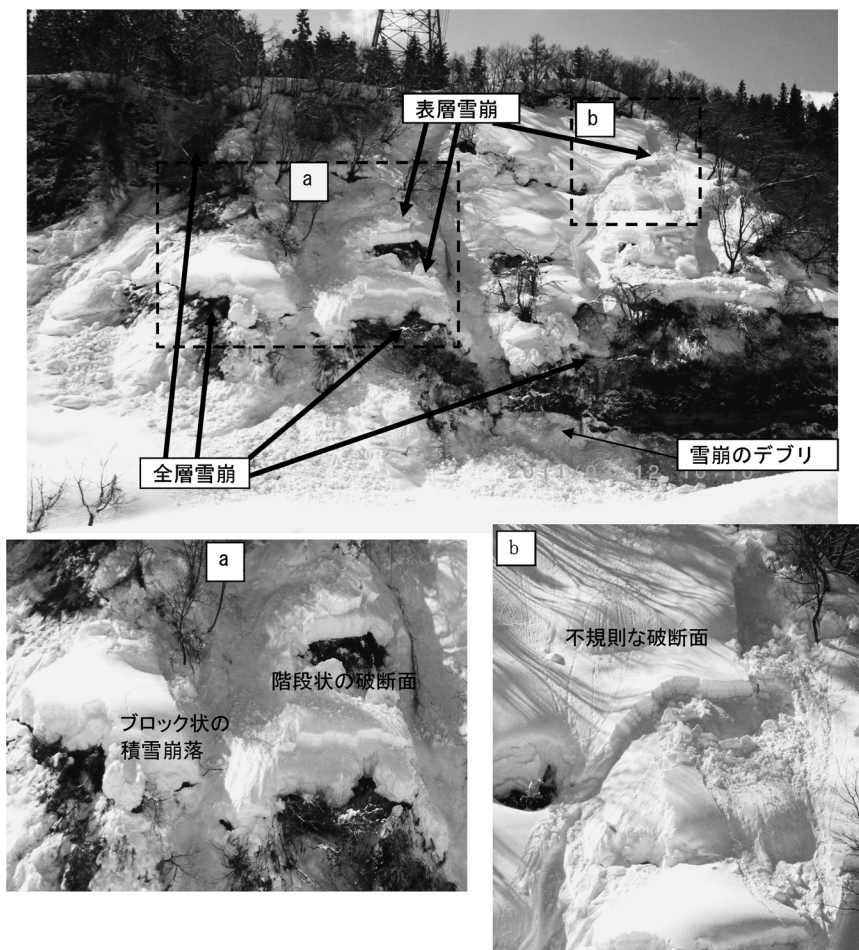


図2 地震による雪崩の典型的な発生状況(新潟県十日町市)。

上図: 全体 表層雪崩と全層雪崩が同時に多数発生 下左図: 上図(a)を拡大, 階段状の破断面, ブロック状の積雪崩落状況 下右図: 上図(b)を拡大, 表層雪崩の不規則な破断面。



図 3 地震によって同時に多発した表層雪崩（新潟県十日町市）.

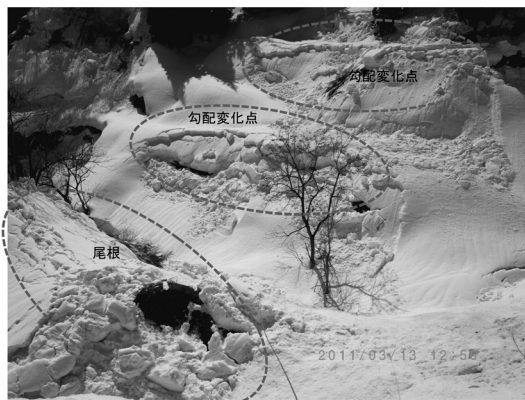


図 4 地震によるブロック状の積雪の崩落と雪崩発生（新潟県十日町市）.



図 5 地震によって発生した格子状のクラック（長野県栄村）.



図 6 道路脇からの小規模な表層雪崩（新潟県津南町）.

- ⑤ 長さ数 m の小規模の表層雪崩が道路脇の堆雪や法面でも発生（図 6）
 - ⑥ 土砂崩壊を伴って発生した雪崩は流動性が高く、長い距離を流下（図 7）
 - ⑦ 雪崩予防柵設置斜面からも雪崩が発生（図 8）
雪崩によって一部で建物が被災し（図 9）、道路も多くの箇所で一時的通行止めとなった。また、地震による雪崩によって河川が埋雪し、その上流側で水がダムアップしている状況も見られた（図 10）。
- また、地震発生後 1 週間後の 3 月 19～21 日でも雪崩の破断面やクラックが引き続き確認できた。クラックや不安定なブロック状の積雪が残っており、余震や気象変化などによって雪崩が発生する可能性もあった。
- 3. 地震によって積雪が影響を受けた範囲**
長野県栄村、新潟県津南町、十日町市を中心に幹線道路（国道、主要地方道）沿いの約 100 地点
- ③ 尾根部、勾配変化点で積雪がブロック状に破壊し崩落（図 4）
 - ④ 緩勾配、平坦部でも雪崩やクラックが発生（図 5）



図 7 地震による斜面崩壊と雪崩（新潟県十日町市）。流動性が高く流下距離が長い（流下距離約 800 m, 見通し角 18 度）。



図 8 雪崩予防柵の上部斜面から発生した雪崩が道路を埋没（新潟県十日町市）。



図 10 地震による雪崩によってダムアップした河川（新潟県十日町市：波海川）。



図 9 地震による雪崩によって被災した建物（新潟県十日町市）。

について地震の積雪・雪崩発生への影響を調査した。地震による積雪への影響が見られた範囲は、長野県栄村の全域、新潟県津南町の全域、十日町市の一部、上越市の一部、南魚沼市の一部である。また、自然では雪崩が発生しない条件（地形勾配 30 度以下）でも雪崩やブロック状の積雪の崩落が随所に発生したり、平坦部でも積雪にクラックが多数入っているような事例も多数あった。このような特に地震の影響が大きいと考えられる個所は、長野県栄村、新潟県津南町と十日町市松代、松之山地区の北東 - 南西方向に細長い範囲に分布していた（図 11）。この範囲内には震度 6 弱以上の震度を記録した観測点も位置している。なお、地盤や積雪の状況が地点によって異なるため、地

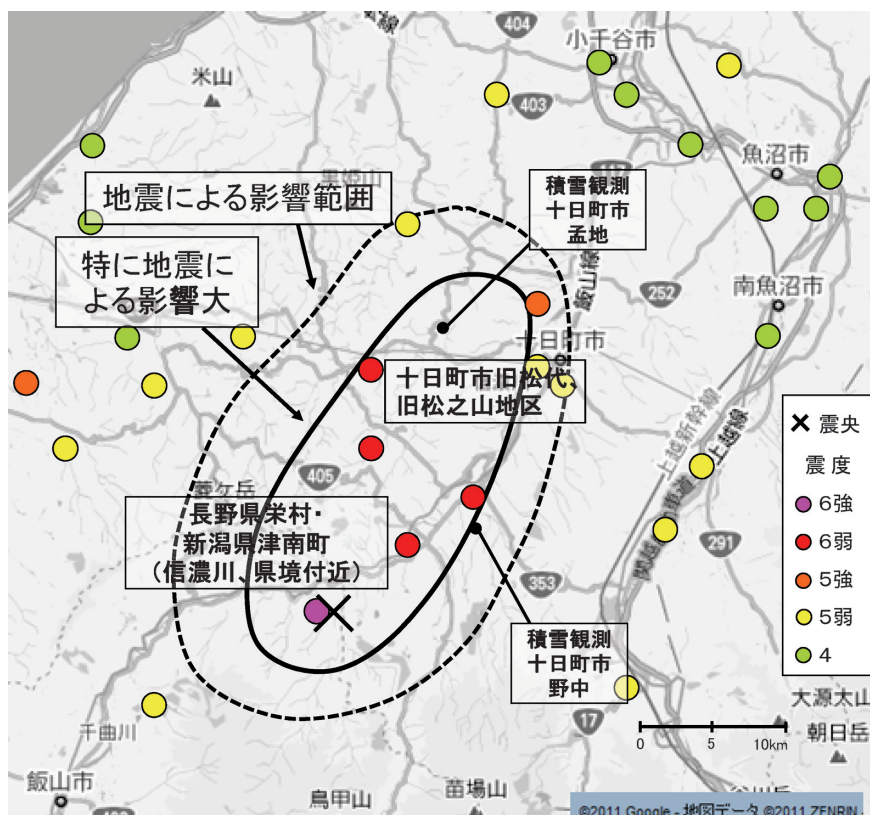


図 11 地震による雪崩発生への影響範囲と積雪観測位置。

震による積雪への影響も違っていたと考えられる。

4. 積雪調査と降積雪状況

3月12日、13日に地震によって表層雪崩が発生した新潟県十日町市孟地、新潟県十日町市野中の2か所（位置については図11）において積雪調査を行った。調査では、すべり層までの雪質、積雪の粒度、密度、含水率、硬度を測定した。また、シアフレーム（断面積 100 cm^2 ）を用いて斜面積雪の剪断抵抗力も測定した。

積雪深は $2.2 \sim 2.6 \text{ m}$ で、表層雪崩は表面から約 70 cm のぬれざらめ雪をすべり層とし、その上部の密度 $200 \sim 350 \text{ kg m}^{-3}$ の積雪が流下していることがわかった（図12、図13）。また、すべり層の剪断抵抗力は十日町市孟地で 1.58 kN m^{-2} 、十日町市野中で 0.78 kN m^{-2} であった。すべり層の下の雪質はざらめ雪であった。

2010-11年冬期は平成18年豪雪以来の豪雪で、

特に1月はこの地域でも大雪となり、気象庁アメダス津南観測点では1月31日に 338 cm を記録した。その後、2月の降雪量は少なかったが、3月初旬には降雪があり、地震発生時の3月12日の積雪深は、アメダス津南観測点で 227 cm 、津南町結東観測点で 212 cm （津南町、2011）、十日町市松代支所で 237 cm 、十日町市松之山支所で 303 cm （十日町市、2011）と、積雪に対する地震の影響が大きかった範囲では 2 m 以上となっていた。アメダス津南観測点の積雪・気象データでは、地震発生前に大量降雪や高温状態が続いている状況ではなく、表層雪崩、全層雪崩とも特に発生しやすい条件ではなかったと推定される（図14）。

5. 地震動の影響を考慮した積雪安定度と雪崩発生の可能性

地震によって発生する斜面積雪の不安定について小倉ら（2001）や松澤ら（2007）が指摘している。前者は、地震によって発生した全層雪崩につ

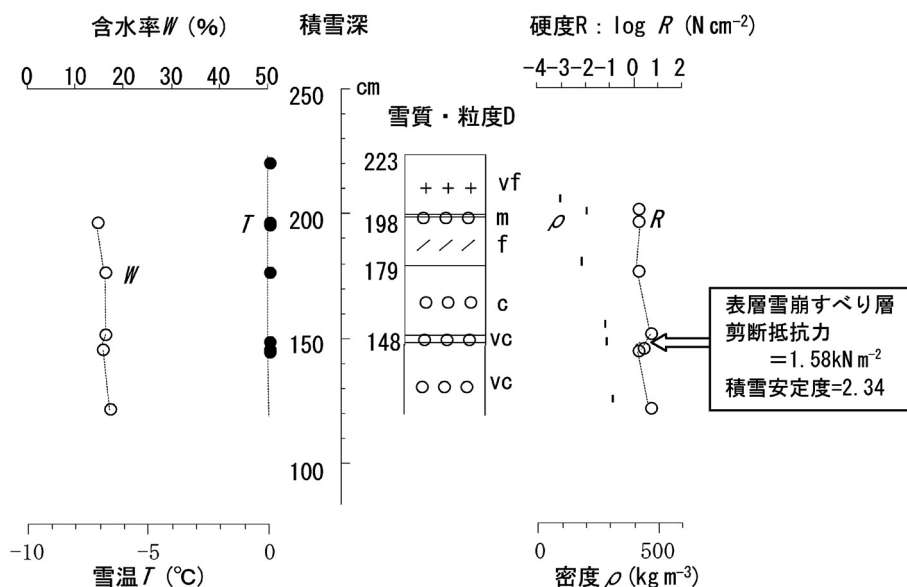


図 12 雪崩発生状況と積雪観測結果 (新潟県十日町市孟地 3 月 12 日)。

いて、積雪底面と地面の摩擦力と積雪の張力ならびに、重力の斜面方向成分と地震の水平加速度を加えたものを比較し、地震による発生の可能性を検討している。また、後者は積雪の凝集力と内部摩擦係数を考慮し、地震発生時の斜面積雪の安全率を評価している。

本研究では、地震を考慮した積雪の安定度を簡易に求めるため、地盤の安定解析の考え方を積雪に応用し、式(1)に示すように、積雪荷重の斜面分力と地震外力の斜面分力をプラスした駆動力（たとえば日本道路協会，2010）と、現地斜面上で測定したすべり層の剪断抵抗力（ SFI ）を用いて積

雪安定度（ SI ）を計算した。ここで積雪荷重（ W ）の単位面積当たりの鉛直荷重は $W \cos \theta$ （遠藤ら，2000）であるので、その斜面分力は $W \sin \theta \cos \theta$ となる。また、盛土や地すべりの安定計算では、地震外力は通常水平加速度のみを考慮し、水平震度係数（ k_h ）を用いて求める。水平震度係数（ k_h ）は、重力加速度（980 gal）に対する水平加速度の比で、これに鉛直荷重（ここでは $W \cos \theta$ ）を掛けたものが地震外力の水平力であり、その斜面分力は $W k_h \cos^2 \theta$ となる。

$$SI = SFI / (W \sin \theta \cos \theta + W k_h \cos^2 \theta) \quad (1)$$

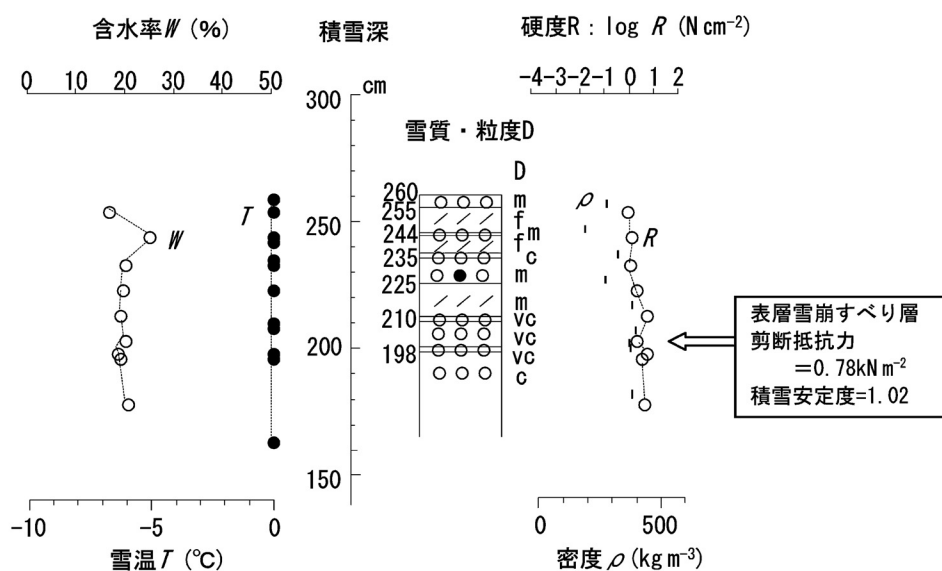


図 13 雪崩発生状況と積雪観測結果 (新潟県十日町市野中 3 月 13 日)。

SI : 積雪安定度

SFI : 剪断抵抗力 (kN m^{-2}) (斜面上の測定値)

W : 単位水平面積当たりの積雪の鉛直荷重 (kN m^{-2})

k_h : 水平震度係数 (=地震水平加速度 (gal) / 重力加速度 (980 gal))

θ : 斜面勾配 (度)

地震による水平加速度は、防災科学技術研究所 (2011) の強震度観測網の津南観測点における水平加速度の最大値 704 gal ($1 \text{ gal} = 10^{-2} \text{ m s}^{-2}$, 東西方向) を用いた。さらに、想定される余震に対する雪崩発生の可能性を検討するため、気象庁震度階級による震度に対応した加速度 (たとえば理

科年表, 1987) の平均値を水平加速度として計算した。

震度 4: 25–80 gal (平均 53 gal)

震度 5: 80–250 gal (平均 165 gal)

震度 6: 250–400 gal (平均 325 gal)

図 12 に示した十日町市松代孟地 (標高 200 m, 斜面の向き西, $SFI = 1.58 \text{ kN m}^{-2}$) とすべり層上 載荷重 ($W = 1.44 \text{ kN m}^{-2}$) から、斜面勾配 (θ) を変数として積雪安定度 (SI) を求めた。図 15 に地震無、津南強震観測点における最大水平加速度、震度階級 4~6 別の斜面勾配による積雪安定度 (SI) の変化を示した。現地の斜面勾配 (θ) は約 35 度であるので、地震無の場合、積雪安定度

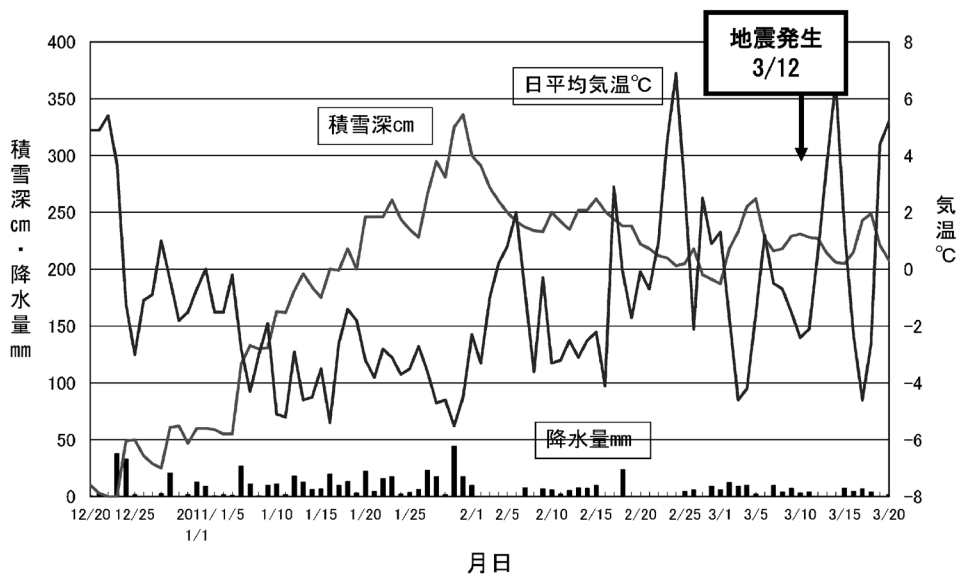


図 14 地震発生前後の津南アメダス観測点の積雪・気象状況。

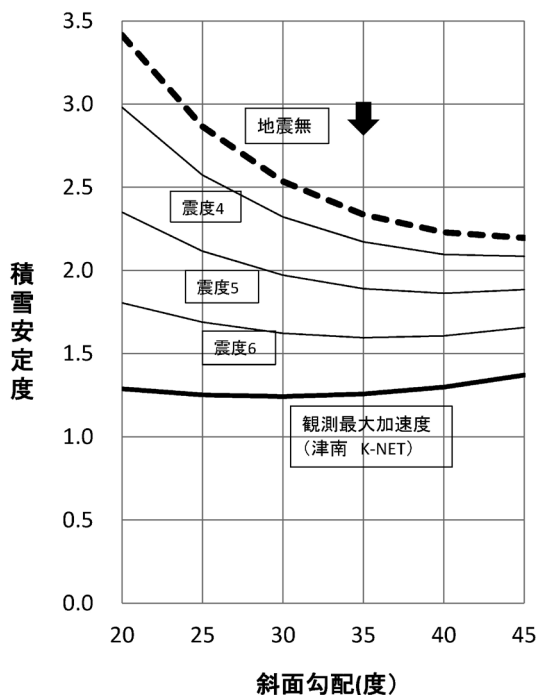


図 15 震度による積雪安定度の解析結果。
新潟県十日町孟地 3 月 12 日の観測データを使用。

(SI) は 2.34 となり、最大水平加速度を考慮した場合は積雪安定度 (SI) が 1.5 以下となった。積雪は比較的安定していたが、地震の強い揺れによっ



図 16 新潟県十日町市孟地で発生したブロック状の積雪の崩落。

て観測箇所（十日町市孟地）周辺で見られたようなブロック状の積雪の崩落現象（図 16）や雪崩が多数発生したものと考えられる。

同様に、図 13 に示した十日町市野中（標高 400m, 斜面の向き北東, 斜面勾配 $\theta=25$ 度）において、測定したすべり層の剪断抵抗力 ($SFI=0.78\text{ kN m}^{-2}$) とすべり層上載荷重 ($W=2.00\text{ kN m}^{-2}$) を用いて、斜面勾配別の積雪安定度 (SI) を求めた（図 17）。この場合、地震による震動が無くとも積雪安定度 (SI) は 1.02 と低く、震度 4 以上では積雪安定度 (SI) は 1.0 以下となった。周囲の斜面で大小の表

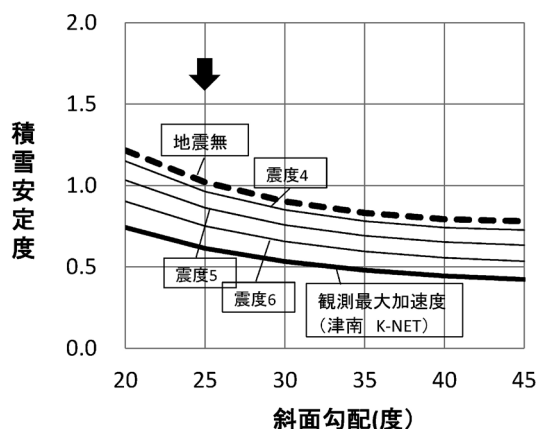


図 17 震度による積雪安定度の解析結果。
新潟県十日町市野中 3 月 13 日の観測データを使用。

層雪崩が多発していたのは(図2参照), この不安定な積雪状態が影響していたものと推定される。このような積雪安定度が低い積雪が分布している個所では, その後の余震活動による雪崩の再発も懸念された。

6. 積雪と地盤のクラックの発生状況

斜面勾配 30 度以下の通常雪崩が発生しにくい緩勾配斜面や平地でも地震による影響でクラックが発生した。クラックは, 表面付近, 積雪の途中(図 18 では約 50 cm), 積雪の底面(図 19), 積雪下の地面まで達しているものなどが見られた。新潟県十日町市天水越や長野県栄村小滝などでは, 融雪後に積雪のクラックの下部の地割れも確認され, 一部では水田等の耕作ができなくなった(図 20, 図 21)。クラックの発生には, 積雪や地盤条件, 振動の強さや方向などが関連しているものと考えられるが, さらに定量的な検討が必要である。

7. まとめと今後の課題

長野県北部地震発生直後の現地調査からは, 積雪 2 m 以上の大雪時に大きな地震が発生したことにより, 全層雪崩, 表層雪崩, 土砂崩壊を伴った雪崩が広域的に発生したことがわかった。表層雪崩はぬれざらめ雪をすべり層としており, 積雪安定度計算からも地震動が加わることで発生し得ることが示された。全層雪崩やブロック状の積



図 18 積雪底面まで到達していないクラック (新潟県十日町市)。表面から約 0.5 m まで亀裂があった(積雪深 2.2 m)。



図 19 道路脇の堆雪に入ったクラック。積雪底面まで到達しているが, 地面にはクラックは見られなかった(新潟県十日町市)。



図 20 水田上の積雪と地面のクラック (新潟県十日町市天水越)。



図 21 地割れのため耕作不能になった水田 (長野県栄村小滝).

雪の崩落, 積雪のクラックの発生にも, 地形や積雪の構造が影響しているものと考えられる. 今後の積雪期の複合災害対策を検討する上でも, 現地の状況をさらに詳しく調査する必要がある. 地震の水平震動が積雪や地盤に与える影響に関しては, 阿部, 中村 (2005) や Podolskiy *et al.* (2010b), 千葉ら (2007) が実験を行い, 積雪の破壊現象を捉えている. 今回の長野県北部地震は直下型で, 津南強度観測点においては垂直方向で最大 316 (gal) を記録しており (防災科学技術研究所, 2011), 今後, 垂直成分も加えた震動が積雪に与える影響を震動実験などにより定量的に検討する必要がある. また, 津南町辰之口などで発生した斜面崩壊に伴う雪崩は, 土砂と雪が同時に流れることによって, 流下距離も長くなって道路に被害を与えた. このような現象についてもそのメカニズムが未解明であるため, さらに詳細な研究が必要である.

謝 辞

現地調査に当たっては新潟県道路管理課ならびに町田建設株式会社から雪崩発生に関しての情報提供を頂いた. また, 積雪安定度の計算については防災科学技術研究所雪氷防災研究センター阿部修博士, プロテックエンジニアリング株式会社西田陽一氏にアドバイスを頂いた. ここに記して感謝いたします.

文 献

- 阿部 修・中村 勉, 2005: 水平振動方式による積雪の剪断破壊強度について. 日本雪工学会誌, **21**, 11-12.
- 防災科学技術研究所, 2011: 2011 年 3 月 12 日 長野県・新潟県県境付近の地震による強振動. http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/html/20110312040021/main_20110312040021.html.
- 千葉隆弘・苫米地司・高橋 徹・植松武是, 2007: 木造住宅における地震時の屋根雪滑動と構造体との動的相互作用に関する基礎的実験. 日本雪工学会誌, **23**, 336-342.
- 遠藤八十一, 2000: 積雪の安定度評価. 基礎雪氷学講座Ⅲ, 雪崩と吹雪, 古今書院, 48-50.
- 東浦将夫・中村 勉・中村秀臣・阿部 修, 1979: 地震によって発生した雪崩. 国立防災科学技術センター研究報告, **21**, 103-112.
- 気象庁, 2011: 平成 23 年 3 月 12 日 03 時 59 分頃の長野県北部の地震について. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/12c/kaisetu201103120500.pdf>.
- 小杉健二・根本征樹・阿部 修・佐藤 威・功刀 卓, 2006: 山形県西川町で発見された不思議な積雪の亀裂について. 東北の雪と生活, **21**, 19-20.
- 松澤 勝・加治屋安彦・伊東靖彦, 2007: 地震発生時の斜面積雪の安定率評価に関する一考察. 北海道の雪氷, **26**, 95-98.
- 新潟県, 2006: 「平成 18 年豪雪」による被害と対応状況. http://mobile.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/462/958/18gousetu_panfu.0.pdf.
- 日本道路協会, 2010: 地震動の作用に対する盛土の安定性の照査. 道路土工・盛土工指針 (平成 22 年度版), 119-127.
- 小倉康子・和泉 薫・宮崎伸夫・小林俊一, 2001: 2001 年 1 月 4 日新潟県中里村で発生した地震による雪崩. 新潟大災害研年, **23**, 9-15.
- Podolskiy, E.A., K. Nishimura, O. Abe and P.A. Chernous, 2010a: Earthquake-induced snow avalanches: I. Historical case studies. *Journal of Glaciology*, **56** (197), 431-446.
- Podolskiy, E.A., K. Nishimura, O. Abe and P.A. Chernous, 2010b: Earthquake-induced snow avalanches: II. Experimental study. *Journal of Glaciology*, **56** (197), 447-458.
- 十日町市, 2011: 平成 22 年度. 降積雪情報 3 月 12 日. <http://www.city.tokamachi.niigata.jp/page/000013019.pdf>.
- 東京天文台編, 1987: 理科年表, 地震関係諸表, 震度階. 786-787.
- 津南町, 2011: 降り始めからの気温・積雪・降雪. http://www.town.tsunan.niigata.jp/pcp_portal/

PortalServlet; jsessionid=62A5DF3614D25402C7A
3D591854B3E45?DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_

DISPLAY_ID=U000004&CONTENTS_ID=1594.

Avalanches induced by North Nagano Prefecture earthquake on 12 March 2011

Isao KAMIISI¹, Hiroki MOTOYOSHI¹, Masaaki ISHIZAKA¹ and Takeshi SATO¹

1 Snow and Ice Research Center,

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

Abstract: The North Nagano prefecture Earthquake (M_g6.7) on 12 March 2011 induced surface-snow avalanches, full-depth avalanches, collapse of the block-like snowpack and cracks on the surface of the snowpack over wide areas, where the seismic intensity was 6 or more. Especially, within the area, failure surfaces of the snow avalanche were stepped and irregular. The avalanches filled roads at many locations, some of which occurred at slopes even though avalanche supporting structures had been deployed. Earthquake-induced avalanches of snow mixed with rock and sand flew long distances due to high fluidity. According to the snowpack and weather conditions, the likelihood of avalanche at the time of the earthquake was estimated to be low. We calculated the stability index of the snowpack by using an equation that incorporates the earthquake acceleration. The result shows that the index of the sliding surface for a surface-snow avalanche, consisting of wet melt forms snow, was estimated to be 1.5 or less which supports the possibility of earthquake-induced avalanche. Further research is needed to understand the snowpack collapse mechanism caused by an earthquake.

(2011 年 12 月 15 日受付, 2012 年 1 月 24 日改稿受付, 2012 年 1 月 24 日受理,
討論期限 2012 年 9 月 15 日)