

総説 (Review article)

平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震による土砂災害の概要とその特徴

三森 利昭^{1)*}、多田 泰之²⁾、村上 亘²⁾、大丸 裕武²⁾、安田 幸生³⁾、野口 正二³⁾

Characteristics of sediment disasters by The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008

Toshiaki SAMMORI¹⁾, Yasuyuki TADA²⁾, Hiromu DAIMARU²⁾
Wataru MURAKAMI²⁾, Yukio YASUDA²⁾ and Shoji NOGUCHI³⁾

Abstract

The Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, which occurred at 8:43 JST, 14, May, 2008 inland of Tohoku region, caused a lot of landslides on mountain hill slopes near the epicenter. We analyzed the influences of geology, topography etc. on occurrence of landslides with Geographical Information System (GIS) in this report. We extracted and plotted the landslides with aerial photographs and satellite visible light images of ALOS which are taken after the earthquake. The numbers and area of landslides were 10,751 and 13,576 square kilometers, respectively. We obtain conclusions as follows; 1. Most of landslides occurred on hanging walls within fifteen kilometers from the seismogenic reverse fault; 2. fragile strata of volcanic deposits strongly affected the landslide occurrence; 3. The landslides occurred near the geological boundaries; 4. A cap rock type of landslides, with strata combination of welded tuff in upper and lacustrine deposit in lower, is conspicuous on steep rim slopes of calderas in southern foot of Mt. Kurikoma; 5. A lateral spread is the main cause of large landslides on gentle slopes.

Key words : 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, sediment disaster, volcanic area, geological boundary, cap rock type of landslide, caldera, geographical information system

要旨

2008年6月14日午前8:43、岩手県内陸南部を震源に発生した2008年岩手・宮城内陸地震(マグニチュード7.2)は、震源付近の山地斜面に多くの崩壊を生じさせた。この地震により発生した崩壊の特徴を明らかにするため、GISを用いて地質、地形などの影響を分析した。地震後に撮影された航空写真とALOSの可視光画像を用いて、10,751箇所、13,576 km²の崩壊地を目視によって抽出し、GIS上に記載した。これらの崩壊地と地震、地質、地形、植生との関係を明らかにした。この結果、①崩壊は逆断層である震源断層の上盤側で断層からほぼ15 kmの範囲内で発生している、②火山地帯特有の地質が崩壊の発生と深い関係がある、③地質境界付近に発生する崩壊が多い、④上層が堅固な溶結凝灰岩で下層が軟弱な湖成堆積岩とするキャップロックタイプの崩壊が栗駒山南麓のカルデラ付近で多発している、⑤大規模な崩壊地の発生原因は側方流動(スプレッド)の可能性が高い、等の結論が得られた。

キーワード : 2008年岩手・宮城内陸地震、土砂災害、火山地帯、地質境界、キャップロック、カルデラ、GIS

1. はじめに

2008年6月14日午前8:43に、岩手県南部の内陸部(北緯39度01.7分、東経140度52.8分)を震源とする地震(マグニチュード7.2)が発生し、死者17名、行方不明6名(内閣府2011)という大きな被害が生じた(Fig. 1 位置図参照)。この地震による被害は岩手・宮城・秋田・山形・福島の5県にまたがっていた。被害の特徴は、建物への被害が少なく、山地での崩壊とそれに伴う土石流による被害が主であった。このうち

土砂による災害では、荒砥沢に発生した大規模な地すべりや、震源から離れた一迫川上流域で規模の大きな崩壊が多数発生するなど、特徴的な現象が数多く見られた。

地震直後の被害実態については、地震・防災に関する各省庁所管の研究所、災害関連の各学術団体から多くの報告がなされている。この中で、本稿が対象としている土砂災害の報告に限れば、各省庁所管の研究所では3研究機関(うち2機関は合同調査を実施)か

原稿受付:平成23年11月28日 Received 28 November 2011 原稿受理:平成24年7月3日 Accepted 3 July 2012

1) 森林総合研究所企画部 Research Planning and Coordination Department, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所水土保全研究領域 Department of Soil and Water Conservation, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

3) 森林総合研究所東北支所 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所企画部 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Research Planning and Coordination Department, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: sammori@ffpri.affrc.go.jp

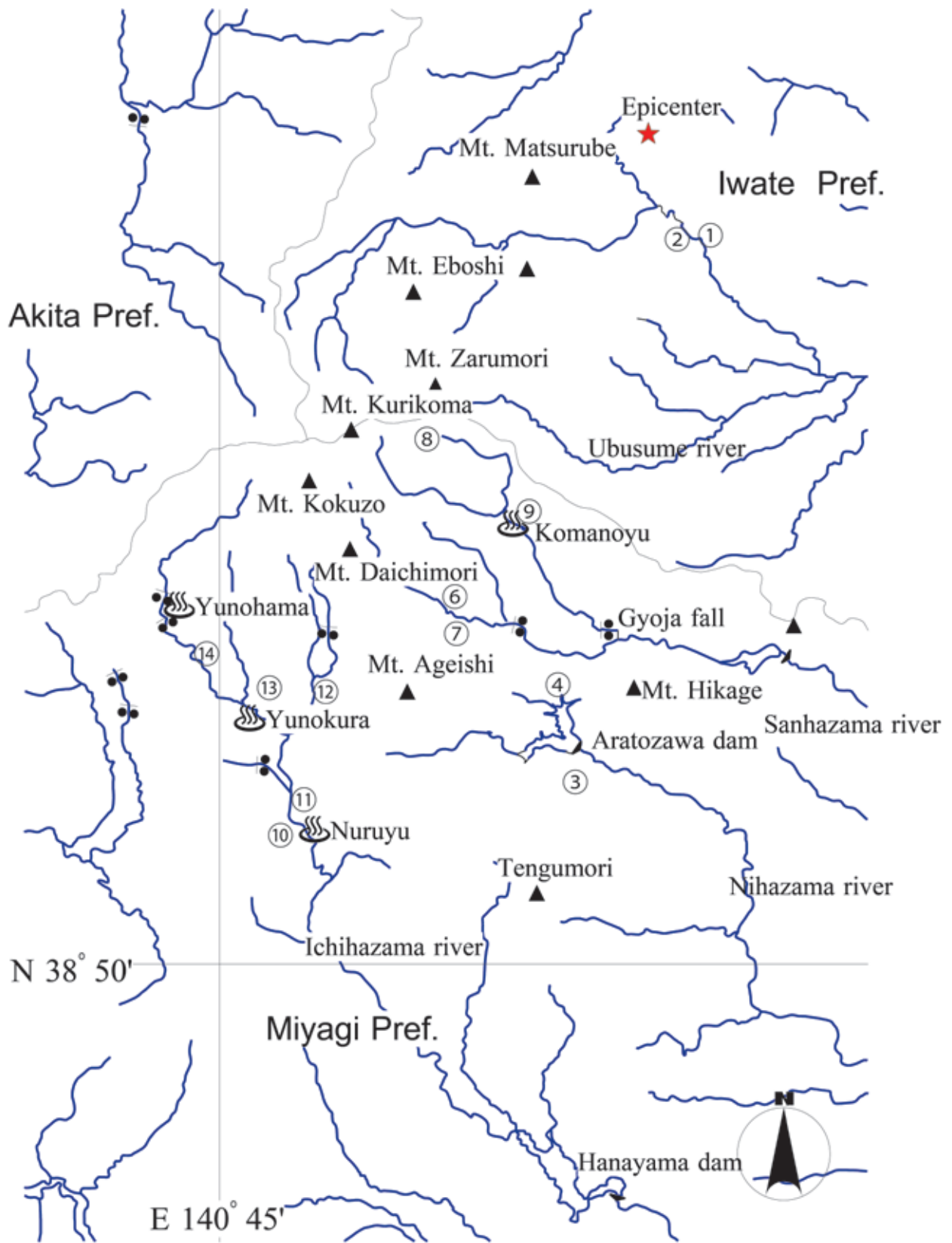


Fig. 1. 位置図。図中の①～⑭は写真の番号に対応する。
 Site map. The numbers from 1 to 14 on the map correspond to the numbers of photographs.

ら報告がされている。このうち国土交通省傘下の国土技術政策総合研究所・土木研究所による調査報告(2008)では、国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センターならびに土木研究所土砂管理研究グループにより、災害直後の空中あるいは地上の踏査による土砂災害の実態が報告されている。特に、河道付近の大規模崩壊により生じた土砂ダムの危険度評価を含めた報告がなされている。防災科学技術研究所では、井口ら(2010)により規模の大きな地すべりを対象に空中写真による判読を行って図化し、既報の地すべり地形分布図(防災科学技術センター 1982)との比較や従来の地震による地すべりとの比較を報告している。各学会による現地調査では、砂防学会が独自の調査団(井良沢ら 2008)を派遣したほか、土木学会・地盤工学会・日本地震工学会・日本地すべり学会の4学会は合同緊急調査団を派遣し、緊急報告(例えば、土木学会 2008)を行っている。また、これらの学会等による報告を、地盤工学会調査委員会が総括し、2010年6月に、「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震災害調査報告書」をまとめている。その内容は、地震動についての報告・解析が主体であるが、土砂災害については、荒砥沢地すべりを主に、流域ごとに崩壊・地すべりの概況について報告している。このほか被災地域近傍の大学の研究者による調査報告(例えば、松垣ら 2009)がなされている。

この一方で、山間部の道路・河道等の被害が甚大であったことから、現地踏査が不可欠な土砂災害調査において現地へのアクセスが長期にわたり制約されたことに加えて、被災地域の住民感情への配慮と、窃盗被害の防止などの保安面を重視する地元自治体の姿勢から、地元住民、市町村、県や国の出先機関以外の人員による被災地域への立ち入りを長期間にわたり厳しく制限した結果、災害直後以降の報告はごく限られている。これは、地震そのものに関する報告の多様さと対照的である。緊急調査以降の報告は、山地における地すべり・崩壊災害の対策工事実施の主体となった東北森林管理局・自治体とその調査事業を担ったコンサルタント(例えば、大野ら 2010, 黒川ら 2010)によるものが主である。これらを除くと、現地調査が不要である衛星を用いた崩壊地抽出に関する報告(石出ら 2010, 翠川ら 2010)等、ごく限られたものとなっている。

森林総合研究所は、東北森林管理局の協力もあって地震直後から継続的な現地調査が可能であったことから、交付金によるプロジェクト研究として採択し、本災害についての調査を2008、2009年の2年間にわたり行ってきた。本稿では、まず、平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震による崩壊・地すべりを主とする土砂災害の概要を述べる。次に、独自に空中写真・衛星画像から崩壊地の図化を行い、これを元に崩壊発生

とその関係要因との関連を明らかにする。

今回の地震は、東北内陸部火山地帯でこれまで危険性が指摘されなかった、断層活動に起因するものである。潜在的な活断層と火山堆積物を主とする地質の組み合わせは、東北地方をはじめ国内に多く存在する。このような地質条件下では、同様の災害が発生する可能性があることから、本災害を集約して分析し、その特徴を記録することは、意義のあることと考える。

なお、本稿では、崩壊、地すべり性崩壊等々の土砂災害について述べるが、これらの土砂災害の英名はlandslideで同一である。今回の土砂災害は、ほとんどが急速な運動を呈しており、崩壊、及び、地すべり性崩壊に分類されるため、本稿では、固有名詞として地すべり・土石流を付している箇所を除き、「崩壊」とする。更に、土壌層下面付近にすべり面のある規模の小さな崩壊を「小規模崩壊」、基岩中にすべり面のある比較的規模の大きな崩壊を「大規模崩壊」とする。

本研究は「岩手・宮城内陸地震によって発生した土砂災害の特徴と発生機構に関する研究(独立行政法人森林総合研究所運営費交付金プロジェクト、課題番号:200810、課題代表者:三森利昭)」によって行った。

2. 本地震災害の概要

1. 震源域周辺における既往の地震災害

東北地方では、日本海溝付近で巨大地震が幾度か発生し、津波や家屋の倒壊により激甚な災害をもたらしている。2011年3月11日に発生した東日本地震はこの端的な例である。これは、太平洋プレートがユーラシアプレートへの沈み込みに伴う海溝型の巨大地震であり、地震の規模やメカニズムが本稿で取り上げる2008年岩手・宮城内陸地震と大きく異なる。このような海溝型巨大地震の他に、東北地方の内陸部においては、これまでもたびたび直下型の地震が発生し、被害を与えている。東北脊梁山地近傍で発生した主な地震をTable 1に集約する。2008年岩手・宮城内陸地震は、このような直下型の地震である。

東北地方の秋田県・岩手県・宮城県にまたがる脊梁山地付近を震源域とし、マグニチュード7.0を超える地震には、1896年8月31日に発生した秋田・岩手県境真昼山付近(北緯39.5度、東経140.7度)を震源とする陸羽地震(マグニチュード7.2)がある。この陸羽地震は、2008年岩手・宮城内陸地震とほぼ同規模の地震である。陸羽地震では、死者209名、負傷者779名、住家全壊5,792戸、半壊3,045戸、一部損壊27,430戸と、今回の地震を遙かに上回る被害を生じている(水田・鏡味 2008, 2009)。陸羽地震については、山地崩壊の箇所数についての調査記録があり、これによれば9,899箇所も発生している(宇佐美 2003)。陸羽地震は19世紀末の災害であることから、これらの調査記録は、当然のこととして、航空写真の実用化以前の調査方法

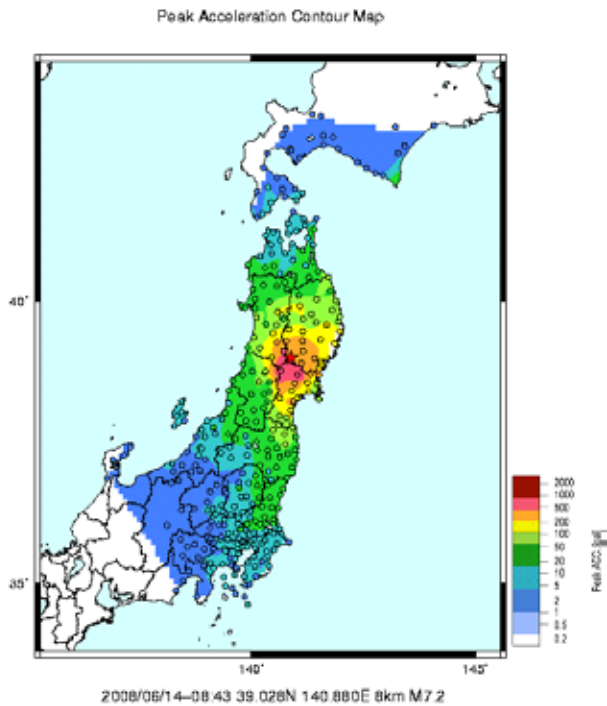


Fig. 2. 2008 岩手・宮城内陸地震における最大加速度分布。独立行政法人防災科学技術研究所強震ネットワーク (K-NET) から転載。
Maximum accelerations of 2008 Iwate Miyagi nairiku earthquake. The map is reprinted from Kyoshin Network (K-NET) of National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention.

による記録であり、おそらく現地踏査により丹念に調査した結果と思われる。これにより約1万カ所近い膨大な数の崩壊が記録されているという事実は、驚くべきことである。明治という時代の技術者の意気込みが表れており、現代においても特筆すべきことと考える。

陸羽地震以外では、1962年4月30日宮城県登米郡(現:登米市)迫町付近(北緯38度44.4分、東経141度8.3分)を震源とする、宮城県北部地震(マグニチュード6.5)があり、死者3名、倒壊家屋369戸の被害を出した。このほか、1996年8月11日秋田県内陸南部(北緯38度54.5分、東経140度38.2分、深さ7km)を震源とする秋田県内陸南部地震(マグニチュード5.9)の地震が発生し、負傷者16名、住家半壊28戸、一部損壊185戸の被害を出している(宇佐美2003)。また、2003年7月26日には宮城県北部(北緯38度24.1分、東経141度10.4分、震源の深さ12km)を震源とするマグニチュード6.5の地震が発生した。この地震では、前震(マグニチュード5.6)、余震(マグニチュード5.5)も同日に発生しており(前震0:13、余震16:56)、3回の地震を合わせて、負傷者675名、住家全壊1,276戸、半壊3,809戸、一部損壊10,975戸もの被害を生じている(仙台管区気象台2003)。秋田県、岩手県、宮城県にかけての脊梁山地付近では、以上の



Photo 1. 市野々原地区地すべりの捷水路の河道掘削面に現れた古い断層。
An old fault observed on the bank of cut-off channel at the foot of Ichinohara landslide.

ように、たびたび直下型地震に見舞われており、その被害も大きい。

2. 2008年岩手・宮城内陸地震の概要

気象庁(2008)発表による各市町村の最大震度をTable 2に、また、防災科学技術研究所(2008)による最大加速度分布をFig. 2に、それぞれ示す。これらによれば、岩手、宮城、秋田の三県にまたがる広い地域で、震度5強より強い揺れが観測されている。震源の深さは約8km、規模はマグニチュード7.2の比較的浅い断層タイプの地震で、防災科学技術研究所(2008)による解析では、「西北西-東南東方向に圧縮軸を持つ逆断層型の震源メカニズム」によるとしている。この地震を発生させた断層は、奥羽山脈の東麓を北北東から南南西に走る未確認の断層とされ、断層の西側がせり上がる逆断層(衝上断層)である。このため上盤側の山間部で揺れと変異が大きく、崩壊の多発をもたらした。この地震をもたらした断層(7km-細倉構造帯北部の未記載の活断層(佐藤ら2008))の地表トレースは不明のままであるが、震源付近には古い断層跡(Photo 1)も見られ、古くからの活動がうかがわれる。

Table 1. 東北脊梁山地区近傍で発生した主な地震とその被害
Earthquakes in Tohoku mountain region.

年 / 月 / 日 year/date	地震名 Earthquake	震源位置 Epicenter			地震強度 Magnitude	人的被害 Human loss		家屋被害 Damaged house			山地崩壊 Landslide
		北緯 Latitude	東経 Longitude	地名 Place		死者 Dead	負傷者 Injured	全壊 Complete	半壊 Half	一部 Partial	
1896/8/31	陸羽地震 ¹⁾ Rikuu ¹⁾	39.5°	140.7°	秋田・岩手県境真昼山付近 Mt. Mahiru	7.2	209	779	5,792	3,045	27,430	9,899
1962/4/30	宮城県北部地震 ¹⁾ Miyagi ken hokubu ¹⁾	38° 44.4'	141° 8.3'	宮城県登米市迫町付近 Tome city	6.5	3		369			
1996/8/11	秋田県内陸南部地震 ¹⁾ Akita ken nairiku nanbu ¹⁾	38° 54.5'	140° 38.2'	秋田県湯沢市虎毛山付近 Mt. Torageyama	5.9		16		28	185	
2003/7/26	宮城県北部地震 ²⁾ Miyagi ken hokubu ²⁾	38° 24.1'	141° 10.4'	宮城県東松島市鳴瀬町付近 Matsushima city	6.5		675	1,276	3,809	10,975	
2008/6/14	岩手・宮城内陸地震 ³⁾ Iwate-Miyagi nairiku ³⁾	39° 01.7'	140° 52.8'	岩手県奥州市祭時山付近 Mt. Matsurube	7.2	23	426	30	146	2,521	

1): 宇佐美 (2003), 2): 仙台管区気象台 (2003), 3): 内閣府 (2011)

1): Usami (2003), 2): Sendai District Meteorology Observatory (2003), 3): Cabinet office, Government of Japan (2011)

Table 2. 各市町村の最大震度 (震度5強以上)
Maximum seismic intensity (More than 5-plus)

最大震度 Max. intensity	県 Prefecture	市町村 Municipalities
震度6強 6-plus	岩手県 Iwate	奥州市 Oshu
	宮城県 Miyagi	栗原市 Kurihara
震度6弱 6-minus	宮城県 Miyagi	大崎市 Osaki
震度5強 5-plus	岩手県 Iwate	北上市、一関市、金ヶ崎町、平泉町 Kitakami, Ichinoseki, Kanegasaki, Horaizumi
	宮城県 Miyagi	加美町、涌谷町、登米市、美里町、名取市、仙台市、利府町 Kami, Wakuya, Tome, Misato, Natori, Sendai, Rifu
	秋田県 Akita	湯沢市、東成瀬村 Yuzawa, Higashinaruse

気象庁 (2008)

Japan Meteorological Agency (2008)

3. 被害の概要

今回の地震による被害を Table 3 に示す。本災害での死者・行方不明者の合計は 23 名であったが、そのうち、21 名が土砂災害による。山地荒廃については、東北森林管理局 (2008) が Table 4 に示すように流域ごとに集約を行っている。著者らの崩壊地判別は地震前後の航空写真の差に基づいており、微少な裸地もなるべく含めて記録したため、Table 4 とは異なることに留意されたい。Table 4 によれば、磐井川流域、一迫川流域、二迫川流域、三迫川流域で 3 % を超える荒廃面積率であった。特に、産女川上流 (磐井川流域)、一迫川上流域、三迫川本流 (御沢・冷沢・耕英地区) の 3 流域では、5 % を超える荒廃率を示し、被害がこの 3 流域で特に大きかったことを示している。本項では、北から、産女川上流域、二迫川・三迫川流域、一迫川流域に区分し、各区域での土砂災害について記す。

1) 産女川上流域 (磐井川流域)

震源に近い産女川上流 (磐井川流域) では、市野々原地区で大規模な地すべりが発生し、崩土が河道を閉塞したほか (Photo 2)、国道 342 号線に架かる祭時 (まつるべ) 大橋が落橋し同国道が不通となるなどの被害が発生した。この付近には新生代第三紀の細倉層に区分される安山岩・凝灰岩が分布し、宮城県側の一迫川・二迫川・三迫川流域に分布する堆積岩よりも地質年代が古い。航空写真による判読では、栗駒山南部と比べると、崩壊は小規模で数も少ないように判断さ

れた。しかし、付近の現地踏査 (村上ら 2009, 2010) によれば、地盤の移動量が少なく崩壊が途中で停止している箇所、尾根付近や山体に亀裂が見られる斜面も多く見いだされ、崩壊等の被害には至らなかったが、かなりの箇所で山体が地震により破壊されていると考えてよい。本流域では、これらのうち特に被害の大きかった市野々原地区の地すべりを取り上げる。



Photo 2. 市野々原地すべり (朝日航洋 (株) 撮影)。右側の最大のブロックが閉塞を発生させた。Ichinonohara landslide. The right block of the landslide dam up the river. The photo was taken by Aero Asahi Corporation.

Table 3. 人的・家屋被害の状況
Numbers of casualties and damaged houses.

都道府県 Prefecture	人的被害 (人) Casualties (number)				住家被害 (棟) Damaged houses (number)			
	死者 Fatalities	行方不明 Missing	負傷者 Injured		全壊 Complete	半壊 Half	一部 Partial	火災 Fire
			重傷 Serious	軽傷 Slightly				
岩手県 Iwate	2		9	28	2	4	778	2
宮城県 Miyagi	14	4	54	311	28	141	1,733	1
秋田県 Akita		2	5	16		1	9	1
山形県 Yamagata			1	1			1	
福島県 Hukushima	1		1					
計 Total	17	6	70	356	30	146	2,521	4

内閣府 (2011)
Cabinet office, Government of Japan (2011)

Table 4. 山地荒廃の概要
Devastation in mountainous region.

流域区分 Catchment and landslide classification	流域面積 (ha) Catchment area	山腹荒廃状況 Hillside devastation		溪流荒廃状況 Stream devastation		荒廃現況計 Total devastation		
		崩壊個数 Landslide	崩壊面積 (ha) Landslide Area	面積率 (%) Percentage	荒廃面積 (ha) Devastated Area	面積率 (%) Percentage	面積計 (ha) Total Area	面積率 (%) Area rate
一迫川上流域 (一迫川・伊豆根沢合流点より上流) Upstream of Ichihazama river	6,156	751	288.1	4.7	63.4	1.0	351.5	5.7
二迫川上流域 (荒砥沢ダムより上流) Upstream of Nihazama river	1,984	111	59.2	3.0	15.6	0.8	74.8	3.8
三迫川上流域 (放森より上流) Upstream of Sanhazama river	2,295	137	71.0	3.1	38.0	1.7	109.0	4.7
三迫川本流 (御沢・冷沢・耕英) Main stream of Sanhazama river	1,929	62	67.8	3.5	31.9	1.7	99.7	5.2
産女川上流 (磐井川) Upstream of Ubusume river	995	36	33.1	3.5	18.7	2.0	51.8	5.4
磐井川上流域 (磐井川・鬼越川合流点より上流) Upstream of Iwai stream	5,971	644	177.2	3.0	19.1	0.3	196.3	3.3
前川流域 (胆沢川) Mae river	5,512	410	77.9	1.4	10.5	0.2	88.4	1.6
尿前沢流域 (胆沢川) Shitomae river	3,274	167	61.4	1.9	10.4	0.3	71.8	2.2
流域計 Total of catchments		2,318	835.7	3.0	208.0	0.7	1,043.3	3.7
荒砥沢地すべり Aratozawa landslide	—	1	98.0	—	—	—	—	—
市野々原地すべり Ichinohara Landslide	—	3	13.0	—	—	—	—	—
総計 Total	—	2,322	947.7	—	—	—	—	—

東北森林管理局 (2008) 岩手・宮城内陸地震に係る山地災害対策検討会報告書より転載
Reprinted from 'Tohoku regional forest office (2008) Disaster report of Iwate-Miyagi Nairiku earthquake.'

(1) 市野々原 (地すべり)

震源に近い磐井川流域のうち市野々原地区では、大規模な地すべりが発生し河道を閉塞した (東北森林管理局 2008)。この地すべりによる移動土砂量は 384 万 m^3 に達し、このうち、河道を閉塞した部分の土砂量は 131 万 m^3 に上る。閉塞土砂の後背では、崩落の直後から湛水をはじめ、その後越流・決壊が危惧されたため、国土交通省により河道開削が実施された。本地すべりは河道沿いに並ぶ 3 つのブロックから成る。このうち最も河道上流に位置するブロックが大きく、これが主に河道を閉塞した。市野々原地区と同様に崩落土砂による河道閉塞は、岩手県・宮城県各流域で発生しており、計 15 箇所の河道閉塞が報告されている (東北森林管理局 2008)。中越地震時においても同様に河道閉塞が多発したことや、2008 年四川省で発生した汶川地震において河道閉塞が生じた例なども含め、過去の地震災害例も考慮すると、山間地での地震においては、崩壊土砂による河道閉塞を必然の現象としてとらえる必要がある。越流あるいは浸透性破壊による土砂ダムの決壊という二次的な災害を防止するため、迅速な対応が必要である。

2) 二迫川・三迫川流域

二迫川流域では、荒砥沢上流の支流であるヒアシクラ沢において大規模な地すべりが発生し荒砥沢のダム湖に一部の土砂が流入するなど、同流域では多くの崩壊・地すべりが発生した。また、同流域の北に位置する三迫川流域においても、耕英地区の冷沢・御沢、下流の行者の滝付近でも大規模な崩壊・地すべりが発生するとともに、同上流ドゾウ沢で土石流が発生して駒の湯温泉を直撃し大きな被害となった。ここでは代表的な土砂災害として、荒砥沢地すべり、耕英地区冷沢の崩壊、ドゾウ沢土石流を取り上げる。

(1) 荒砥沢地すべり

荒砥沢ダム湖の左岸上流部ヒアシクラ沢において、幅:900 m、長さ:1300 m、深さ:120 m、最大移動距離:300 m、面積:98 ha、すべり面傾斜:ほぼ水平 (1~2 度、冠頭部付近では僅かに逆勾配)、の大規模地すべりが発生した (Photo 3)。滑落崖の高さは 150 m にも及び、広大な荒廃地が出現した。地すべり本体は、対岸の尾根にあたり停止しており、幸いにもダム湖への大規模な突入は起こらなかった。この地すべりは、発生時に目撃者がおり、その話によれば、地震から 20 分ほどかけてゆっくりと、手前から徐々に斜面奥に向かって流動化したという証言が得られている。

荒砥沢地すべりは、本地震で発生した地すべりの中では最も規模が大きく、社会の関心も高いことから、すでに多くの報告例がある。たとえば日本地すべり学会では、2010 年に特集として「大規模地すべりの機構」



Photo 3. 荒砥沢地すべりと荒砥沢ダム。崩土のすべり方向は対岸の尾根に向かっている。これにより、ダム湖への突入・越流という最悪の事態は避けられた。
Aratozawa landslide and Aratozawa dam. A worst situation of debris thrust into the dam lake was avoided, because the landslide debris drifted toward the ridge of opposite bank.

を取り上げ、森屋ら (2010)、大野ら (2010) がそれぞれ荒砥沢地すべりの発生機構について報告を行っている。森屋 (2010) らは、荒砥沢地すべりが数万年前に活動を始めた地すべりの再活動であり、移動機構に関わる地形地質の特徴として、斜面末端部の沢の発達、斜面上部にキャップロック状の火山性堆積物が覆っていること、すべり面が層理の発達する砂岩・シルト質泥岩に相当すること、流れ盤の岩盤地すべりの形状をなしていること、地すべり頭部が尾根状地形に位置していること、の 5 点をあげている。大野ら (2010) は、動的応答解析等による数値計算を行い、300 m の移動量を生じさせるには 100 m 近い間隙水圧が必要であると報告している。また、山崎ら (2012) は冠頭部の重力性クリープが進行していることを報告し、継続的な監視が必要としている。

当地すべり地の堆積構造は、下部に火砕流起源の軽石質凝灰岩を主とする湖成の堆積岩 (小野松沢層) が存在し、上部は溶結凝灰岩 (北川溶結凝灰岩) が厚く堆積する、いわゆるキャップロック構造 (三森ら 2009, 2010b) となっている (Photo 4)。当地すべりは栗駒山南麓カルデラ (大竹 2000) の外輪山付近に位置しており、カルデラの存在が大規模地すべりの要因であるとの指摘 (布原ら 2008) もされている。また、東北森林管理局 (2008) のボーリングに基づく調査結果によれば、当該地すべりのすべり面はほぼ水平であり、すべりはいわゆる重力移動によるものとは考えられず、液状化による側方流動 (三森ら 2009, 2010a, b) あるいはスプレッド (Varnes 1978) 等他の要因を考えなければ、移動を生起させたメカニズムの合理的説明が難しい。地盤工学会 2008 年岩手・宮城内陸地震災



Photo 4. 荒砥沢地すべりの滑落崖。上部の溶結凝灰岩と下部の湖成層との境界がはっきり見える。ボーリングの結果、ほぼ水平なすべり面が湖成層中に形成されていることが判明した。溶結凝灰岩がキャップロックとして強度の小さな湖成堆積物に、地震の間繰り返し上載加重を与えた結果、スプレッドタイプの地すべりを発生させた。Aratozawa landslide cliff. A boundary between Upper welded tuff and lower lacustrine sediment is quite obvious. Horizontal slip plane exist in the lacustrine sediment layer with test borings. The welded tuff with acting as cap rock cyclically had loaded to lacustrine during the earthquake, and led a spread type of landslide.

害調査委員会 (2010) による報告においても、発生メカニズムにおいて粘性土の動的強度特性では説明できないとし、今後キャップロックによる動的载荷の影響解明の重要性を指摘している。

ここで、側方流動とは、たとえば、地震時の埋め立て地で地盤の液化に伴い土砂が側方に流動化するような現象を指し、均質な砂またはシルト層が飽和や過剰間隙水圧の発生により急激な変動を示す現象に対する呼称である。Varnes (1978) は、地すべりの分類において、スプレッドを一つのタイプとして取り上げた。さらに、スプレッドを移動速度により2つに分類している。一つ目は、分離した岩石が明瞭なすべり面を形成することなく広がるタイプであり、速度もきわめて遅いとしている。二つ目は、凝集性の粘性土が液化あるいは塑性流動するタイプで、速度の速いタイプとしている。このように、側方流動よりスプレッドの方が広い意味を持つ。今回、荒砥沢、耕英地区で発生した現象は、Varnes によるスプレッドの定義のうち後者の特徴と一致している。後者のスプレッドは、現象として側方流動と同一であるとし、以降本稿ではこのようなタイプの崩壊を「側方流動(スプレッド)」とする。

このような大規模な側方流動(スプレッド)が地震時に山地においても発生しうることを、今回の荒砥沢の災害を契機に十分考慮する必要があると著者らは考える。ダム湖周囲に側方流動(スプレッド)が発生した場合、その移動土塊・岩塊がダム湖に突入し、甚大な被害をもたらす可能性がある。なお、本災害における、カルデラ、キャップロック構造の影響、および側



Photo 5. 耕英地区冷沢の荒廃状況(朝日航洋(株)撮影)。上流(写真下)から下流(写真上)を撮影している。流域全体が流動化している様子がわかる。特に、写真上部(下流側)では右岸上部の平坦地が溪流側(斜面下)に側方に移動し、平坦部には樹木が残っている。Photo 7はこの付近の地上で撮影している。Devastation of Hiyasawa valley in Koei area. The Photo was taken from the upstream by Aero Asahi Corporation. The whole valley of Hiyasawa fluidized by the earthquake. The spreading toward the stream emerged at the upper part which is the downstream of Hiyasawa valley. Rotated trees remained on the flat ridge of right bank.

方流動(スプレッド)については、別項で詳述する。

(2) 耕英地区(冷沢)

荒砥沢地すべりの北側に位置する耕英地区の中心部を流れる冷沢においても、大規模な崩壊が発生した。冷沢流域の地質は、荒砥沢地すべりと同様に、火砕流起源の軽石質凝灰岩を主とする湖成の堆積岩であり、やはり上部に溶結凝灰岩が堆積するキャップロック構造である。この上部の溶結凝灰岩の厚さは、荒砥沢に比べるとかなり薄い。この地区における崩壊は沢の側方上部の平坦ブロックが横にずれ、溪流の側岸をすべり落ちるような形態となっている(Photo 5)。崩壊は、ほぼ沢全域に及び、大きな面積を占めている。Photo 6に見られるように、キャップロックである溶結凝灰岩の直下の軽石層をすべり面として側方に移動してお

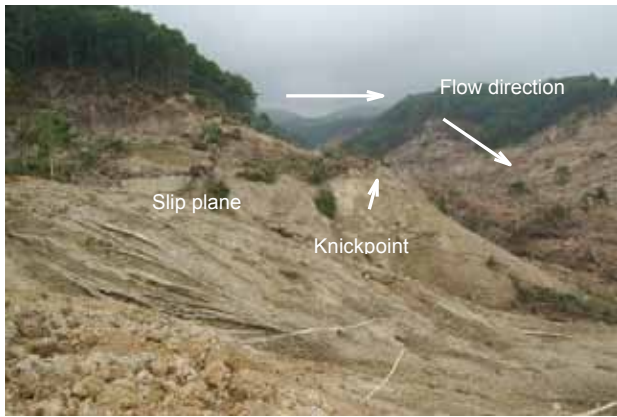


Photo 6. 耕英地区冷沢の荒廃状況。側方流動をうかがわせる崩壊形状が見て取れる。湖成層中に傾斜の変化点があるのわかる。変化点が側方流動のすべり面と思われる。The upstream devastation of Hiyasawa in Koei area. Whole slope along the stream fluidized. A Knickpoint on the slope is obvious in the lacustrine sediment layer. The point coincides with the position of slip plane.



Photo 7. 耕英地区冷沢における斜面上部の荒廃状況。樹木を乗せたまま小ブロックで移動している。樹木は後方に回転している。The devastation on uphill of Hiyasawa in Koei area. Longitudinally layered small blocks with trees moved and slanted backward.



Photo 8. ドゾウ沢土石流。発生点には残雪が見られ、崩壊発生箇所が湿潤であったことがわかる。崩壊は一気に土石流化した様であり、側岸を侵食しながら流下している。Dozouzawa debris flow. The outbreak point covered with snow beds indicates a wet ground condition at the earthquake. A landslide fluidized immediately. The debris flowed downstream at high velocity with eroding the stream bank.



Photo 9. ドゾウ沢土石流により被災した駒の湯温泉（中央）と対岸の地すべり（中央手前）。対岸の地すべりが河道を閉塞したところに、右上からの土石流が旅館（中央の裸地）を直撃した。Komanoyu hot spring inn at the center of the photo was hit directly by the Dozouzawa debris flow shown in Photo 8. The landslide of the opposite bank clogged the stream, before the debris flowed from the right hand side.

り、水平に近い堆積構造を反映し、上部が横方向に移動している様子がわかる。崩壊土砂の移動量はすべり面の傾斜が緩いことを反映して短く、崩壊地冠頭部では、Photo 7 に示すように、地表部の樹木を乗せたままブロック状に沢方向に移動している。荒砥沢地すべりと規模は大きく異なるが、同様に地震時の液状化による側方流動（スプレッド）をうかがわせる形態を示している。後述する試錐孔を用いた試験結果からは、当地区での液状化による側方流動（スプレッド）を大いに支持する。なお、耕英地区下流近傍では、日陰森において中規模の崩壊が発生しており、岡田ら（2012）は、本崩壊において崩土の一部がアースフロー化し流下したことを報告している。

(3) ドゾウ沢（土石流）

東栗駒山山頂付近の東側斜面において発生した崩壊（Photo 8）が土石流化し、ドゾウ沢に沿って約 4 km 流下して、駒の湯温泉を直撃した。駒の湯温泉の関係者からは、地震から 6～9 分で土石流が到達したとの証言が得られており、地震時に発生した崩壊が一気に土石流化したものと思われる。この土石流により 7 名の方が亡くなられた。駒の湯温泉付近は古い地すべり地形を呈しており、これまでの地すべり活動による崩土で、すでに沢は狭窄していた。これに加え、対岸（左岸側）の斜面が地震時に崩壊したことから、流下して来た土石流の進路が妨げられ右岸側にあった駒の湯温泉の旅館・施設を直撃した（Photo 9）。

この土石流を発生させた崩壊の発生箇所付近には雪田が広がっており、地震発生時に崩壊土層はかなり湿潤であったことが推察される。このドゾウ沢で発生した土石流のほかに、高標高における崩壊は笹森の南東斜面等に見られるが、長距離を流下するような土石流となっていない。今回の災害で、崩土が高速で長距離を流動した土石流はドゾウ沢のみである。これは、次の二つの要因によると考えている。

第一に、素因である次に述べる地形・地質的要因である。火山の山頂付近は勾配が急であるため、ひとたび崩壊し崩土が沢に流入した場合、土石流化しやすい特徴がある。しかし、栗駒山頂周辺の溪流源頭部付近の地質は、更新世から完新世にかけての新しい熔岩（産業技術総合研究所地質調査総合センター 2004）で比較的堅固である。このことから、栗駒山頂部付近に源流を持つ沢はあまりみられず、ドゾウ沢以外では、侵食や源頭部崩壊による開析をあまり受けていないという地形的特徴がある。大丸ら（2010）は、ドゾウ沢の源頭部の崩壊が、以前に発生した崩壊地の拡大崩壊であると指摘している。このため、急傾斜の山頂部付近に開析した源頭部を有するドゾウ沢でのみ崩壊が発生したと言える。

第二に、誘因である次に述べる崩壊発生源付近の水文的要因である。野口ら（2010, 2012）は、2008年の消雪が例年より早く、更に、5月20日以降地震当日まで無降雨の期間が継続しており、栗駒山頂周辺の雪田を除くと地震発生時には比較的乾いた土湿状態にあったと報告している。さらに、安田ら（2012）は、災害の発生した地域では、これまでも近隣の地域より降水量が多い特徴を指摘している。特に、栗駒山周辺の観測点において2008年冬期の積雪量が多かったことを報告し、栗駒山頂周辺の1000m以上の高標高において地震発生時において湿潤であったと結論した。また、大丸ら（2010）は、地震時の発生点付近の雪田で2008年4月以降4000mmの融雪水量があったと推定し、地震発生時にはかなり土層が湿潤で、豊富な水量が溪流に供給されていた可能性を報告している。これらの報告は、地震発生時において栗駒山の雪田付近では、地震発生前では無降雨期間が長期であったにもかかわらず、融雪により土層がかなり湿潤であった状況が推察される。

以上から、崩壊発生箇所の素因である地質・地形的要因、誘因である水文的要因の二つの要因により、ドゾウ沢のみで崩土が長距離流動したことが理解される。

3) 一迫川流域

震源から比較的離れた花山湖上流の一迫川流域では、温湯温泉付近より上流域で、崩壊・落石が多発し

た。この上流域一帯は、荒砥沢と同じ「栗駒山南麓カルデラ」内にあり、下部の湖成の軽石質凝灰岩（小野松沢層）の上を節理の発達した溶結凝灰岩・安山岩が覆う、キャップロック構造を呈している。温湯温泉から上流に行くに従って沢の下刻が進み、谷底から谷壁上部までの比高が徐々に高くなる。これに合わせて、落石、トップリングからキャップロックすべりへと土砂移動の形態が変化していく。ここでは、温湯温泉付近と、原小屋沢分岐・湯ノ倉温泉上流について取り上げる。

(1) 温湯温泉付近

一迫川流域の比較的下流に位置する温湯温泉付近での被害は、トップリングが主体であった（Photo 10）。トップリングとは、岩盤斜面破壊の一種で、岩柱や岩塊の上部が回転前掲し倒れる現象をいう。温湯温泉付近は、一迫川が栗駒南麓斜面を下刻した溪谷の下流部にあたり、両岸に切り立った崖状の斜面が見られる最下流にあたる。上流部と比較すると、溪流による下刻はあまり発達しておらず、側壁についても溪床からの比高が低い。側壁の上位にある比較的堅い溶結凝灰岩の厚さに比し、下位にある軟質岩の露頭の厚さが上流域より薄い。トップリングによる崩壊は、溶結凝灰岩が節理を境界として崩れ落ちる様な形態である。温湯温泉からすぐ上流の、白糸の滝に向かう歩道の吊り橋付近では、2名の方がトップリングによる崩落により亡くなられた。溪床付近には古い落石を示す巨岩の堆積がみられ、以前から頻繁にトップリングによる崩落が発生していたものと思われる。

現地を踏査したところ、この付近では下部の軟質岩中に崩壊には至らない程度のすべりが発生している箇所もあり、すべり面の傾斜は沢に向かって上向きと、通常のすべりとは異なる（Photo 11）。このほかにも、河床付近で軟質岩に膨らみや脚部の座屈褶曲が観察された。沢部が見かけ上背斜であることや、尾根部付近には特徴的な線状凹地が見出された（大丸ら 2011）。これらは、キャップロックによるバレーバルジング（谷底の隆起による褶曲構造）特有の特徴であり、地震以前より重力による深部変形を受け軟質岩がはらみ出していたものと考えられる（大丸ら 2010）。

(2) 原小屋沢分岐・湯ノ倉温泉上流

原小屋沢分岐・湯ノ倉温泉付近では中・小規模の崩壊が多発した（Photo 12）。湯ノ倉温泉直下では崩壊土砂によって河道が閉塞し、同温泉が水没する被害を生じた（Photo 13）。これよりさらに上流に向かうに従って、徐々に開析台地と溪床との比高が高くなって行く。湯浜峠対岸付近の急斜面では、一迫川流域では最も大規模な崩壊が発生し、河道を閉塞した（Photo 14）。Photo 14によれば、この付近での溶結凝灰岩の堆積厚はかなり厚く、滑落崖上に水平な堆積構造が見て取れ



Photo 10. 湯湯付近に見られるトップリング（北川溶結凝灰岩中の節理の崩落による崩壊）。
Toppling failures occurred along Ichihazama river, because perpendicular joints are well developed in Kitagawa welded tuff. The photo was taken near Nuruyu hot spring.



Photo 11. 溪岸の軟質岩（小野松沢層）中に見られるすべり面。傾斜角は水平面より上向きである。すべり面は侵食を受けていないことから地震時に生じたと考えられる。
Slip plane at the left bank of Ichihazama river appeared in the Onomatsuzawa stratum of lacustrine sediment. The dip of the plane rises toward to the stream. The movement occurred at the earthquake, because the slip plane is fresh, and not eroded.



Photo 12. 一迫川支流原小屋沢の様子。無数の小規模の崩壊が発生している。
Devastation in the catchment of Harakoya tributary of Ichihazama river. Many landslides occurred along the stream.



Photo 13. 湯ノ倉温泉付近の湛水状況。奥に見える崩壊により湛水し、温泉の建物が流出している。
A landslide dam lake at Yunokura hot spring. A hot spring inn was carried away into the dam lake.



Photo 14. 湯浜峠対岸付近に発生した大規模崩壊（一迫川本流）。この崩壊によりやはり河道閉塞が発生した。溶結凝灰岩の層厚は上流の栗駒山に向かうにつれて厚くなっている。
A large landslide occurred at the left bank of Ichihazama river near the Yunohama pass. The landslide debris dammed up the Ichihazama river. The welded tuff becomes thicker in accordance with coming upstream to Mt. Kurikoma.

る。

浅野 (2010) は、湯ノ倉温泉上流に位置する相野沢分岐地点で、地震時の地盤応答解析を行った結果、従来の地震時の地盤応答解析と同様に、山稜の尾根部付近で応答加速度の高い箇所が見られたとしている。地表に近い上層を、弱溶結と強溶結の二層に区分したモデルを用いた解析結果からは、弱溶結（溶結凝灰岩）と強溶結（溶岩）の境界付近で地震加速度の増幅結果が得られたことを報告している。この報告は、キャップロック崩壊が卓越していた現地の状況と一致する。

4. 崩壊の特徴と地震断層・地質・地形・植生の影響

著者らは、今回の崩壊の特徴と、崩壊発生への地質・地形・植生の影響を明らかにすることを目的として、

航空写真と衛星画像を用いて崩壊地を抽出した。使用した航空写真は、災害直後である 2008 年 6 月 15 日から 16 日にかけて (株) アジア航測が撮影した航空写真、衛星画像は、2008 年 7 月 3 日に ALOS により撮影された可視光画像を用いた。これらの画像を用い、10,751 箇所、13,576 km² の崩壊地を目視によって抽出し、GIS 上に記載した。崩壊発生に影響を与える因子のうち、地質図は産業技術総合研究所 (1986) 作成の「栗駒地熱地域地質図 (10 万分の 1)」、地形図は北海道地図 (株) 作成の「10 m メッシュ標高 DEM データ」、植生図は環境省自然環境局生物多様性センター (2004) による「自然環境保全基礎調査による植生図」を、それぞれ使用して GIS のレイヤーを作成し、解析を行った。以下にその結果を示す。

1) 地震断層と崩壊の位置

Fig. 3 に、東北大学大学院理学研究科 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ (2008) が提示した、キネマティック GPS データによる地震時断層モデルと崩壊地の重ね合わせを示す。Fig. 3 に示すように、断層はほぼ脊梁山脈と平行している。震源断層の西側は山地が広く分布しており、衝上断層の下盤側である東側が緩傾斜であるのと対照的である。この地域は、鮮新世中期より隆起をはじめ、過去 12 万年の間に 70 m を超える隆起量を示している (小池ら 2005)。この断層線は、ほぼ 50 m 隆起量の等値線と一致しており、第四紀以降の逆断層活動による隆起との関連性を強く示唆する。Fig. 3 によれば、崩壊地は、衝上断層の上盤側である地震断層の西側に大多数が存在し、断層からほぼ 15 km 以内で発生していることが解る。一般に、逆断層による地震の場合、上盤側の地震動は下盤側のそれより卓越する。これを上盤効果と呼ぶ。上盤側が山地で、急斜面が多いという地形的な特徴と併せ、より大きな地震動が上盤側に多数の崩壊を発生させたと言える。

2) 地質・地形の影響

(1) 付近の地質・地形の特徴

今回の被災地域は、東北脊梁中部の栗駒・鬼首火山地域の東端に位置している。被災地域には、主に、栗駒山生起の溶岩、火山灰による堆積層が層状に厚く分布しており、また南部には、巖美、栗駒南麓、花山、鬼首の各カルデラが分布し、周囲には急崖が分布している。

近年では、地質・年代データを元に、後期中新世におけるカルデラ形成期以降の東北脊梁山地の火山が等間隔の分布ではなく、7つのクラスターを作って分布していることが明らかにされた (天野・佐藤 1989, 伊藤ら 1989)。この7つとは、北から、恐山火山地域、

八甲田・十和田火山地域、仙岩火山地域、栗駒・鬼首火山地域、蔵王・舟形火山地域、磐梯・安達太良火山地域、会津火山地域である。それぞれのクラスターは、数個から数十個の成層火山と 0～数個の大カルデラ火山よりなる。これらのカルデラを充填する堆積物の一般的層序は、下位から、厚い凝灰岩、土石流あるいは岩屑なだれ堆積物、湖成層となっている。

被災地域の中中部から南側は、栗駒・鬼首火山地域 (クラスター) にほぼ含まれており、ここに見られる緩詰め凝灰岩、岩屑なだれ堆積物、湖成層は、カルデラ内の堆積物である。湖成層中には植物化石が含まれることもあり、荒砥沢地すべり土塊中には数 cm の腐植の狭層が見られた。以上のように、被災地域には、地質構造により特徴付けられる地形が発達している。

(2) 地質別の崩壊発生状況

地質別の崩壊発生状況を表した Fig. 4 に示すとおり、「北川溶結凝灰岩及び相当層」と「湖成層」での崩壊が 3 % 近くに達し、両地質での崩壊が突出して多い。規模の大きな崩壊が多かった南部の一迫川流域から三迫川流域にかけて、地質と崩壊を重ね合わせた Fig. 5 では、両層をまたぐ境界付近で崩壊が多発している。両層は第三紀から第四紀にかけての堆積層で、特に「湖成層」は固結度が低く、ゆるぎの軟弱な地層であり、地震時の強度も低い。今回の災害で特徴的に見られた地質境界での崩壊については、特に詳しく後述する。

栗駒山北部には、やや古い海成層である細倉層が地域一帯に広く分布する。この細倉層の岩質を反映して、航空写真等から判読される崩壊は、南部と比較すると、中規模以下のものが多く、大規模な崩壊は南部に比べてやや少ない。しかし、村上ら (2009) の報告のように、初生すべりの発生や、航空写真から判読できない亀裂の発生も見られており、崩土の移動は少ないがせん断破壊が進行している崩壊もあり、今後注意する必要がある。

(3) 土質試験による側方流動 (スプレッド) の確認

耕英地区御沢で発生した崩壊地の脇での試錐孔を用いた標準貫入試験結果 (東北森林管理局ほか 2010) によれば、溶結凝灰岩直下の軟弱層 (強風化の軽石凝灰岩) で N 値が 10 以下を示す箇所も見られ、相当層の FL 値も 0.21 ~ 0.35 と 1.0 以下と小さな値であった。ここで FL 値とは、液状化に対する抵抗率で、1.0 以下で液状化の可能性が高いと判定される数値 (日本道路協会 2012) であり、0.21 ~ 0.35 の測定値は、液状化を充分起こしうる値である。また、この軟弱層の部位は、上層の亀裂に富んだ溶結凝灰岩と異なり、空隙に乏しいことから透水性が低く、境界面で帯水層を形成しやすい。試錐結果によれば、境界部に空洞が見られたが、これは帯水した地下水により地下侵食が生じた結果であり、豊富な地下水による作用が見取れ

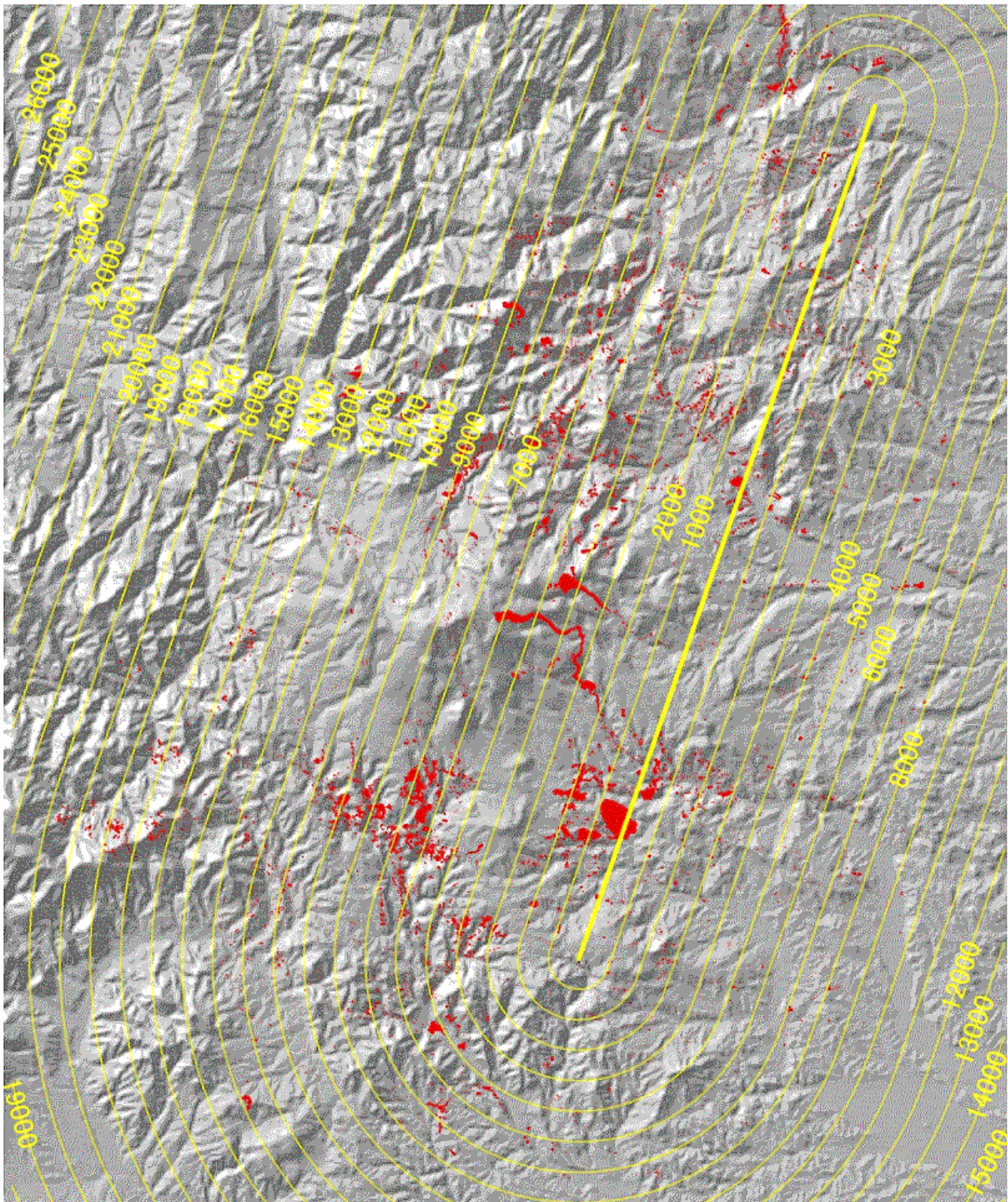


Fig. 3. 地震断層からの距離と崩壊の関係。崩壊の多くは震源断層の上盤側 15 km 以内で発生している。地震断層は東北大学大学院理学研究科 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ (2008) による。
 Relationship between the distance the from seismogenic fault and landslides. Most of landslides are located on the hanging wall with in 15 km from the seismogenic reverse fault. The seismogenic fault is reported by the research group of Tohoku University (2008).

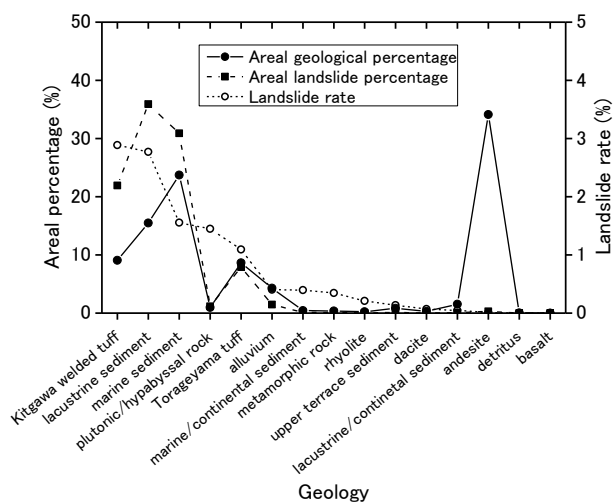


Fig. 4. 地質別の崩壊発生状況。
Areal landslide percentage and rate of each geological rock type.

る。融雪期以降も含水率の高い状態が続くことが考えられ、地震時においても高い含水率が示唆される。上層の堅固な溶結凝灰岩は、下層と比較すると密度も高いことから（三森ら 2009, 東北森林管理局ほか 2010）、地震時において大きな上乗荷重となって動的に作用する。このため、直下の湖成層中の軽石凝灰岩が液状化して強度を失い、溪流の下刻侵食により溪流側が解放された場所では側圧が無いことにより側方流動（スプレッド）を発生させたと考えられる。この結果、北川溶結凝灰岩と湖成層の地質的組み合わせの分布する地域である二迫川・三迫川流域（耕英地区）に多数の崩壊を発生させ、高い崩壊発生率をもたらした可能性が高い。

我が国の山地におけるスプレッドに関する報告は、加藤ら（1999）による三田盆地における神戸層群の報告が最初である。その後、大八木（2003）による既存の地すべり地形の再検討によって、塔のへつりカルデラ、新潟県田麦付近における地すべり等、複数の事例が見いだされている。地震時の液状化による側方流動（スプレッド）については、沖積層、あるいは、埋め立て地など、砂質の水平堆積構造の場所で発生することが、これまでの地震災害において数多く報告されている。地震時の側方流動が、わが国で初めて認識されたのは、1964年新潟地震による信濃川や新潟空港の被害であった（例えば、Hamada et al., 1986）。その後、1983年日本海中部地震（例えば、渡辺ら 1984）、1995年兵庫県南部地震（例えば、堀越ら 1996）、2004年新潟県中越地震（例えば、国土交通省 2008）等でも地震時の液状化による側方流動について数多くの報告がなされている。また、平成 23 年（2011 年）年東北地

方太平洋沖地震（東日本大震災）では、沖積平野を中心に広範な地域に側方流動による被害が生じている。

今回被災した箇所の土の粒径は比較的均一で、砂質からシルト質の粒径に属するものが多く、密度が小さく緩詰め層がほぼ水平に堆積する構造である。これまでに報告のあった側方流動の発生箇所との類似性を指摘することができ、地震時の液状化発生を大いに裏付ける。カルデラ内の充填堆積物は、一般に、緩詰め層で比較的粒径が大きいことから、先述した東北脊梁山地のカルデラ・クラスター分布域では、今回の災害と同様に、地震時には側方流動（スプレッド）による大規模な地すべりが発生する可能性を考慮しておく必要がある。

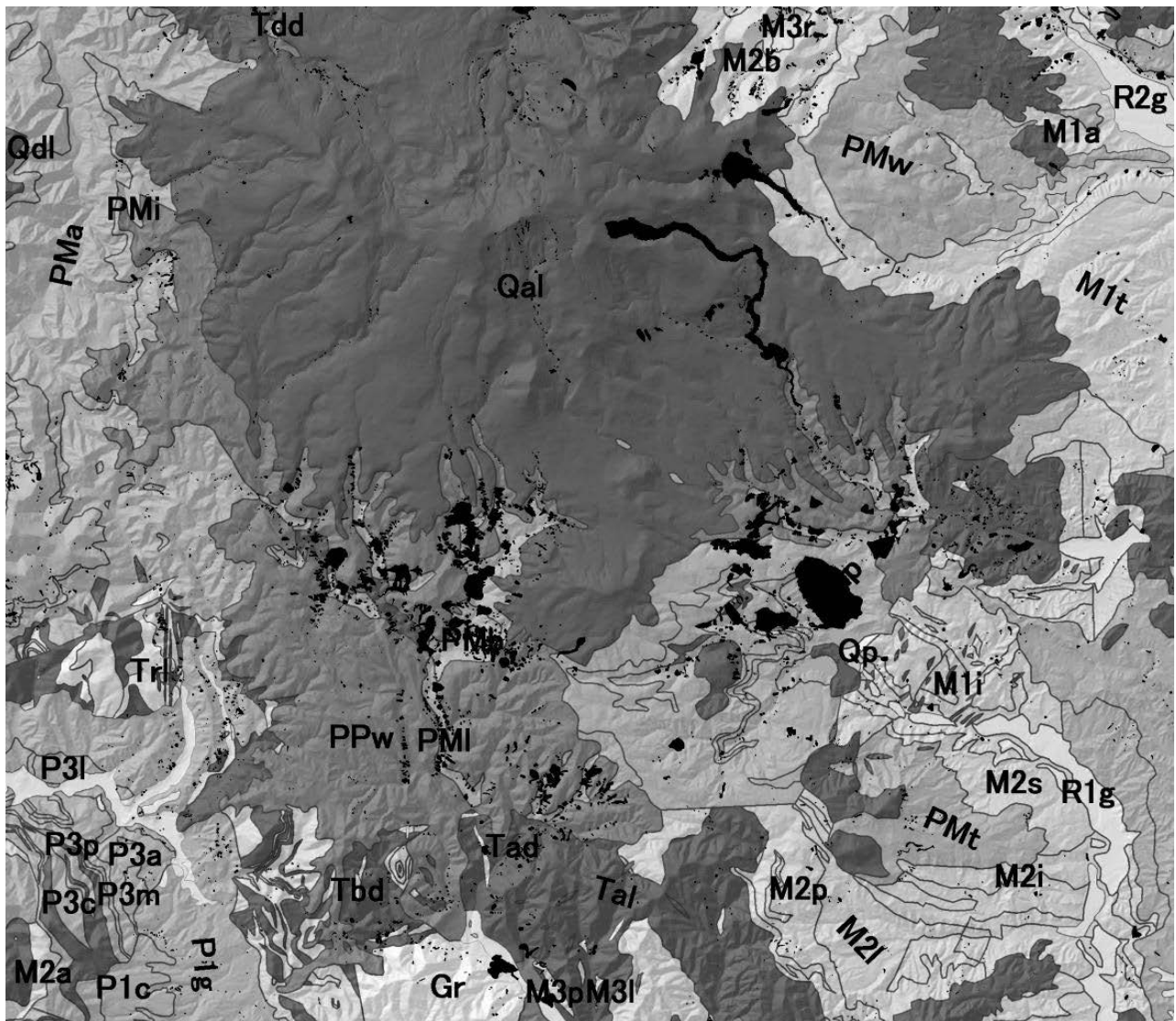
(4) 地形・傾斜の影響

傾斜区別の崩壊発生状況を Fig. 6 に示す。被災地域全体では、10～20度の傾斜にピークを持つ傾斜分布を示し、比較的なだらかな地形である。これに対し、今回発生した崩壊での傾斜別分布は、25～35度での頻度が最も高く、被災地域全体の傾斜分布より急勾配に寄った分布を示している。また、傾斜角が50度を超えると崩壊の発生率は急激に上昇し、面積は極限られるが、60度を超える斜面では半数以上に崩壊が見られる結果が得られた。平坦な火山堆積物を河川が下刻した今回の被災地域では、このような急傾斜地は河道両側の谷壁にほとんどが位置しており、崩壊地の傾斜分布結果は、谷壁での崩壊が多発した現状を反映している（Fig. 7）。さらに、本被災地域では、最上層部に節理の発達した比較的密度の高い溶岩や、溶結凝灰岩が分布し、その下層に密度の小さな軽石凝灰岩や湖成層が分布する堆積構造（キャップロック構造）を示す箇所が、栗駒山南部一帯に広く見られる。このようなキャップロック構造は、斜面上部に大きな上乗加重をもたらすことから、崩壊を発生させる大きな要因となる。谷壁にこのようなキャップロック構造を認める箇所でも崩壊が多いこともこれを裏付ける。

内陸の山間部で発生する地震では、急勾配斜面で崩壊が多数発生することがこれまで多くの地震災害でも数多く報告されており（例えば、高橋ら 1986）、今回の岩手・宮城内陸地震による崩壊も同様の傾向を示している。傾斜別の崩壊占有率では、20度未満の斜面でも比較的高い値を示しているが、これは荒砥沢地すべり・耕英地区における大規模崩壊を反映したためである。また、崩壊発生率は50度を超える斜面で急増しており、一迫川流域の北川溶結凝灰岩分布域で特徴的に見られるキャップロックやトップリングによる小規模から中規模の崩壊を反映した結果となった。

(5) キャップロックの影響

キャップロックによる崩壊の場合、崩壊・地形・地質の各 GIS レイヤーの重ね合わせによって特徴的な様



Legend

symbol	geology	symbol	geology
PPw	Kitgawa welded tuff	PEg, Pet	marine/continental sediment
PM, P1, P3	lacustrine sediment	GM, S	metamorphic rock
M1, M2, M3	marine sediment	R2g	upper terrace deposit
D0, Qd, Qp, Sp, Gr	plutonic/hypabyssal rock	Trl, Trd	rhyolite
PMw	Torageyama tuff	PLc, PLp	lacustrine/continental sediment
Qal, Ta	andesite	Tbl, Tbd	basalt
R1g	alluvium	●	landslide

Fig. 5. 一迫川・二迫川・三迫川流域の崩壊と地質の関係。地質境界、特に北川溶結凝灰岩（硬質）と湖成層（軟質）の境界付近に位置する崩壊が多い。地質図は産業技術総合研究所による栗駒地熱地域地質図を用いた。
 Relationships between landslides and geology in Ichihazama river, Nihazama river, Sanhazama river basins. There are a lot of landslides near the geological boundaries, especially, the boundary of Kitagawa welded tuff and lacustrine sediment. We use the Geological map of Kurikoma geothermal area by The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.

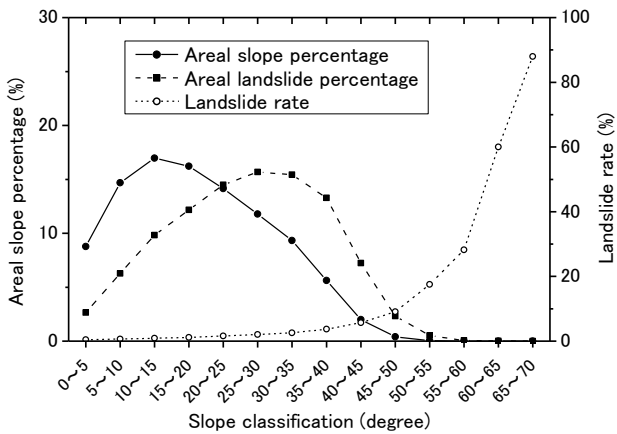


Fig. 6. 傾斜区分別の占有率と崩壊発生率。
Relationship among slope classification, areal percentage of slope and landslide, and landslide rate.

相が見て取れる (Fig. 5 参照)。すなわち、多くの崩壊が、地形図上では下刻した沢の側壁急斜面上に位置し、地質図上では上層下層の地質境界線の付近に位置するという特徴である。この特徴は、この地域の堆積構造に由来する、と著者らは考えている。この地域では、溶結凝灰岩と湖成層の層序が水平に近い結果、溶結凝灰岩と湖成層の境界は必然として沢沿いの急斜面となることが多いことが理由である。

この GIS 上での特徴は、今回のようなキャップロック構造を持つ地質条件下で、強い地震が発生するような場合を想定して崩壊の危険箇所を推定する際に、有効な特徴であると考えられる。今後、このような硬質岩と軟質岩の境界付近の急斜面で、規模の大きな崩壊が発生しやすいかどうかを検証する試みを、他の地域で行うことが必要である。地質構造と堆積構造における不

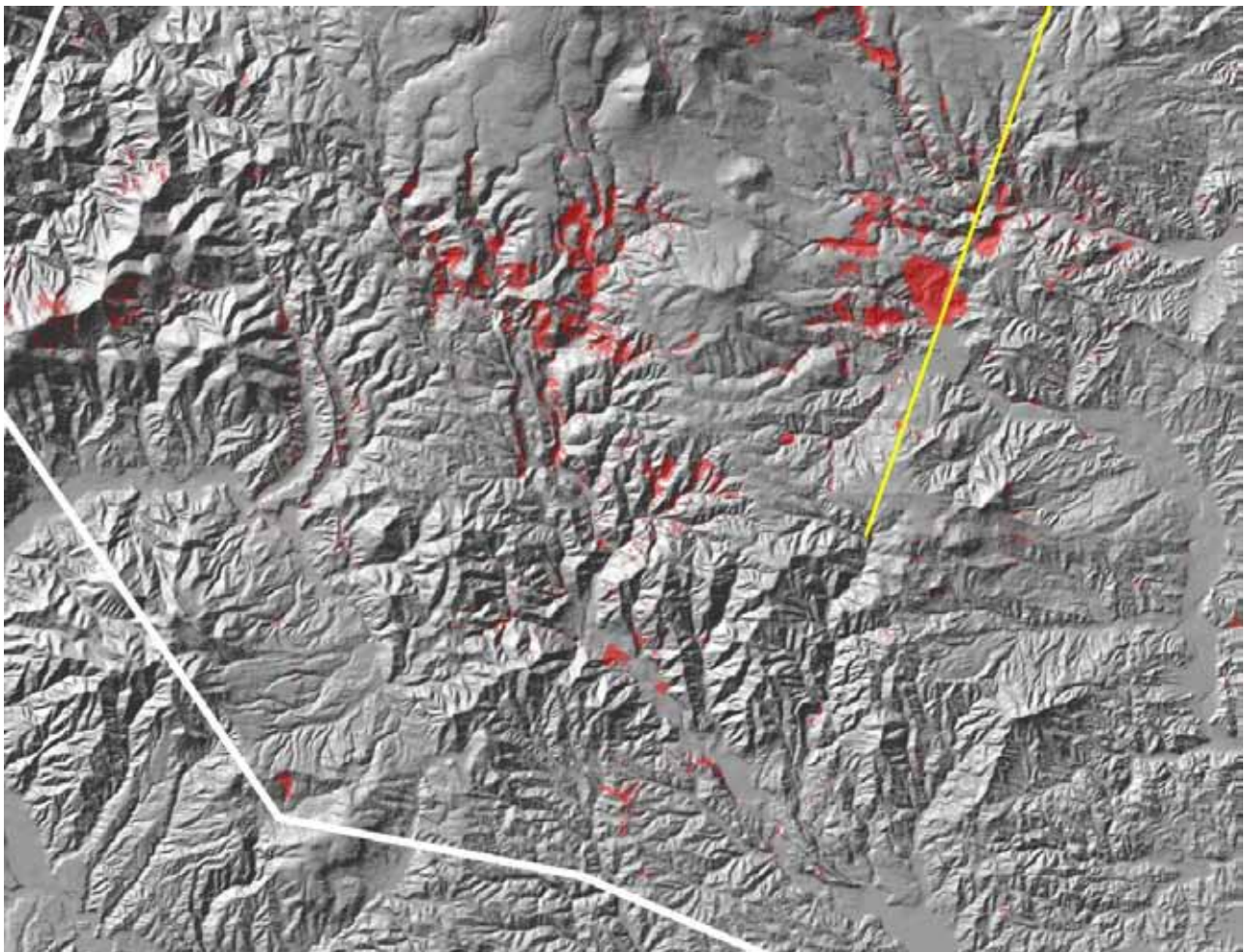


Fig. 7. 栗駒山南部斜面の地形と崩壊。赤い部分が崩壊を示す。
Topographic features and landslides at the southern slope of Mt. Kurikoma.

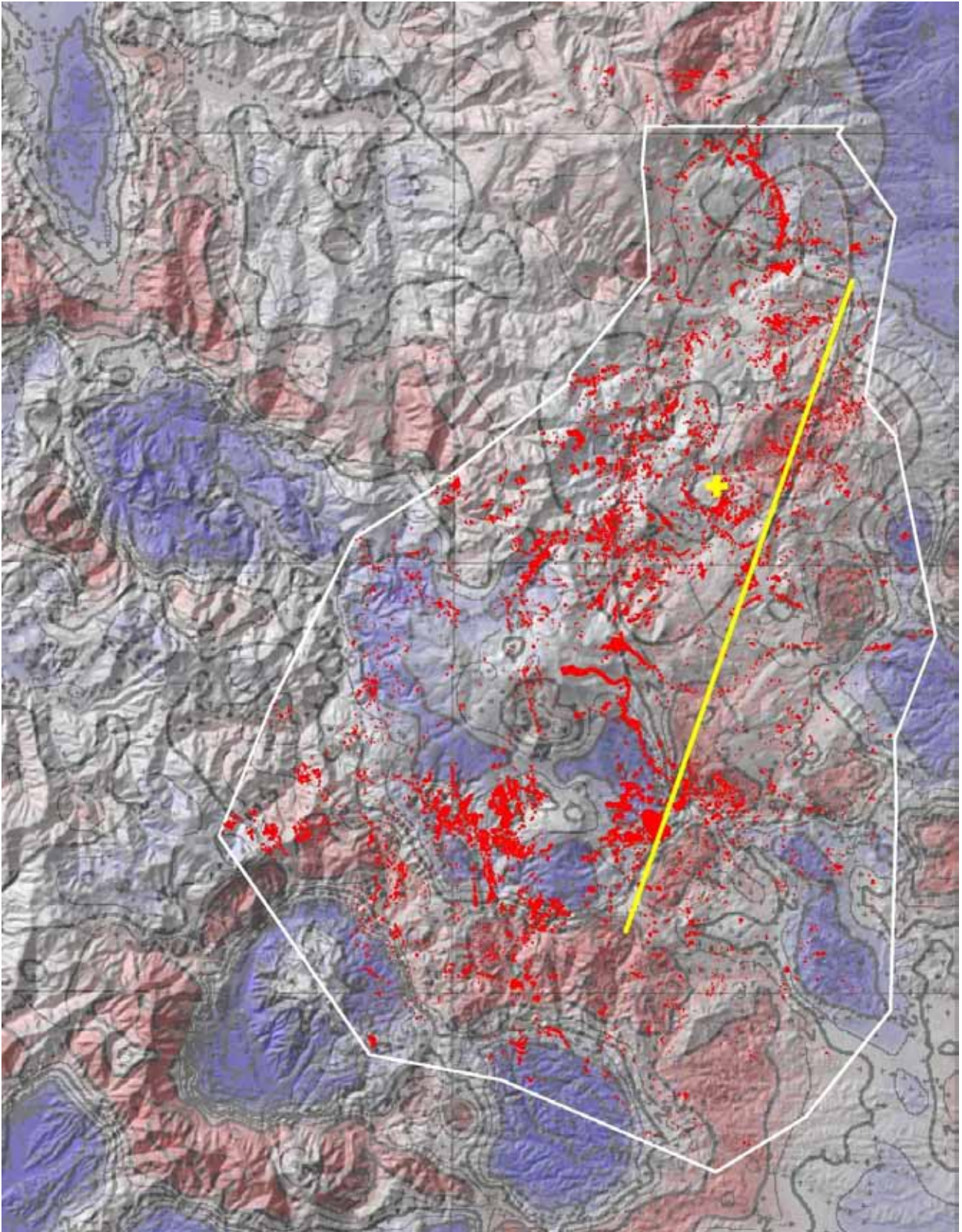


Fig. 8. ブーゲー異常と崩壊の関係。ブーゲー異常図は、
http://staff.aist.go.jp/k.nawa/geophysmap-rg/grav/iwate-miyagi_gravres_L.gifを使用。
Relationship between Bouguer anomaly and landslides. The map of Bouguer anomaly is reprinted from
http://staff.aist.go.jp/k.nawa/geophysmap-rg/grav/iwate-miyagi_gravres_L.gif

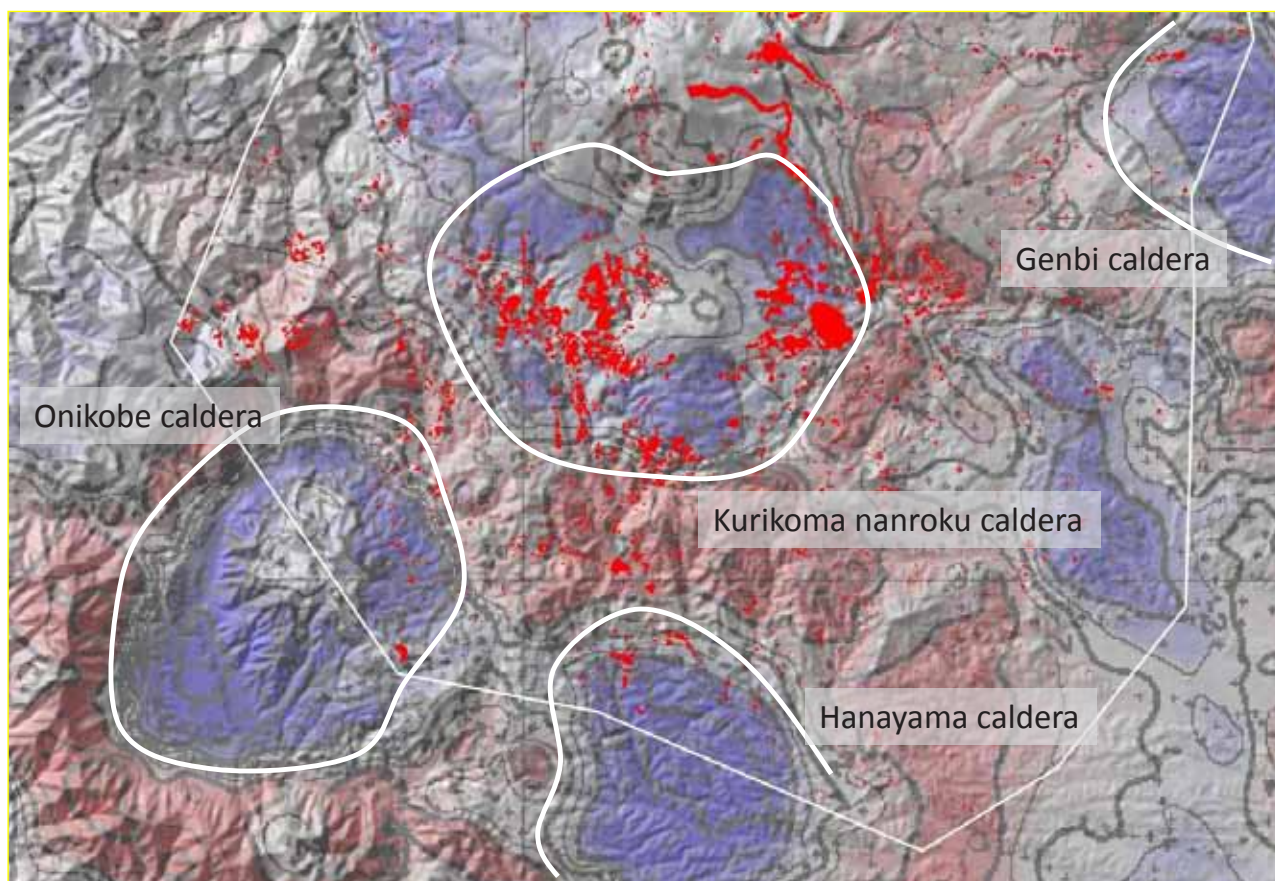


Fig. 9. 栗駒山南部におけるブーゲー異常とカルデラ 1, 2)、崩壊との関係。図中、鬼海、栗駒南麓、巖美、花山の各カルデラを表記した。カルデラ壁の周辺に崩壊が分布している。1): 天野・佐藤 (1989), 2): 伊藤ら (1989)
 Relationship of bouguer anomaly, calderasl, 2), and landslides in the southern slope of Mt. Kurikoma. Calderas of Onikobe, Kurikoma nanroku, Genbi, and Hanayama were confirmed. Landslides were observed on peripheries of calderas.
 1) Amano, K. and Sato, H (1989), 2) Ito, T. et al. (1989)

連続性は、雨水や地下水の浸透にも大きな影響を与えること、キャップロックによる崩壊は地震ばかりでなく豪雨でも発生すること、キャップロックを原因とする崩壊は大規模になりやすいこと等から、このようなGISを通じての特徴把握が、未だ不明な部分の多い、豪雨による大規模崩壊の発生予測にも役立つ可能性が高い。

(6) カルデラ地形の影響

当該地域には、前述のように、巖美、栗駒南麓、花山、鬼首の各カルデラが分布している。Fig. 8 に解析対象地区全体重力 (ブーゲー異常) 図 (産業技術総合研究所地球物理情報リサーチグループ 2009) と崩壊との重ね合わせを示す。また、Fig. 9 に栗駒山南部の拡大図を示す。Fig. 8, 9 中の青色は重力値の小さな箇所を示し陥没帯に相当する。一方、ピンク色は重力値の大きな部分を示し、外輪山に相当する。Fig. 9 の曲線は既報のカルデラ (天野・佐藤 1989, 伊藤ら 1989) を示す。

Fig. 9 からは、崩壊がカルデラ周囲の外輪山の谷壁や、中央部の円頂丘斜面に集中しているのがわかり、

カルデラが崩壊の発生に大きな影響を与えていることが理解される。カルデラは陥没形成の際に大きな応力を受けていることから、外輪山を含む周囲は大きな変形や破壊を受けている可能性が高く、これに伴い強度的にも脆弱化していることが考えられる。

Fig. 8 から判断すると、被害地域周辺にはこのほかに未記載のカルデラ構造も存在すると考えられ、精細な調査が求められる。前述のように、東北脊梁山地には複数のカルデラ・クラスターが存在しており、今回と同様の内陸性の地震が発生した場合、カルデラ付近に大きな土砂災害をもたらす可能性が高い。今後、同様な地質構造を有する火山地帯において、地震時の地盤災害を予測する場合には、このようなカルデラとカルデラ内の堆積構造の把握等、地質要素の把握が重要な鍵となろう。

(7) 地質境界と崩壊発生位置

Fig. 10 に被災地域の地質と崩壊との重ね合わせを示す。Fig. 10 によれば、全域で地質の境界付近で崩壊の発生数が多いことがわかる。特に、栗駒山の北東部で

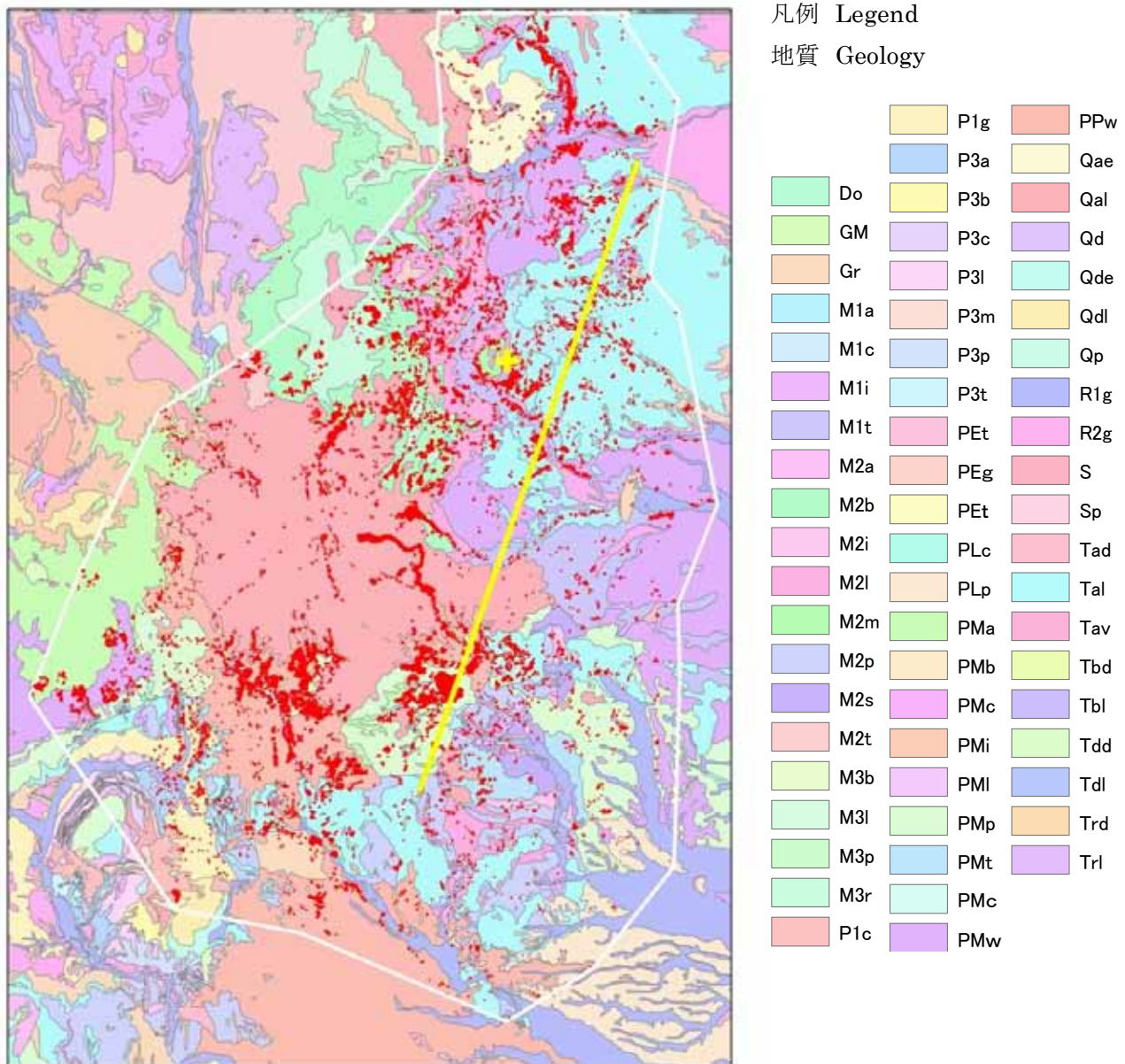


Fig. 10. 崩壊と地質区分との関係を示す位置図。凡例に示す記号による分類は、Fig. 5 のものと同様である。図中の黄色の十字は震源、黄色の直線は東北大学による震源断層モデル、白線は解析範囲をそれぞれ示す。
Map of landslide location and geological classification. Geological classifications are same as Fig. 5. A yellow cross is the epicenter, yellow line is the seismicogenic fault model by Tohoku university, a white polygon is the analyzed area.

は、虎毛山凝灰岩と海成層との境界部、南西部では栗駒溶岩外縁部と北川溶結凝灰岩の境界部付近に、それぞれ崩壊が多発している。

Fig. 11 に、地質境界から崩壊発生位置までの距離と、崩壊発生率との関係を示す。崩壊発生位置は崩壊の重心とした。Fig. 11 によれば、地質境界から数百メートル内での崩壊発生率が高いことがわかる。また、地質境界からの距離と崩壊の出現度数とその累積比率を示した Fig. 12 によれば、地質境界から 600 m の範囲に、崩壊のほぼ 90 % が含まれている。

本被災地域のようななだらかな堆積構造を持つ地質

では、カルデラ壁面や、河道谷壁等の縦方向の侵食・変形作用により形成された斜面に、地質・地層の境界が出現しやすい。したがって、今回の地震により発生した崩壊地が、カルデラやキャップロック構造を示す谷壁に多いことから、崩壊地内あるいはその近傍に地質境界が出現することが多くなる。すなわち、火山地帯特有の層状の堆積構造を持つなだらかな山腹における、カルデラ陥没による急崖形成とカルデラ内部の軟弱層の堆積、河川による山腹の下刻による急崖の形成、これらの地質・地形要因に加えて、軟弱層の上部に新しい堅固な溶岩が堆積しているというキャップロック

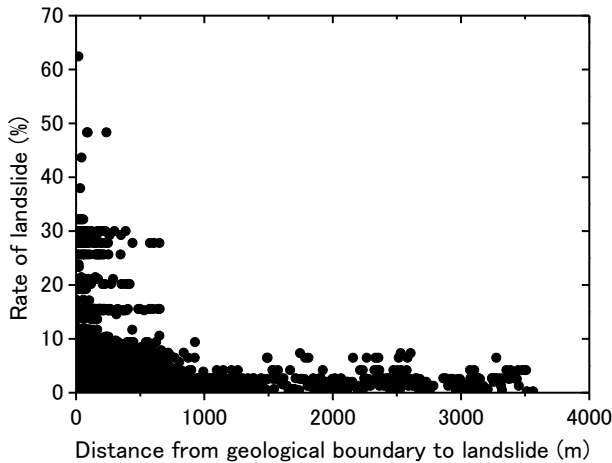


Fig. 11. 地質境界から崩壊発生位置までの距離と崩壊発生率。
Relationship between distance from geological boundary and rate of landslide.

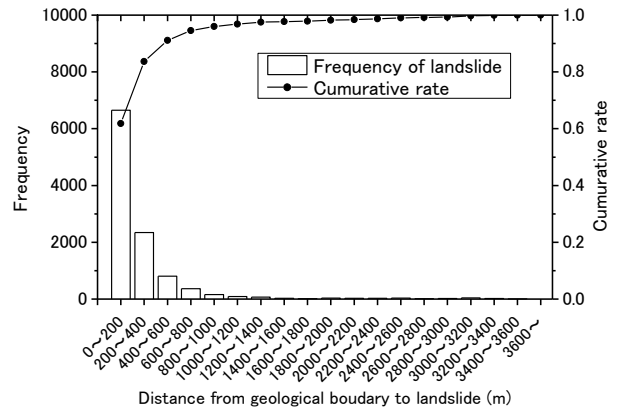


Fig. 12. 地質境界からの距離と崩壊の出現度数とその累積比率。
Relationship between distance from geological boundary to landslide and frequency of landslide occurrence.

構造の存在、などの複合的な要因が、今回の地震災害で地質境界に崩壊が多発するという現象をもたらしたといえる。

今回の地震災害のデータからは、25度を超える傾斜地で、地質層序によりキャップロックとなっている箇所、すなわち、上層が堅固で下層が軟弱な堆積構造が地表に出現している地質境界の周辺数百mの範囲で、カルデラ谷壁、河道の下刻による谷壁等の条件を満たす斜面での崩壊が卓越していたことが判明した。したがって、このような箇所を地質図・地形図を用いて抽出すれば、崩壊が想定される危険斜面の抽出が可能である。このような抽出操作はGISの最も得意とする作業であり、今回得られた成果に基づくこの手法は、今回の被災地域と同様の地質構造である、カルデラ火山地帯でのハザードマップを作成する際にも有効と考える。

3) 植生の影響

豪雨による表層崩壊への植生影響についての議論と同様に、地震時の土壌層下面をすべり面とする小規模崩壊について植生がどのように影響するかは、防災対策の観点からも重要な事項であろう。ここで言う植生が影響を与える小規模崩壊は、豪雨時の崩壊と同様に、表層崩壊に分類されるような深さのものであり、大規模崩壊は基岩中にすべり面が存在するため根系の影響は及ばない。従って、植生影響を議論する際には、崩壊の規模により区分して、特に規模の小さなものを取り上げて議論すべきである。しかし、今回行った崩壊の把握は空中写真に基づくものであり、崩壊深のデータをとることが出来ないことや、植生影響の大まかな把握を目的としたため、下記の統計値は全ての崩壊か

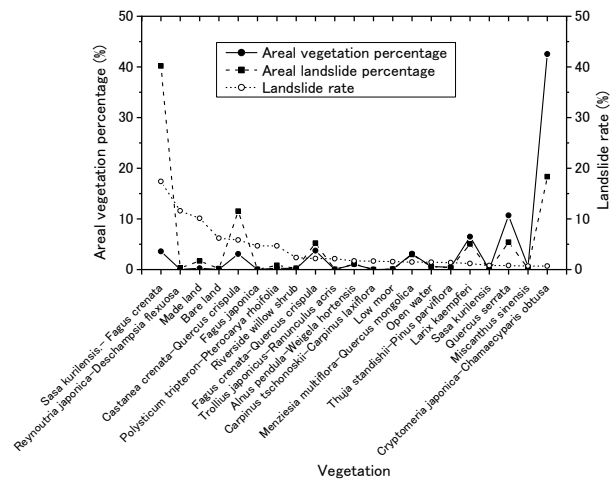


Fig. 13. 植生区分別の崩壊発生状況。
Relationship between vegetation type and landslide.

ら求めている。

Fig. 13に植生区分ごとの崩壊発生状況を示す。植生区分のうち、スギ・ヒノキ植林 (*Cryptomeria japonica* - *Chamaecyparis obtusa*) が最も占有率が高く崩壊面積の多くを占めているが、崩壊発生率は低い。同様にカラマツ植林 (*Larix laempferi*) などの人工林や、コナラ・ブナ (*Fagus crenata* - *Quercus crispula*) などの天然林の崩壊発生率は低く、成林している場合には地震時の崩壊についても発生率は低い。これに対し、チシマザサ群団 (*Sasa kurilensis* - *Fagus crenata*)、イタドリ・コメススキ群落 (*Reynoutria japonica* - *Deschampsia flexuosa*)・造成地 (Made land)・自然裸地 (Bare land) などの天然林や無植生や草本主体の植生では崩壊発生率が高い。しかし、これにより森林が地震による崩壊の防止

に有効であると結論することは早計である。

今回、一迫川流域で、主に、トップリングによる崩壊が溪岸側壁の急傾斜地で発生していることを前項で述べたが、このような急傾斜の斜面は造林対象になることはもとよりなく、通常は植生の遷移が容易に進行せず、無植生や草本主体の植生のままのことも多い。このことから、木本の成立しえないような急斜面が今回数多く崩れたと考えるのが妥当であろう。さらに、今回は比較的標高の高い山間地での崩壊も多く、必然的にこのような場所では植生も元々貧弱であることも影響していると考えられる。地震時に発生する小規模崩壊への植生の影響を議論するには、植生以外の傾斜・標高等もふまえた詳細な分析が必要であり、今回の解析からは「成林している箇所の崩壊発生率は比較的小さい」と述べるにとどめる。

3. おわりに

本稿では、2008年岩手・宮城内陸地震で発生した崩壊・地すべりを主とする土砂災害の特徴について報告した。本災害では、火山地帯での堆積構造と地形が崩壊の発生に大きな影響を与えていることを明らかにした。特に、次の2点の重要性を指摘した。まず、軟質な湖成堆積物の上に硬質な溶結凝灰岩が堆積する構造が大規模かつ多数のキャップロックタイプの崩壊を発生させたこと、次に、キャップロック構造による大きな上載加重が下層の軟質な湖成堆積物に動的に載荷したことにより地震時に液状化して側方流動が生じた可能性が高いこと、の2点である。今回の災害で得られたこれらの特徴は、東北の脊梁山地に分布する他のカルデラ・クラスターとも共通するものであり、今後類似の地震が発生した場合に、同様な災害が起こりうることを示している。また、今回のように、広域で多数の崩壊が発生するような地震を原因とする土砂災害について解析する際には、GISの利用が非常に有効であることも加えておきたい。

現地調査に際しては、東北森林管理局治山課、同岩手南部森林管理署、同宮城北部森林管理署、同宮城山地災害復旧対策室に多大なご協力をいただいた。

最後に、この災害で亡くなられた方々のご冥福を、心からお祈りします。

引用文献

天野一男・佐藤比呂志 (1989) 東北本州弧中部地域の新生代テクトニクス, 地質学論集, 32, 81-96.
浅野志穂 (2010) 岩手・宮城内陸地震災害における山地斜面の振動特性に及ぼす地層構造の影響, 「岩手・宮城内陸地震によって発生した土砂災害の特徴と発生機構に関する研究」交付金プロジェクト推進会議資料.

防災科学技術センター (1982) 地すべり地形分布図第1集「新庄・坂田」, 防災科学技術資料, 69.
防災科学技術研究所 (2008) "強震ネットワークK-NET", <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/quake/>.
大丸裕武・村上 亘・多田泰之・三森利昭 (2010) 岩手宮城内陸地震による一迫川上流部の崩壊発生とバレーバルジング, 2010 地形学連合春季大会講演要旨, 61.
大丸裕武・村上 亘・多田泰之・岡本 隆・三森利昭・江坂文寿 (2011) 2008年岩手・宮城内陸地震による一迫川上流域の崩壊発生環境, 日本地すべり学会誌, 48(3), 23-36.
大丸裕武・村上 亘・小川泰浩・江坂文寿 (2010) 2008年6月の岩手・宮城内陸地震によって土蔵沢源頭部で発生した崩壊, 「岩手・宮城内陸地震によって発生した土砂災害の特徴と発生機構に関する研究」交付金プロジェクト推進会議資料.
土木学会 (2008) 2008 (平成20年) 岩手・宮城内陸地震による被害速報, 土木学会誌, 93(8), 42-45.
Hamada M., Yasuda, S., Isoyama R, Emoto, K. (1986) Study on liquefaction induced permanent ground displacements. Association for the Development of Earthquake Prediction in Japan, 1, 1-87.
桧垣大助・佐藤 剛 (2009) 平成20年岩手・宮城内陸地震における斜面変動の特徴, 東北地域災害科学研究, 45, 59-63.
堀越研一・大津宏康・木村 亮・岡二三生 (1996) 1995 兵庫県南部地震によって損傷した杭の調査, 土と基礎, 地盤工学会, 44 (11), 27-29.
井口 隆・大八木規夫・内山庄一郎・清水文健 (2010) 2008年岩手・宮城内陸地震で起きた地すべり災害の地形地質的背景, 防災科学技術研究所主要災害調査, 43, 1-10.
井良沢道也・牛山素行・川邊 洋・藤田正治・里深好文・檜垣大助・内田太郎・池田暁彦 (2008) 平成20年 (2008年) 岩手・宮城内陸地震により発生した土砂災害について, 砂防学会誌, 61 (3), 37-46.
石出貴大・山崎文雄 (2010) ALOS/AVNIR-2画像を用いた2008年岩手・宮城内陸地震における斜面崩壊の検出, 日本地震工学会論文集, 10 (3), 12-24.
伊藤谷生・歌田 実・奥山俊一 (1989) 東北脊梁地域に分布する中新世～鮮新世のカルデラ群について, 地質学論集, 32, 409-429.
地盤工学会 2008年岩手・宮城内陸地震災害調査委員会 (2010) 平成20年 (2008年) 岩手・宮城内陸地震災害調査報告書, 158 pp.
環境省自然環境局生物多様性センター (2004) "第6回・第7回自然環境保全基礎調査による植生図",

- 生物多様性情報システム, <http://www.vegetation.jp/>.
- 加藤靖郎・三好正夫・東 一樹 (1999) 第三系大山系神戸層群の lateral spreads, 第 38 回地すべり学会研究発表会講演集, 431-434.
- 気象庁 (2008) 災害時地震速報 (2008.7.31), 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震, 93 pp.
- 小池一之・田村俊和・鎮西清高・宮城豊彦編 (2005) 日本の地形 3 東北, 東京大学出版会, 355 pp.
- 国土交通省 (2008) 平成 19 年 (2007 年) 新潟県中越沖地震における液状化に関する被害調査報告, 31 pp.
- 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人土木研究所・独立行政法人建築研究所 (2008) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料第 486 号・土木研究所資料第 4120 号・建築研究所資料第 115 号, 239 pp.
- 黒川 将・岩田英也・柴崎達也・大野亮一・小澤幸彦・寺村 保 (2010) 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震で発生した増沢地区の地すべりと地すべりダムの調査結果, 日本地すべり学会誌, 47 (6), 33-40.
- 翠川三郎・三浦弘之 (2010) 高分解能 SAR 画像による 2008 年岩手・宮城内陸地震での 斜面災害地域の抽出, 日本地震工学会論文集, 10 (3), 25-32.
- 水田敏彦・鏡味洋史 (2008) 1896.8.31 陸羽地震の岩手県における被害に関する文献調査, 日本建築学会技術報告集, 28, 665-668.
- 水田敏彦・鏡味洋史 (2009) 1896.8.31 陸羽地震の秋田県における被害分布に関する文献調査, 日本建築学会技術報告集, 30, 597-600.
- 森屋 洋・阿部真郎・荻田 茂・桧垣大助 (2010) 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴って発生した荒砥沢ダム上流の大規模地すべり構造, 日本地すべり学会誌, 47 (2), 1-7.
- 村上 亘・大丸裕武・小川泰浩・黒川 潮・多田泰之・三森利昭・安田正次・齋藤 仁 (2009) 岩手宮城内陸地震において崩壊斜面背後の山地稜線部に形成された亀裂, 日本地理学会春季大会発表要旨集, 217.
- 村上 亘・大丸裕武・江坂文寿 (2010) 地震後に発生した斜面崩壊 (2 次崩壊) の地形・地質的特徴, 「岩手・宮城内陸地震によって発生した土砂災害の特徴と発生機構に関する研究」交付金プロジェクト推進会議資料.
- 内閣府 (2011) "災害情報: 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震について (第 34 報) (2011.6.23)", <http://www.bousai.go.jp/kinkyu/iwate2/2008-iwate-cao-034.pdf>.
- iwate-cao-034.pdf.
- 日本道路協会 (2012) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 318 pp.
- 野口正二・三森利昭・多田泰之・安田幸生 (2010) 2008 年岩手・宮城内陸地震前後における災害地周辺の先行土湿, 砂防学会誌, 63 (1), 39-43.
- 野口正二・安田幸生・多田泰之・三森利昭 (2012) 2008 年岩手・宮城内陸地震災害地周辺の先行土湿の季節変動, 森林総合研究所研究報告, 11 (3), 151-160.
- 布原啓史・吉田武義・山田亮一 (2008) "地理情報システムを用いた地震災害とカルデラ構造との関連の検討", 日本地質学会 HP, <http://www.geosociety.jp/hazard/content0035.html>.
- 大野亮一・山科真一・山崎孝成・小山倫史・江坂文寿・笠井史宏 (2010) 地震時大規模地すべりの発生機構—荒砥沢地すべりを例として—, 日本地すべり学会誌, 47 (2), 8-14.
- 大竹正巳 (2000) 栗駒南部地熱地域, 赤倉カルデラの層序と火砕流噴出・陥没様式, 地質学雑誌, 106 (3), 205-222.
- 大八木規夫 (2003) 日本におけるスプレッドタイプ地すべりの事例, 深田地質研究所年報, 4, 133-153.
- 岡田康彦・黒川 潮・浅野志穂 (2012) 日蔭森で発生した地すべりの流動化機構の土質力学的検討, 森林総合研究所研究報告, 11 (2), 71-75.
- 産業技術総合研究所 (1986) 栗駒地熱地域地質図.
- 産業技術総合研究所地球物理情報リサーチグループ (2009) "2008 年岩手・宮城内陸地震—震源域付近の詳細重力異常図 (Fig. 2 残差重力図 (作成: 駒澤正夫))", 産業技術総合研究所, http://staff.aist.go.jp/k.nawa/geophysmap-rg/grav/iwate-miyagi_gravres_L.gif.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (編) (2004) 日本重力 CD-ROM, 第 2 版, 数値地質図 P-2.
- 三森利昭・大丸裕武・黒川 潮・村上 亘・多田泰之・小川泰浩・岡田康彦・大野泰宏・野口正二・安田幸生・浅野志穂・安田正次 (2009) 岩手・宮城内陸地震で発生した崩壊の特徴, 平成 21 年度砂防学会研究発表会概要集, 14-15.
- 三森利昭・多田泰之・大丸裕武・村上亘・野口正二・安田幸生 (2010a) 岩手・宮城内陸地震で発生した崩壊の特徴 (II), 平成 22 年度砂防学会研究発表会概要集, 52-53.
- 三森利昭・大丸裕武・黒川潮・岡本 隆・村上 亘・多田泰之・小川泰浩・岡田康彦・野口正二・安田幸生・浅野志穂・大野泰宏 (2010b) シリーズ「近年の土砂災害」: 2008 年岩手・宮城内陸地震によ

- る土砂災害, 水利科学, 54 (3), 105-127.
- 佐藤比呂志・加藤直子・阿部 進 (2008) "2008 年岩手・宮城内陸地震の地質学的背景", 日本地質学会 HP, <http://www.geosociety.jp/hazard/content0031.html>.
- 仙台管区气象台 (2003) 平成 15 年 7 月 26 日の宮城県北部の地震, 災害時自然現象報告, 2003 年第 2 号, 35 pp.
- 高橋 博・大八木規夫・大滝俊夫・安江朝光 (1986) 斜面災害の予知と防災, 白亜書房, 526 pp.
- 東北大学大学院理学研究科 2008 年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ (2008) 平成 20 年度第 178 回地震予知連絡会資料, 17 pp.
- 東北森林管理局 (2008) 岩手・宮城内陸地震に係る山地災害対策検討会報告書, 141 pp.
- 東北森林管理局宮城北部森林管理署・国土防災技術株式会社 (2010) 平成 21 年度迫川地区地質調査業務報告書, 181 pp.
- 宇佐美龍夫 (2003) 最新版日本被害地震総覧 416 - 2001, 東京大学出版会, 605 pp.
- Varnes, D. (1978) Slope Movement - Types and Processes, Landslides Analysis and Control, Editors: Schuster R. and Krizek R., TRB, National Research Council, Washington, 11-33.
- 山崎 努・山科真一・大坪俊介・江坂文寿 (2012) 荒砥沢地すべり冠頭部の重力性クリーブとその機構, 地すべり学会誌, 49 (1), 36-42.
- 安田幸生・野口正二・三森利昭 (2012) 岩手・宮城内陸地震災害地における 2008 年の気象と山地積雪水量分布の特徴, 森林総合研究所研究報告, 11 (3), 135-150.
- 渡辺 進・羽竜忠男・沓沢貞雄・鍛冶義和 (1984) 日本海中部地震における液状化現象と地盤特性, 土と基礎, 32 (9), 35-40