

3. 林野庁における亀裂のモニタリング結果

3.1 林野庁業務の概要

林野庁では、熊本地震で発生した亀裂の今後の崩壊の危険性を鑑み、航空レーザ測量データ（以降、LPデータ）で作成した微地形判読により亀裂を抽出し、保全対象との関係から特に重要と考えられる箇所に伸縮計および雨量計を設置し、土塊の移動量と降水量の関係を記録する業務が平成28年度より実施されている。

これらの業務は、地震により発生した亀裂が、降雨等によりどのような挙動を示すかを観測し、将来的な危険性の検討や留意点などを整理することを目的として実施されている。既往業務として下記に示す業務が実施されており、平成30年度においても同業務が発注されている。

【既往業務】

平成28年度 流域山地災害対策調査業務（地震による亀裂等監視・分析調査）

平成29年度 流域山地災害対策調査業務（地震による亀裂等監視・分析調査）

【平成30年度発注業務】

平成30年度 流域山地災害対策調査業務（地震による亀裂等監視・分析調査）

以下に、当該業務における観測手法などについて報告書を参考に整理した。

3.1.1 設置機器の概要

(1) 伸縮計

- ✓ 伸縮計：伸縮データ集録装置／NetLG-501型（オサシ・テクノス製）
- ✓ 保護箱：防滴防塵簿ボックス／NetLG-501用（オサシ・テクノス製）
- ✓ 検出方式：ポテンショメータ
- ✓ 分解能：0.1mm
- ✓ 記録間隔：1分と下記に示す任意の記録間隔のダブル方式
(5分, 10分, 20分, 1時間, 2時間, 6時間, 12時間, 1日)
- ✓ 記録内容：インターバル毎の正時値、平均値、最小値、最大値



写真 3.1 伸縮計本体（伸縮データ集録装置）と保護箱

(2) 雨量計

- ✓ 雨量計：転倒ます型雨量発信器／RS-2 型（オサシ・テクノス製）
- ✓ 測定単位：0.5mm／1 転倒（パルス）
- ✓ 精度：20mm 以下の雨量のとき±0.5mm 以内、20mm 以上の雨量のとき±3%以内
- ✓ 受水口径：200mm
- ✓ 集録装置：雨量データ集録装置／NetLG-201 型（オサシ・テクノス製）
- ✓ 保護箱：防滴防塵簿ボックス／NetLG-001・WLG-01 兼用（オサシ・テクノス製）
- ✓ 入力信号：0.5mm または 1mm／1 パルス（無電圧接点）
- ✓ 記録方式：雨量パルス入力時の時刻を記録
- ✓ 適応センサー：RS-2 転倒ます型雨量発信器

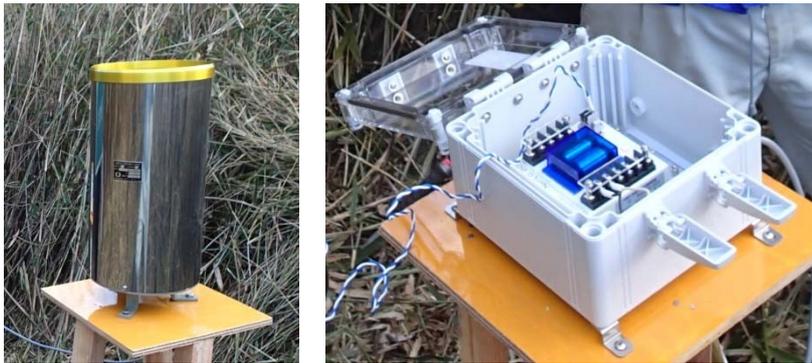


写真 3.2 転倒ますおよび雨量伸縮データ集録装置と保護箱

3.1.2 データ回収方法

- ✓ 携帯型ネットワークコントローラ NetCT-1 を各本体に接続。
- ✓ 測定条件の設定を実施し、CF カードでデータ回収。
- ✓ データ回収は、月 1 回を標準として実施。

3.1.3 判定基準

- ✓ 伸縮計は上部亀裂（滑落崖）に設置した場合、基本的に引張の変動が累積する特性がある。
- ✓ 突発的な変動や一旦変動したデータが、後に戻る場合は、有意な変動とはいえない場合がある。

表 3.1 伸縮計における解析判定基準

変動種別	日変位量 (mm)	月間変位量 (mm)	一定方向への累積傾向	変動形態	摘要
緊急変動	2×10^1	5×10^2	非常に顕著	引張が一般的	崩壊型 泥流型
確定変動	1×10^0 以上	1×10^1 以上	顕著	引張および 圧縮	表層すべり 深層すべり
準確定変動	1×10^{-1} 以上	2×10^0 以上	やや顕著	引張・圧縮および断続変動	粘土すべり 崖錐すべり
潜在変動	2×10^{-2} 以上	5×10^{-1} 以上	ややあり	引張および 圧縮	粘土すべり 崖錐すべり

出典：地すべり観測便覧(H24) p.334

3.1.4 伸縮計設置位置

伸縮計は、保全対象との関係により特に重要と考えられる箇所を設置されており、14基の伸縮計と3基の雨量計が設置されている。本業務に関係する立野地区においては、図3.1（図中青丸）に示すとおり（9箇所）であるが、内伸縮計1基は工事実施のため撤去されており（S-4）、現在は8基の伸縮計と1基の雨量計の観測が継続されている。各機器の設置目的を表3.2に整理した。

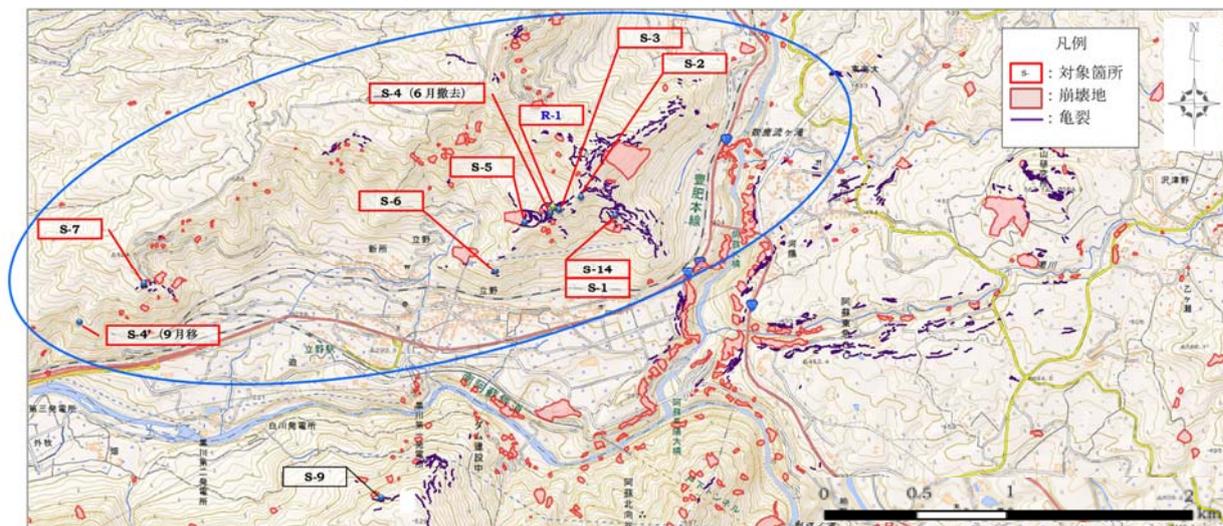


図 3.1 伸縮計・雨量計設置位置

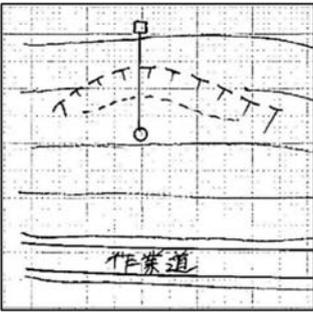
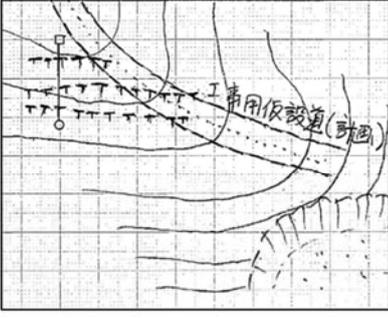
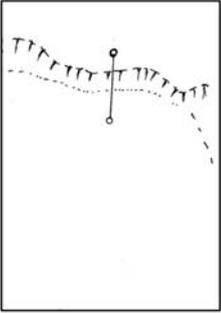
表 3.2 各機器の設置理由

計器No.	協議先 協議年月日	設置目的	備考
S-1	熊本県 森林保全課 2016/12/20	設置箇所：三つ石崩壊の背後に生じた主要な亀裂を対象として設置	JR豊肥本線 立野集落 国道57線
S-2		設置箇所：三つ石崩壊西側に派生する崩壊の背後に生じた亀裂の主要な箇所に設置	
S-3		設置箇所：三つ石崩壊と宮内崩壊との中間部の浅層崩壊に生じた主要な亀裂を対象として設置	
S-4	熊本県 森林保全課	設置箇所：宮内崩壊の背後に生じた主要な亀裂を対象として設置	JR豊肥本線 立野集落
S-4'		治山工事で撤去となったS-4の代わりに国道57号線直上に生じた崩壊の上方斜面に発生した亀裂を対象として設置。	JR豊肥本線 立野集落 国道57線
S-5	熊本県 森林保全課 2016/1/19	設置箇所：舞堂崩壊南側に生じた亀裂の主要な箇所に設置 保全対象：JR豊肥本線・立野集落・国道57線	JR豊肥本線 立野集落 国道57線
S-6		設置箇所：九州電力送水管の東側に発生した亀裂の主要な箇所に設置	JR豊肥本線 立野集落
S-7		設置箇所：立野駅直上に発生した崩壊の西側斜面に生じた亀裂の主要な箇所に設置	JR豊肥本線 立野集落 国道57線
S-14	熊本県 森林保全課 2017/3/10	S-1に縮変動がみられたため、上部亀裂の変動を確認するために設置	JR豊肥本線 立野集落
R-1	林野庁との 協議	立野地区南向き斜面の降水量観測を目的として設置	

3.2 モニタリング亀裂の状況

立野地区において、モニタリング対象となっている亀裂の詳細を以下に示す。

<p>S-1</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・三ツ石の二股冠頭部の西側滑落崖の延長斜面上に位置する ・開口部は明瞭だが下方で不明瞭になる ・下部崩壊に近い為、亀裂の変動を把握するために設置 
<p>S-2</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・崩壊地滑落崖と尾根筋亀裂群の間にある亀裂馬蹄状のやや不明瞭な亀裂 ・尾根筋亀裂は連続性があり、関連性は低いと考えられる ・下部崩壊地との関連、および斜面変動の観測を目的とするために設置 
<p>S-3</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・明瞭だが連続性に乏しい尾根に平行な亀裂で、亀裂下方には土砂の押し出し地形がみられる ・亀裂の谷落ちが著しいため、変状地形と亀裂の動態を観測するために設置 
<p>S-4'</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・当初宮内地区にあったが治山工事で撤去することになったため、S-14近くの尾根亀裂部に移設した。 ・国道及び鉄道に土砂が流出した崩壊冠頭部の背地に位置する亀裂に設置。 ・亀裂と崩壊の関連性を観測するために設置している。 

S-5	<ul style="list-style-type: none"> ・舞堂地区の尾根の遷緩部に位置し、馬蹄状をなすが亀裂の右側部は崩壊地の側部へと連続する ・崩壊地および山脚部一帯の亀裂との関連性および変動を把握する ・崩壊地土砂移動方向に沿った西向きに配置   
S-6	<ul style="list-style-type: none"> ・九電送水管およびその点検作業道の東寄り上方斜面にある馬蹄状の亀裂 ・下方に作業道があるために、上部亀裂の変動を観測するために設置   
S-7	<ul style="list-style-type: none"> ・斜面直下の急崖下部では斜面が崩落して土砂が国道や鉄道線路に流出した ・亀裂は災害復旧のための工事中仮設道路(計画)を横断している ・斜面崩壊と亀裂の関連性を把握するために設置   
S-14	<ul style="list-style-type: none"> ・S-1の設置後、縮み変動が確認されたため設置 ・上部の変動を把握するためにS-1の上部の亀裂に配置   

3.3 モニタリング結果の概要

3.3.1 異常データの抽出

立野地区のモニタリング結果では、突発的な伸縮計の伸び等が多数観測されているが、降雨との関連性が見られないことや伸縮計の周囲に野生動物の足跡が確認されることから、野生動物の接触により発生した異常値であると考えられる。また、伸縮計周辺において実施された治山工事の時期との整合性がみられる変動も確認されている。これらのデータは、表 3.5 に示したとおり学識経験者の助言の下、異常値データとして伸縮計変動量の累積値から除外されている（除外期間、縮み変動が安定するまでの期間とし最大 10 日間程度）。

表 3.5 異常データの除去変動量

計器番号	異常データの除去期間	異常データ除去変動量 (mm)	異常データの原因 (推定)
S-1	12/14~23 (-1.6mm), 1/24~25 (-2.6mm), 2/3~4 (-0.9mm), 2/14~15 (+0.8mm), 2/21 (+2.7mm)	-1.6	野生動物・落石等による障害
S-2	11/2~11/7 (3.0mm)	3.0	野生動物による障害
S-3	10/7~11 (+1.4mm), 11/2~7 (+0.4mm)	1.8	野生動物による障害
S-4'	10/20~21 (+1.0mm)	1.0	野生動物による障害
S-5	10/23~27 (-0.3mm), 11/29~30 (-1.0mm) 12/16~23 (-0.5mm)	-1.8	野生動物による障害
S-6	9/8~10 (+1.2mm)	1.2	野生動物による障害
S-7	異常と認められるデータ無し。		
S-8	4/21~9/13 (-2.3mm)	-2.3	周辺での重機作業等による
S-9	8/2~11 (+5.3mm)	5.3	野生動物による障害
S-10	異常と認められるデータ無し。		
S-11	異常と認められるデータ無し。		
S-12	異常と認められるデータ無し。		
S-13	10/31~11/10 (+0.4mm), 12/20~24 (+0.1mm) 1/20~23 (+0.1mm)	0.6	野生動物による障害
S-14	6/26~8/19 (-2.7mm), 2/7~8 (+0.8mm)	-1.9	倒木による保護管破損

※「平成 29 年度 流域山地災害対策調査業務（地震による亀裂等監視・分析調査）」を抜粋し一部加筆

※赤枠：本業務対象伸縮計

3.3.2 モニタリング結果

設置当初からの累積変動量を整理したものが表 3.6 となる。全期間をとおして、平均日変動量が 0.02mm 以上の「潜在変動」となるような変動は確認されていない。降雨による崩壊の危険性を考慮した場合、圧縮変動ではなく伸び変動が重要となるが、多くの亀裂で圧縮変動の傾向が認められるのみであり、降雨と呼応した伸び変量はほとんど確認されていない。

なお、平成 30 年度業務の観測における、平成 30 年 12 月上旬までの観測結果（中間報告結果）においても、特に大きな変動は認められていない。

表 3.6 地表伸縮計観測結果一覧

計器番号	累積変動量 観測データ (mm)	異常データ 除去変動量 (mm)	累積変動量 異常データ除去 (mm)	日最大 変動量 (mm/日)	月最大 変動量 (mm/30日)	観測 期間 (日)	平均 日変動量 (mm/日)	変動形態	変動種別	備考
S-1	-5.7	-1.6	-4.1	±0.5	-1.2, +0.3	412	-0.010	圧縮		
S-2	2.3	3.0	-0.7	0.2	-0.3, +0.2	433	-0.002	圧縮・引張		
S-3	0.7	1.8	-1.1	-0.2	-0.3, +0.1	416	-0.003	圧縮		
S-4'	0.6	1.0	-0.4	±0.1	-0.2, +0.1	169	-0.002	変動なし		
S-5	-4.8	-1.8	-3.0	-0.4	-0.8, +0.1	378	-0.008	圧縮		
S-6	0.1	1.2	-1.1	0.3	-0.5, +0.2	387	-0.003	圧縮		
S-7	-0.2		-0.2	0.6	-0.8, +0.4	390	-0.001	圧縮・引張		
S-8	-2.0	-2.3	0.3	0.5	-1.6, +1.6	246	0.001	圧縮・引張	潜在変動	
S-9	8.5	5.3	3.2	2.7	-0.1, +2.7	377	0.008	引張	準確定変動	
S-10	-0.7		-0.7	-0.2	-0.8, +0.2	388	-0.002	圧縮		
S-11	-1.1		-1.1	-0.1	-0.3	388	-0.003	圧縮		
S-12	-1.2		-1.2	-0.4	-1.0, +0.7	396	-0.003	圧縮・引張	潜在変動	
S-13	-1.9	0.6	-2.5	-2.1	-2.2	371	-0.007	圧縮		
S-14	-4.4	-1.9	-2.5	0.1	-0.7, +0.2	287	-0.009	圧縮		

※「平成 29 年度 流域山地災害対策調査業務（地震による亀裂等監視・分析調査）」を抜粋し一部加筆

※赤枠：本業務対象伸縮計

ただし、ここで示したモニタリング結果は、立野地区における熊本地震後最大の降雨である 2016/6/18～6/25 の降雨（以降、6 月降雨）以降に設置された観測結果であり、6 月降雨を超える降雨を経験していないことに留意が必要となる。

4. 地震に伴う亀裂に関する既往文献の整理

4.1 地震に伴う亀裂の既往文献リスト

地震に伴う亀裂（以降、地震亀裂）については、大規模な地震発生の際に数多く報告されているが、その多くは平野部や断層に関する報告となっている。また、山地斜面の崩壊現象についても多くの報告がみられるが、地震後の降雨等による2次災害の危険性については、表4.1に示すとおり平成7年の兵庫県南部地震を契機に報告例が増加している。特に、村上ほか（2017）では、岩手・宮城内陸地震後の山地斜面の変形について、過去の報告例の整理も含めた上でLPデータにより危険斜面を抽出する試みなどが実施されている。

表 4.1 地震後の降雨による山地斜面の崩壊に関わる主な研究・報告例

主な著者	災害	内容	主な地質背景
川邊（1987）	関東ほか4地震	分布特性および崩壊分布率について	
横山・菊山（1997）	兵庫県南部地震	地震後の山地における、降雨を誘引とする亀裂の発達について	花崗岩・花崗閃緑岩
田結庄・藤田（1996）	兵庫県南部地震	地震後の山地における、降雨を誘引とする亀裂の発達について	花崗岩・花崗閃緑岩
富田ほか（1996）	兵庫県南部地震	地震後の山地斜面の降雨による崩壊発生度の定量評価	花崗岩・花崗閃緑岩
西村・海堀（2002）	芸予地震	地震後の降雨による斜面の崩壊特性について	花崗岩
小山ほか（2009）	鳥取県西部地震	地震変動を受けた斜面の豪雨による崩壊様式とその原因について	凝灰角礫岩
村上ほか（2009）	岩手・宮城内陸地震	地震後の山地斜面亀裂周辺の微地形について	凝灰岩・溶結凝灰岩
村上ほか（2013a）	岩手・宮城内陸地震	地震後の山地斜面亀裂周辺の微地形について	凝灰岩・溶結凝灰岩
村上ほか（2013b）	岩手・宮城内陸地震	地震後の山地斜面の重力変形等の微地形について	凝灰岩・溶結凝灰岩
村上ほか（2017）	岩手・宮城内陸地震	地震直後LPデータを用いた降雨による2次崩壊危険箇所の抽出	凝灰岩・凝灰角礫岩

4.2 岩手・宮城内陸地震で発生した亀裂の変状

岩手・宮城内陸地震は、平成20年6月14日に岩手県一関市磐井川上流部を震央として発生した地震で、山間域の地震であったため非常に多くの山地災害を発生させた。特に、荒砥沢ダム上流部で発生した大規模地すべりや磐井川流域など、災害規模が大きく崩壊数が多かったことから、山地災害対策検討会が設置され、各災害発生箇所について検討されている。以下に、山地災害対策検討会でとりまとめられた荒砥沢地すべり、磐井川流域で発生した災害の概略（特に亀裂発生および観測による経緯）について整理した。

4.2.1 荒砥沢地すべり

荒砥沢地すべりは、幅約 800m、斜面長約 1,300m の大規模な地すべりで、67 百万 m³ もの移動土塊が発生した。下流に位置する荒砥沢ダムは通常の約 1 割程度の低水位だったこともあり、ダム堤体や下流域の被害はほとんどなかったものの、大量の土砂がダムに流れ込んだ。荒砥沢地すべりでは、地すべりに伴い多くの亀裂発生が確認され、特に滑落崖は、高低差 100m を超す急崖となっている。この滑落崖上部には、地震直後の LP データで確認されなかった亀裂が、7 月の豪雨後に撮影された LP データで、円弧状に連続した段差を伴う開口亀裂として確認された。この亀裂は、潜在的な移動土塊が滑落崖上部に残存していたことを示しているが、その後、排土工および緑化工等の対策工が施工され、台風等での変状も確認されなかったことから移動土塊は安定した状況であると判断されていた。

しかし、平成 23 年東北太平洋沖地震の発生により、安定していた切土のり面に新たな亀裂が確認され、現在は観測下に置かれている。ただし、これらの亀裂がその後大きく変動したとの報告は認められないことから、通常の降雨等で活動する亀裂ではなく、地震による緊急度の低い亀裂であると判断される（今後、同程度の地震があれば拡大する可能性はある）。

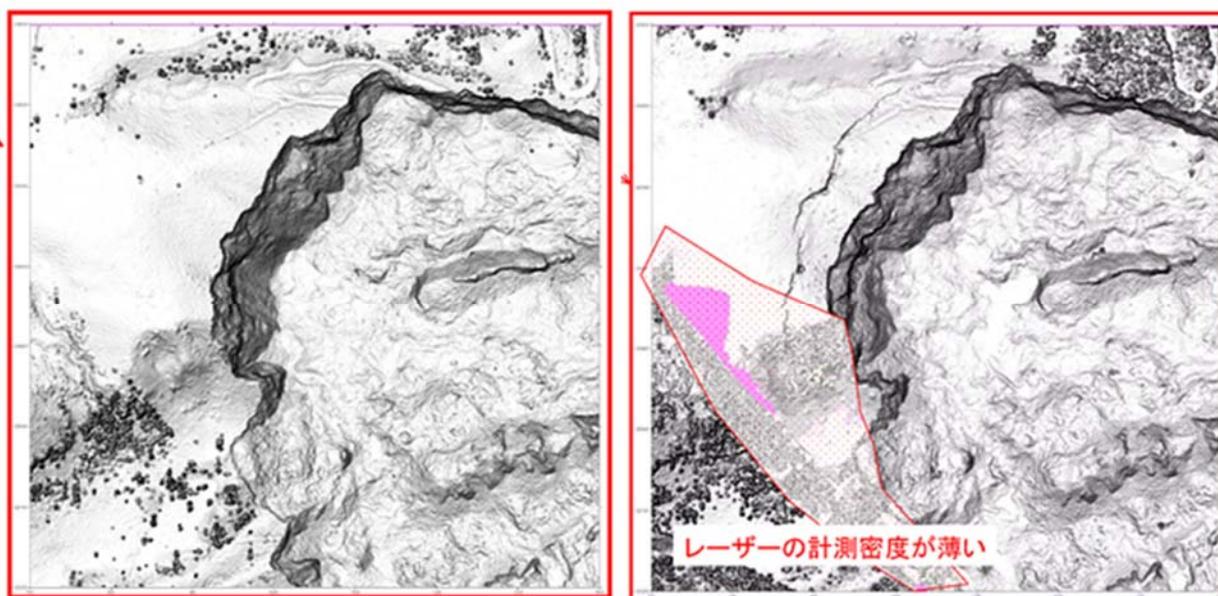


図 4.1 航空レーザー測量による立体地形図（[左] 2008.6.15 撮影、[右] 2008.07.19 撮影）



写真 4.1 冠頭部に発生した段差を伴う亀裂

4.2.2 磐井川流域

磐井川をはじめとする複数の流域では、地震による地すべりや溪岸・山腹崩壊が多数発生しており、山地斜面に写真 4.2 に示すような段差地形や開口性の亀裂が多く確認された。しかし、これらの亀裂は、直接の保全対象からの距離が遠く、流域内に発生していたことから、流域全体での土砂流出抑制対策が検討され、溪流内不安定土砂や山脚の固定、流路の確保を目的とした溪間工（谷止工・床固工・流路工・護岸工の連続配置による流路固定）による整備を行う方針がとられている。そのため、7月の豪雨や東北太平洋沖地震発生時に個別の亀裂拡大などについては調査されていないが、大きな被害が発生したとの記録もないことから、流域全体での管理により地震後の降雨による2次災害の危険性が抑制されていると考えられる。



写真 4.2 産女川溪岸で確認された山腹崩壊および亀裂（[左] 段差地形、[右] 開口亀裂）

4.3 地震後の降雨による危険斜面判定の既往研究

4.3.1 村上ほか（2017）による危険斜面判定手法

村上ほか（2017）では、既往の報告例も踏まえ地震直後の LP データを基に、その後の降雨による2次崩壊の危険箇所抽出の手法について整理されている。これは、地震で崩壊しなかったものの、斜面上に不安定土塊として残存している箇所を微地形判読から抽出するものであり、岩手・宮城内陸地震で被災した斜面に対し、地震直後の LP データと豪雨後の LP データを比較することで、どのような箇所が危険斜面となっているかが調査されている。また、危険斜面として抽出された箇所でも豪雨による崩壊が認められない斜面については、現地踏査による確認も実施されている。

その結果、地震では崩壊していないものの豪雨で崩壊が発生した箇所は、地震により平面形状では斜面上に馬蹄状ないし楕円形状の緩斜面地形（等高線の乱れ）が、縦断形状では凸型の地形（等高線の乱れ）が形成されていることが確認された。また、緩斜面地形の頭部に亀裂が発達している箇所も確認されるなど、地震による地形変動の影響がその後の降雨により崩壊を発生させる起因となり得ることが指摘されている。

また、崩壊地で簡易貫入試験を実施した結果、地表面から深くない深度に強風化相となる弱面があることが確認されている。これらのことから、原位置風化した溶岩類が地震動により破碎されることで、亀裂等が発達し微地形的な緩斜面地形が形成され、等高線の乱れとして抽出できるものと考えられている。

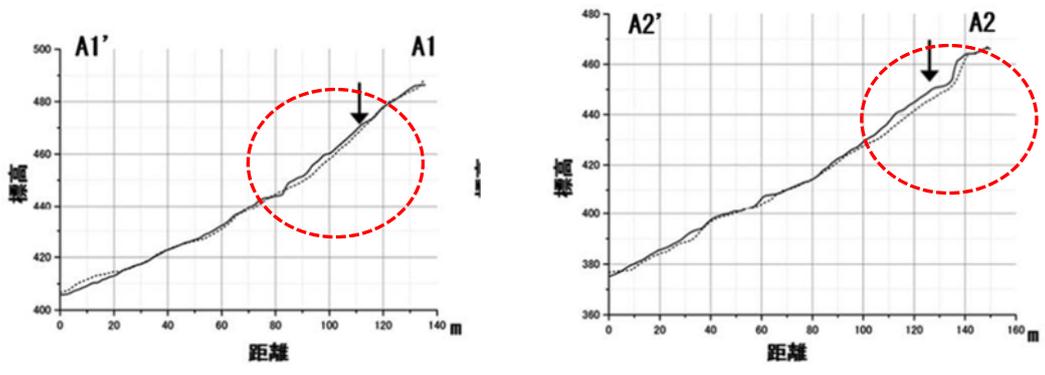
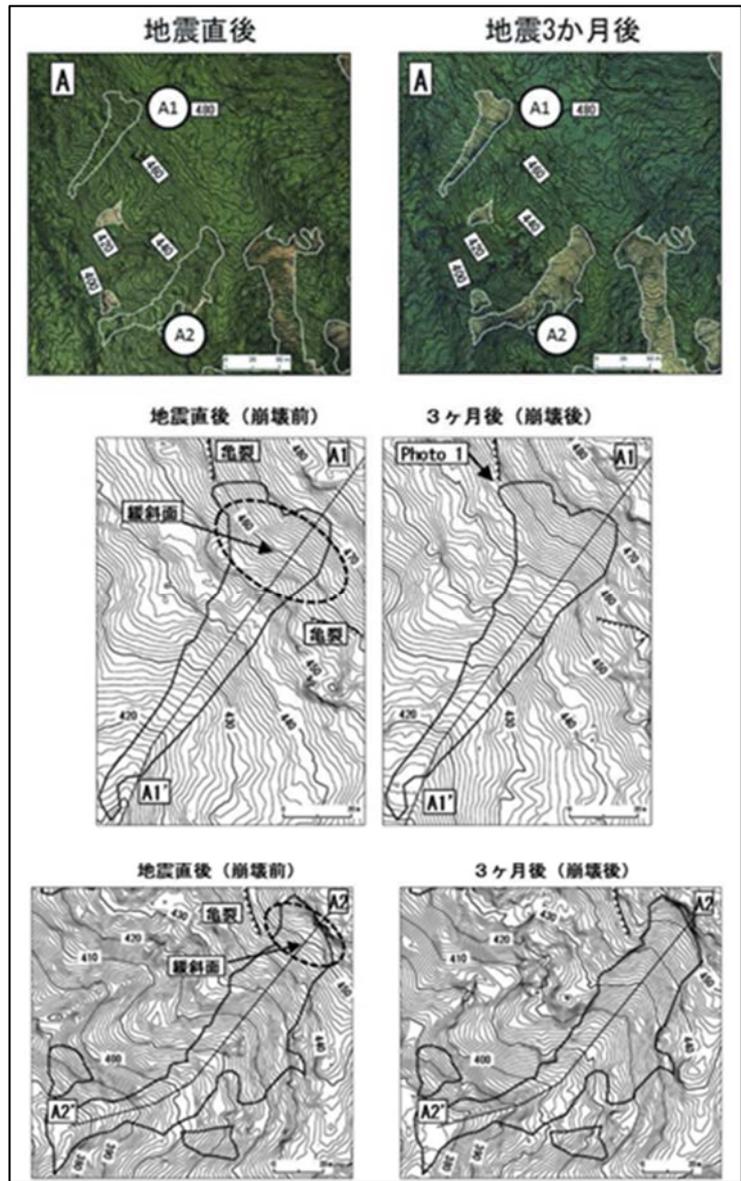


図 4.2 村上ほか (2017) による緩斜面の微地形解析例

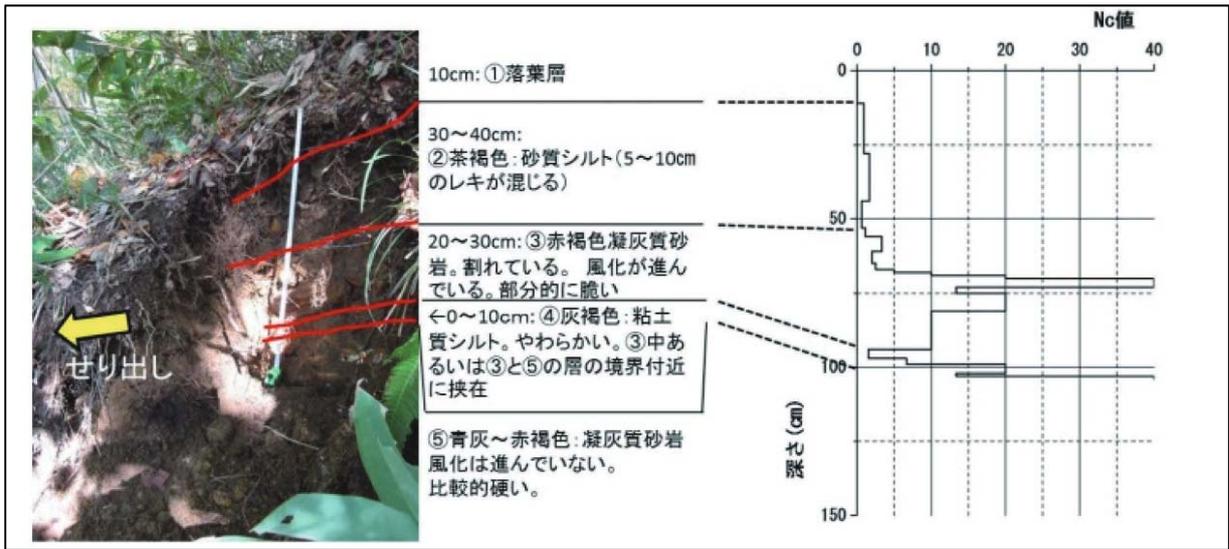


図 4.3 等高線の乱れが発生した箇所での簡易貫入試験・土壌断面調査結果

4.3.2 立野地区における等高線の乱れ箇所の状況

村上ほか(2017)で指摘された危険斜面となり得る等高線の乱れが、立野地区においても同様の危険があるかについて、地震直後のLPデータにより等高線の乱れが確認されたモニタリング亀裂(S-3)付近について現地調査を実施した。

現地調査の結果、LPデータで確認された等高線の乱れは、土砂のはらみだし地形であり、斜面途中で不安定土塊となり、一部が樹木に捕捉されている状況であった(写真4.3参照)。



写真 4.3 モニタリング亀裂 S-3 周辺のはらみだしの状況

また、地震直後の LP データと 6 月降雨などを経験した後の 2017/11/2 撮影 LP データを比較すると、地震直後に発生した亀裂の両翼に亀裂が延伸している状況が確認される。当該箇所は、45 度を超える急峻な平衡斜面であるが、地震により崩壊は発生しておらず、その後の降雨によっても崩壊はしていないが、亀裂は徐々に拡大していることが確認された（図 4.4、図 4.5）。

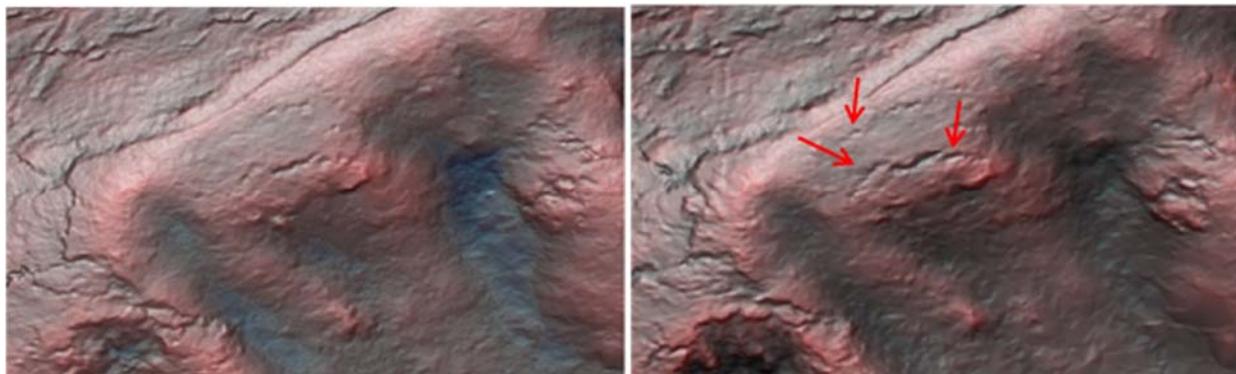


図 4.4 微地形判読図による亀裂の拡大・延伸（左：2016/4/23、右：2017/11/2）

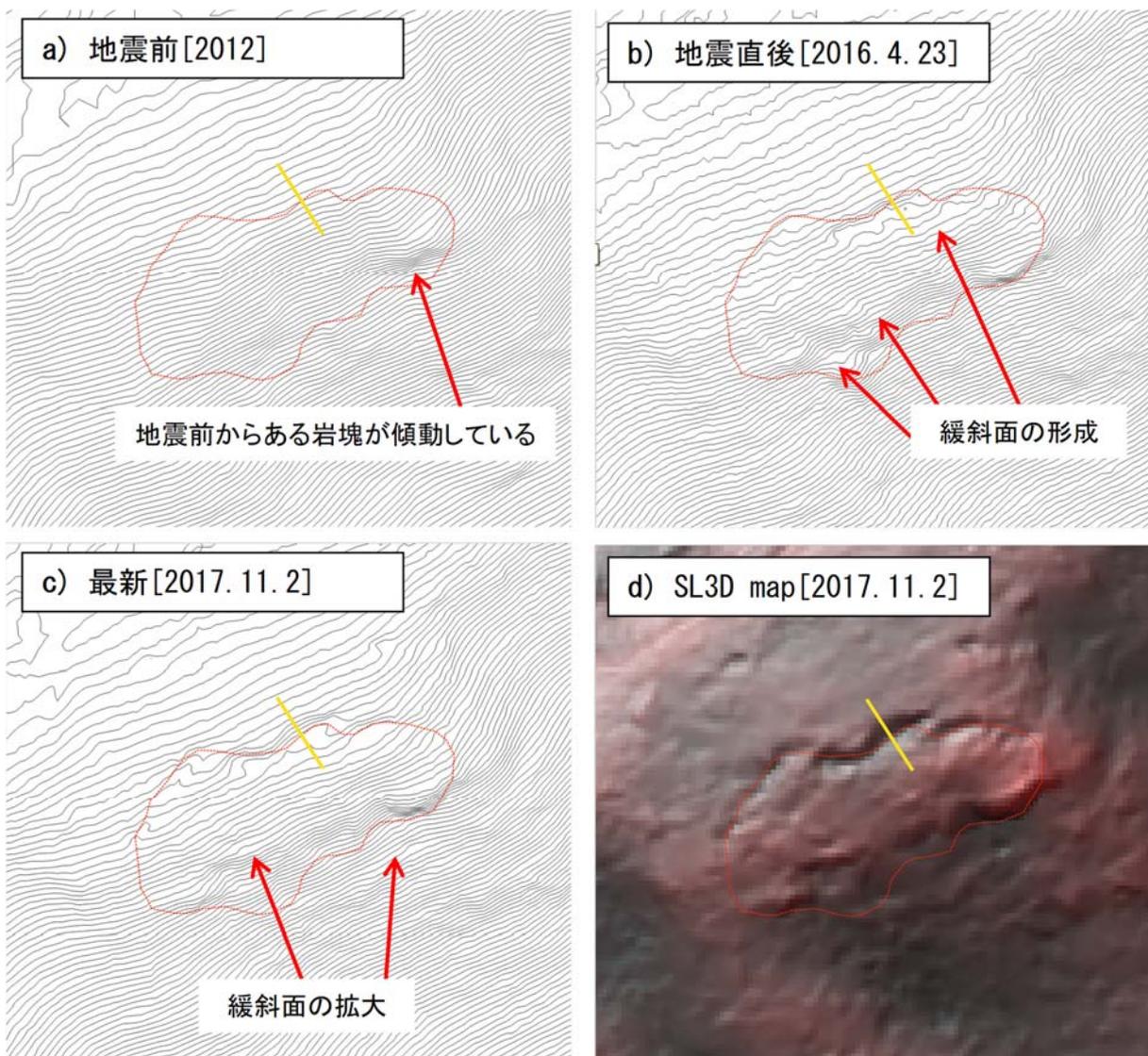


図 4.5 モニタリング亀裂 S-3 周辺の微地形解析結果

ただし、立野地区は、写真 4.4 に示すとおり表土・黒ボク土の直下に自破碎溶岩が卓越しているため、貫入試験などによる弱層の推定が困難であるが、樹木による不安定土塊の捕捉状況などを確認すると、ある程度表層の一部が地震動により変形を受けているものと考えられる。



写真 4.4 周辺の地山の地質構造

以上のことから、地震直後に直接的な亀裂が確認されなくとも、等高線の乱れなど局所的な微地形変動が確認されるような箇所では、地震後の降雨による 2 次崩壊に注意が必要であると考えられる。