

5. 熊本地震以降の降雨と土砂災害（亀裂の変状）の関連性

5.1 崩壊タイミングの整理

立野地区では、第1章に示したとおり、熊本地震以降表5.1、図5.1に示すとおり約7回の大きな一連の降雨が確認されている。特に、地震直後の2016年の4月から7月にかけて多くの一連の降雨が見られ、立野地区においてもこれらの降雨による崩壊が確認されている。

表 5.1 熊本地震以降の大きな一連の降雨（阿蘇乙姫観測所）

No.	一連の降雨※		連続雨量 (mm)	最大日雨量		備考 (降雨要因、関連災害など)
	期間	日数		雨量 (mm)	観測日	
①	2016年	4/21～4/22	125.5	125	2016/4/21	前線を伴った低気圧
②		5/8～5/11	143	72	2016/5/10	前線を伴った低気圧
③		6/18～6/25	645.5	205	2016/6/22	梅雨前線
④		7/8～7/14	478.5	179.5	2016/7/13	梅雨前線
⑤	2017年	7/4～7/9	440.5	157.5	2017/7/4	H29年7月九州北部豪雨
⑥	2018年	6/18～6/21	340	187	2018/6/19	梅雨前線
⑦		7/1～7/8	392	165.5	2018/7/6	H30年7月豪雨
参考	2012年	7/11～7/14	816.5	493	2012/7/12	H24年7月九州北部豪雨

※ 前後に24時間の無降雨期間があるひとまとまりの降雨

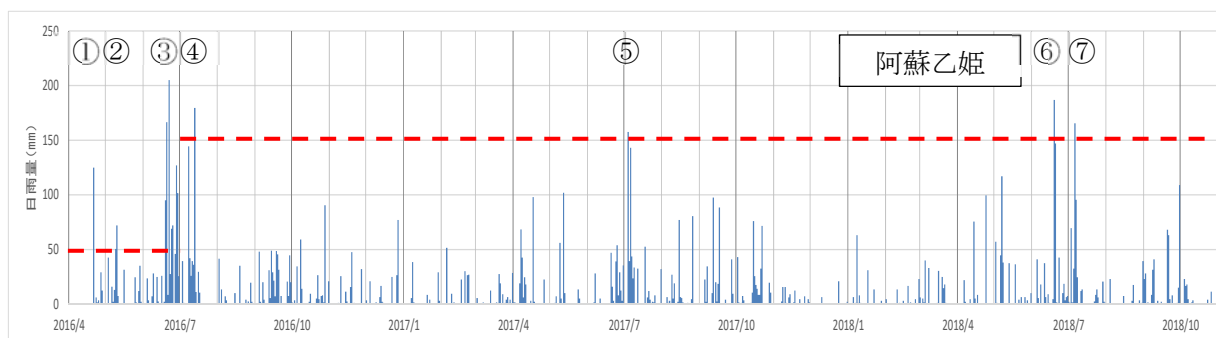


図 5.1 熊本地震以降の「阿蘇乙姫」観測所の日降雨量

熊本地震以降に国土地理院で取得された空中写真（地理院地図）は、表5.2、図5.2～図5.4に示したとおりであるが、空中写真を時系列で確認すると、4/20時点では、地震による崩壊地が確認でき、5/31時点では、表5.1に示す①、②の降雨により拡大したと考えられる崩壊が判読される。また、7月時点では、③（④）の降雨の影響が反映された結果の崩壊が判読できる。

表 5.2 熊本地震以降に撮影された空中写真

種類	管理者	撮影日	備考
空中写真	国土地理院	H28.4.20	熊本地震直後
		H28.5.31	①、②降雨イベント経験後
		H28.7月	③、④降雨イベント経験後 多くの箇所は7/5撮影 遅くとも24日までに撮影（地理院地図より）

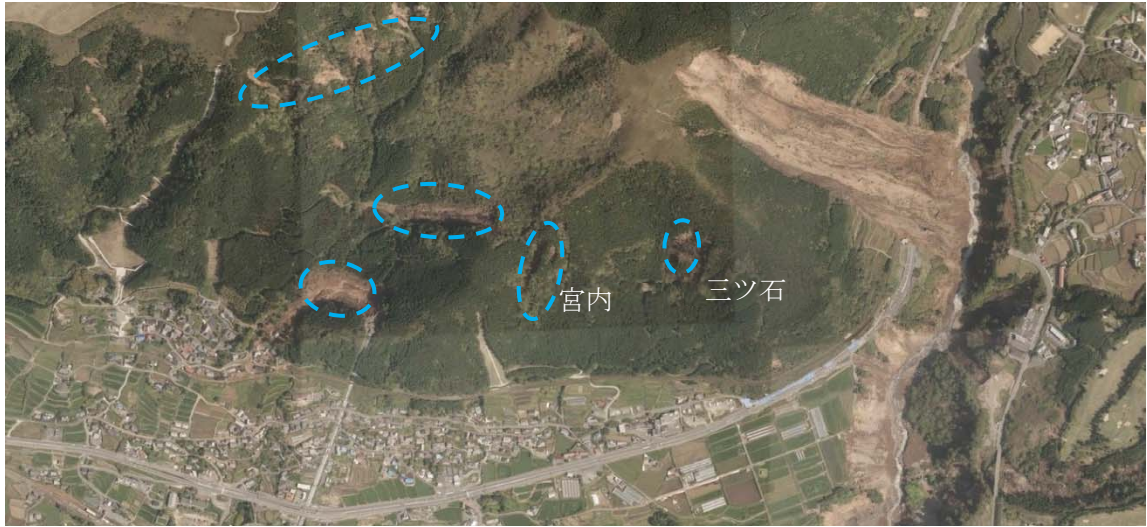


図 5.2 平成 28 年 4 月 20 日撮影写真判読

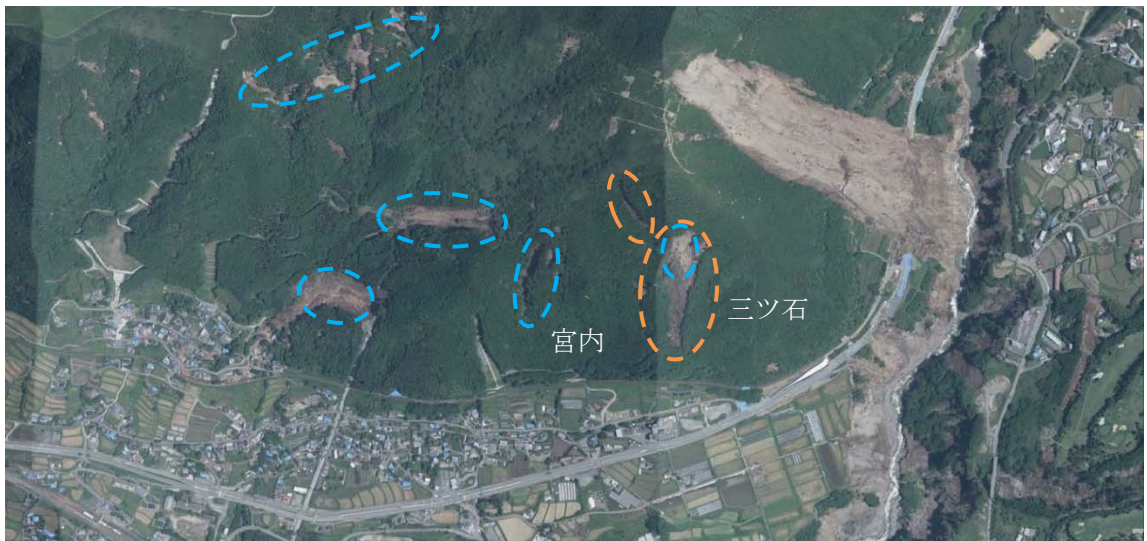


図 5.3 平成 28 年 5 月 31 日撮影写真判読

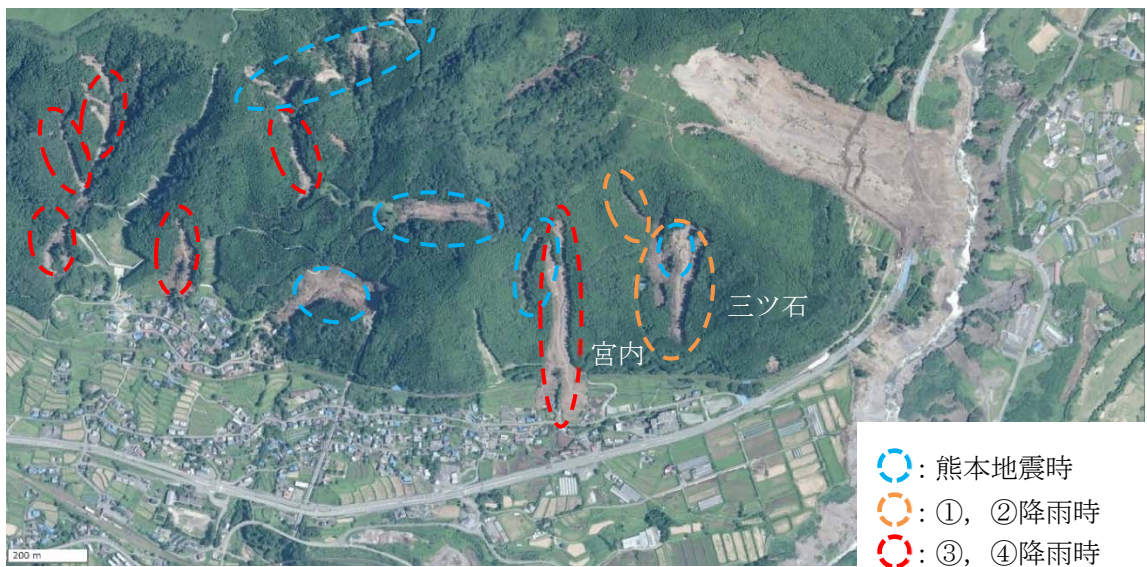


図 5.4 平成 28 年 7 月撮影写真判読

また、熊本地震以降に撮影された LP データを表 5.3 に整理した。

表 5.3 熊本地震以降に撮影された LP データ（入手は本業務使用の有無）

種類	管理者	撮影日	入手	備考
LP	立野ダム工事事務所	H28.4.19	-	立野地区の撮影日は4月19日。 計測精度は1点/m ² とやや粗い。
	熊本県 (林野庁)	H28.4.23	○	熊本県土木の撮影成果を用いる。 立野地区の撮影日は4月23日
	熊本河川事務所	H28.5.14	○	すでに三ツ石地区は降雨により崩壊
	熊本復興事務所	H29.11.2	○	阿蘇大橋大規模崩壊付近のみ
	JR	H28.7.18	○	他のデータと精度が異なり、亀裂の詳細調査としての使用が困難

空中写真で 5/31 時点で拡大崩壊が認められた三ツ石地区は、4/23 取得の LP データで既に土砂流出が確認されることから、表 5.1 に示す①4/21~4/22 降雨（以降、4 月降雨）で崩壊したと考えられる。



図 5.5 「三ツ石地区」の時系列の崩壊状況

以上のことから、立野地区では熊本地震による直接的な崩壊の他に、その後の降雨により崩壊（拡大あるいは新規崩壊）が発生していることがわかる。

そこで、表 5.1 に示した一連の降雨に対しスネーク曲線を作成し、崩壊のタイミングと合わせ、どの段階で崩壊が発生したかを整理した。崩壊のタイミングと崩壊箇所を示した図面を図 5.6 に、スネーク曲線を図 5.7 に示す。なお、参考として、当該地区において既往最大の降雨を記録した平成 24 年 7 月九州北部豪雨時の降雨量および崩壊箇所についても整理した。

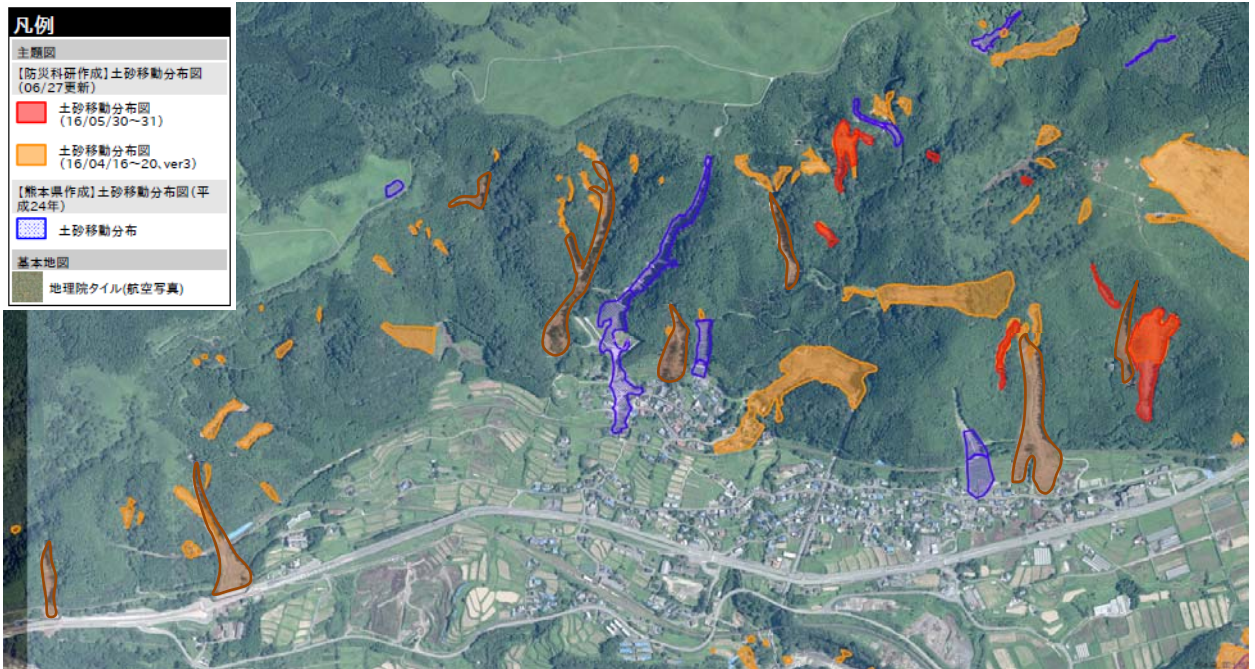


図 5.6 立野地区における崩壊箇所と崩壊タイミング

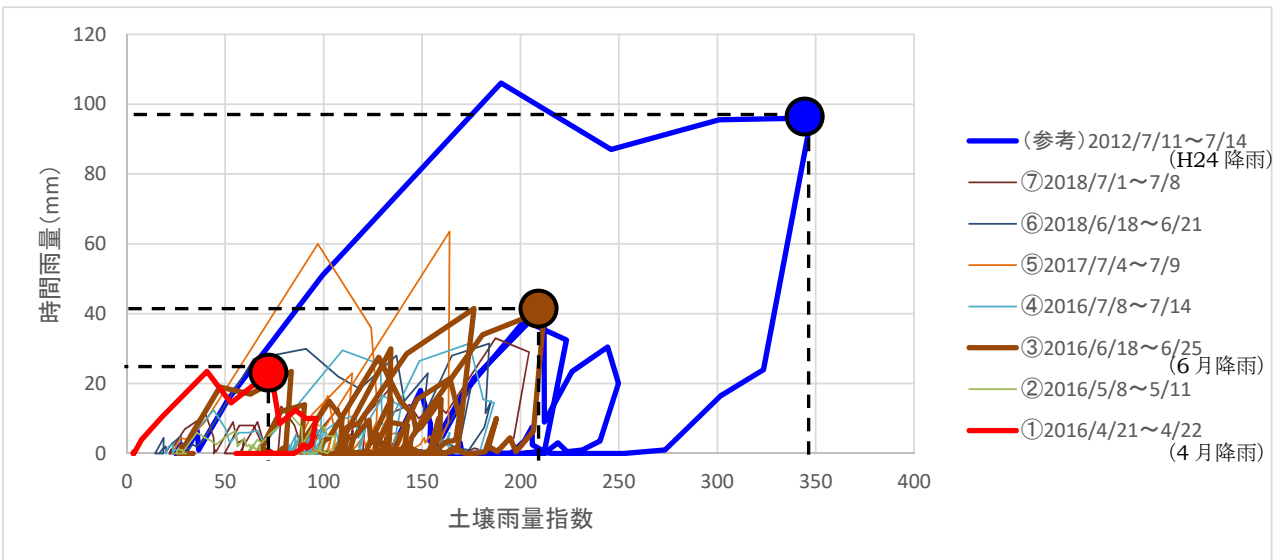


図 5.7 一連の降雨ごとのスネーク曲線

図 5.6 を見ると、地震直後には阿蘇大橋地区の崩壊をはじめとし、立野地区においても比較的大きな崩壊が 2~3 箇所確認され、それ以外は谷頭付近の崩壊が多数認められる。4 月降雨で崩壊したと考えられる箇所は、地震での崩壊箇所と重複した箇所を確認される。一方で、6 月降雨では地震で発

生した谷頭付近の崩壊を起因とした土砂流出に加え、地震では崩壊が確認されていない箇所での崩壊（土砂流出）も確認される（※7月の空中写真、7/18取得のLPデータによる確認のため、崩壊発生の可能性としては6月降雨の他に④7月降雨もあげられるが、現地の崩壊発生報告から、6月降雨により崩壊したことが確認されている）。これらは、既往最大であるH24降雨でも崩壊していない箇所であり、地震やそれに伴う崩壊・亀裂等の影響により、より小さい降雨で崩壊を誘発したと推察される。

5.2 崩壊箇所ごとのタイプ区分及び発生状況

前節で整理したとおり、立野地区では地震により崩壊が発生した箇所とその後の一連の降雨により崩壊が発生した箇所に区分される。また、地震からの影響度合いにより、その後崩壊が発生する降雨状況が異なっていると考えられる。そこで、4/23取得のLPデータと7/18取得のLPデータの差分により（地震後直後の崩壊は空中写真判読で確認）、熊本地震以降の一連の降雨で崩壊が発生した11箇所（図5.8参照）について、崩壊タイミングと崩壊状況によりタイプ区分し、その特徴を整理した。

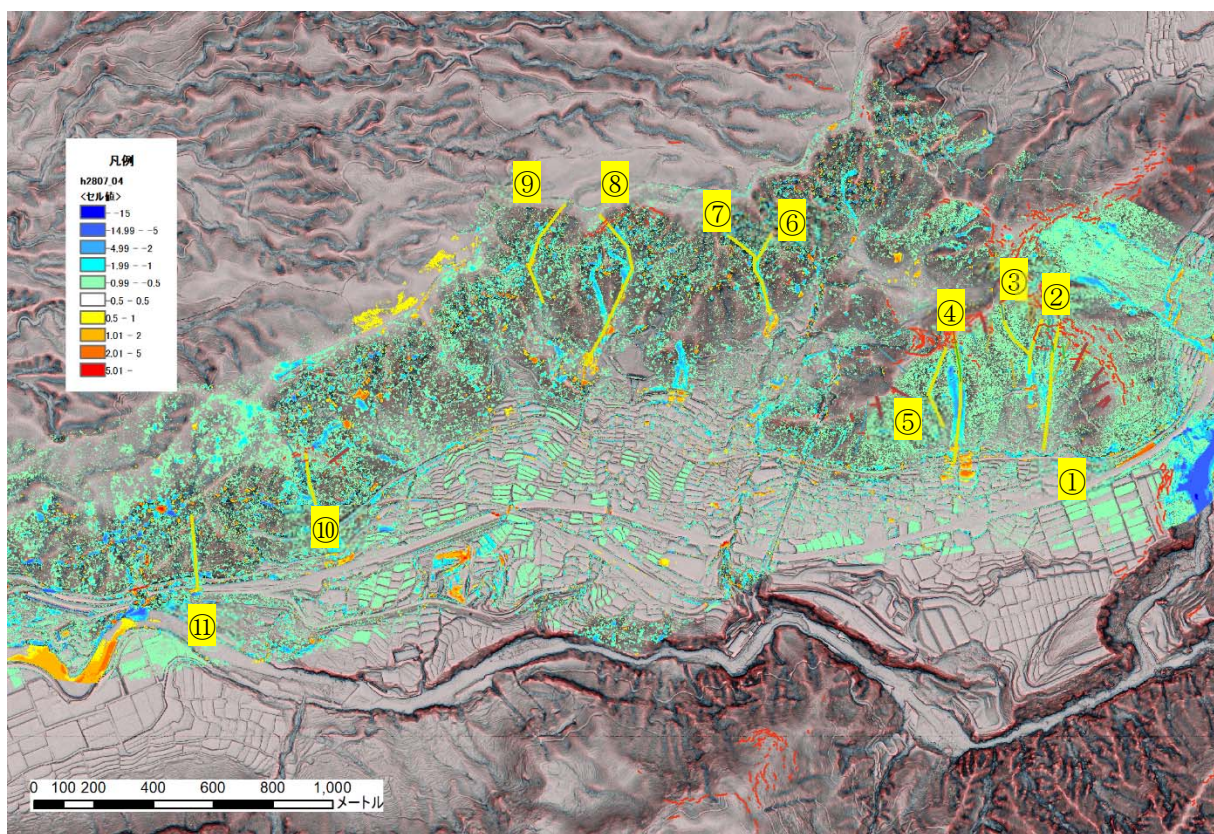


図 5.8 地震以降の奥羽により崩壊した箇所（LP 差分データ）

立野地区では、前節に示したとおり4月降雨と6月降雨により崩壊が発生している。4月降雨は連続雨量125.5mm（2日間）、最大日雨量125mmと、比較的まとまった雨ではあるが、図5.9に示すとおり時間雨量は30mmを超えておらず、H24の既往最大降雨と比較すると非常に小さな降雨である（図5.7）。また、6月降雨は連続雨量645.5mm（8日間）、最大日雨量205mmと、熊本地震

以降に記録した降雨としては最大の降雨であり、図 5.10 に示すとおり日雨量 100mm を超える日が 2 日間あり、うち 1 日は 200mm 以上を記録している。ただし、日雨量 205mm の確率規模は 2 年確率程度であり、H24 の既往最大と比べそれほど大きな降雨を経験したとは言えない。

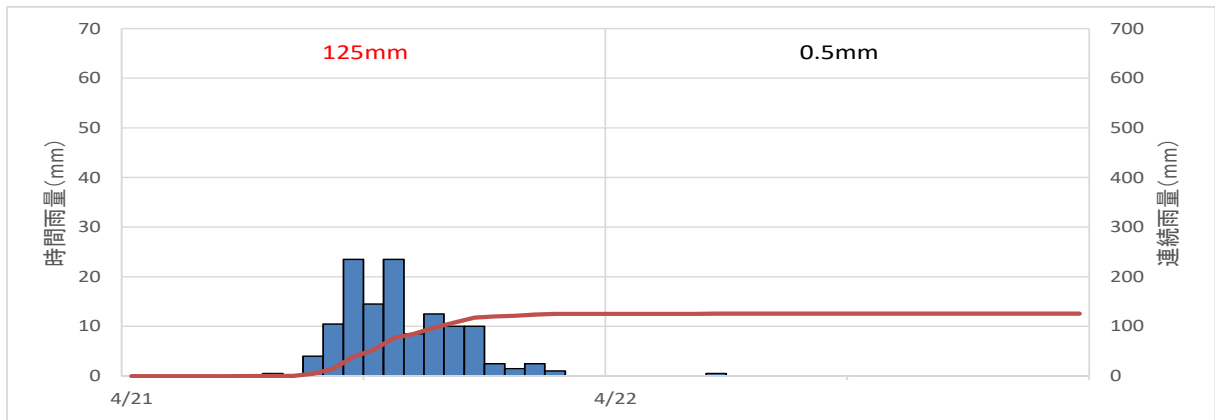


図 5.9 2016/4/21～4/22 の期間累積雨量（4 月降雨）

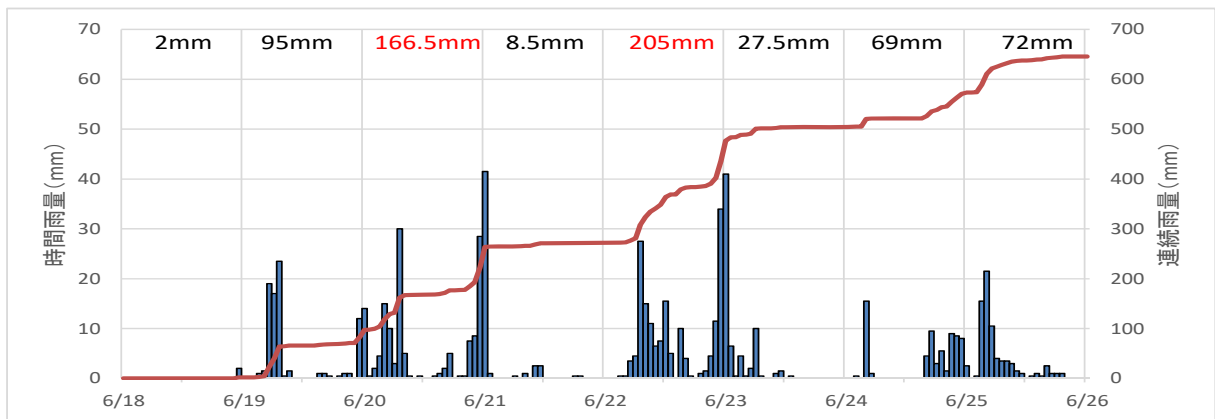


図 5.10 2016/6/18～6/25 の期間累積雨量（6 月降雨）

そこで、以下に示すとおり、過去と比較して非常に小さい 4 月降雨で崩壊した箇所を「タイプ I」、地震以降の最大降雨ではあるが、2 年確率とそれほど大きくない降雨で崩壊した箇所を「タイプ II」として区分し、それぞれのタイプの特徴を整理した。また、地震による崩壊発生や亀裂の有無により各タイプを細分化した。

- タイプ I : 熊本地震で崩壊が確認され、4 月降雨で再崩壊した箇所
- タイプ I-1 : 熊本地震では崩壊が確認されないが、4 月降雨で崩壊が発生した箇所
- タイプ II : 熊本地震により谷頭の一部が崩壊し、6 月降雨で再崩壊（拡大崩壊・下流への土砂流出）が発生した箇所
- タイプ II-1 : 熊本地震による直接的な崩壊はないものの、斜面下部が崩壊しており周辺に亀裂が多く認められる箇所
- タイプ II-2 : 熊本地震では崩壊が確認されないが、6 月降雨で崩壊が発生した箇所

上記のタイプ区分にしたがい、図 5.8 で抽出した 11 箇所について整理した結果を表 5.4 に示す。

表 5.4 各箇所の崩壊タイミングとタイプ区分

番号	崩壊タイミングおよび崩壊の状況	崩壊形態	区分
①	地震で斜面中腹まで崩壊。4/21降雨によりルーズな崩壊土砂と崩壊地周辺が崩壊	地震崩壊+4月降雨	I
②	地震で亀裂が多く発生。6/22降雨により凹地形を中心に崩壊	地震亀裂+6月降雨	II-1
③	地震での崩壊は確認されないが、4/21降雨により凹地形が崩壊(地震で緩んでいた可能性あり)	4月降雨	I-1
④	地震により谷頭のみ崩壊(緩み)。6/22降雨により谷頭崩壊を起点に下部まで崩壊・流下	地震崩壊+6月降雨	II
⑤	地震により谷頭の一部崩壊。4/21降雨により谷頭崩壊を起点に崩壊拡大(斜面中腹まで)	地震崩壊+4月降雨	I
⑥	地震により谷頭が崩壊。6/22降雨により凹地形沿いに崩壊拡大(土砂流出)	地震崩壊+6月降雨	II
⑦	地震により谷頭が崩壊。6/22降雨により凹地形沿いに崩壊拡大(土砂流出):⑥と同様	地震崩壊+6月降雨	II
⑧	地震により谷頭が崩壊。6/22降雨により凹地形沿いに崩壊拡大(土砂流出)	地震崩壊+6月降雨	II
⑨	地震では崩壊は確認されない(一部亀裂あり)。6/22降雨により凹地形が崩壊	6月降雨(亀裂)	II-2
⑩	地震では崩壊は確認されない(一部亀裂あり)。6/22降雨により凹地形が崩壊	地震亀裂+6月降雨	II-1
⑪	地震による若干のゆるみは確認される(崩壊なし)。6/22降雨により凹地形が崩壊・流下	6月降雨(ゆるみ)	II-2

タイプごとの崩壊の特徴について下記に整理した。

【タイプ I : ①、⑤】

- ✓ ①は地形を確認すると比較的緩勾配であるものの熊本地震により中腹にルーズな形で土砂が堆積しており、その土砂が流下したものと考えられる。降雨前の細密地形図はないものの4/23撮影の細密地形図においては、周辺に亀裂が多く確認されることから地震によるルーズな土砂堆積、地震による亀裂などが影響したと考えられる。
- ✓ ⑤は比較的急傾斜地であり、元地形が凹地形を形成している。地震による崩壊でルーズな形で凹地形内に土砂が堆積しており、その土砂が降雨で流出したものと考えられる。
- ✓ いずれも、地震によるルーズな崩壊土砂が周辺の亀裂や凹地形により集積された降雨により崩壊(再移動)したものと考えられる。

【タイプ I-1 : ③】

- ✓ 凹地形が発達した箇所で、地震によるゆるみの状況は把握できないものの、発達した凹地形が崩壊に関与したものと考えられる。

【タイプ II : ④、⑥、⑦、⑧】

- ✓ 立野地区で最も多く認められるタイプ。
- ✓ いずれも凹地形の山頂付近で崩壊が発生しており、周辺には亀裂も多く確認されている。
- ✓ 地震により谷頭付近に堆積していた崩壊土砂が、凹地形に集積された降雨により崩壊(拡大崩壊・下流への土砂流出)したものと考えられる。再移動には亀裂の影響も考えられる。

【タイプ II-1 : ②、⑩】

- ✓ 4月降雨の際にも亀裂の拡大が確認されており、周辺に明瞭な亀裂が多くみられる。
- ✓ 亀裂を起点とし、若干の凹地形に沿って崩壊が発生している。凹地形周辺の亀裂を起点とした

箇所からも拡大崩壊した様子が確認される。

【タイプⅡ-2：⑨、⑩】

- ✓ いずれも凹地形を呈している箇所で、一部細密地形図の判読により明瞭ではないものの小規模な亀裂（段差地形）が確認される。
- ✓ 崩壊の起点となっている尾根部（遷急線上部）は、地震前後の差分で沈降が確認されていることから、地震の影響を大きく受けていた箇所であると考えられる。

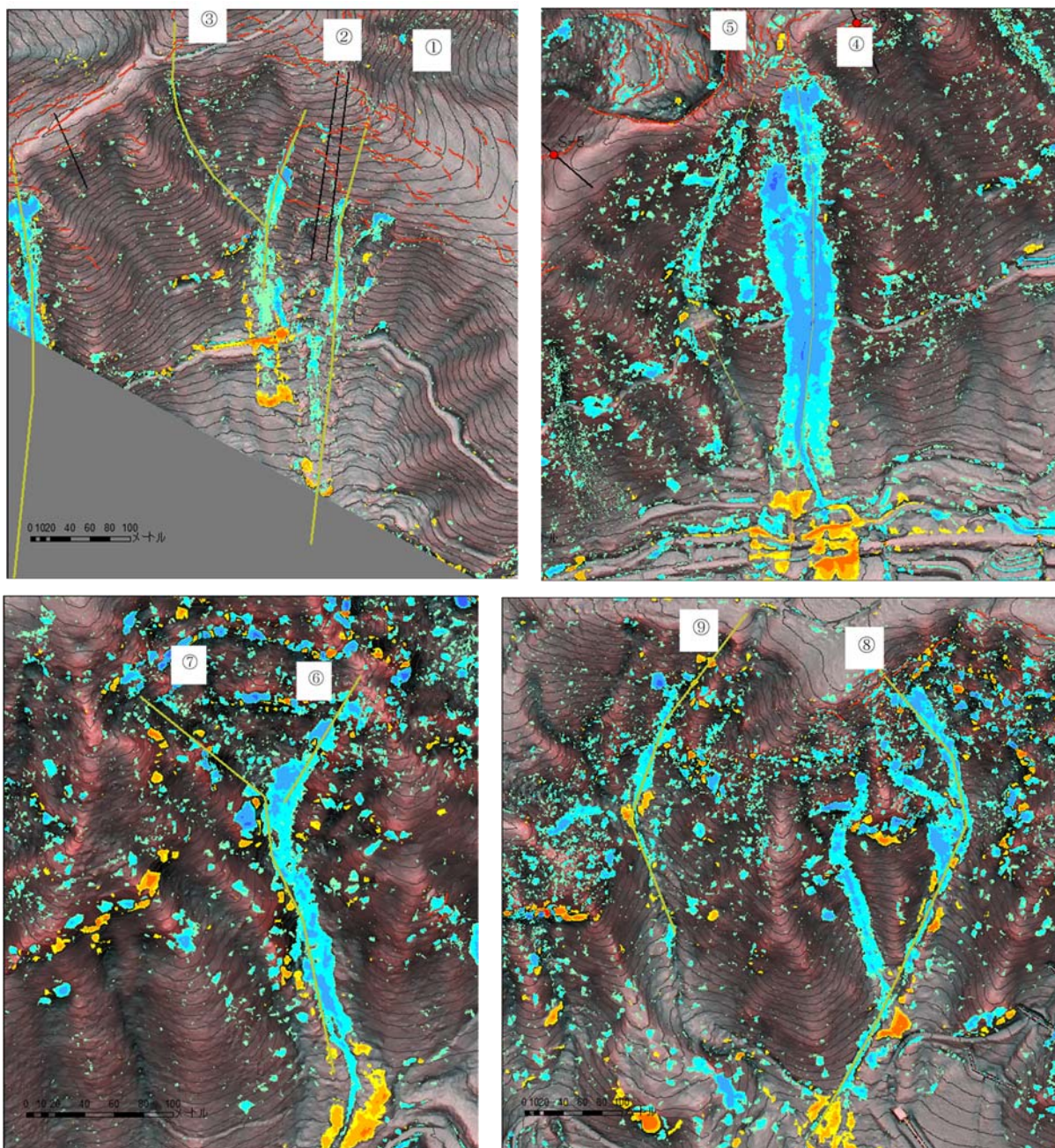


図 5.11 各抽出箇所の拡大図（①～⑧）

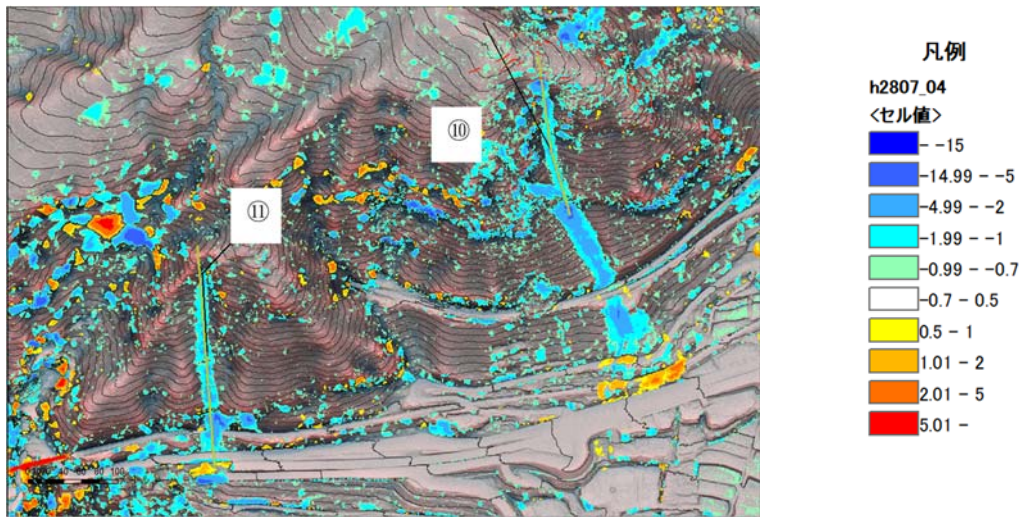


図 5.12 各抽出箇所拡大図 (⑩～⑪)

以上に示したとおり、地震により受けた斜面への影響度合い（山腹の崩壊発生や谷頭の崩壊、亀裂の発達など）や場所により、その後の降雨による土砂災害（崩壊・土砂流出）の発生状況が異なることが明らかとなった。

5.3 地震を経験した斜面における土砂災害発生状況

立野地区では、熊本地震の発生により H24 の既往最大降雨の際に崩壊しなかった斜面においても崩壊の発生が確認された。熊本地震では、特に地震動が集中する尾根部を中心に亀裂が多く発生し、遷急線直下（谷頭含む）での崩壊が多数発生した。

地震により崩壊したルーズな土砂および崩壊地周辺の落ち残り箇所では、通常では崩壊が発生しないような小さな降雨でも不安定となり崩壊の拡大や新たな崩壊の発生が確認された（タイプ I）。

また、地震により谷頭が崩壊（亀裂含む）した箇所や亀裂等により不安定な状態でかつ凹地形を呈するような箇所では、降雨が集中することで、当該箇所を起点に崩壊が拡大し、下流域まで土砂が流出している（タイプ II）。

一方で、亀裂等により不安定な状態であると考えられる箇所においても凹地形でない箇所は、現段階では崩壊に至っておらず、亀裂の拡大、明瞭化が促進された程度となっている。このような箇所は、今後、より大きな降雨が発生した場合には、不安定化が進み崩壊が発生する可能性が考えられる。

6. 亀裂発生メカニズム及び崩壊発生状況の整理

6.1 発生場所ごとのメカニズムの検討

熊本地震では、地震動が尾根付近に集中したことから、尾根部及びその周辺に亀裂が集中している。立野地区において亀裂が発達する尾根は、「2.3 亀裂の発生状況」で示したとおり、阿蘇大橋地区の大崩壊が位置する標高 754m の山頂を中心とし、北東（断層とほぼ平行）および南東（断層とほぼ直行）に伸びている（図 6.1 参照）。これらの尾根は、尾根形状が大きく異なっており山頂から南東と北東に伸びる尾根は「幅広尾根」、南西（一部北東）に伸びる尾根は「やせ尾根」となっており、亀裂の発達に大きな差異が見られる。

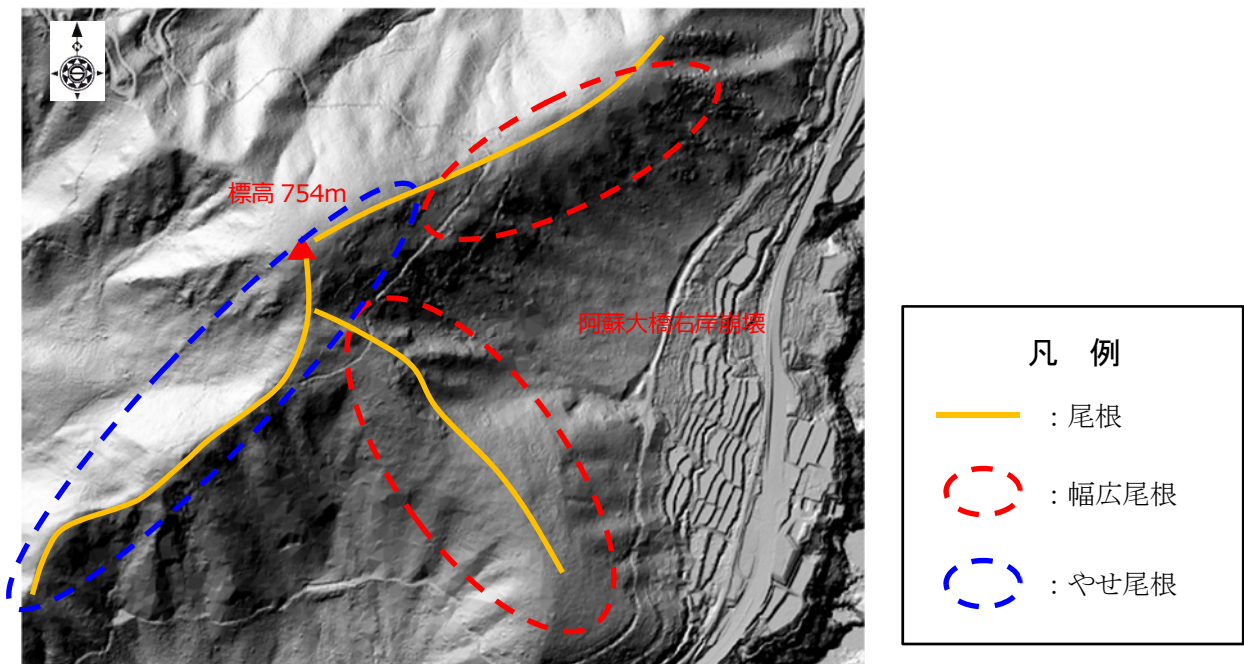


図 6.1 地震前（2012 年）の地形図および尾根形状の区分

6.1.1 幅広尾根に発生した亀裂のメカニズム

幅広尾根では、尾根に沿って陥没帯が形成され、尾根を挟み両側に明瞭な山落ち亀裂（転倒亀裂）が幾重にも重なり遷急線付近まで連続している。遷急線付近より下部では、亀裂は谷落ち亀裂となり、一部で遷急線付近を頭部とする崩壊が発生している。これらは、緩斜面部の転倒により押し出された可能性が高い。ただし、国土交通省が実施したトレンチ調査からは、亀裂が深部まで到達していないことが確認されており、先阿蘇火山岩類の上部に堆積した黒ボク土や岩屑堆積物、崖錐堆積物等の比較的脆弱な地質内で発生しているものと考えられる。

以上のことから、幅広尾根で発生した亀裂のメカニズムは、下記のとおりとなる。

- 地震動のエネルギーが尾根部などに集中することで、尾根部が突き上げ、揺さぶりを受け、破砕・脆弱化する（主に溶岩上部の堆積物内）。
- 形成された場所が緩斜面であり、溶岩内部にはすべり面等の層が連続しないため、地震によりブロックに分離し斜面下方へ倒れるように変位。
- 尾根両側の土塊が左右に転倒したため尾根部に空間が生じ陥没帯を形成したと推定される。

- 地震後の降雨等により、亀裂肩部での侵食・崩落が確認され、内部に土砂が堆積している。

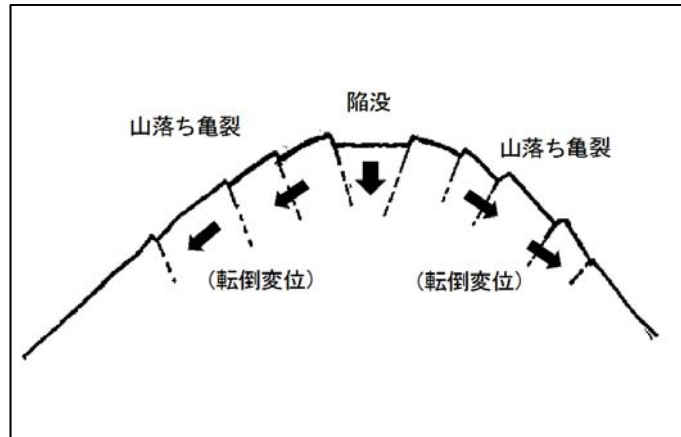


図 6.2 幅広尾根で生じた斜面変動（亀裂発生）のメカニズム（模式図）

6.1.2 やせ尾根に発生した亀裂のメカニズム

やせ尾根は、幅広尾根と異なり尾根緩斜面の幅が狭く、尾根付近まで急な傾斜が連続している。そのため、尾根を挟み両側に明瞭な谷落ち亀裂が形成されており、陥没帯や転倒亀裂は幅広尾根よりも明瞭ではない。ただし、遷急線付近を頭部とする崩壊や地すべり等が確認されており、地震により一部が崩壊し、その後の4月降雨で拡大崩壊した三ツ石地区もこのタイプとなる。

以上のことから、やせ尾根で発生した亀裂のメカニズムは、下記のとおりとなる。

- 急斜面の表層部にある脆弱部が地震動によって円弧状に崩壊するタイプと考えられる。
- このため、斜面には谷落ち亀裂が形成される。
- 急傾斜部が尾根まで達していることから、斜面の安定度が低く、崩壊が発生。
- 崩壊した場合は、土塊が残存しにくいものと推定される。
- 阿蘇大橋崩壊もこのタイプと考えられる。
- ただし、平面的に尾根部に形成している場合は、亀裂の状況や地形などにより崩壊発生の有無に変化が認められる。

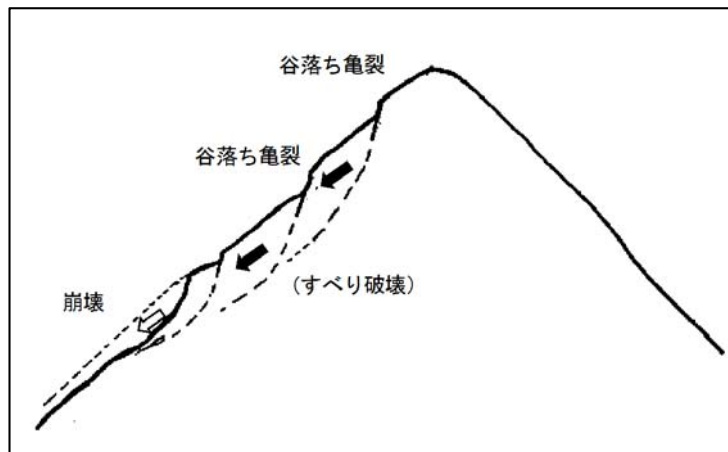


図 6.3 やせ尾根で生じた斜面変動（亀裂発生）のメカニズム（模式図）

6.2 土砂災害（崩壊・土砂流出）を誘発する地震亀裂のメカニズム

前節に示したとおり、地震による亀裂は、発生場所により異なるメカニズムを持っていることがわかった。一方で、前章に示した地震後の降雨による土砂災害（崩壊・土砂流出）の発生状況から、土砂災害の発生は、地震による斜面への影響度合いや周辺の地形状況により異なることが明らかとなった。以上のことから、土砂災害（崩壊・土砂流出）を誘発する地震亀裂のメカニズムについて以下に整理した。

6.2.1 土砂災害を誘発する可能性のある亀裂

地震の亀裂は尾根に集中しているが、尾根部や尾根部から続く緩斜面に発生した亀裂は、熊本地震以降の降雨でも崩壊発生事例は確認されておらず、地震発生から2年以上経過した現時点では、土砂により埋没が見られるなど降雨により崩壊等を誘発する可能性は低いと考えられる。

一方で、図 6.4 に示すとおり遷急線より下部の急傾斜内に発生した亀裂は、熊本地震後の降雨による崩壊が確認されており、今後も降雨による崩壊の危険性があると考えられる。

したがって、土砂災害を誘発する可能性の高い亀裂としては、遷急線より下部の急傾斜内に発生した「谷落ち亀裂」が対象になると考えられる。なお、尾根部緩斜面内にも一部で谷落ち亀裂が確認されるものの、地震後の観察では、山落ち亀裂同様、埋没傾向が認められることから、遷急線より下部に発生した「谷落ち亀裂」のみが対象になると考えられる。

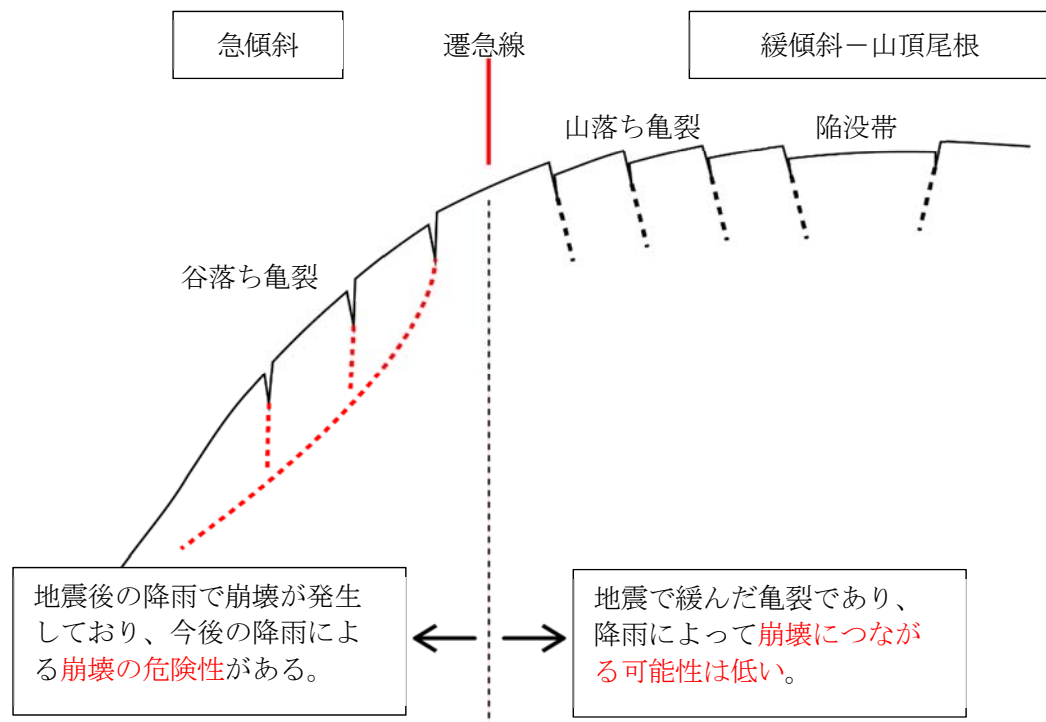


図 6.4 土砂災害を誘発する可能性のある亀裂（模式図）

6.2.2 小さな降雨で土砂災害を誘発する亀裂

前章の結果から明らかなおとおり、地震の影響を受けた斜面では、通常よりはるかに小さな降雨でも崩壊を誘発している。立野地区においては、通常では崩壊が発生しないと考えられる4月降雨により

崩壊が発生した箇所として、既に崩壊しておりルーズに堆積していた土砂の再流出、崩壊地周辺（主に滑落崖上部）に「谷落ち亀裂」が発生していた場合に、これらの現象が確認された。そのため、地震以降により小さな降雨で土砂災害を誘発する亀裂としては、図 6.5 に示すとおり「崩壊地内および崩壊地周辺」に発生した亀裂であると考えられる。

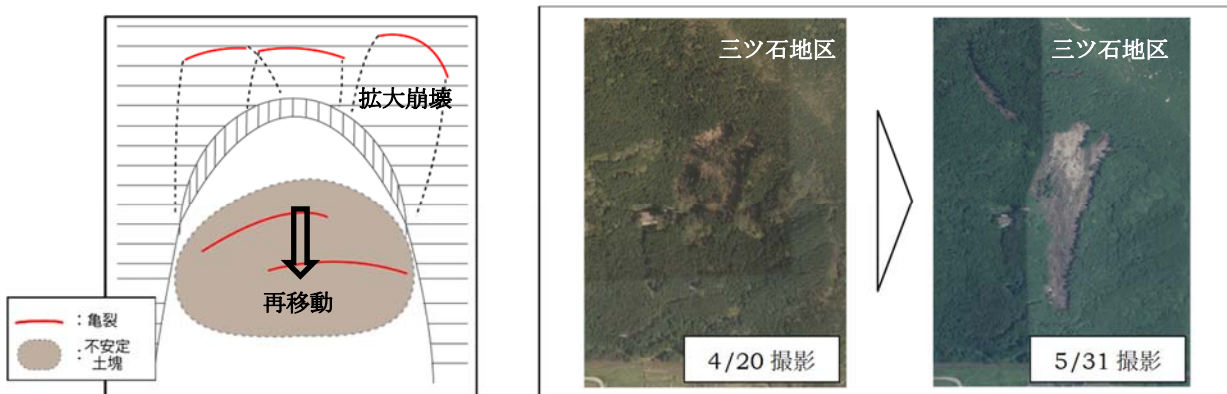


図 6.5 小さな降雨で土砂災害を誘発する亀裂の模式図（右写真は三ツ石地区の事例）

6.2.3 降雨により土砂災害を誘発しやすい亀裂

立野地区において、地震後の降雨により崩壊が発生した箇所は、先に示した崩壊地周辺を除くと、ほとんどが「凹型斜面（谷地形）」で発生しており、6月降雨で崩壊した箇所の多くが「凹地形および凹地形直上（谷頭）」の亀裂を起点として発生している。

一方で、凸型斜面や平衡斜面に発生した亀裂は、一部で亀裂の拡大や明瞭化が確認されるものの、現段階では崩壊に至っておらず、図 6.6 に示すとおり、水が集中しやすい凹地形およびその周辺（特に上部）で発生した亀裂が、降雨により土砂災害を誘発しやすい亀裂であると考えられる。

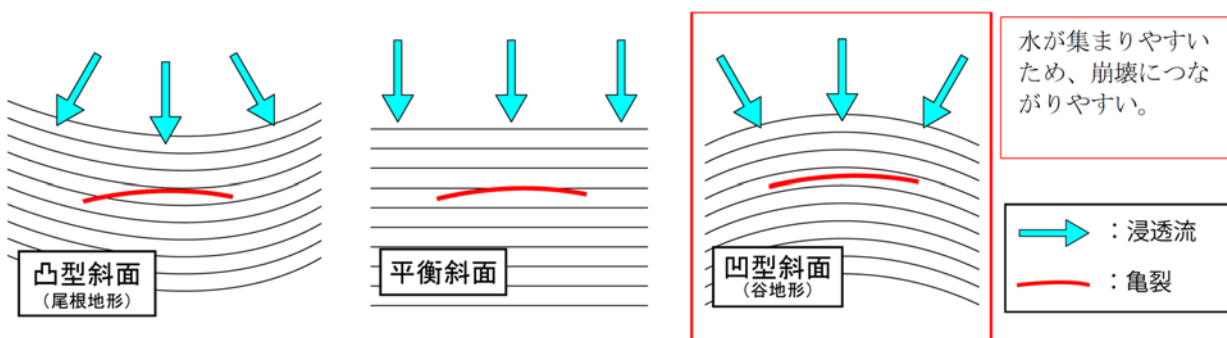


図 6.6 降雨により土砂災害を誘発しやすい亀裂の模式図（凹型斜面）

6.2.4 土砂災害を誘発する可能性のある亀裂

立野地区においては、崩壊には至っていないものの、地震後の降雨により亀裂の拡大や明瞭化が認められた事例が確認された。これらの箇所は、先に示した崩壊地や凹型斜面ではないものの、地震により局所的に等高線が乱れた箇所（局所的な緩斜面が分布する箇所）であり、等高線の乱れた箇所（地

震による影響範囲)より下部の斜面傾斜が急な場合ほど、図 6.7 に示すとおり降雨による影響範囲の拡大(移動)が大きい事例が確認された。

これらの箇所では、現段階で崩壊に至っている箇所は認められないものの、4章に示した既往文献調査では、LPデータにより等高線の乱れ(馬蹄状ないし楕円状の緩斜面地形・縦断面で凸型の地形等)が確認された箇所において、その後の降雨により崩壊が発生した事例が報告されていることから、今後、現状よりも大きな降雨を経験した際に崩壊に至る可能性が高いと考えられる。

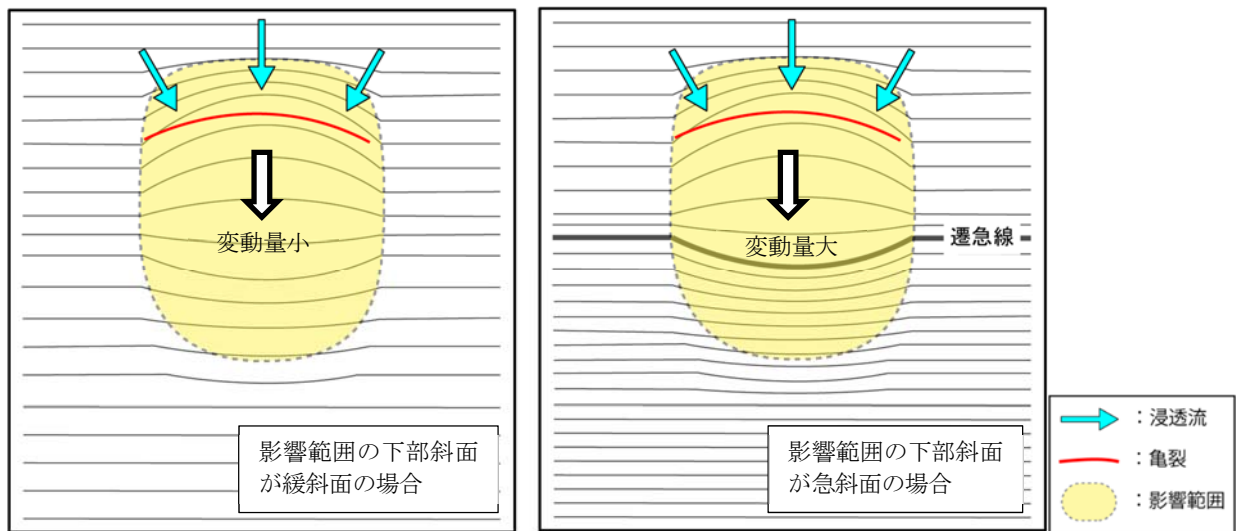


図 6.7 等高線が乱れ土砂災害を誘発する可能性のある亀裂(模式図)

6.2.5 土砂災害を誘発する亀裂の特徴および事例（立野地区）

立野地区における崩壊事例の整理により、土砂災害を誘発する可能性のある亀裂は、亀裂の明瞭度や長さ、集中度など亀裂自体の発生状況の違いよりも亀裂が発生した「場（地形）」に大きな影響を受けることが明らかとなった。特に、遷急線より下部の急傾斜地内で、すでに崩壊している箇所や水の集まりやすい凹地形で、崩壊の発生が顕著であった。

このことから、土砂災害（崩壊・土砂流出）を誘発する地震亀裂としては、亀裂が発生した「場（地形）」に大きく支配され、亀裂の危険度を検討する上では「場（地形）」に着目することが重要であることが確認できた。ただし、同じような場所に発生した亀裂（例えば凹地直上）においては、亀裂の明瞭さや集中度が高いほど、崩壊・土砂流出が発生しやすい状況にあると考えられる。表 6.1 に、立野地区における「場+亀裂の状況」による、崩壊・土砂流出、亀裂拡大の誘発事例を整理した。

表 6.1 (1) 立野地区における崩壊・土砂流出誘発事例

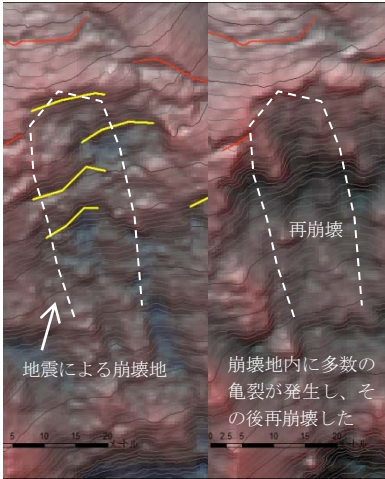
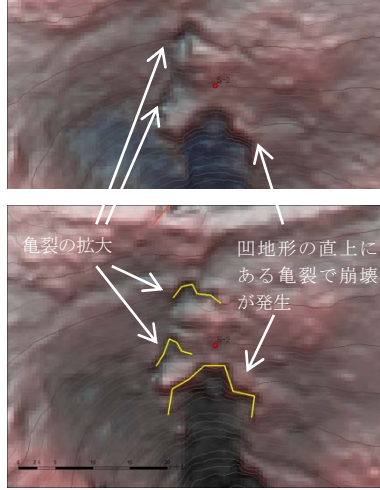
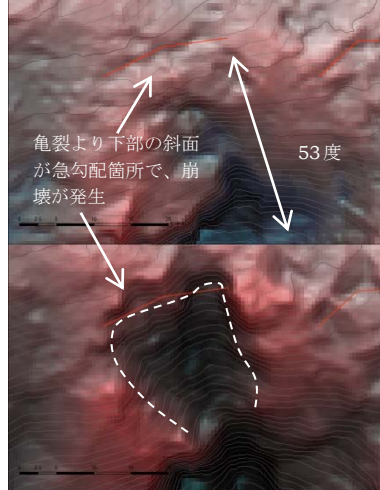
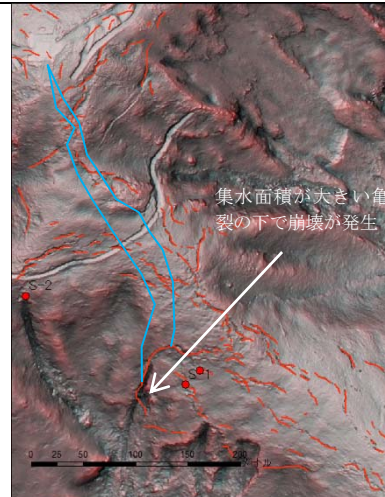
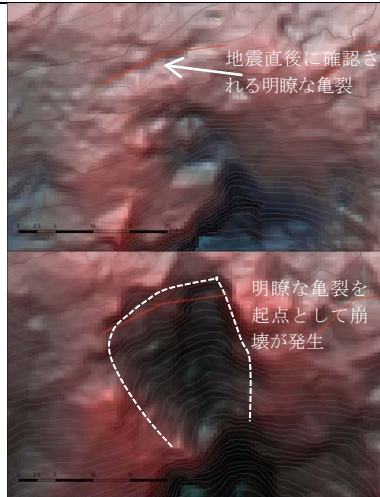
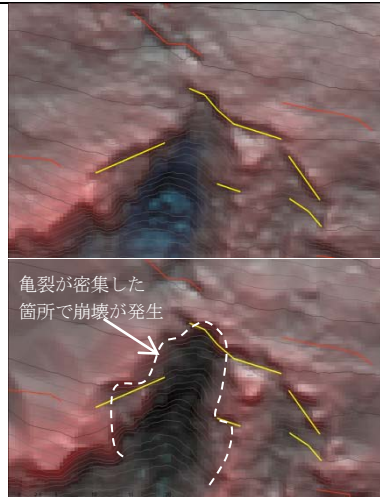
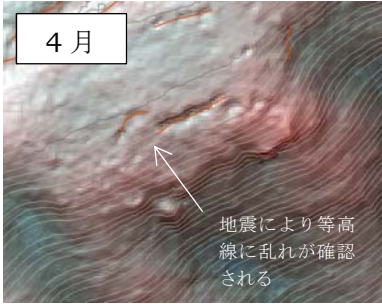
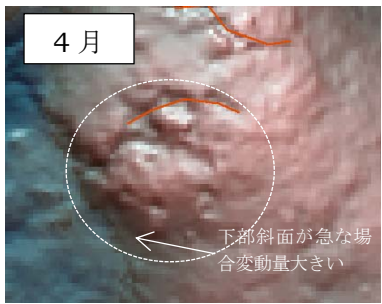
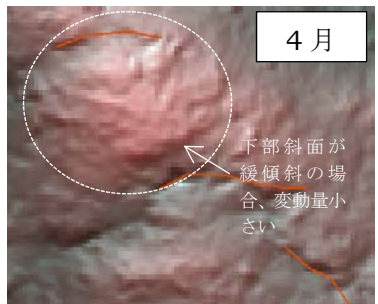
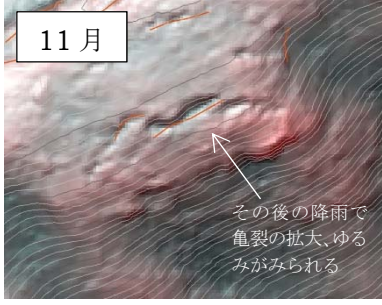
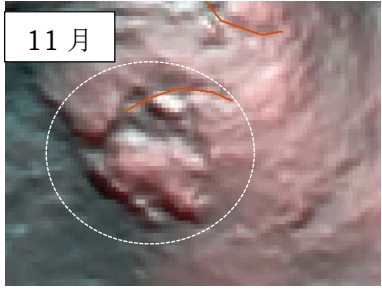
地震崩壊箇所およびその周辺	凹地形内およびその直上	凹地形+急勾配箇所
		
大きな集水面積が存在	凹地形+亀裂の明瞭さ	凹地形+亀裂の集中箇所の崩壊
		

表 6.1 (2) 立野地区における崩壊・土砂流出誘発事例

地震による等高線の乱れ	同様の地形の亀裂でも下部の傾斜により変状が異なる	
<p data-bbox="268 376 379 427">4月</p>  <p data-bbox="464 577 612 651">地震により等高線に乱れが確認される</p>	<p data-bbox="667 376 778 427">4月</p>  <p data-bbox="863 584 1011 636">下部斜面が急な場合変動量大きい</p>	<p data-bbox="1305 376 1417 427">4月</p>  <p data-bbox="1289 495 1422 600">下部斜面が緩傾斜の場合、変動量小さい</p>
<p data-bbox="268 694 379 745">11月</p>  <p data-bbox="475 875 624 958">その後の降雨で亀裂の拡大、ゆるみが見られる</p>	<p data-bbox="667 694 778 745">11月</p> 	<p data-bbox="1305 694 1417 745">11月</p> 