
同一斜面で繰り返し発生する崩壊の素因形成と発生予測

16380098

平成16年度～平成19年度科学研究費補助金
(基盤研究(B)) 研究成果報告書

平成20年3月

新潟大学附属図書館



1080034074

研究代表者 川 邊 洋
新潟大学自然科学系教授

はじめに

大規模な崩壊は、豪雨や大地震などの際だった「誘因」を直接的な原因として発生するため、従来から、降雨特性あるいは地震動特性と崩壊発生との因果関係に注目した研究が盛んになされてきた。しかし、ある斜面にある一定強度以上の降雨や地震動が作用したとき、必ずしも大規模な崩壊が発生するわけではなく、その複雑さが崩壊メカニズムの研究を困難にしてきた。

その一見複雑に見える現象には、「誘因」以外に、地質・地形、地盤強度、地下水など、さらにそれらの時間的な変化という「素因」の影響が大きく関わっている。すなわち、同程度の誘因が付加しても崩壊したりしなかったりするものは、「素因」とくに時間的に変化する「素因」に原因があると考えるのである。今までも「素因」が無視されてきたわけではなく、地質や地形については様々な調査・研究が行われてきたが、「素因」はほとんど固定されて変化しないものという暗黙の認識があったように思われる。

例えば、台湾の集集地震（1999年）で発生した最大規模の崩壊（九份二と草嶺の崩壊）では、数十年間隔で大規模な崩壊が繰り返されている歴史があり（「誘因」となった地震動は必ずしも大きくなく、それよりはるかに大きな地震動でも崩壊しないことが再々あった）、また崩壊後のすべり面で座掘褶曲が始まっているという報告や、ボーリング孔を利用した傾斜計には、崩壊後の斜面に微少な変動が現れているという報告があり、崩壊直後のすべり面に硫酸ナトリウムの白い粉末あるいは方解石が一面に析出していたことなどと考え合わせたとき、時間的に変化する「素因」が崩壊発生に重要な役割を果たしていることが想像できる。

本研究では、「素因」も長年にわたり変化していくものであり（多くの場合、斜面を不安定化する方向に進む）、「素因」がある段階に達しているときに「誘因」が付加すると崩壊を起こすが、「素因」がまだその段階に達していないときには、たとえ同程度の「誘因」が付加しても崩壊を起こさない、とくに、地盤の構造や強度に及ぼす力学的な地盤変動の影響が重要であると考え、このような視点から調査・研究を進めた。

主な調査対象地は、1999年の台湾集集地震の折りに、新第三紀層山地に発生した2箇所の大規模崩壊地（草嶺、九份二）と、大規模崩壊ではないが、当科研の初年度に発生した新潟県中越地震により多数の再活動型地すべりが発生した東山丘陵である。

本研究を実施するに当たり、台湾・工業技術研究院能源與資源研究所の王文能（現所属鋒環工程顧問企業股份有限公司）、銭正明、歐陽湘、呉建宏（現所属国立成功大学）の諸氏には多くのご協力をいただいた。とくに、GPSの貸与がなければ、斜面変動の観測は不可能であった。ここに記して深甚の謝意を表す。

平成20年3月22日

研究代表者 川 邊 洋

（新潟大学自然科学系教授）

研究組織

研究代表者 : 川邊 洋 (新潟大学自然科学系教授)
研究分担者 : 権田 豊 (新潟大学自然科学系准教授)
林 拙郎 (三重大学生物資源学研究科教授)
故近藤観慈 (三重大学生物資源学研究科准教授) (平成 19 年 5 月 8 日死去)
沼本晋也 (三重大学生物資源学研究科准教授)

交付決定額 (配分額)

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 16 年度	8,500,000	0	8,500,000
平成 17 年度	2,300,000	0	2,300,000
平成 18 年度	2,300,000	0	2,300,000
平成 19 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
総計	15,600,000	750,000	16,350,000

研究発表

(1) 雑誌論文

川邊 洋 (2004) 地震動による斜面不安定化と斜面災害、(社)日本地すべり学会シンポジウム「地震と地すべり」(査読なし)、30-37

川邊 洋・権田 豊・林 拙郎・近藤観慈・沼本晋也 (2004) 大規模崩壊後の斜面の再不安定化一予察的研究一、坡地地質災害研討會論文集 (査読なし)、C1-C7、台湾・行政院農業委員會水土保持局第一工程所・工業技術研究院能源與資源研究所

林 拙郎・梅村善信・石橋弘光・土屋 智・近藤観慈・沼本晋也・地頭菌隆・王文能・川邊 洋 (2004) 1999 年集集地震により発生した崩壊地の航空写真を用いた解析、坡地地質災害研討會論文集 (査読なし)、E1-E23、台湾・行政院農業委員會水土保持局第一工程所・工業技術研究院能源與資源研究所

渡部直喜・丸井英明・川邊 洋・権田 豊・山岸宏光・稲葉一成 (2004) 新潟県中越地震による山古志村の土砂災害の状況一特に芋川流域の地すべりダムについて一、平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集 (査読なし)、39-45、日本地震工学会

林 拙郎・近藤観慈・沼本晋也・川邊 洋・権田 豊 (2005) 2004 年夏期の台湾山地災害 (速報)、砂防学会誌 (査読有り)、57(5)、32-38

- 川邊 洋・権田 豊・丸井英明・渡部直喜・土屋 智・北原 曜・小山内信智・笹原克夫
・中村良光・井上公夫・小川紀一郎・小野田敏 (2005) 2004 年新潟県中越地震による
土砂災害 (速報)、砂防学会誌 (査読有り)、57(5)、39-46
- 林 拙郎・川邊 洋・近藤観慈・沼本晋也・権田 豊 (2005) 台湾集集地震とその後の豪
雨による土砂災害、土砂災害に関する緊急フォーラム (査読なし)、15 ~ 26、総合土砂
管理研究会主催、砂防学会・日本自然災害学会・日本森林学会九州支部後援
- 川邊 洋 (2005) 地震動による斜面崩壊の発生と新潟県中越地震、フォレストコンサル (査
読なし)、101、24-36、森林部門技術士会
- 川邊 洋 (2005) 斜面表層の振動特性と不安定化、日本地すべり学会誌 (査読有り)、42(2)、
112-114
- 川邊 洋・権田 豊・丸井英明・渡部直喜・土屋 智・小山内信智・内田太郎・栗原淳一
・中村良光・井上公夫・小川紀一郎・小野田敏 (2005) 新潟県中越地震による土砂災害
と融雪後の土砂移動状況の変化、砂防学会誌 (査読有り)、58(3)、44-50
- Kanji Kondo, Setsuo Hayashi, Shinya Numamoto, Hiromitsu Ishibashi, Hiroshi Kawabe, Satoshi
Tsuchiya and Wen-Neng Wang (2005) Topographical features of landslides caused by
earthquake in 1999 and rainfalls in 2001 in Taiwan, Proceedings of International Symposium
on Landslide Hazard in Orogenic Zone from the Himalaya to Island Arc in Asia (査読有り),
93-103
- Kanji Kondo, Setsuo Hayashi, Shinya Numamoto, Hiroshi Kawabe, Yutaka Gonda, Masahiro
Kaibori and Wen-Neng Wang (2006) Topographical changes due to heavy rainfall in the
Chiu-Fen-Erh-Shan landslide triggered by the Chi-Chi earthquake in Taiwan, Disaster
Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides (査読有り), 13-24, Universal
Academy Press, Inc., Tokyo
- 権田 豊・登坂陽介・田中将徳・川邊 洋 (2007) 新潟県中越地震により発生した芋川流
域の崩壊及び地すべりの GIS による特性解析、新潟大学農学部研究報告 (査読有り)、59、
108-113
- 林 拙郎・近藤観慈・川邊 洋・花岡正明・秋山一弥・沼本晋也・鈴木 滋・向井啓司・
福田睦寿 (2007) 2007 年 3 月 25 日能登半島地震による土砂災害の発生形態、砂防学会
誌 (査読有り)、60(2)、51-58

林 拙郎・近藤観慈・川邊 洋・花岡正明・秋山一弥・沼本晋也・向井啓司・福田睦寿・鈴木 滋：能登半島地震による土砂災害の特徴、砂防学会誌（査読有り）（投稿中）

(2) 学会発表

川邊 洋・権田 豊：新潟県中越地震の概要、(社)砂防学会・新潟県中越地震土砂災害調査研究委員会、2005.1.29、東京都

川邊 洋：被災地域に見られた斜面崩壊の特徴と今後の復旧対策、栃尾市の復興に向けての講演会、栃尾市・日本雪工学会上信越支部、2005.3.19、栃尾市

権田 豊・川邊 洋・丸井英明・渡部直喜・井良沢道也・笹原克夫・中村良光・安田勇次：2004年7月新潟豪雨災害調査報告、砂防学会研究発表会、2005.5.25、名古屋市

川邊 洋・権田 豊・丸井英明・渡部直喜・土屋 智・北原 曜・小山内信智・笹原克夫・中村良光・井上公夫・小川紀一郎・小野田敏：新潟県中越地震による土砂災害、砂防学会研究発表会、2005.5.25、名古屋市

川邊 洋：中越地震により発生した斜面災害の特徴と今後の課題、にいがた市民大学、新潟市教育委員会、2005.11.19、新潟市

林 拙郎・黒田 渉・近藤観慈・川邊 洋：2004年新潟県中越地震により発生した崩壊・地すべりの地形・地質特性、砂防学会研究発表会、2006.5.24、和歌山市

登坂陽介・権田 豊・川邊 洋・山本仁志：新潟県中越地震により発生した芋川流域の崩壊及び地すべりのGISによる特性解析、砂防学会研究発表会、2006.5.24、和歌山市

沼本晋也・林 拙郎・近藤観慈・川邊 洋・権田 豊・王文能：台湾集集地震後の崩壊斜面における弾性波速度の経年変化、砂防学会研究発表会、2007.5.23、福井市

川邊 洋：最近北陸地方で発生した地震災害、頻発する大規模地震災害を考える講演会、(社)日本技術士会北陸支部、2007.9.12、新潟市

川邊 洋：最近北陸地方で発生した地震・豪雨災害、(社)日本技術士会全国大会・第3分科会「大規模災害と危機管理」、2007.10.17、福井市

川邊 洋：地震特性と崩壊等の発生、地震による土砂災害の実態と対策に関する研修会、雪崩・地すべり研究推進協議会、2007.10.25、長岡市

目 次

大規模崩壊の発生メカニズムについての一考察	1
	川邊 洋
<u>地震とその後の降雨に伴う崩壊現象</u>	
斜面表層の振動特性と不安定化	4
	川邊 洋
1999年集集地震により発生した崩壊地の航空写真を用いた解析	7
	林 拙郎・梅村善信・石橋弘光・土屋 智・近藤観慈 沼本晋也・地頭菌隆・王 文能・川邊 洋
2004年夏期の台湾山地災害	30
	林 拙郎・近藤観慈・沼本晋也・川邊 洋・権田 豊
Topographical features of landslides caused by earthquake in 1999 and rainfalls in 2001 in Taiwan	37
	近藤観慈・林 拙郎・沼本晋也・石橋弘光・川邊 洋・土屋 智・王 文能
Topographical changes due to heavy rainfall in the Chiu-Fen-Erh-Shan landslide triggered by the Chi-Chi earthquake in Taiwan	48
	近藤観慈・林 拙郎・沼本晋也・川邊 洋・権田 豊・海堀正博・王 文能
2004年新潟県中越地震による土砂災害	60
	川邊 洋・権田 豊・丸井英明・渡部直喜・土屋 智・北原 曜・小山内信智 笹原克夫・中村良光・井上公夫・小川紀一朗・小野田敏
新潟県中越地震による土砂災害と融雪後の土砂移動状況の変化	70
	川邊 洋・権田 豊・丸井英明・渡部直喜・土屋 智・小山内信智 内田太郎・栗原淳一・中村良光・井上公夫・小川紀一朗・小野田敏
新潟県中越地震により発生した芋川流域の崩壊及び地すべりの GISによる特性解析	79
	権田 豊・田中将徳・登坂陽介・川邊 洋
2007年3月25日能登半島地震による土砂災害の発生形態	148
	林 拙郎・近藤観慈・川邊 洋・花岡正明・秋山一弥 沼本晋也・鈴木 滋・向井啓司・福田睦寿

能登半島地震による土砂災害の特徴 157
林 拙郎・近藤観慈・川邊 洋・花岡正明・秋山一弥
沼本晋也・向井啓司・福田睦寿・鈴木 滋

地震特性と斜面災害—最近北陸地方で発生した地震を例として— 163
川邊 洋

崩壊跡斜面の地形変化と強度低下

大規模崩壊後の斜面の再不安定化—草嶺および九份二の崩壊を例として— 165
川邊 洋・権田 豊・林 拙郎・近藤観慈・沼本晋也
銭 正明・王 文能・歐陽 湘

GPS による崩壊跡斜面の変動観測 172
川邊 洋・権田 豊・林 拙郎・近藤観慈・沼本晋也

台湾集集地震後の崩壊斜面における弾性波速度の経年変化

—地震崩壊発生から8年間の変化傾向— 181
沼本晋也・近藤観慈・林 拙郎・川邊 洋・権田 豊・王 文能

草嶺崩壊地（台湾）の崖の後退 190
林 拙郎・近藤観慈・沼本晋也・稲葉誠博・川邊 洋・権田 豊

大規模崩壊の発生メカニズムについての一考察

川邊 洋 (新潟大学農学部)

本科研では、次の3項目に注目して、観測と理論の両面から考察を加えることを企図した。これらの現象は、同一斜面で繰り返し崩壊を発生させる可能性が高いため、大規模崩壊後の斜面ではとくに重要である。

- 1) 繰り返し崩壊を起こす斜面での、上載荷重の急激な除去による応力開放。
- 2) 流れ盤の斜面で見られる、重力性クリープによる岩盤の緩みと座屈現象。
- 3) 塩類を過飽和に含んだ地下水からの結晶成長に伴って発生する応力。

さらに、これらの現象は、①どの程度普遍的に起こるのか、②斜面の不安定化に対して力学的に有意な影響を及ぼすのか、などの点についても明らかにしなければならない。繰り返し崩壊を起こしている斜面であれば、過去に崩壊を起こしたときの誘因の強度が推定できるので、この崩壊発生時に、素因の変化による斜面の脆弱化がどこまで進行していたか判断でき、この結果を利用すれば、継続的な斜面の観測により、今後の崩壊発生の時期の予測が可能となるであろう。

1. 崩壊現象の概念モデル

崩壊の準備段階から発生にいたる全過程を、一連の破壊・摩擦すべりの過程として理解し、崩壊発生にいたる概念モデル、さらには定量的モデルを構築することは、大規模崩壊の予測とそのための観測方法を確立する上で重要であり、様々な調査・研究が行われている。ここでは、崩壊に至る過程を次のような段階に分けて考えてみる。

崩壊準備段階

①斜面内の何箇所かの脆弱部で、重力作用、降雨あるいは地震等の原因により、局所的な破壊が発生する(局所破壊面の形成)。新たに亀裂を生み出すためには、ある程度のエネルギーが必要であるが、再滑動型あるいは本科研で対象としている大規模崩壊跡斜面では、それほど大きなエネルギーを必要としないかもしれない。

②次の段階では、各局所破壊面が拡大していく。破壊の伝播が強度の大きい部分に達した場合には、そこで破壊は止まる。したがって、破壊面の広がり方は、強度の大きい個所の分布状況やその強度の大きさに制約される。一般的には、それぞれの破壊域が一気に結び付いて、全面的な崩壊現象に至ることはなく、局所的な破壊面のクラスターが斜面内に分布する、不安定な状況が維持されると考えられる。この段階の破壊の伝播は、パーコレーションの原理で説明できるようなメカニズムであろう。

ここで生じた局所破壊面に水が滲入すると、クラック先端の拡大が促されたり、さらなる摩擦強度の低下により、すべりやすい状況が作られる。場合によっては、水に多量に溶解している化学成分が、狭小な隙間で結晶成長を起こし、接着面の固着度が高まることも考えられる。台湾の九份二崩壊のすべり面では、一面に方解石が析出し

ていたが、たとえ固着度を高めていたとしても、方解石の存在は斜面内部に既にクラックが発達していたことを示している。

③②の段階とほとんど同時に、重力の作用により破壊面でのゆっくりとしたすべりが始まる。この動きが強度の強い部分（②で破壊面の拡大を阻止した固着部分）に次第に歪みを蓄積し、その結果応力が集中して不安定化する。この段階になると、微小な変位を GPS 観測等によって抽出したり、破壊そのものや破壊面でのすべりを AE 観測等によって捉えることにより、前兆を把握することが可能かもしれない。

誘因付加→崩壊発生段階

④固着部分の面に沿って岩盤をすべらそうとする剪断力が、地震等の誘因によりある値を超えると、急激に全面的なすべりに発展する。すべり面に、急激な破壊で一気にすべる部分、まだ持ちこたえている部分、ゆっくりすべる部分が混在している場合には、斜面の動きに不均一さが見られることになる。単純な全面すべりは、次の3通りのいずれかに帰着する。

→ すべり面の摩擦が減少し、一方的に加速して崩壊に至る。

→ 加速した後、摩擦がある程度働き、等速あるいは間歇運動的な地すべりが続く。

→ 一旦加速した後、大きな摩擦が働き、減速して停止する。

2. 摩擦法則の適用

崩壊過程を記述する方程式には、すべり面についての摩擦法則と斜面に掛かる力が関係してくる。降雨は摩擦の減少をもたらす、地震力は応力の増加をもたらす。すべり面での応力が摩擦強度を上回るとすべりが発生する。

すべり面とは固体と固体の接触面であるが、微小な凹凸により、微視的に見ると接触面と非接触面が生じている。すべり面の摩擦強度は、全すべり面積に対する微視的な接触面積の割合で表すことができる。この微小な凹凸が、すべり面に地下水が滲入することにより崩れたり、すべりにより摩耗して、微視的な接触面積の割合が減少していく。

ここで、上記の③と④の段階、すなわち崩壊の準備から発生を連続した現象として理解するために、地震学の分野で発展してきた「速度・状態依存摩擦則」を適用してみる。「状態依存」とは、接触時間の対数に比例して静止摩擦係数が大きくなる、すなわち接触時間が長いほど真の接触面積が増えることを指している。また、「速度依存」とは、動摩擦係数がすべり速度の対数に比例して変化することを意味している。

一定の速度 V ですべるときの摩擦係数を μ 、一定の速度 V_0 ですべるときの摩擦係数を μ_0 として ($0 \leq \mu$ 、 $\mu_0 \leq 1$)、次式を仮定する。

$$\mu = \mu_0 + c \cdot \log(V/V_0)$$

$c < 0$ (速度弱化) の場合、加速すると摩擦が減少し、ますます加速する。逆に、減速すると摩擦が増大し、再び固着する。

$c > 0$ (速度強化) の場合、加速すると摩擦が大きくなり減速、逆に減速すると摩擦が小さくなり加速、この過程を繰り返し、減速と加速がバランスした速度でゆっく

り定常的にすべる。したがって、定常すべり域は、単に摩擦が小さいだけでなく、急激なすべりに対してはバリアーにもなる。水を含んだ粘土が接触面に介在する場合などが該当する。

cの正負を決める要因の1つとして、断層すべりでは温度が挙げられている（接触面が高温になるほど摩擦は急減する）。それより遙かに小さい温度・圧力条件下ではあるが、すべりにより発生する摩擦熱の影響（cや水などへの影響）が注目される。

④の3通りの場合を、上式に則って表現すると、次のようになる。

→ 固着部（ $c < 0$ ）が急激にすべり出した後は加速する一方で、その動きに定常すべり域（ $c > 0$ ）が引っ張られ、崩壊が完了する。

→ 固着部（ $c < 0$ ）が急激にすべり出した後も、斜面全体では定常すべり域（ $c > 0$ ）の動きが卓越している。

→ 固着部（ $c < 0$ ）は、急激にすべり出した後、卓越した定常すべりに引っ張られて減速し、摩擦が増大して再び固着する。あるいは、 $c < 0$ で、cの絶対値のもっと大きい（摩擦の大きい）領域にぶつかる。

本科研のテーマである「同一斜面で繰り返し発生する崩壊」は、ほぼ決まった発生場所と規模を持っているとみなしてよい。③の段階で、固着部に歪みが蓄積していく速度はほぼ一定であろう。崩壊の発生は、その歪みを一気に解放する誘因の発生時期とその規模に左右されるが、もし誘因が定期的に襲ってくるのであれば、崩壊の発生間隔もほぼ一定となる。

1999年の台湾・集集地震で発生した草嶺崩壊は、本科研の出発点ともいえる興味深い崩壊であるが、 10^4 m^3 規模の地震による崩壊のみに注目すると、崩壊発生間隔は60～80年であり、それより短い期間で素因の形成が行われたはずである。一方、崩壊後44年経過した時点で発生した大地震では崩壊の記録がない。草嶺斜面では50～60年かかって崩壊を起こしうる素因が形成されると考えてよいのではないか。

草嶺と同時に発生した九份二の崩壊では、崩壊跡斜面の下部に座屈褶曲が発達してきた（草嶺では斜面脚部が解放されているためか、目立った座屈褶曲はない）。この座屈褶曲を上記の考え方で解釈すると、次のように表現できる。

斜面上部部を定常すべり域、斜面下部部を固着域（面同士の固着というより斜面脚部が物理的に押さえられている）とみなす。斜面上部部がゆっくりすべることにより斜面下部部に応力が集中する。応力のかかり方によっては、岩盤のレオロジー的性質により褶曲してくるが、褶曲が激しくなると亀裂が入る。現在はこの段階にあるが、亀裂が発達して、いずれ斜面上部部と下部部が分断された状態になる（固着域が破壊される）と、崩壊の準備ができたということになる。

本成果報告書の前半は、台湾における地震とその後の降雨による崩壊、新潟県中越地震など最近の地震による崩壊現象の報告である。後半は、崩壊跡斜面の地形変化や強度変化を継続観測した結果を整理し考察を加えたものである。