

令和3年8月24日（火）

名称：関東支部創立15周年記念シンポジウム
テーマ：地すべり技術の現状と課題－会長経験者に聞く－
主催：公益社団法人日本地すべり学会関東支部

次第：
13:15 接続開始
13:30 開会
13:30-13:35 挨拶 櫻井正明（日本地すべり学会関東支部長）

講演

○落合博貴（一般社団法人日本森林技術協会 技術指導役）

13:35-14:10 「最近の土砂災害と森林の機能について（仮題）」（資料1）
○土屋 智（静岡大学名誉教授、国土防災技術（株）斜面環境研究所 所長）
14:10-14:45 「九州北部豪雨に伴う斜面崩壊の発生場所の特徴」（資料2）
○檜垣大助（弘前大学名誉教授、日本工営（株）国土基盤整備事業本部 理事・技師長）
14:45-15:20 「地形情報を活かした斜面災害リスクへの対応」（資料3）
15:20-15:30 休憩
15:30-16:30 質疑応答・意見交換（講演者間）
16:30 閉会

九州北部豪雨災害 調査団派遣

日程：2017年7月14日～16日、8月9日～11日

団員：落合博貴、後藤聰、櫻井正明
樋垣大助、若井明彦、福岡浩
中村真也、木村匡



日本地すべり学会

平成29年（2017年）7月福岡・大分豪雨による調査災害について

- 【九州災害の特徴について】
今回の豪雨災害の特徴は以下の通り。
① 7月5～6日にかけて約24時間で、福岡県により福岡県朝倉市および別府市から大分県別府市にかけての総計で豪雨（90ミリから300ミリ）による大雨が発生した。
② 地震活動背景：火山活動、震度計、地震波等多種で、地震発生に特徴的な地震にともない。主にこれらは暴風や風化物・堆積物に起因して発生したのみである。
③ 地形的特徴：尾根まで浸透する性質の悪い土地（谷津田地）で地盤をさむる土層が不安定にして堆積したとされる。
④ 土質：土質が多く含まれていたため調査して土質がなっても多くのもの多く、表面を削除する。
⑤ 流れし土石流は深く、斜面を侵食して土砂を含み堆積する傾向があった。
⑥ 傷害特徴：より深刻にあった見本は、土砂とともに流れで泥水化した。
⑦ 地震波は震度でもあるが地盤を変形することで瓦礫として人間の骨格が重く、必ず骨折が多かったため、死骸も死骸なもののが目立った。
⑧ それらの森林は林業地帯にあり倒木を大量にする働きをしていた。異常に重い倒木が倒木の表面に集中して倒木での表面の倒木を詰めて斜面が崩壊したのみならず。
⑨ 一部の大規模な斜面に付いては、表面の斜面地帯に沿って斜面の剥離が進んでいたとみられる。

【今後の対応について】

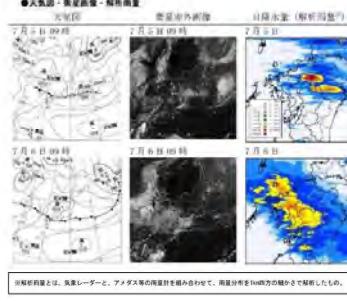
- ① 今後もこうした災害を防ぐ・経済のため、特に二度災害の折からのある暴雨については、土石流センサー等の機能などに取り組む防災整備をとることが重要。
② 地震地盤地帯、地盤が弱くなる地盤のための斜面モニターリング装置の実施および地盤の定期対策。
③ 沿河に作成した防災ダムなど、適切な防災施設の整備。
④ 斜面への斜面を土止めするため、斜面に深い森づくりに寄り。
⑤ これらの災害の原因を取り直しに考慮するためのゾート対策を効果的に構成させつつ、災害の防止・対策を図ることが必要。
⑥ 地震学：今回の地震活動が地盤を変形させ、斜面の崩壊抑制のための調査の実施を強調。
⑦ 今後、災害予測技術の実証などを活用して斜面を守るために導入した活用を検討。

2017年7月16日記者会見資料（日田市役所）

資料 1

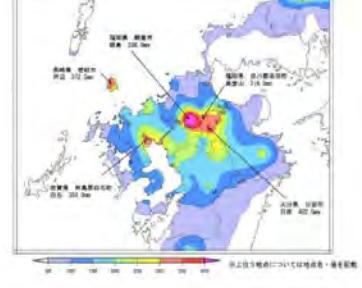
公益社団法人日本地すべり学会関東支部
創立15周年記念シンポジウム
地すべり技術の現状と課題

令和3年8月24日（火）13:30～16:30
航空会館2階204（東京都港区新橋）



参考：7月5日0時～7月6日24時の観測データ（九州北部地方）

・期間降水量分布図（7月5日0時～7月6日24時）



（気象庁：平成29年7月九州北部豪雨について）

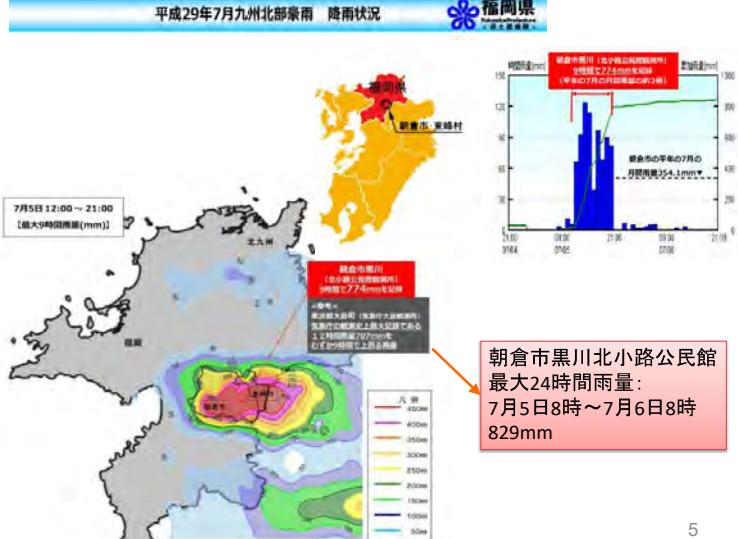
1

4

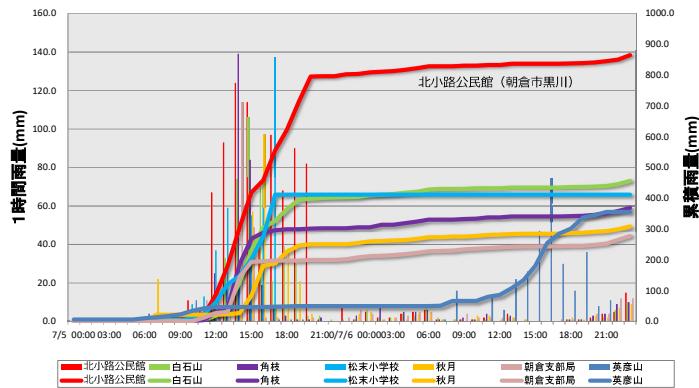
落合博貴（一般社団法人日本森林技術協会 技術指導役）

最近の土砂災害と森林の機能について

2017年九州北部豪雨災害



5



崩壊地からの流出土砂は、約1km下流の朝倉市黒川疣目地区に堆積。

出典Webサイト「福岡県河川砂防情報」
http://www.kendoseishi.pref.fukuoka.lg.jp/bousai/servlet/bousaiweb.servletBousaiGraph?sy=grn_rain&rg=1&wl=0&sn=248&tmg=2

6

9



7



10



8



基岩の上部から崩壊したと推測される大規模な崩壊地。
左岸側の渓流を流下した土砂による脚部侵食の可能性。

11



12

森林と侵食・崩壊現象との関係



15



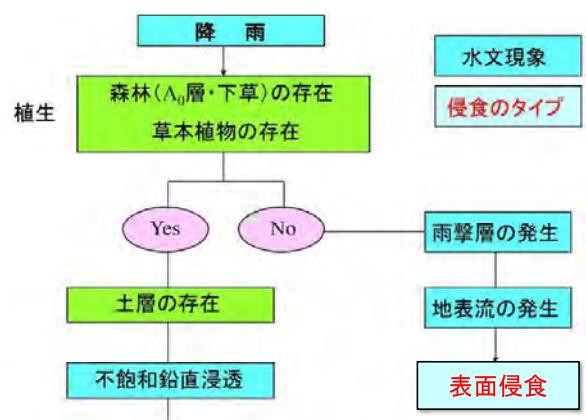
13



16

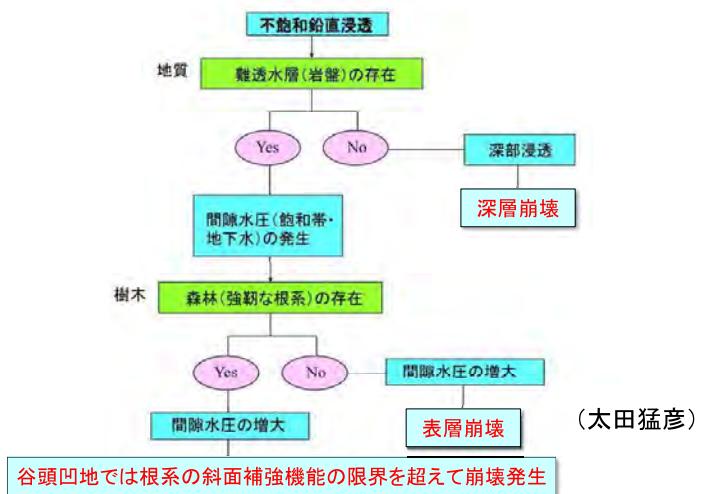


表層崩壊から流出した土砂により右岸側斜面脚部が侵食され土塊が

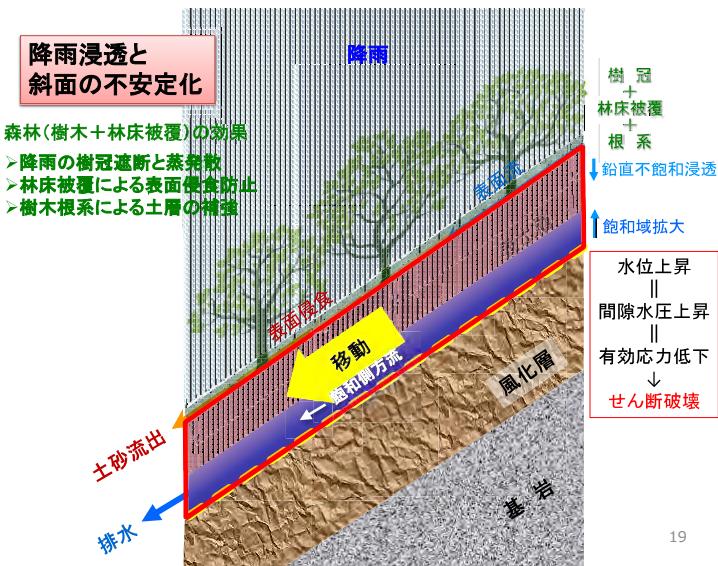
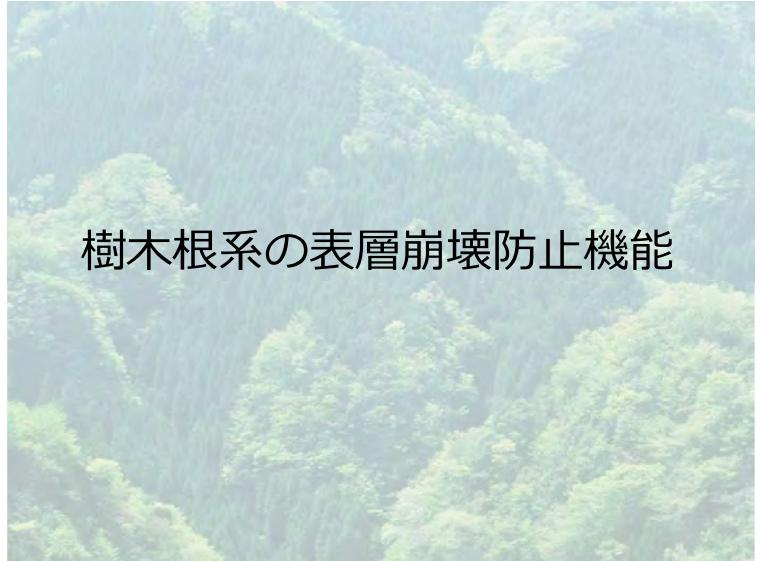


(太田猛彦)

17

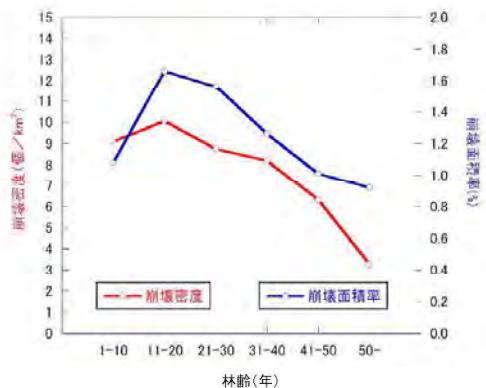


18



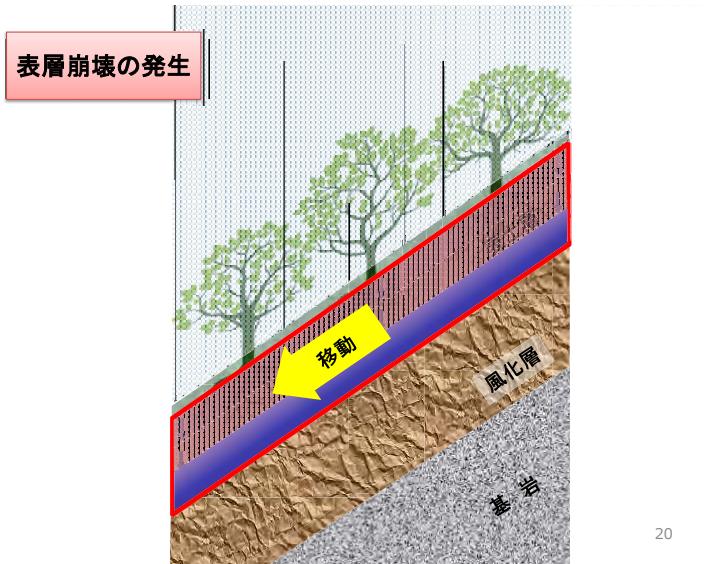
19

林齢と根系の斜面補強効果

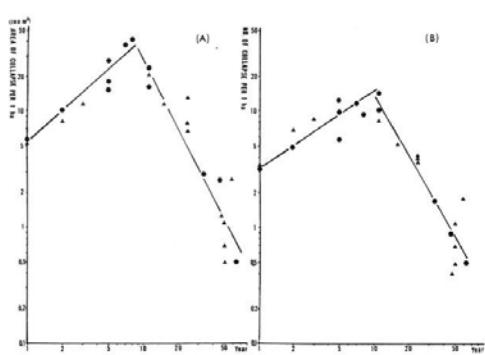


昭和30年における林齢別の崩壊密度と崩壊面積率(難波1959より作成)

22



20

図 3.7.1 愛知県小原村一帯の昭和47年7月豪雨災害地内2地点での林齢と崩壊との関係。
(A) 林令と1ha当たりの崩壊面積との関係、(B) 林令と1ha当たりの崩壊数との関係。

▲ 愛知県東加茂郡足助町月原・足助町共用林
● 愛知県西加茂郡小原村竹平・大ヶ巣連園有林。

昭和47年愛知県小原村における崩壊地の齢級別崩壊面積率と密度

23

森林伐採後の斜面補強効果の時間的変化

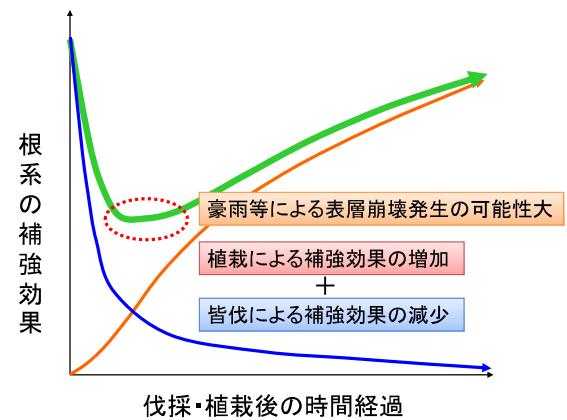


図4 林齢別の崩壊面積率

(沼本晋也: 森林斜面における表層崩壊の動態に関する研究(2000)より引用)

24

27

樹木根系強度の経年変化

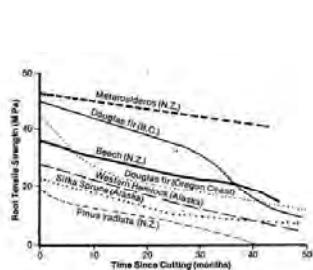


Figure 3.19. Changes in mean tensile strength of various conifer and hardwoods a 45 year period after cutting [after O'Loughlin and Ziemer, 1987].

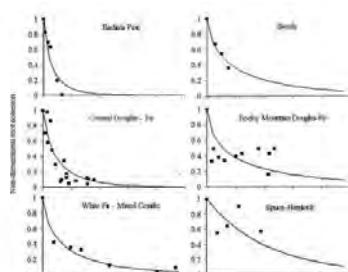


Figure 3.20. Decay of transversal root cohesion for various forest types after clearcutting; coefficients (k and α) for the root decay curves are given [after Sidle, 1991].

Sidle, R.C. & Ochiai, H. (2006) Landslides : Processes, Prediction, and Land Use, America Geophysical Union, Water Resources Monograph 18

25

28

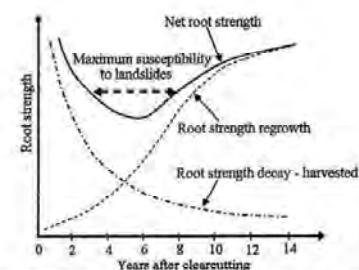


Figure 3.17. An example of typical changes in rooting strength of forest vegetation after timber harvesting (clearcutting). Root decay and recovery curves are based on numerous data worldwide. Net rooting strength is the sum of the decay and recovery curves.

Sidle, R.C. & Ochiai, H. (2006) Landslides : Processes, Prediction, and Land Use, America Geophysical Union, Water Resources Monograph 18

樹木根系の斜面補強効果に関する研究

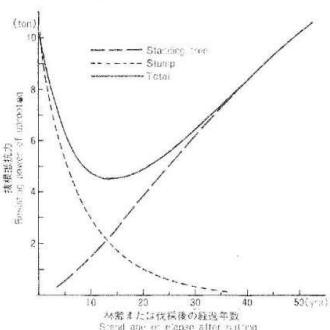


Fig. 13 林齢または伐採後の経過年数と抜根抵抗力の関係(スギ)

Relation between resisting power of uprooting and stand age, years elapsed after cutting (*Cryptomeria japonica*).

北村嘉一・難波宣士(1981)抜根試験を通して推定した林木根系の崩壊防止機能、林試研報、No.313

樹木根系の斜面補強効果に関する研究

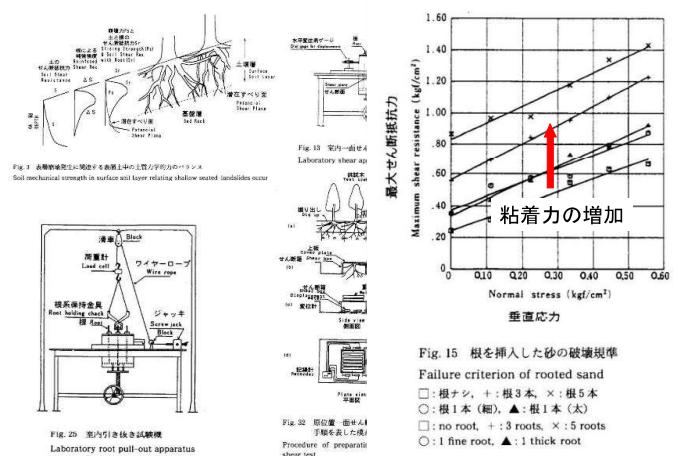


Fig. 15 根を挿入した砂の破壊規準
Failure criterion of rooted sand

□: 根なし, +: 根3本, ×: 根5本
○: 根1本(細), ▲: 根1本(太)
□: no root, +: 3 roots, ×: 5 roots
○: fine root, ▲: 1 thick root

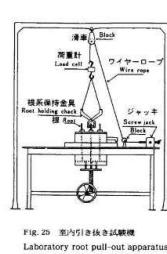


Fig. 20 室内引き抜き試験機
Laboratory root pull-out apparatus

阿部和時(1997)樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能評価手法に関する研究、森林総研研報、No.373

26

29

現地実験による根系の機能評価



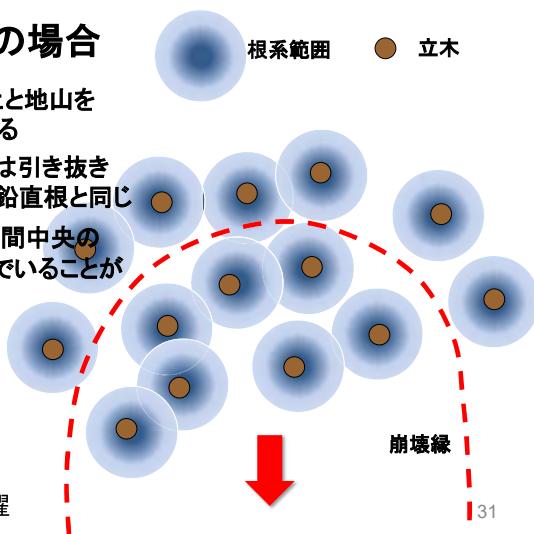
根系分布調査

トレンチを掘削し土壤断面に現れた根系の直径階別本数を測定



b. 水平根の場合

1. 水平根は崩土と地山を繋ぎ止めている
2. そのはたらきは引き抜き抵抗力であり鉛直根と同じ
3. 崩壊線は立木間中央の弱線をつないでいることが多い



信州大学・北原曜

地盤工学分野における地山補強と森林

無補強土の安定計算

$$F_s = \text{Min} \left[\frac{\sum (\sigma \cdot \tan \phi \cdot l)}{\sum (T_u \cdot l)} \right] \quad (\sigma = 0 \text{ を仮定})$$

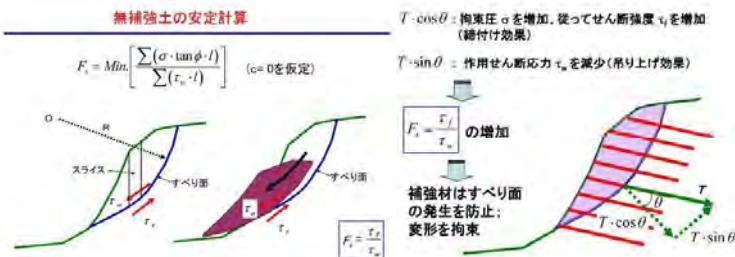


図2-1-22 地山を引張り補強土工法で安定化させるメカニズム

龍岡文夫 (2008) 地盤強化改良工学
地盤改良技術とその応用, 東京理科大

34

根系引き抜き試験

根系の引き抜き抵抗力を直径階別に測定



信州大学・北原曜

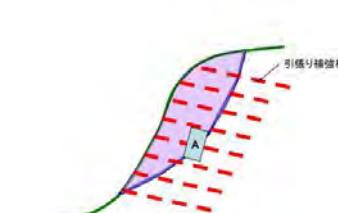


図2-1-14 地山補強土工法での潜在すべり面に沿った要因Aの応力ひずみ状態

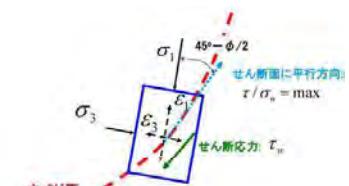


図2-1-15 地山補強土工法での潜在すべり面に沿った要因Aの応力ひずみ状態

龍岡文夫 (2008) 地盤強化改良工学
地盤改良技術とその応用, 東京理科大

35

解説図-1.2 森林の斜面安定効果

土砂災害形態	森林保全効果	斜面の安定化への影響	
		プラス面	マイナス面
表面侵食 有り		<ul style="list-style-type: none"> ○地表面被覆が保護材としての機能 ○森林土壤が雨水を浸透させ表面流を減少 	無し
表層崩壊 (根系の深さより浅い崩壊)	有り	<ul style="list-style-type: none"> ○根系による土のせん断強度増加 ○被覆による基岩の風化抑制 ○断熱効果による凍土防止 	<ul style="list-style-type: none"> ○樹木自体の重さ ○風によるひきり ○根系効果による風化
深層崩壊 (根系の深さより深い崩壊)	無し	無し	無し

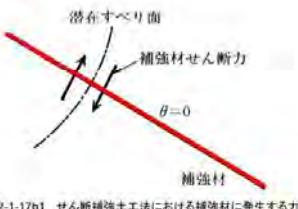


図2-1-17b1 せん断補強工法における補強材に発生する力

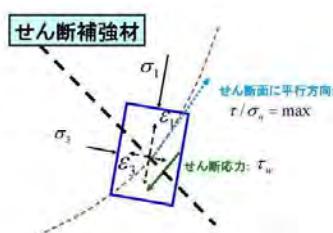


図2-1-19b 地山補強工法での潜在すべり面に沿った要素Aのせん断強度

龍岡文夫 (2008) 地盤強化改良工学
地盤改良技術とその応用、東京理科大

36

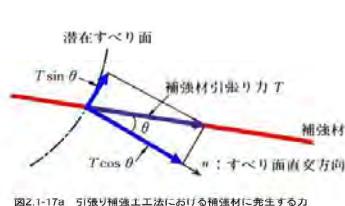


図2-1-17a 引張り補強工法における補強材に発生する力

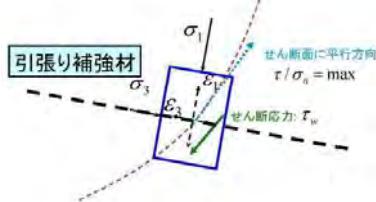
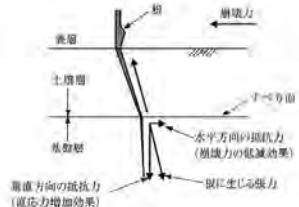


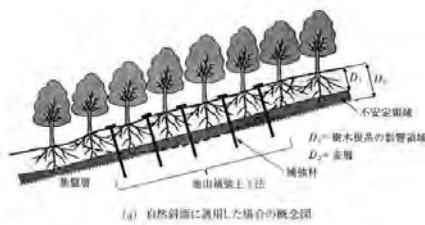
図2-1-16a 地山補強工法での潜在すべり面に沿った要素Aの引張り補強

龍岡文夫 (2008) 地盤強化改良工学
地盤改良技術とその応用、東京理科大

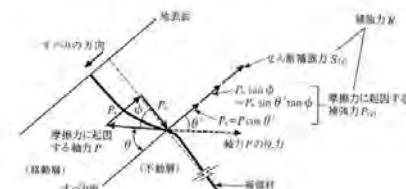
37

解説図-1.12 樹木根系による補強メカニズムの概念図
地山補強工法設計・施工マニュアル、地盤工学会

39



(a) 自然斜面に適用した場合の概念図

解説図-1.13 自然斜面に適用した場合の地山安定化工法の概念図と
補強メカニズム
地山補強工法設計・施工マニュアル、地盤工学会

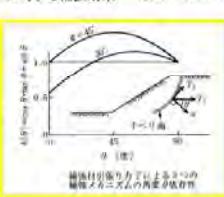
40

補強土の安定計算

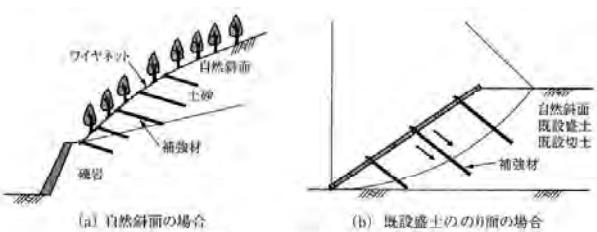
$$F_s = \min \left[\frac{\sum (\sigma \cdot \tan \phi + T \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi)}{\sum (\tau_u \cdot l - T \cdot \sin \theta)} \right]$$



□補強効果の総計: $T \cdot \cos \theta \cdot \tan \phi + T \cdot \sin \theta$
□同一のTに対する補強効果: $h(\theta) = \cos \theta \cdot \tan \phi + \sin \theta$

図2-1-23 地山
を引張り補強工法
における補
強材角度の影響補強材引張り力Tによるさくの
補強材角度θの影響龍岡文夫 (2008) 地盤強化改良工学
地盤改良技術とその応用、東京理科大

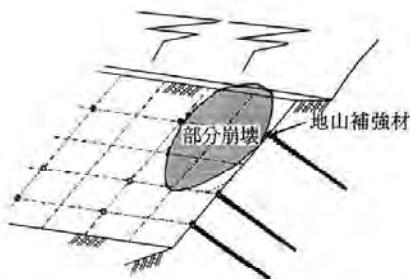
38



解説図-1.11 地山安定化工法の例

地山補強工法設計・施工マニュアル、地盤工学会

41



解説図 -5.6 切土安定化工法の部分崩壊

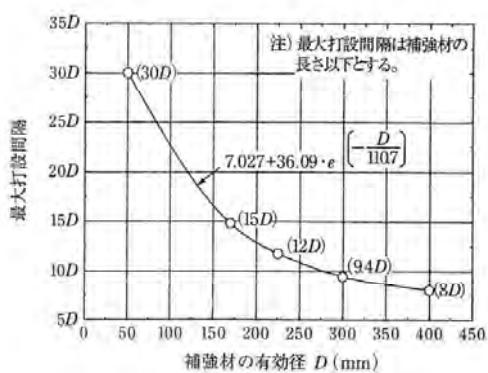
地山補強土工法設計・施工マニュアル、地盤工学会

42



地山補強土工法(高倉山)

45



解説図 -5.8 補強材有効径と最大打設間隔(目安)

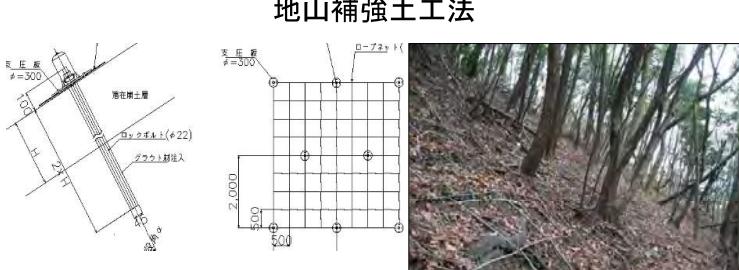
地山補強土工法設計・施工マニュアル、地盤工学会

43

2013年伊豆大島土石流災害と 火山碎屑物・常緑広葉樹



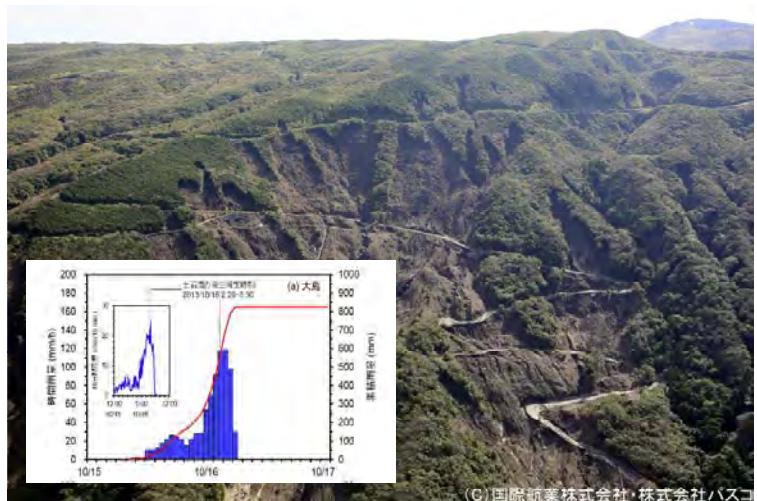
46



神戸市高倉山

Rock-bolt	Arrangement: 2.0m Diameter: φ22mm Length: Twice of the soil depth
Rope-net	Diameter: φ8mm Interval: 0.5m
Bearing plate	Shape: Circle Size: φ300mm

44



(C) 国際航業株式会社・株式会社バスコ

47

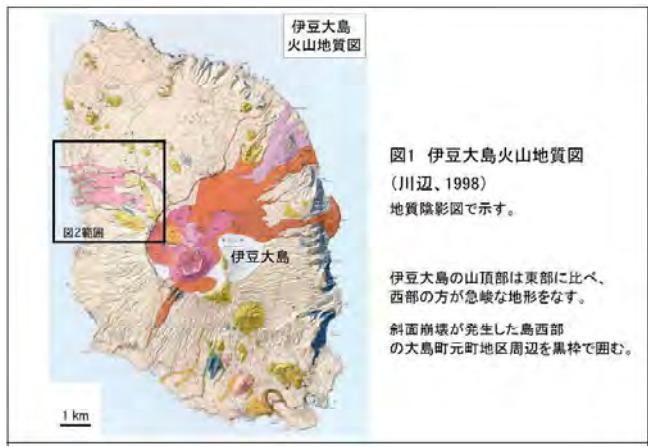
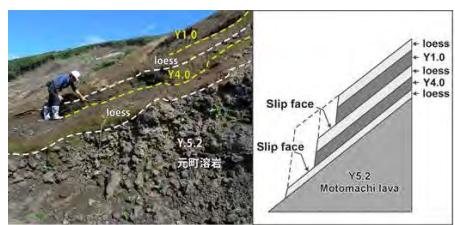


図1 伊豆大島火山地質図
(川辺、1998)
地質陰影図で示す。

斜面崩壊が発生した島西部
の大島町元町地区周辺を黒枠で囲む。

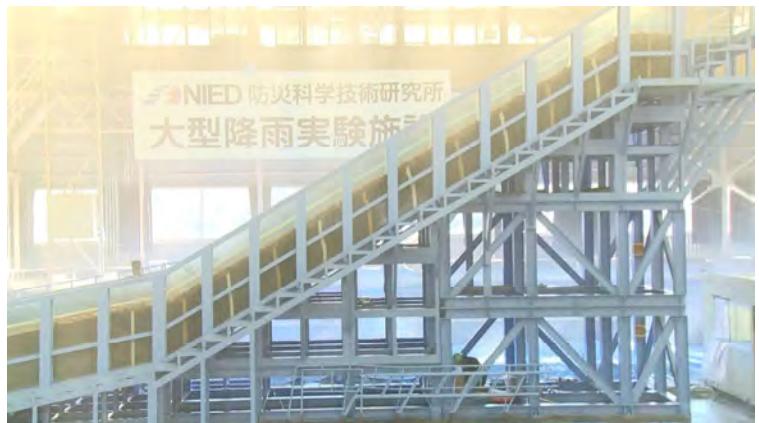


透水性が高く脆弱な火山灰と細粒で透水性の低い風成土(レス)の境界から崩壊発生



図2 上図の黒枠を拡大
(大島町元町地区周辺)
主な土砂移動方向を青点線で示す。

凡例



火山碎屑物の斜面崩壊実験 (防災科学技術研究所大型降雨実験施設)

崩壊発生源

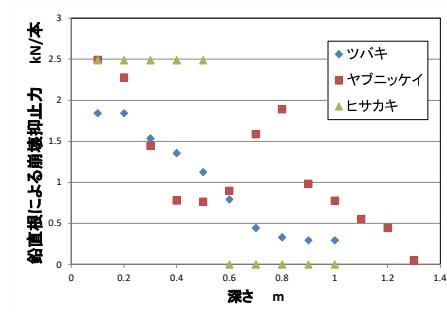


常綠広葉樹根系調査箇所

常緑広葉樹の根系分布調査を行った伊豆大島の森林



主要3樹種の鉛直根による崩壊抑制力



深さ方向に示した鉛直根による崩壊抑制力

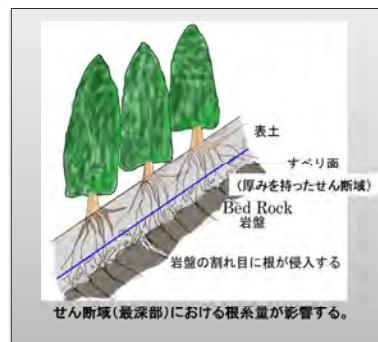
(崩壊抑制力は単木当たりの抑制力を表している。ヒサカキ根系は深さ0.5mまでに集中していたため、他2樹種の深さごとの抑制力が0.5mまでに集中したと仮定して算出した。)

57

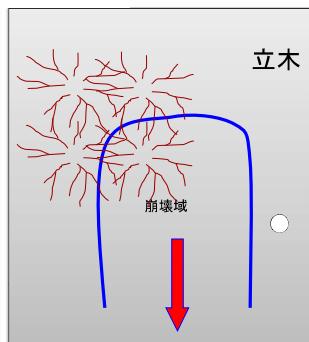
崩壊跡地に残された根系



鉛直根の杭効果（アンカー効果）と水平根のネット効果



鉛直根の杭効果（アンカー効果）



水平根のネット効果（平面図）

森林の崩壊防止機能：

根系分布調査：崩壊すべり面における根の大きさ・量
引き抜き試験：崩壊すべり面における根の働き

58

常緑広葉樹3樹種の鉛直根分布調査



ツバキの鉛直根（直径11.5cm）
深さ1.0mまで太い鉛直根が1本生育し、鉛直根から段状に水平根が発生している。



ヤブニッケイの鉛直根（直径10.2cm）
深さ1.3mまで斜出根が多数生育、明瞭な鉛直根はない。
水平根は少ない。

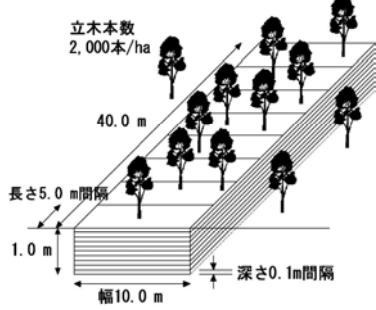


ヒサカキの鉛直根（直径18.5cm）
深さ0.5mまでに18本の太い水平根が発生し、根株直下に根が密集している。深さ0.5mより下に鉛直根は生育していない。
56

根系分布調査：調査用トレンチ（幅・深さ：2m × 1m）で根の位置、直徑を測定



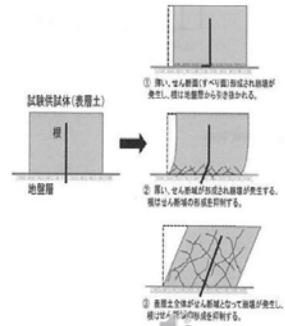
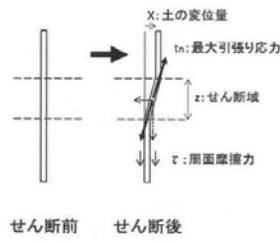
3. 森林の崩壊抑制力の評価



崩壊抑制力を評価する際に用いた斜面の初期条件

60

根系の補強強度とせん断域の厚さ

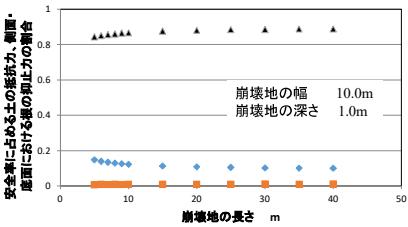


図一-1. 根による土のせん断抵抗力補強モデル

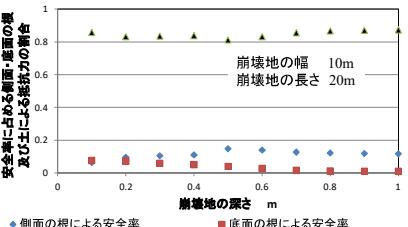
図一-2. 原位置せん断試験におけるせん断域の状態の違いと根の変形状況の違いを示した模式図

掛谷亮太・荒金達彦・村津匠・阿部和時・岡田康彦:
原位置せん断試験による森林の崩壊防止機能の考察、関東森林研究65-2(2014)

63



△側面の根による安全率 ■底面の根による安全率 ▲土の抵抗による安全率



△側面の根による安全率 ■底面の根による安全率 ▲土のせん断抵抗力による安全率

61

根系の補強強度とせん断域の厚さ

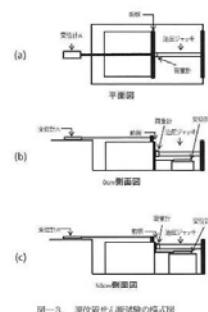


Fig. 3 Schematic illustration of in-situ direct shear test

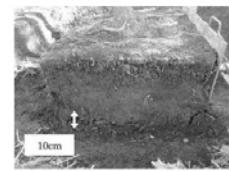


Fig.4 Photo of thin shear zone



Fig.5 Photo of thick shear zone

掛谷亮太・荒金達彦・村津匠・阿部和時・岡田康彦:
原位置せん断試験による森林の崩壊防止機能の考察、関東森林研究65-2(2014)

64

根の崩壊抑制効果は10~20%弱、水平根の効果の方が大きい、小さい崩壊地での効果が大きい。

- 崩壊発生斜面に生育する常緑広葉樹林(ツバキ、ヤブニッケイ、ヒサカキ)による崩壊地底面における崩壊防止力を推定。根系全体を掘り出して、地表面から深さ方向に向かって10cm間隔で全ての鉛直根・斜出根の直径を計測。
- 計測データと根の引き抜き抵抗力の推定により、地表面から深さ10cmごとの地表面と平行な面(崩壊地底面と考えられる)における鉛直根・斜出根による崩壊防止力を推定。ツバキ・ヤブニッケイは樹幹直下の深さ10cmで2.5~1.8kN/m²(gf/cm²)、深さ100~120cmで0.3~0.8kN/m²(gf/cm²)の崩壊防止力。
- 水平根による崩壊地側面と、鉛直根・斜出根による崩壊地底面での崩壊抑制力を用いて、根系の崩壊抑制効果を推定。根の崩壊抑制効果は斜面安全率の10~20%弱、水平根の効果の方が鉛直根の効果より大きい。

62



SATREPSによるベトナム交通省
交通科学技術研究所での崩壊実験(2016. 11. 13)

Table 1 – Soil properties and initial conditions

Soil material	Ha Vi sand (weathered granite)
Density of soil particles (ρ_s)	2.7 (g/cm ³)
Unit weight (γ)	1.8 (g/cm ³)
Dry unit weight (γ_d)	1.3 (g/cm ³)
Volumetric water content (w)	1.0
Porosity (n)	0.6
Permeability (k)	6.0×10^{-10} (cm/s)
Initial water content (w _i)	10.2 (%)
Rainfall intensity (mm/min)	50 (mm/min)
Failure time of start of application	137.5 (minutes)
Sliding time	-7 (second)

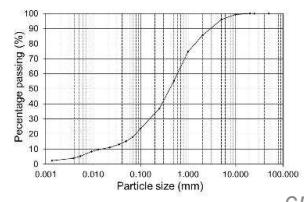
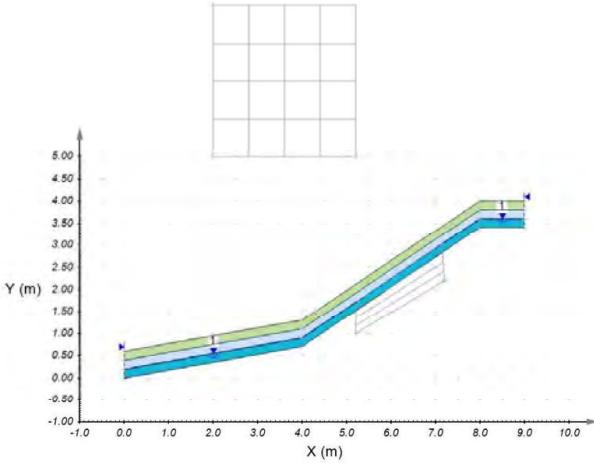
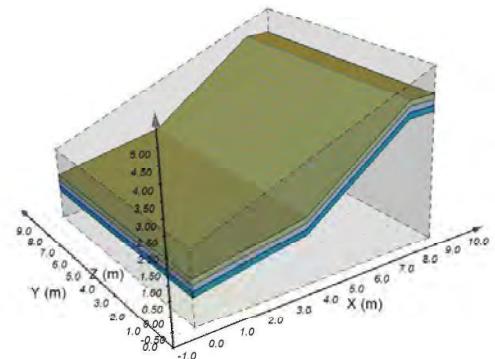


Figure 1 – Grain size distribution curve (Ha Vi sand)

65

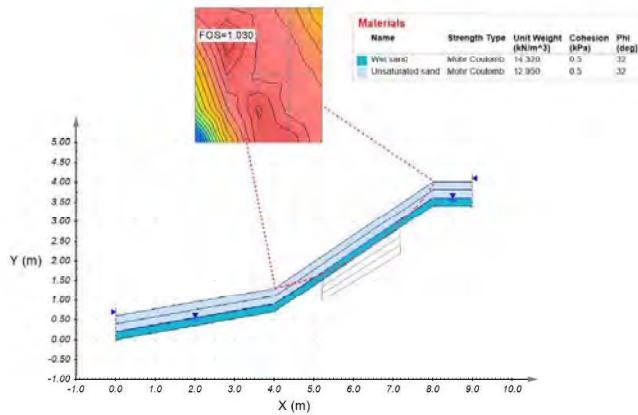


66



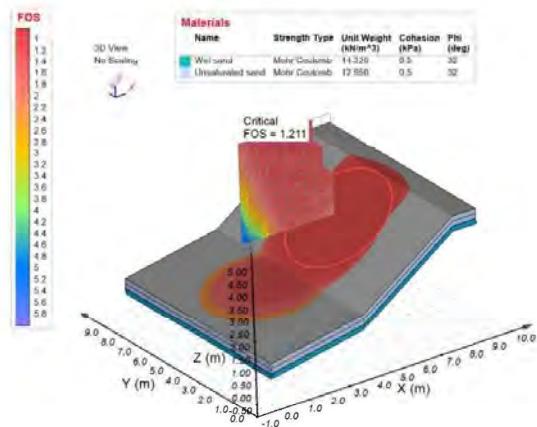
69

崩壊発生を想定したマサ土斜面の最小安全率



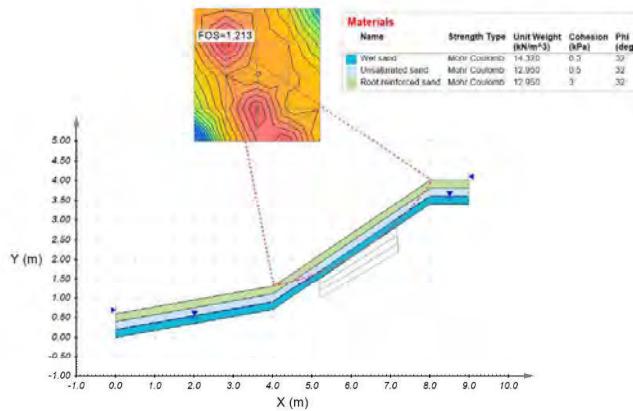
67

崩壊発生を想定したマサ土斜面の最小安全率



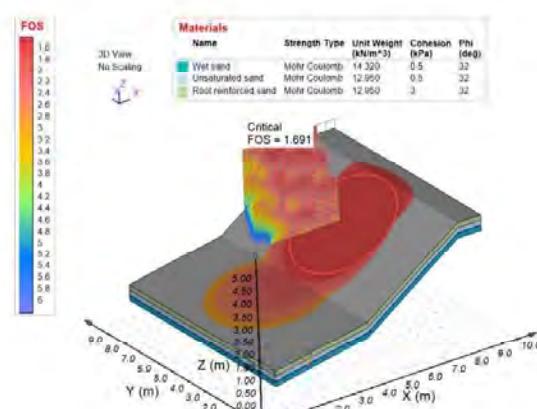
70

崩壊発生を想定したマサ土斜面の最小安全率（表層に根系による補強）



68

崩壊発生を想定したマサ土斜面の最小安全率（表層に根系による補強）

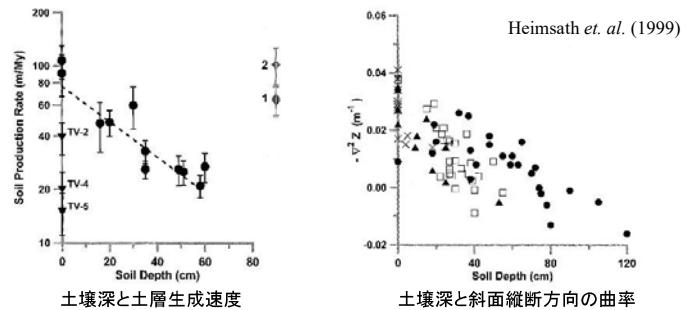


71

谷頭凹地での崩壊発生メカニズム

ゼロ次谷での雨水集中と土壤層の発達・崩壊

なぜ谷頭凹地は土壤深が小さく飽和しやすいのか？



- 土壤深の小さいところほど、土壤生成速度が大きく、斜面方向の曲率が大きい。
- 谷頭凹地（ゼロ次谷）では、縦断方向の曲率が大きく、土壤が斜面方向にクリープするとともに、土壤生成速度が大きく土壤深は小さい。
- 谷頭凹地は、集水地形かつ土壤深が小さいため、降雨による飽和域が最初に発生するため、セン断強度が低下して崩壊が発生する。

75

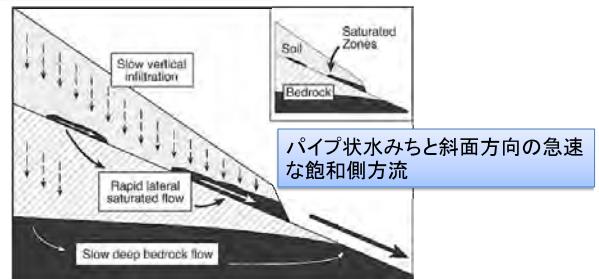


谷頭凹地(0次谷)の地形的特徴

73

Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape

ゆっくりとした鉛直方向の不飽和浸透流



Montgomery and Dietrich. (2002)

Water Resources Research
Volume 38, Issue 9, pages 7-1-7-8, 10 SEP 2002 DOI: 10.1029/2001WR000822
[http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001WR000822/full/wrcr9190-fig-0008](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001WR000822/full)

76

遷急線付近での土壤のクリープ現象

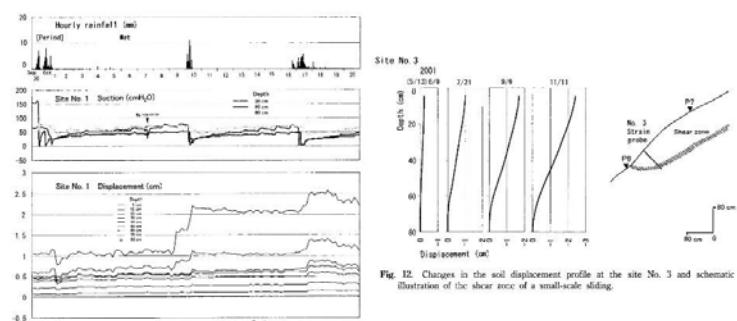
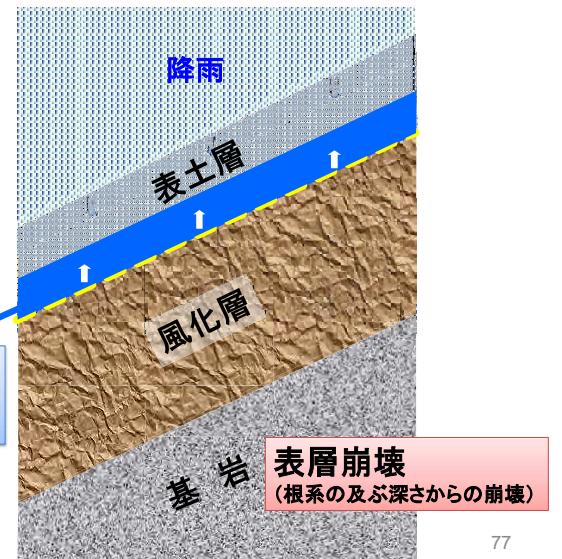


Fig. 12. Changes in the soil displacement profile at the site No. 3 and schematic illustration of the shear zone of a small-scale sliding.

園田美恵子・奥西一夫(2005)：風化花崗岩森林斜面におけるソイルクリープ挙動と土壤水分変化との関係、地形26-2, 105-129

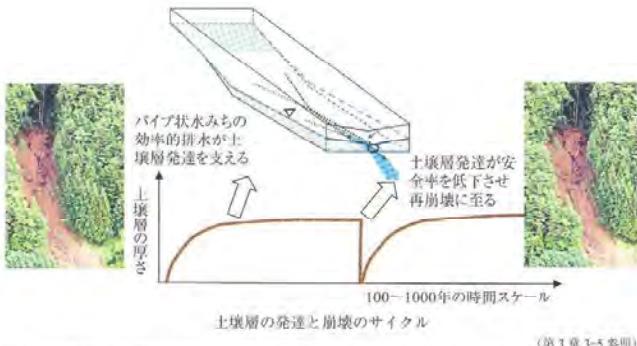
74

パイプ状水みちの排水効果による斜面の安定化



77

土壤中のパイプの機能と崩壊発生との関係



谷 誠 (2016) 水と土と森の科学, 京都大学学術出版会, 252p, ISBN: 9784814000234

斜面災害の実態



78

資料2

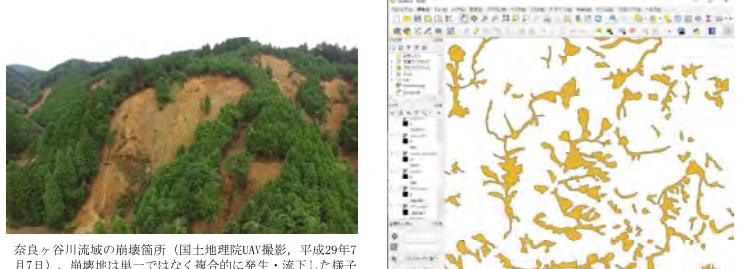
九州北部豪雨に伴う斜面崩壊の発生場の特徴

2021年8月24日

国土防災技術（株）
斜面環境研究所

土屋 智

九州北部豪雨に伴う被害状況判読図



▶国土地理院が作成した被害状況判読図は、豪雨で生じたと考えられる土砂崩壊地、道路損壊、鉄道損壊、洪水流到達範囲を空中写真等から判読したもので、1935個の土砂崩壊地が抽出されている。抽出された崩壊地は、ポリゴンとして境界座標と面積が整理され、一般的なGISソフトで閲覧可能なGeoJSONファイルで公開されている。

▶解析対象範囲は246.16km²の領域で、土砂崩壊地は1723個含まれる。なお、判読された土砂崩壊地は、長さ、幅が約50m以上の崩壊跡で、写真では区別できない複数の崩壊地と堆積地とが一体で抽出されている。

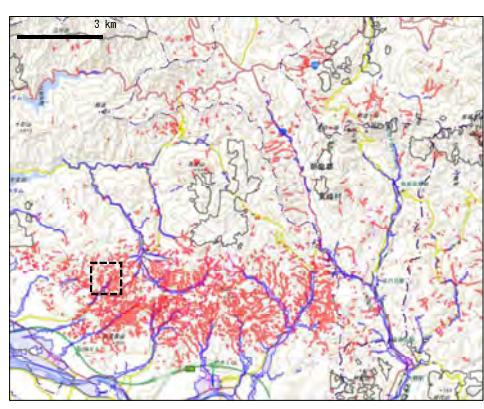
▶表示区域（右図の矩形域）の崩壊面積率は約16.5% (=478338/2904300*100)とさわめて高い値を示す。解析域内の崩壊地が密集する区域（横10km×縦3km）もほぼ同様で崩壊深を1mと仮定すると約500万m³、2mで約1000万m³の新規土砂生産が見積もれる。

斜面災害の概要

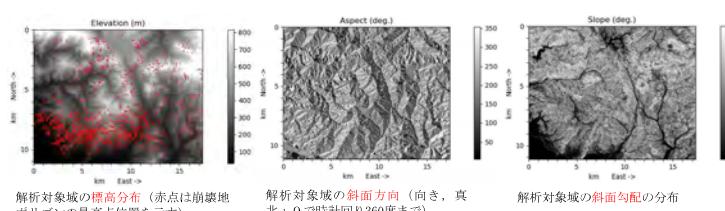
▶平成29年(2017)7月、福岡県朝倉市を中心とする山間域で集中的な豪雨があり、近年稀にみる斜面崩壊が高密度に発生した。最大24時間降雨量829mm（朝倉市黒川）という未曾有なもので、多量の流木を伴う甚大な土砂災害となつた。

▶この土砂災害の誘因は、狭い範囲に集中的な強雨が継続して降ったことにあるが、素因にはマサ土化した花崗岩類や風化の進んだ泥質片岩、加えて火山性岩という脆弱な地質で覆われていることがあげられている。

▶また、災害の社会的なインパクトとして、林業が盛んな地方で森林域から多量な立木が流出し、被害を拡大したことが注目される。



解析地の地形概要

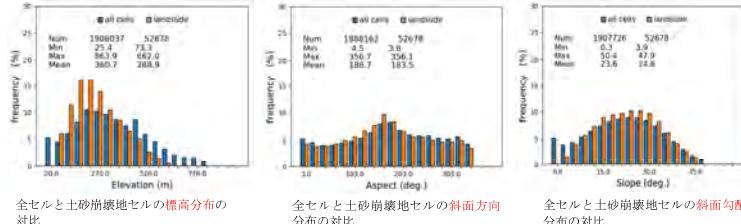


▶崩壊地の高密度な分布域は、標高分布とほぼ無関係に領域の右下域に長方形をなすように位置する。この高密度な分布域は、図の下端を右から左に蛇行する筑後川の北方山麓の標高200~500mの範囲である。図中の中央を南下する大肥川を境に、その東側では崩壊地は少なくなる。

▶谷と尾根を境に斜面の向きが異なることから、地形の特徴が良好に示されていることがわかる。図に示す崩壊地の密集域とそれ以外における斜面方向を比べると、特徴ある傾向は見られない。

▶崩壊地の密集域とそれ以外の斜面勾配を比べると、特徴ある傾向は見られない。密集域の斜面勾配は、25~40度の範囲に含まれる。

土砂崩壊地の有無と地形因子



国土地理院10x10mメッシュの標高データを使用。

非現実的な数値が含まれることを避けるため、各因子データの1~99%を取り出し解析対象とした。

▶ 標高分布の対象全セルは1908037個、土砂崩壊地セル数は52678個である（崩壊面積率は2.8%）。一般セルは220~370mに多く、約40%が分布するが、土砂崩壊地セルは標高180~270m域で約45%がやや尖塔形に分布する。降雨量はこの標高ゾーンで多かったと推定される。

▶ 傾斜方向は、図に示すように真北から約180前後の南向き斜面が10%前後と他に比べて多い。この対比も、一般セルと土砂崩壊地のセルには違いがみられない。

▶ 斜面勾配を比べると、図に見るように特徴ある分布は見られない。崩壊地の多くは斜面勾配25~40度の範囲に含まれるようである。

九州北部豪雨災害の斜面崩壊の概要

国土地理院が作成した「平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」を用いて、斜面崩壊の規模と発生場所の特徴分析を行った。

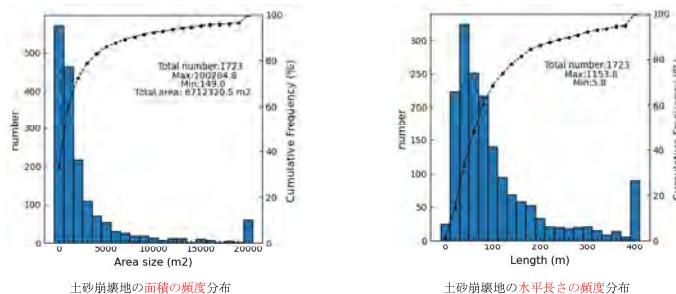
▶ 解析領域内には崩壊地が密集する区域（横10km、縦3km）があり、そこで崩壊面積率は約16.5%と極めて高い。平均崩壊深を1mとすれば、約500万m³、2mで約1000万m³の土砂生産が見込まれること、また、解析領域246.16km²の崩壊面積率は2.8%を示し、降雨に伴う一般的な崩壊面積率1%を大きく超える。

▶ 土砂崩壊地の面積は1000m²以下で30%強、2000m²以下のが約60%を占め、3000m²まで含める70%強を示した。抽出された土砂崩壊地の多くは表層崩壊であったことが裏付けされる。

▶ L/H率は一般的な「かけ崩れ」よりも大きく、2.5で約80%弱、3.0で約90%が含まれることがわかった。これには、土砂崩壊地の抽出が複数の崩壊地を一体としていること、規模の大きな深層型の崩壊が含まれていると思われる。

▶ 解析領域の地形因子、標高、斜面向き、傾斜において、土砂崩壊地とそれ以外の一般斜面で頻度分布を対比したところ、両者の違いは見られなかった。斜面崩壊の発生は、素因である地形が大きく影響したのではなく、誘因である降雨によるものと推察される。つまりは、外力である降雨による影響が引き立て大きな土砂災害であったともいえる。

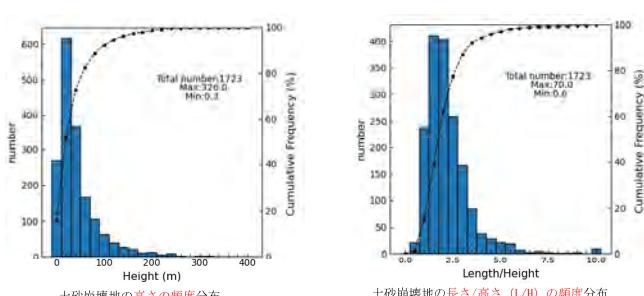
土砂崩壊地の形態分布（1）



▶ 土砂崩壊地の面積は、面積2000m²以下のものが約60%、3000m²まで含めると70%強を示す。抽出された土砂崩壊地は、複数の崩壊地と堆積地とが一体で抽出されていることから、面積3000m²としても、多くはその1/2~1/3程度と推察され、多くは小規模な表層崩壊と考えられる。ただし、面積10,000m²のものが約10%、170個程度存在し、最大は100,000m²以上である。深層型の斜面崩壊の発生も少なくなかったと判断される。

▶ 土砂崩壊地が滑落・流動方向した水平距離は、100m以下のものが約70%を占める。長さ400mを超えるケースも100個程度みられ、最長では1100m超のものがある。これは崩壊土砂量の比較的少ない表層崩壊のほかに、多量の崩土を伴う斜面崩壊が長距離を流动したケースが相当程度あったことによると判断される。

土砂崩壊地の形態分布（2）



▶ 土砂崩壊地の高さは、60m以下が約70%で、90mでは約90%が含まれる。なお、最大の高さは326mであった。

▶ 土砂崩壊地の水平長さを高さ/Hで除して、L/H率の頻度分布を求める結果、2.5倍で約80%弱、3.0倍で約90%が含まれる。一般的な崖崩れであれば、そのほとんどが2倍以内となるが、流動距離はこれらよりも長いことを示す。つまり、崖崩れとほぼ同義である表層崩壊に加えて、規模が大きな深層型の崩壊が含まれている結果と判断される。

土砂崩壊地の面的規模と斜面勾配による区分

当該域は、マサ土化した花崗岩類や風化の進んだ泥質片岩のほかに、火山性岩という脆弱な地質であり、風化は堆積岩地帯の表層よりも深いと予想される。これらを考慮し、抽出された土砂崩壊地について面積規模と斜面勾配で区分し、それぞれの形態的な特徴を把握する。

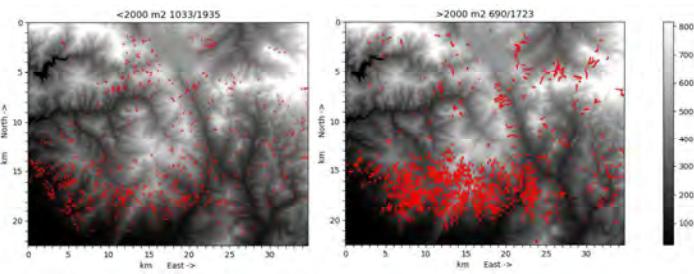
1. 面的規模

面積2000m²以下を表層崩壊、それ以上を深層の崩壊と区分した。

2. 斜面勾配

勾配 20° 以下を堆積地の特徴を含む土砂崩壊地、20° 以上を崩壊地に近い特徴を有する土砂崩壊地と区分した。

土砂崩壊地の面的規模による区分



（国土地理院が作成した「平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」および基盤地図情報・数値標高モデルを使用）

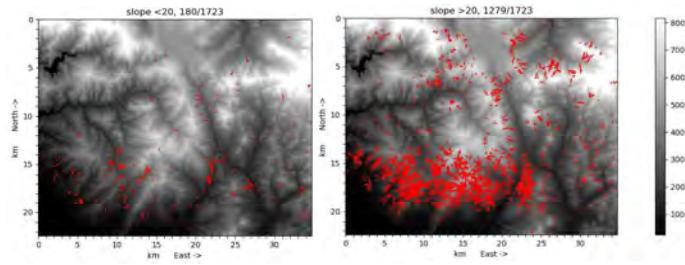
面積2000m²以下

対象域の全箇所1723個（面積合計、6,712,000m²）のうち1033個（面積合計、1,006,000m²）であり、個数は全数の約53%と半数以上を示すが、面積は全面積の約15%を占めるにとどまる。

面積2000m²以上

崩壊地個数は690個に減少するが、土砂崩壊地全面積の約85%、5,707,000m²と大部分を占める。

土砂崩壊地の斜面勾配による区分



（国土地理院が作成した「平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」および基盤地図情報・数値標高モデルを使用）

勾配20°以下

左図に示す勾配20°以下の土砂崩壊地は、全箇所1723箇のうち180箇で全土砂崩壊地の約10%を示すにとどまる。

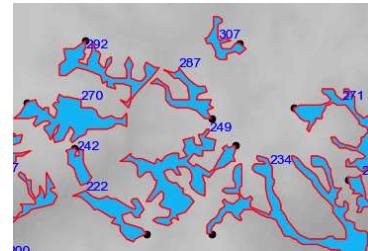
勾配20°以上

右図の勾配20%以上の場合は、1279箇で約74%を多くを占める。抽出された土砂崩壊地は、緩傾斜な堆積地に近いものではなく崩壊地に近い傾斜を有するものと判断される。

土砂崩壊地の面積2000m²以上、勾配20°以上 の冠頭部の地形

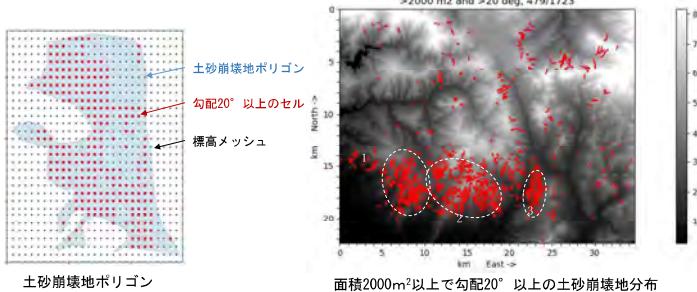


朽木白木地区上流の空中写真（国土地理院2017年7月13日撮影）



面積2000m²以上、勾配20°以上の土砂崩壊地の冠頭位置は、どのような地形場に存在したかを把握するため、土砂崩壊地ポリゴンの最高標高を有するセルを抽出し、そこでの傾斜、標高、斜面方向の分布を全セルのそれらと対比する。

面積2000m²以上で勾配20°以上の分布

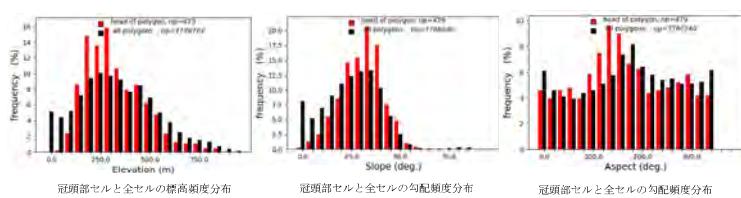


面積2000m²以上で斜面勾配20°以上

条件を満足する土砂崩壊地は、479箇、合計面積は4,282,000m²。面積2000m²以上の場合から211箇、面積で約25%（1,424,000m²）減少する。

その結果、集団で群状に分布する傾向がみられ、概ね3つのグループに分類される。グループ1は集落に近く、2は尾根から山腹が主体、3は山腹から渓流沿いの位置にある。

土砂崩壊地の冠頭部の地形



標高分布

冠頭部セルと全セルの標高頻度分布は、ほぼ同形で、面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地セルの標高分布に類似する（ただしピークは300mで、50m大きい）。

勾配分布

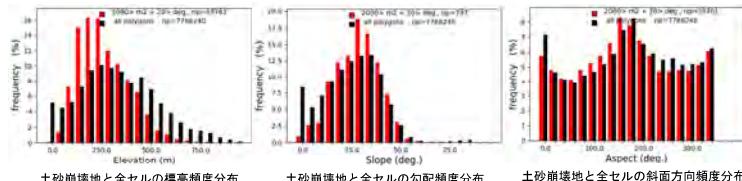
面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地と同様の分布傾向を示すが、勾配25から35°の範囲が突出する分布形状を示し、頭部セル全数の約67%を占める（土砂崩壊地の勾配分布よりも5°大きい）。

斜面方向分布

面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地と同様の分布傾向を示すが、土砂崩壊地が約180°で大きくなるのに対し、120から160°（南南東向きの斜面）で突出する様子が見られる。

豪雨が発生した当時、九州北部では対馬海峡付近にあった梅雨前線に向かって南海上の熱帯低気圧などから湿った空気が流入している（福岡管区気象台、2012）ことから、災害時には南南東斜面により多くの雨が降ったと推察される。

土砂崩壊地の面積2000m²以上、勾配20°以上の標高、勾配、斜面方向の分布



面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地セルの標高、勾配、斜面方向分布を領域内全セルの分布と対比

標高分布

全セルの標高頻度分布は250mを中心に、450m付近でやや大きくなり、その後標高1000mまで漸減する。一方、土砂崩壊地セルの頻度分布は、標高200から250mの区間で特異的に高く、この区間に約45%が集中し、先に示した3つのグループの多くはこの標高帯に含まれる。

勾配分布

全セル頻度分布は30~35°を中心いて、それ以降60°までは急激に減少する。土砂崩壊地セルの頻度分布もほぼ同型であるが、30から35°がやや突出し、この区間に約30%強を占める。

斜面方向分布

全セルと土砂崩壊地セルの斜面方向頻度分布は、違いは見られない。いずれも約180°前後の南向き斜面が10%弱で他に比べて多く、それ以外は5%程度で全方位に分布する。

規模と勾配が大きい斜面崩壊の分布

平成29年7月の九州北部豪雨にともなう斜面崩壊を対象に、その分布に関する概要と、面的規模（2000m²）から、表層崩壊とそれ以外の深層の崩壊に区分した。また、斜面勾配20°を基準に急傾斜面を有する崩壊地を抽出し、各々の土砂崩壊地の発生場の特徴を示した。

- 面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地は、479箇、合計面積は4,282,000m²であった。対象域の土砂崩壊地は1723箇、面積合計は6,712,000m²であるから、これらは、個数で約28%、面積で64%に相当する。
- 抽出した土砂崩壊地の標高、勾配、斜面向きの分布は、①標高200~250mの区間で特異的に高く、約45%が集中すること、②勾配30~35°でやや突出し約30%強を占めること、③北から時計回りに約180°前後の南向き斜面が10%弱を占め、他に比べてやや大きいこと、がわかった。
- 土砂崩壊地の冠頭部の分布は、①標高は、全セルの分布とほぼ同型であり、違いは見いだせないこと、②勾配は、勾配25~35°の範囲が突出し、土砂崩壊地頭部セル全数の約67%を占めること、③斜面方向は、北から時計回りに120から160°（南南東向き）の斜面が多くなることがわかった。

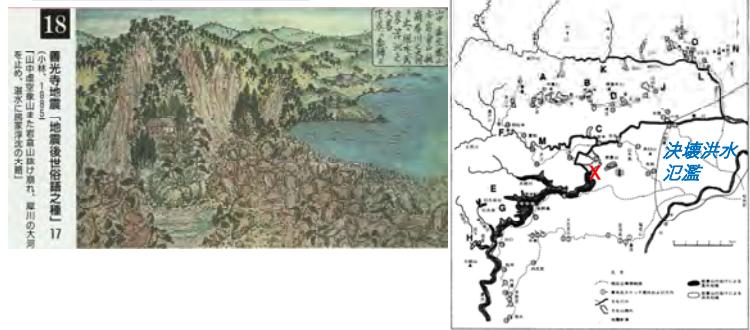
解析領域の標高、斜面向き、傾斜において、抽出した土砂崩壊地とそれ以外の一般斜面で頻度分布を対比したところ、両者に大きな違いは見られなかった。斜面崩壊の発生は、素因である地形が大きく影響したのではなく、誘因である降雨による影響が大きいと推察される。今回のような豪災害では、斜面崩壊の発生位置を地形因子から特定することは難しいと思われる。

地形情報を活かした斜面災害リスク への対応



日本工営(株)国土基盤整備事業本部
檜垣大助

1. 絵図に書かれた災害発生の様子—古文書・伝承から発生場所、現象を知る



1847年善光寺地震（M=7.4）での松代藩による信州地震大絵図の作成（斜面変動、中村浩之・土屋智・井上公夫・石川芳治編(2000)地震砂防、古今河道閉塞、洪水氾濫の場所・状況を記録）書院

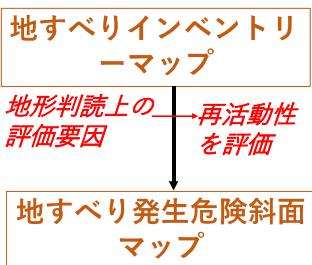
2. 空中写真による地形判読



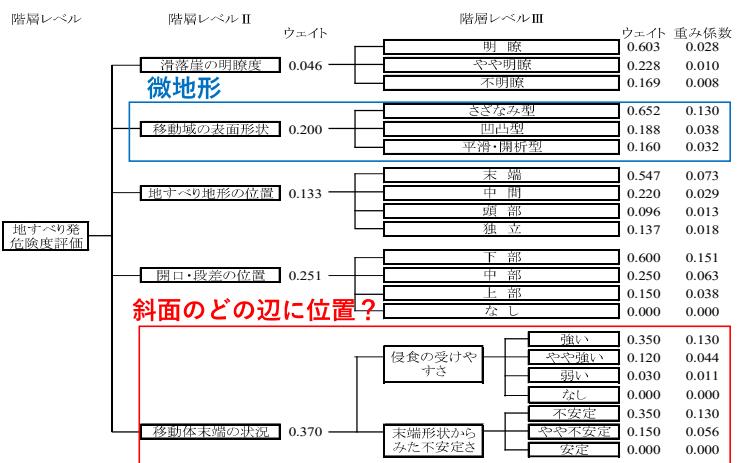
薦川地すべり(青森県)一地形判読から:
被災地すべりは、赤倉岳東斜面の**巨大地すべり地形**の末端に位置。
大規模地すべりは数度(I~III2)にわたって発生、**広大な集水域**あり。

3-1 地すべり地形判読 (空中写真)による地すべり再活動性評価 (階層構造分析 (AHP)法)

((社)日本地すべり学会・国交省阿賀野川河川事務所)



八木浩司・檜垣大助・(社)日本地すべり学会(2009)：空中写真判読とAHP法を用いた地すべり地形再活動危険度評価手法の開発と阿賀野川中流域への適用、日本地すべり学会誌、45(5)



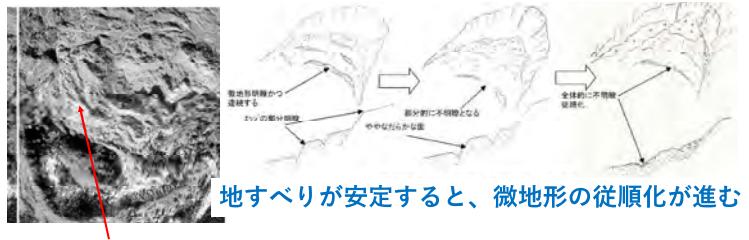
AHP法による危険度判定要因の階層構造図

(八木他(2009))

3-2 地すべり地形判読（空中写真）による地すべり再活動性評価（AHP法）

(日本地すべり学会東北支部・岩手県・宮城県, 2001~2005)

地すべり微地形の新鮮さの程度→活動後の経過時間
を表す従順化、谷開析の進み具合を評価
→地形発達の考慮



さざなみ形

Miyagi, T., Gyawali, B.P., Tanavud, C., Potichan, A., Hamasaki, E. 2004, Landslide risk evaluation and mapping, 防災科学技術研究所研究報告, 66

3.3 地すべり学会によるAHP法危険個所評価の要因構成

地すべり  地すべり地形の特徴 頭部崖・移動体・末端急斜面
微地形

○降雨の浸透を表す地形の変化

- ・水系の発達が悪い斜面
- ・化石谷のある斜面

○地すべり地形の新しさ（開析度）

- ・従順化
- ・水系侵食や崩壊による開析
- ・活動性を示す微地形

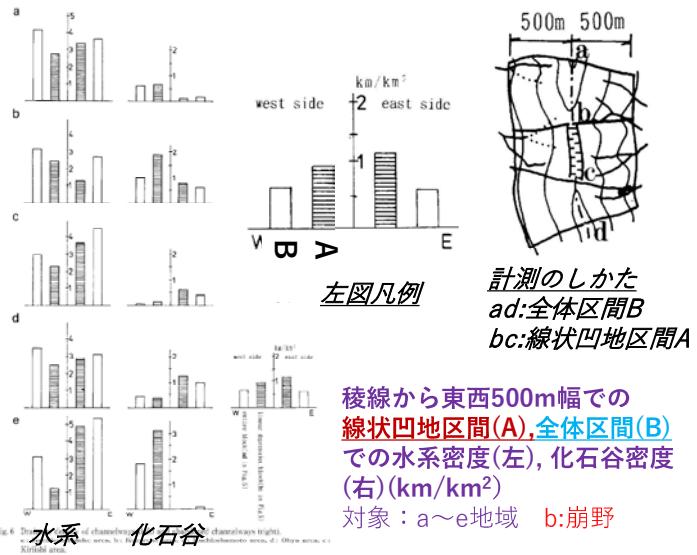
さざ波型、凹凸型
流動痕、圧縮丘

○地形場の重力的安定性

- ・末端侵食の受けやすさ
- ・縦断的安定性
- ・末端対岸の形

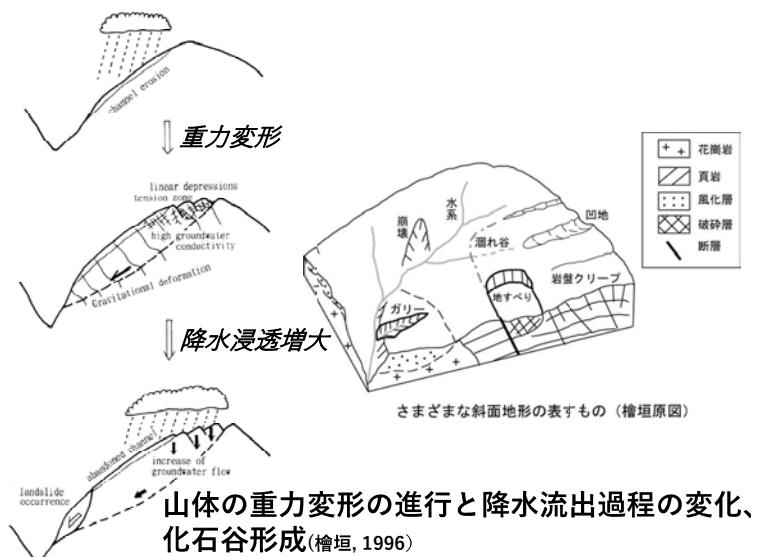
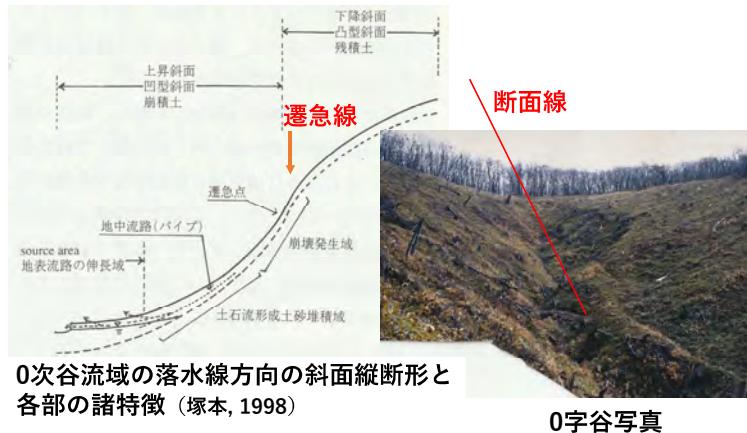
○最近の活動を示す事象

課題：移動体構成物の破壊のしかた、運動形態も反映 → 地質によるケース分け必要？)

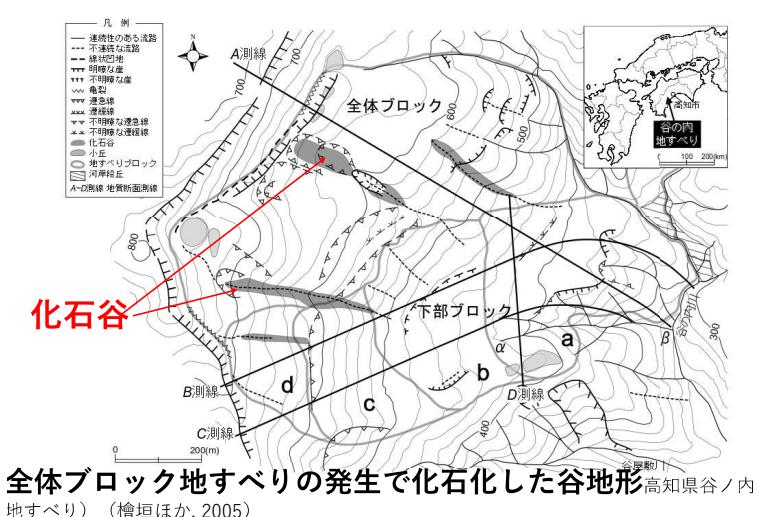


4. 降雨流出過程と地すべり・崩壊発生危険斜面

4.1 遷急線・0次谷と谷頭崩壊、流路形成

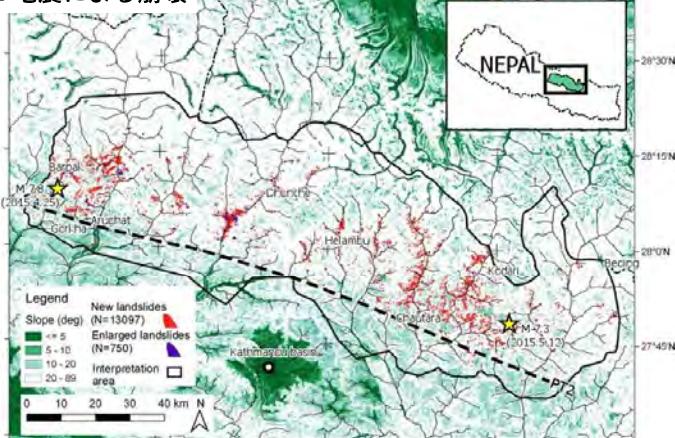


4.2 重力変形斜面の水系発達と化石谷



5. 高解像度数値地図の利用—斜面変動分布把握と発生危険斜面

5.1 地震による崩壊



崩壊は、ヒマラヤの隆起に打ち

勝ってできた急峻な谷壁斜面(谷中谷)に多い。

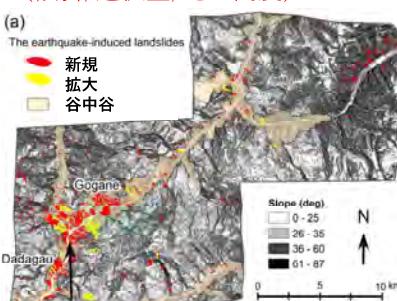
Trishuli IIIの例



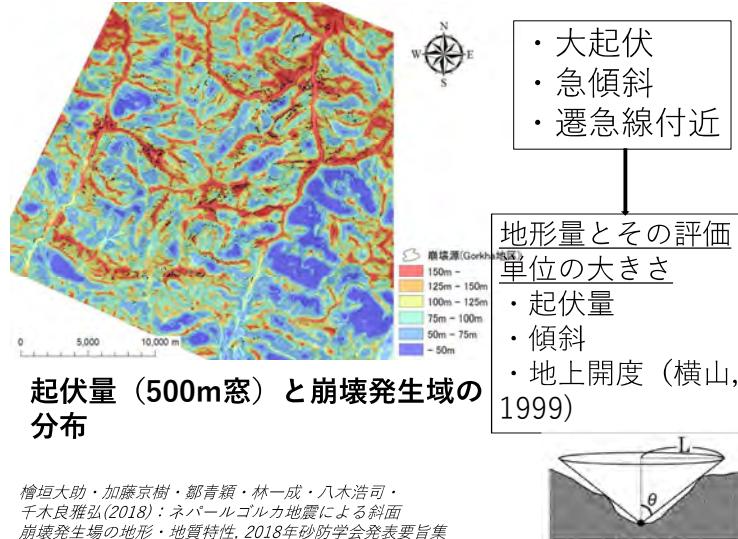
衛星による数値地形情報の活用

ALOS-1(AA)による汎地球的な数値標高データ (AW3D) の入手

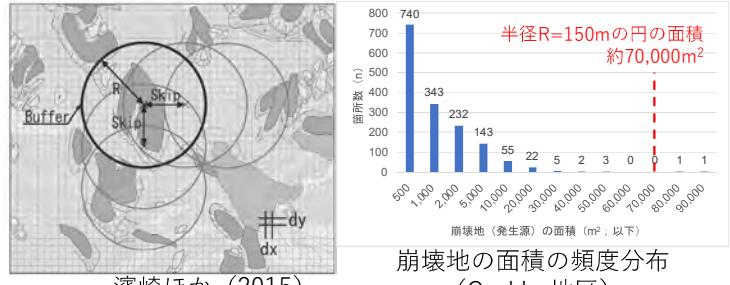
↓
地震による崩壊と地形量の把握
(傾斜, 起伏量, 地上開度)



傾斜分布図



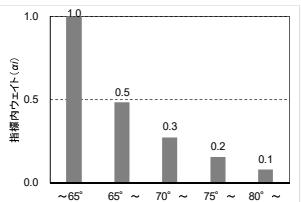
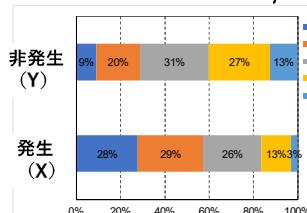
バッファ移動分析によるGIS統計データ収集



- Skip距離Lごとにバッファを移動させながら、半径R内の崩壊面積率とメッシュ単位（ここでは10mメッシュ）の地形量のデータ収集。
- ここでは、地形や崩壊発生源の規模を考慮してR=150m/L=150m。

濱崎英作・檜垣大助・林一成(2015) : GISに基づく斜面変動予測評価のためのバッファ移動分析と過誤確率分析法—2008年岩手・宮城内陸地震での事例研究—, 日本地すべり学会誌Vol.52-2, 3-11.

要因内ウェイト (α_i) の検討



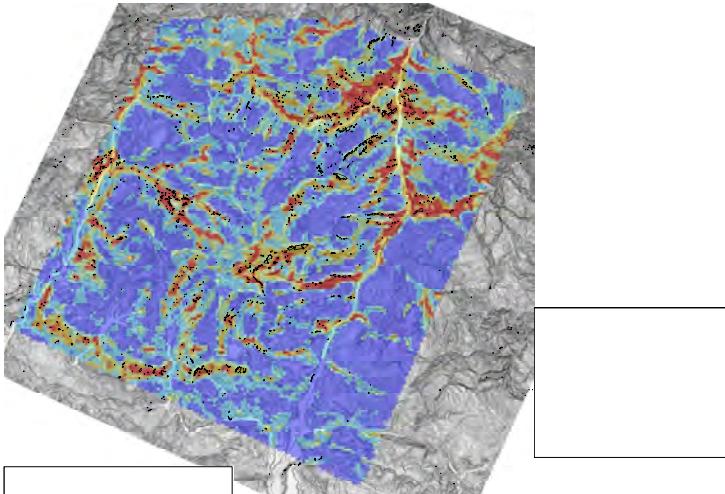
- 集積したバッファを崩壊発生(X)と非発生(Y)に区分
- $X/Y (=Z)$ が大きいランクほど崩壊発生し易い。
- Z最大を1.0とし、Zを正規化し指標内ウェイトとする (α_i)

要因間ウェイト (W_{ij}) の検討

地形量	過誤確率 (P)	指標間 ウェイト (W_{ij})
傾斜角度	32.0%	36
地上開度 (L=2000m)	37.5%	30
起伏量 (窓領域200m)	33.7%	34

ここでは、過誤確率が小さい指標ほど重いウェイトとなるように,
 $W_{ij} = (P^{-1}/P_{\text{sum}})^{-1} \times 100$
として試算

崩壊危険度 (S) の計算結果(ゴルカ地域)



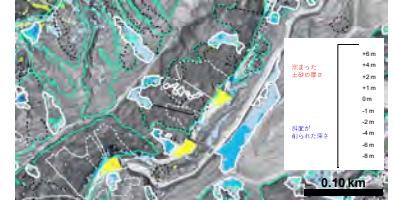
火山灰土層の推定厚さと現地斜面での厚さの比較 → 斜面での土層厚さを推定

● 火山灰層の厚さ分布の推定

- 火山灰噴出量の研究を基に推定

● 厚さの実測と推定との比較

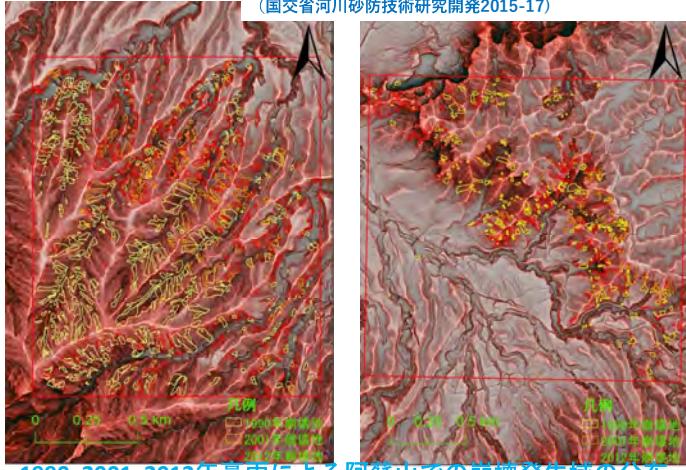
- 阿蘇山周辺の急斜面では、実測値が推定値の1/4程度と小さい
- 斜面の崩壊危険度評価のために厚さ分布の補正が必要！



5-2 高解像度DEMによる地形表現図からの崩壊跡地形判読

火山灰被覆斜面での崩壊発生危険斜面評価手法検討

(国交省河川砂防技術研究開発2015-17)



1990, 2001, 2012豪雨による阿蘇山での崩壊発生域の分布

(檜垣, 李, 林, 郷, 木村, 林, 佐藤, 後藤(2019): 日本地すべり学会誌Vo.56(電子版), 218-226)

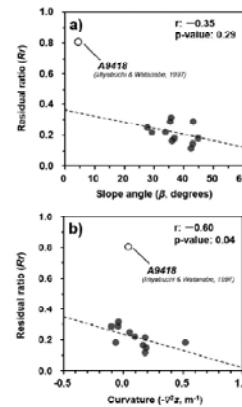


図-3 テフラの残存率と地形量との関係：(a)傾斜角との関係、(b)曲率との関係。

Fig. 3 Relationships between residual ratios of tephra layers and topographic properties: (a) the correlation of residual ratio with slope angle, (b) the correlation of residual ratio with curvature.

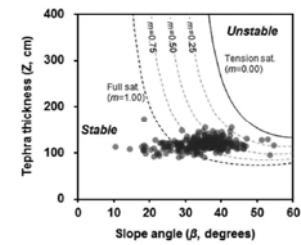


図-4 確界状態 ($F_s=1.00$) となる傾斜角とテフラ層厚との関係。図中の点は2012年7月豪雨により高岳地区内で発生した崩壊地309箇所の傾斜角と推定層厚との関係を、5つの曲線は相対水深 $m=0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$ の各段階で臨界状態となる傾斜角—層厚関係（崩壊発生、非発生の境界条件）を表す。

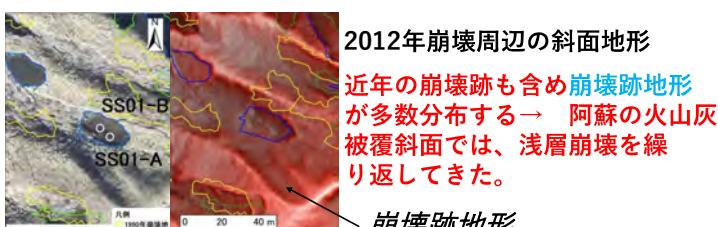
斜面土層厚（すべり面となり易い層深度）
↓ (地下水位m=0~1.00)

無限長斜面の安定計算から臨界土層厚算出

崩壊予測のカバー率 = 0.62 (m=0.75)

0.84 (m=1.00)

木村謙, 後藤聰, 佐藤剛, 若井明彦, 林信太郎, 榎垣大助(2019): テフラ層厚分布を考慮した斜面安定解析による崩壊危険地の抽出, 日本地すべり学会誌56(電子版) 240-249.



2012年崩壊周辺の斜面地形

近年の崩壊跡も含め崩壊跡地形
が多数分布する → 阿蘇の火山灰
被覆斜面では、浅層崩壊を繰
り返してきた。

崩壊跡地形

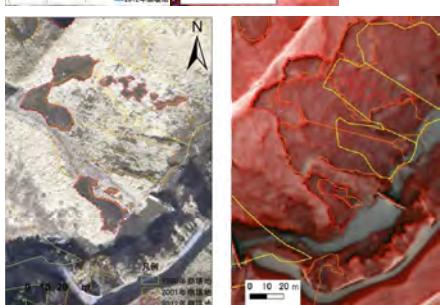


Table 2 Ratios of the landslide slopes expected to slip by rainfall based on the slope stability analysis.

相対水深 m	崩壊発生した 崩壊地の箇所数 $G_{(m,1)}$	崩壊地の箇所数 $G_{(m,2)}$	カバー率 $C_{(m)}$	$F_s < 1.00$ となる 斜面領域の面積割合
0.25	5	304	0.02	0.05% (0.00 km²)
0.50	51	256	0.17	5.20% (0.08 km²)
0.75	191	118	0.62	34.25% (0.51 km²)
1.00	260	49	0.84	66.58% (0.99 km²)

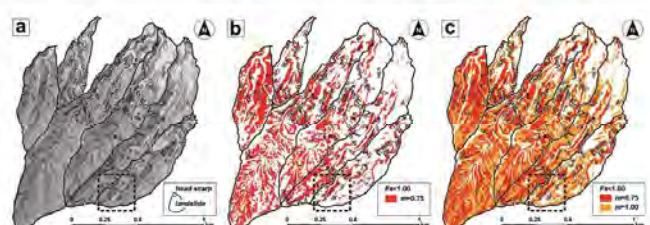


図-5 高岳地区における崩壊地と斜面安定解析で抽出された崩壊危険地の分布との比較：(a)2012年7月豪雨により発生した崩壊地とその頭部滑落崖の分布、(b)相対水深 $m=0.75$ の条件下で $F_s < 1.00$ となる斜面領域の分布、(c) 相対水深 $m=1.00$ の条件下で $F_s < 1.00$ となる斜面領域の分布。

(木村ほか, 2019)

2012年豪雨での崩壊地の多くが $m=0.75, 1.00$ での $F_s < 1.0$ の斜面に入る。
但し、実際の崩壊面積率(8%)に比べ過大。



山の住民は斜面を良く知っている(ブータン中部)

斜面災害リスク管理に地形情報を活かす

1. 地形痕跡、歴史時代も含めた斜面変動インベントリーが大事
2. 記載的な地形から、地形発達・営力の演繹的説明をもとにした地形分類、形成過程の説明が必要
3. 2に基づく斜面災害リスク評価手法の高度化
4. 高解像度数値地形データと地形表現図による地形判読、定量的解析を行うとともに、判読技術の継承・普及
5. 温暖化を見据えた斜面災害リスク対応に、地形痕跡が活用できる?



再活動性を持つことが多い地すべりでは、住民協働のハザードマップ作りが有効ではないか?

→住民の声を聞き取り、市民に分かる土地や地すべり変状の見方を教材化

