An aerial photograph of a mountain slope covered in dense forest. A prominent, wide, light-brown path of soil and debris, likely a landslide, runs vertically down the center of the image. The forest consists of various shades of green and brown, indicating different types of trees and possibly some dead or dormant vegetation. In the background, more mountain peaks are visible under a clear sky.

2024年7月23日
第11回S-18セミナー
オンライン開催

山地における土砂災害 ー森林による減災効果とその限界ー

(国研) 森林研究・整備機構
森林総合研究所
経隆 悠

本日の内容

1. 斜面が崩れる（斜面崩壊）メカニズムについて



2. 森林の斜面崩壊防止機能について



3. 近年の斜面崩壊を引き起こす降雨について



4. 森林の斜面崩壊防止機能の限界に関する力学的考察

土砂災害（土石流等，地すべり，がけ崩れ）発生件数の推移

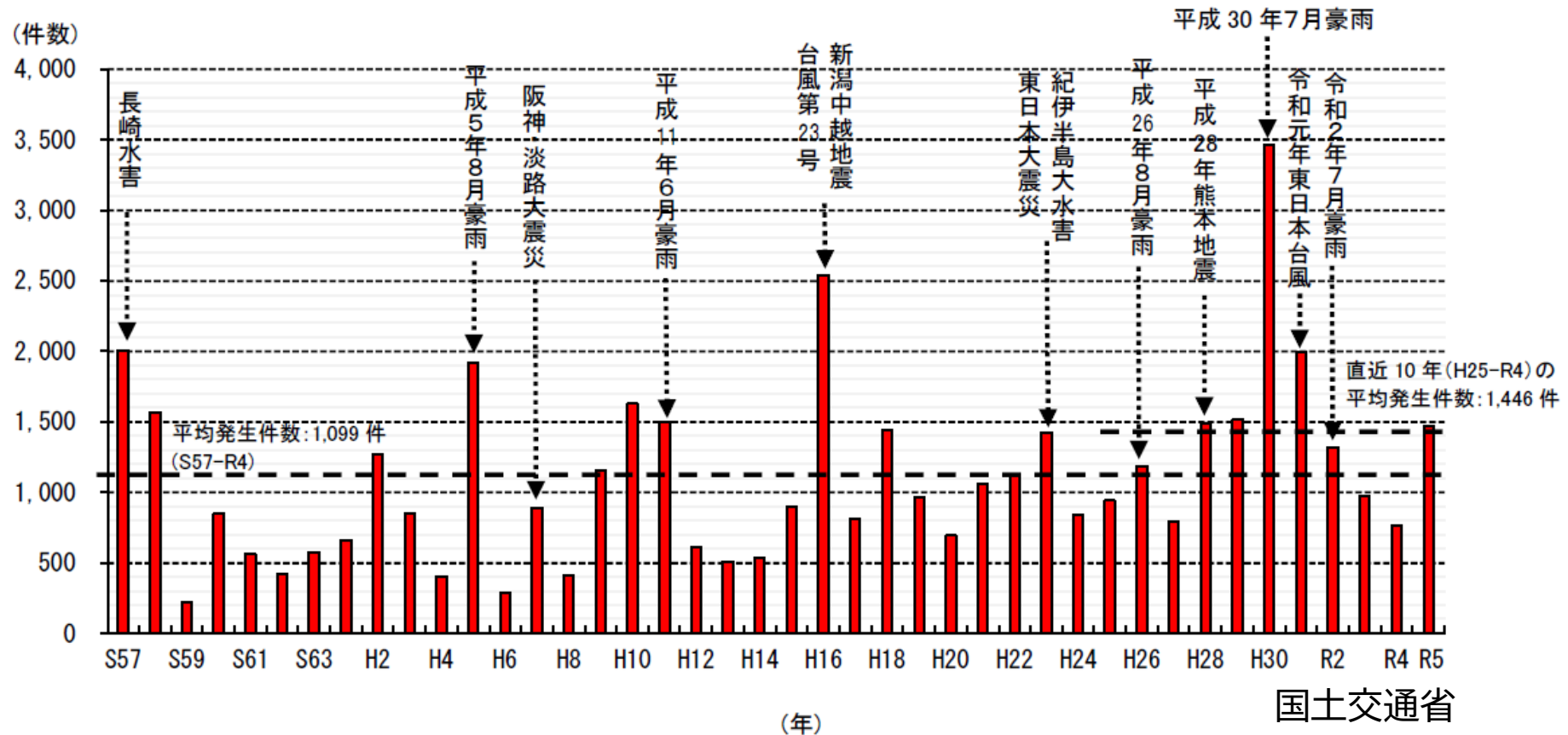
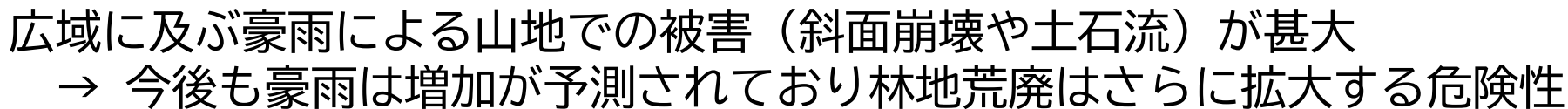


図. 土砂災害発生件数の推移 (S57~R5)

発生件数は年毎に大きくばらつく（大災害によって件数が急増するため）
近年では発生件数が500件を下回ることがなくなってきている


山地災害：雪崩や融雪，風倒木等も含む



近年の豪雨による土砂災害

平成29年九州北部豪雨

(福岡県朝倉市)

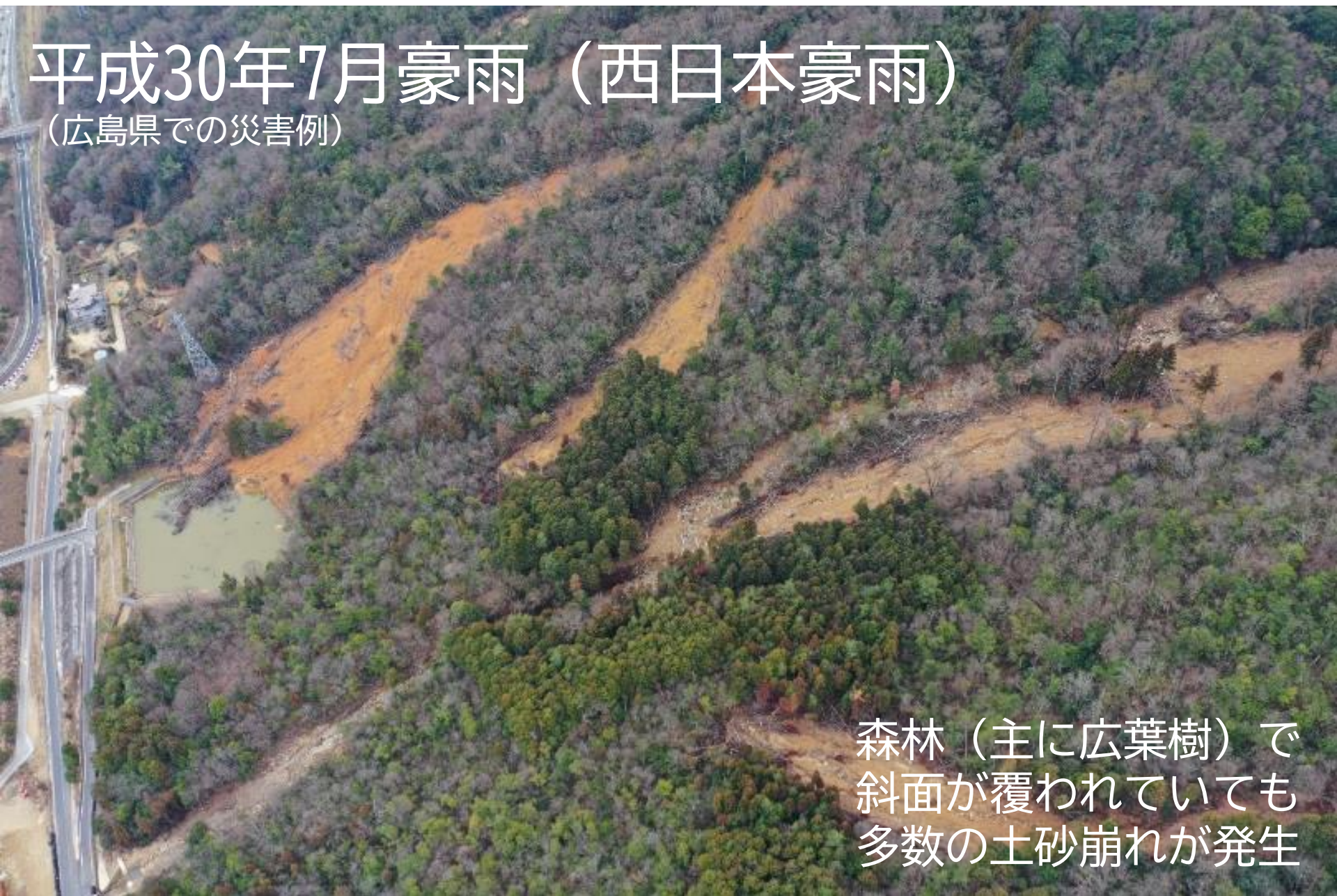
An aerial photograph showing a vast mountainous landscape covered in dense green forest. Numerous brown, muddy paths of landslides and mudflows are visible, cutting through the green forest. The terrain is rugged, with steep slopes and deep valleys. In the distance, more mountain ranges are visible under a hazy sky. A small power line tower is visible on a ridge in the upper right.

森林（主に針葉樹）で
斜面が覆われていても
多数の土砂崩れが発生

近年の豪雨による土砂災害

平成30年7月豪雨（西日本豪雨）

（広島県での災害例）



森林（主に広葉樹）で
斜面が覆われていても
多数の土砂崩れが発生

近年の豪雨による土砂災害

平成30年7月豪雨（西日本豪雨）

（広島県での災害例）

広域かつ多地点で斜面が崩れるため
ダム等の人工構造物での対策には限界がある

森林に覆われていたとしても
なぜこれほど多くの崩壊が発生するのか？

そもそもなぜ雨によって斜面は崩れるのか？

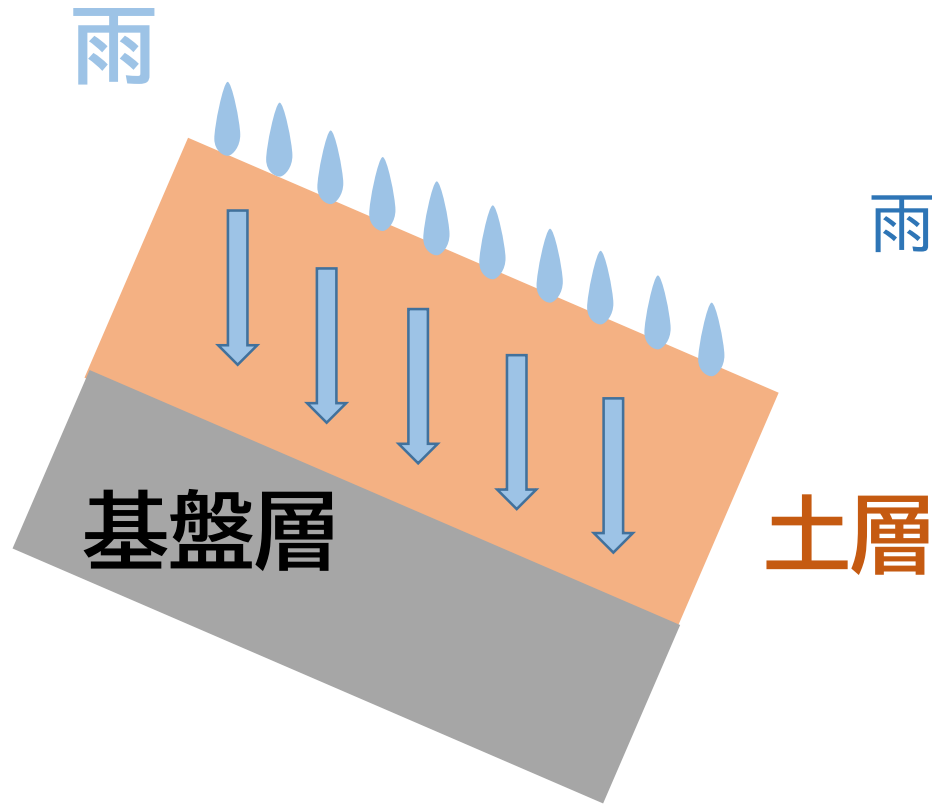
降雨中の山地斜面の模式図

雨



雨は斜面の内部で
どのような動きをするのか

そもそもなぜ雨によって斜面は崩れるのか？



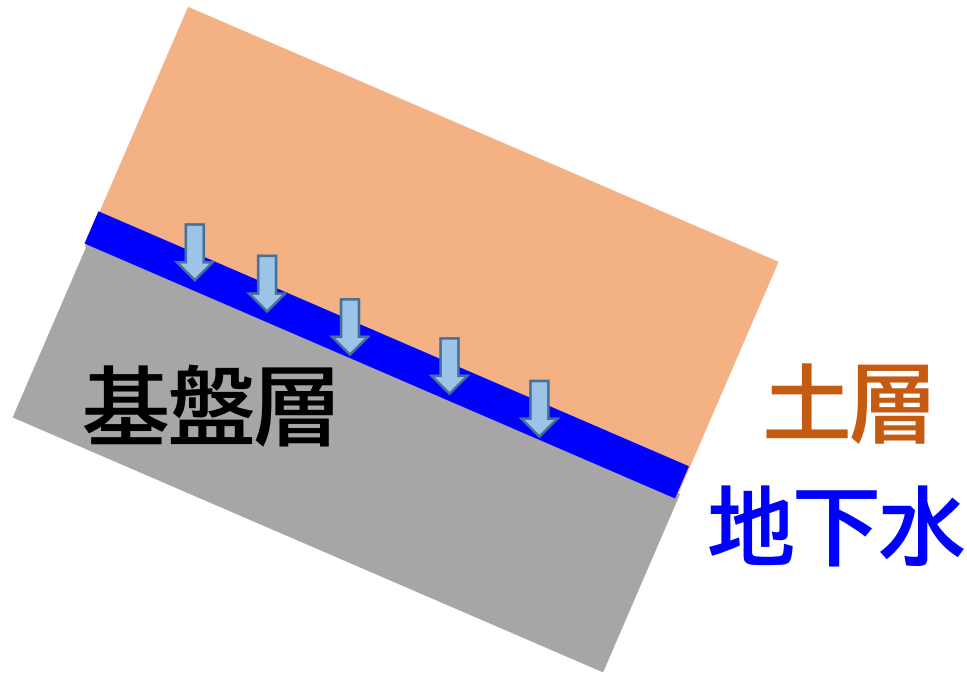
雨は水を通しやすい土層に浸透

そもそもなぜ雨によって斜面は崩れるのか？

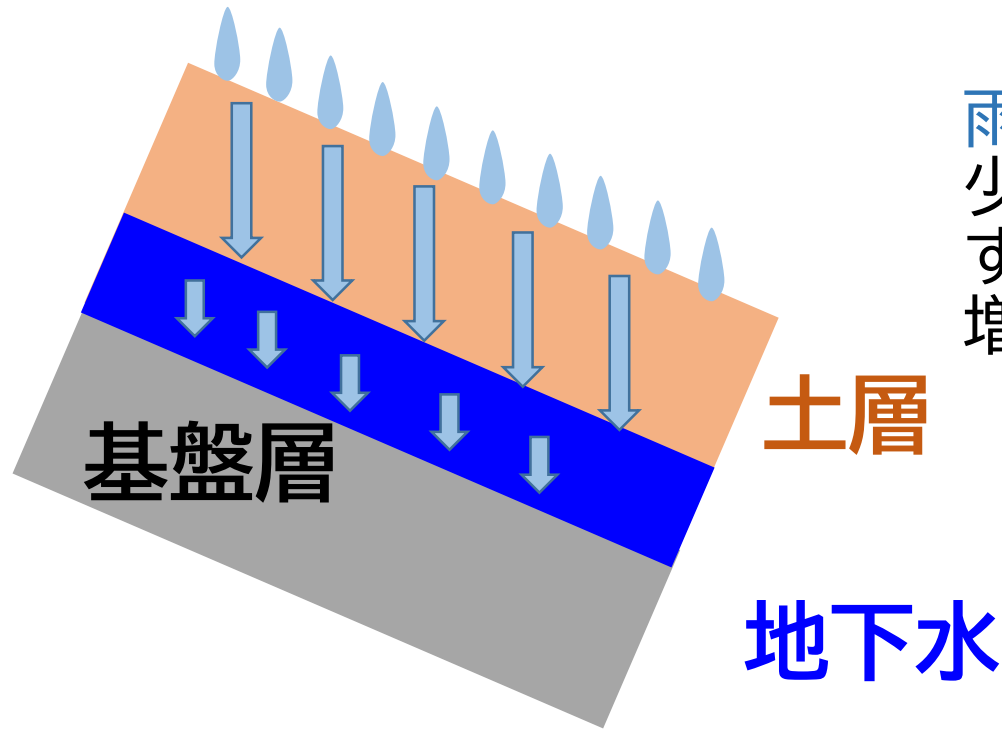
雨は水を通しにくい基盤層（岩盤など）ではゆっくり移動する



雨が基盤層上部に地下水として蓄積されていく



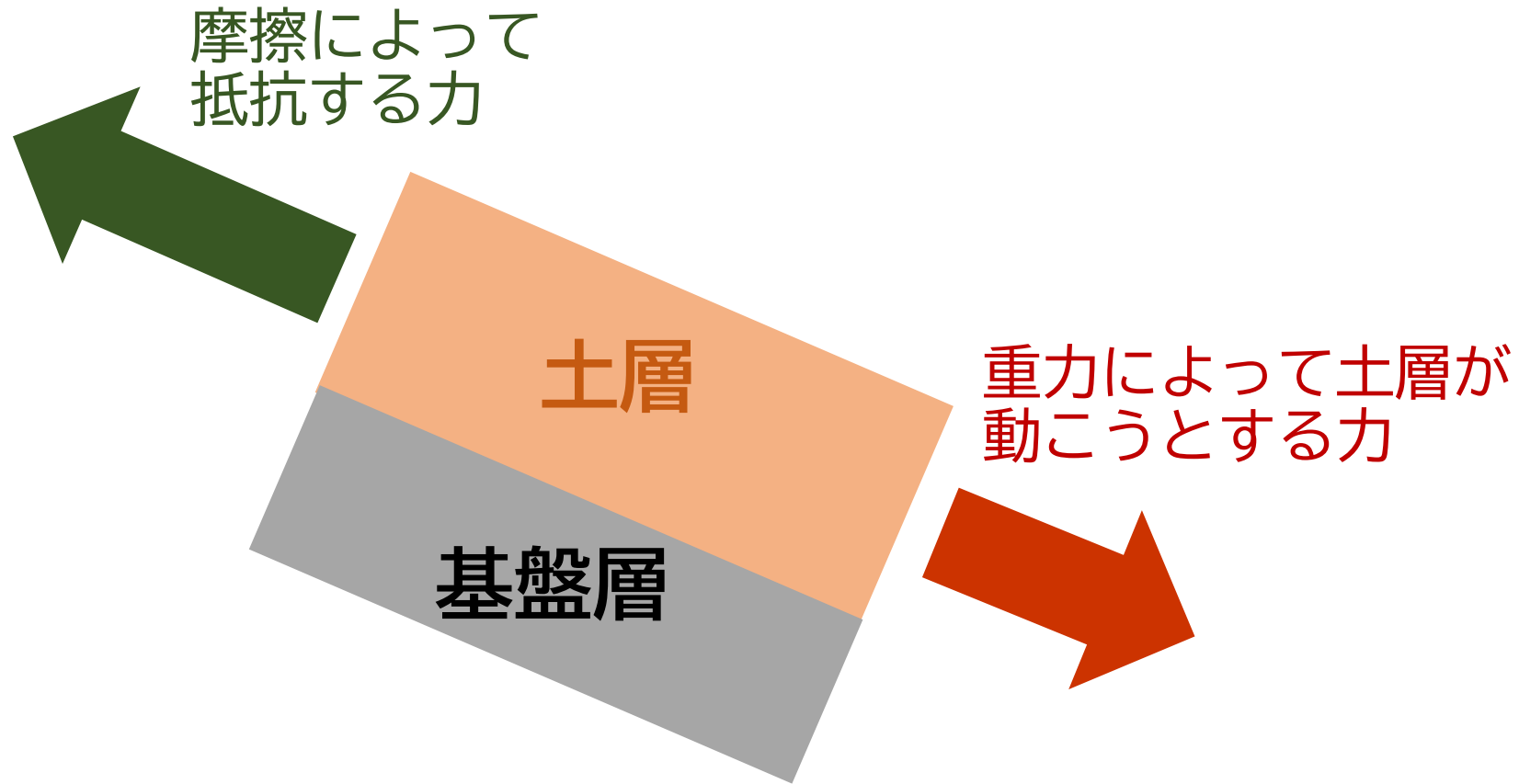
そもそもなぜ雨によって斜面は崩れるのか？



雨が大量に短時間で降ったり
少量ずつだが長時間降ったり
すると基盤層上部の地下水が
増えていく

そもそもなぜ雨によって斜面は崩れるのか？

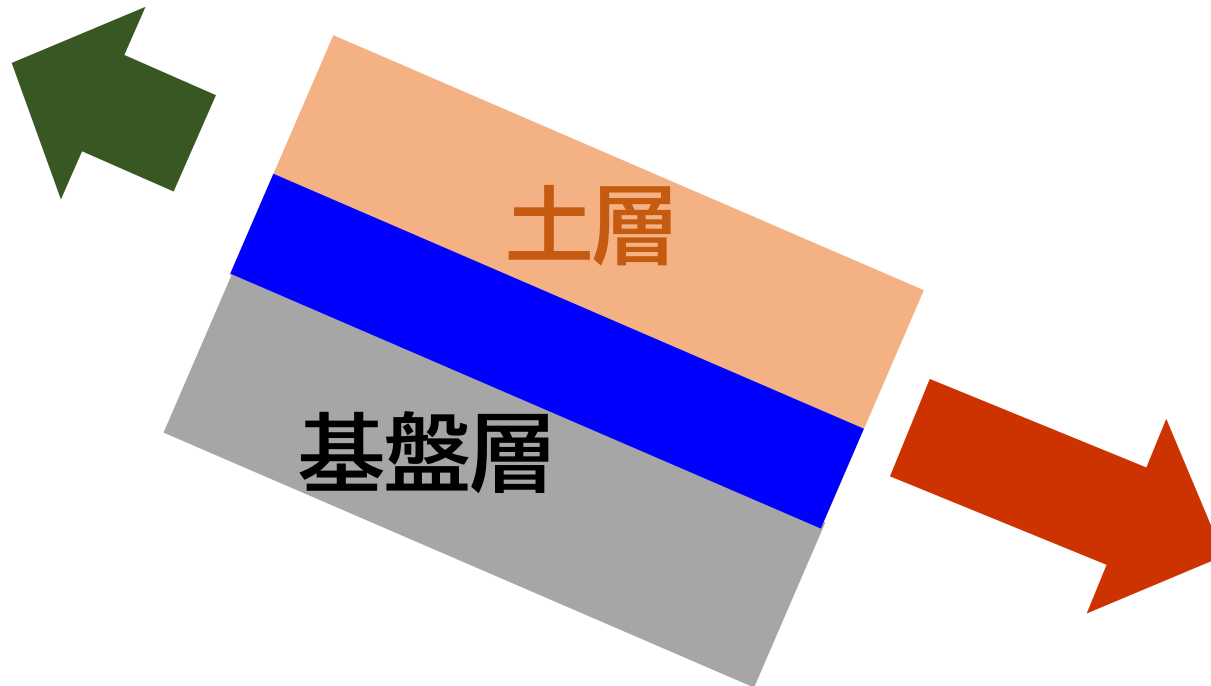
地下水が無いあるいは少ない場合



緑矢印の力（抵抗力） > 赤矢印の力（せん断力）
であるため斜面の土層は崩れない

雨（地下水）が抵抗力を下げるから崩れる

抵抗力（地下水によって土粒子に浮力が働き摩擦が減少）

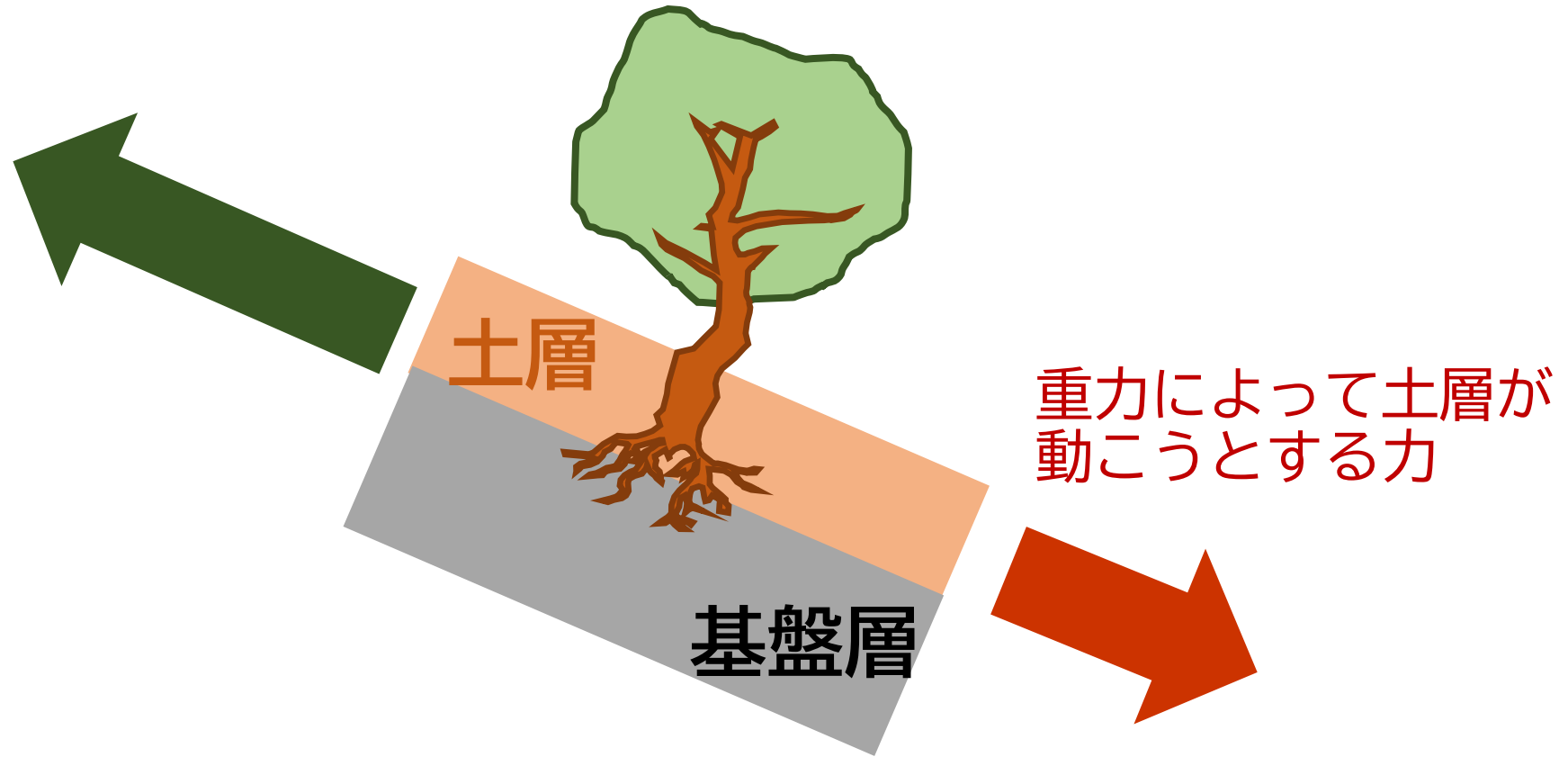


緑矢印の力（抵抗力） < 赤矢印の力（せん断力）
となり斜面の土層が動き出す（崩れてしまう）

土層の崩壊を表層崩壊，基盤層内部まで崩壊するものを深層崩壊と呼ぶ

森林は抵抗力を上げるから崩れにくくなる

抵抗力（摩擦によって抵抗する力+木の根によって抵抗する力）

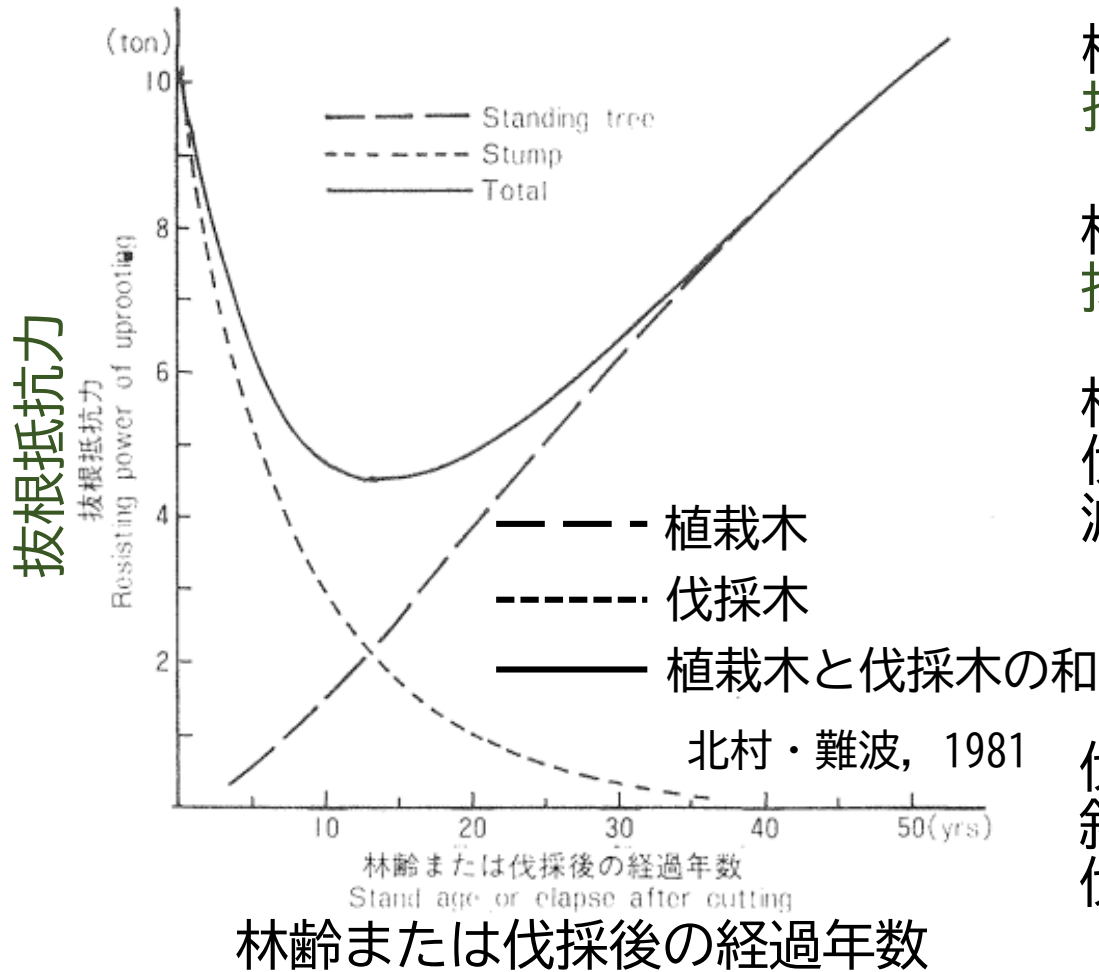


森林の根系は抵抗力を増加させる

緑矢印の力（抵抗力）が増加することで
斜面の土層が動きにくくなる（崩壊防止機能）

樹木根系による崩壊防止機能は変化する

スギの植栽木と伐採木の抜根抵抗カ



植栽木は成長によって
抵抗カが50年ほどの間増加

根が残っていれば伐採木は直ちに
抵抗カが無くなるわけではない

根が腐るまで時間がかかるので
伐採後10～20年ほどの間に
減少し続ける

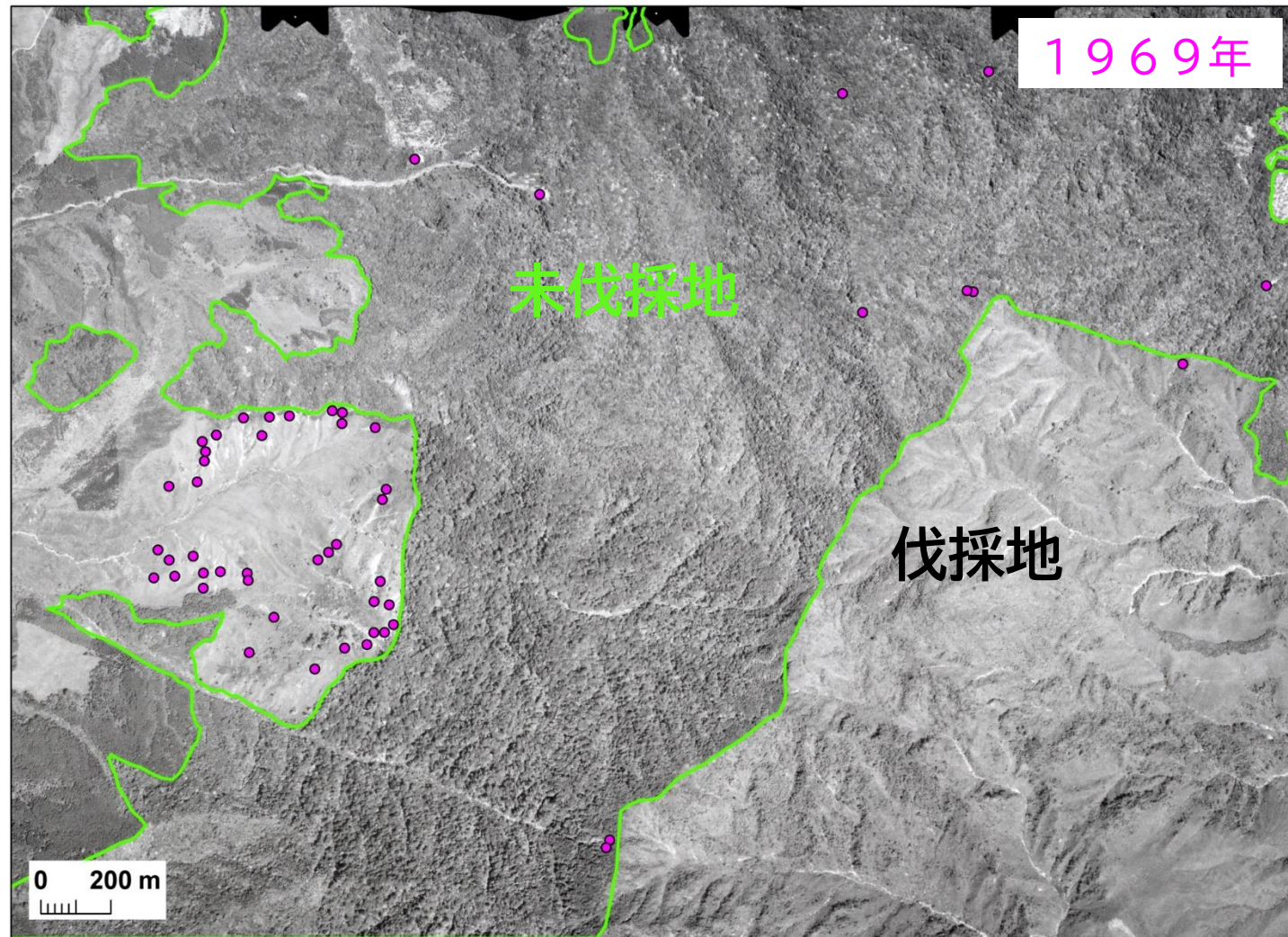


伐採直後に植林したとすると
斜面の根系による抵抗カは
伐採後10～20年後に最も低下

木を切ると根系による抵抗カが減少し斜面が崩れやすくなる

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

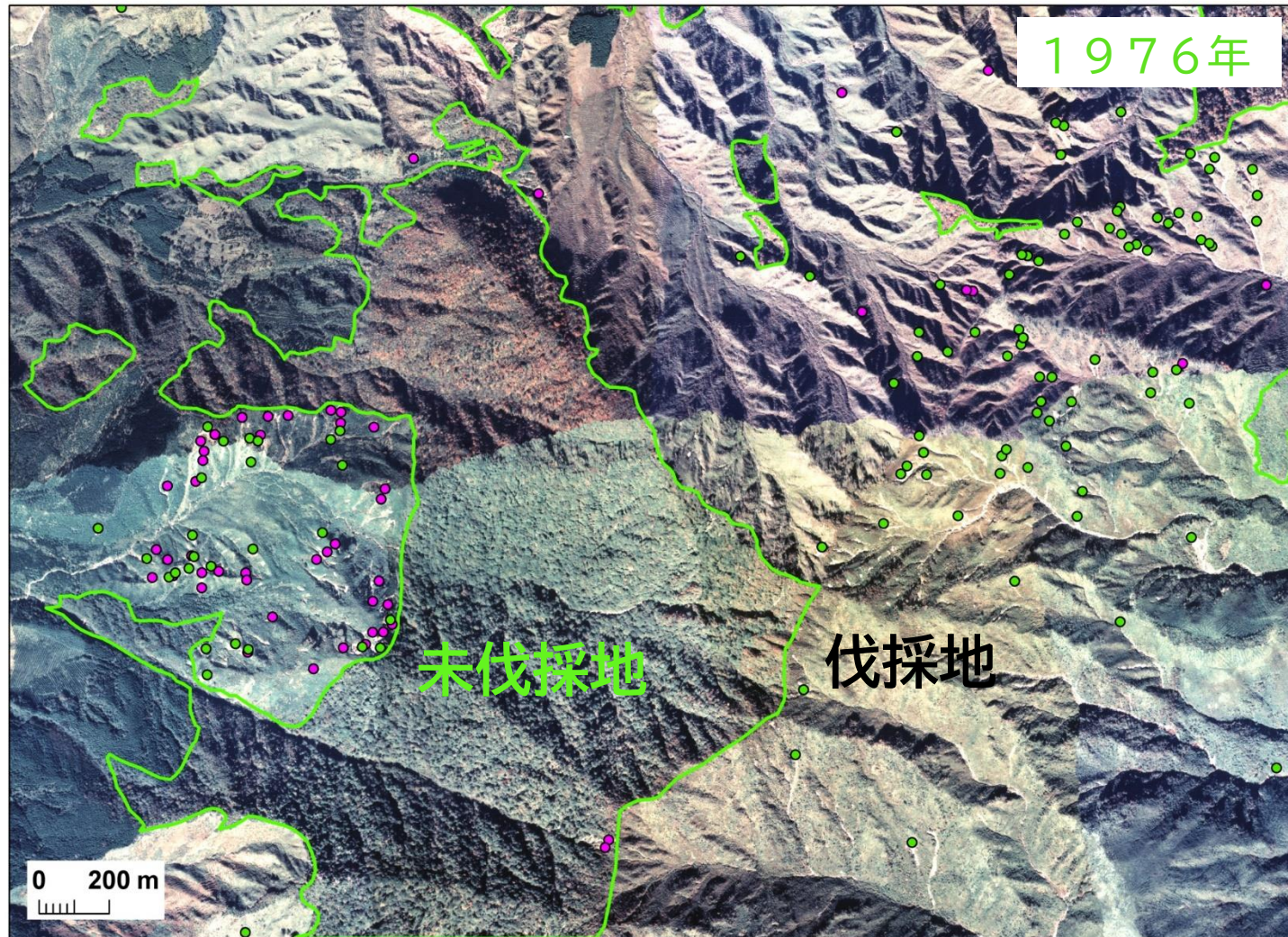
Saito et al., 2017



熊本・宮崎県の市房山では1960年代後半に大規模な皆伐を実施

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

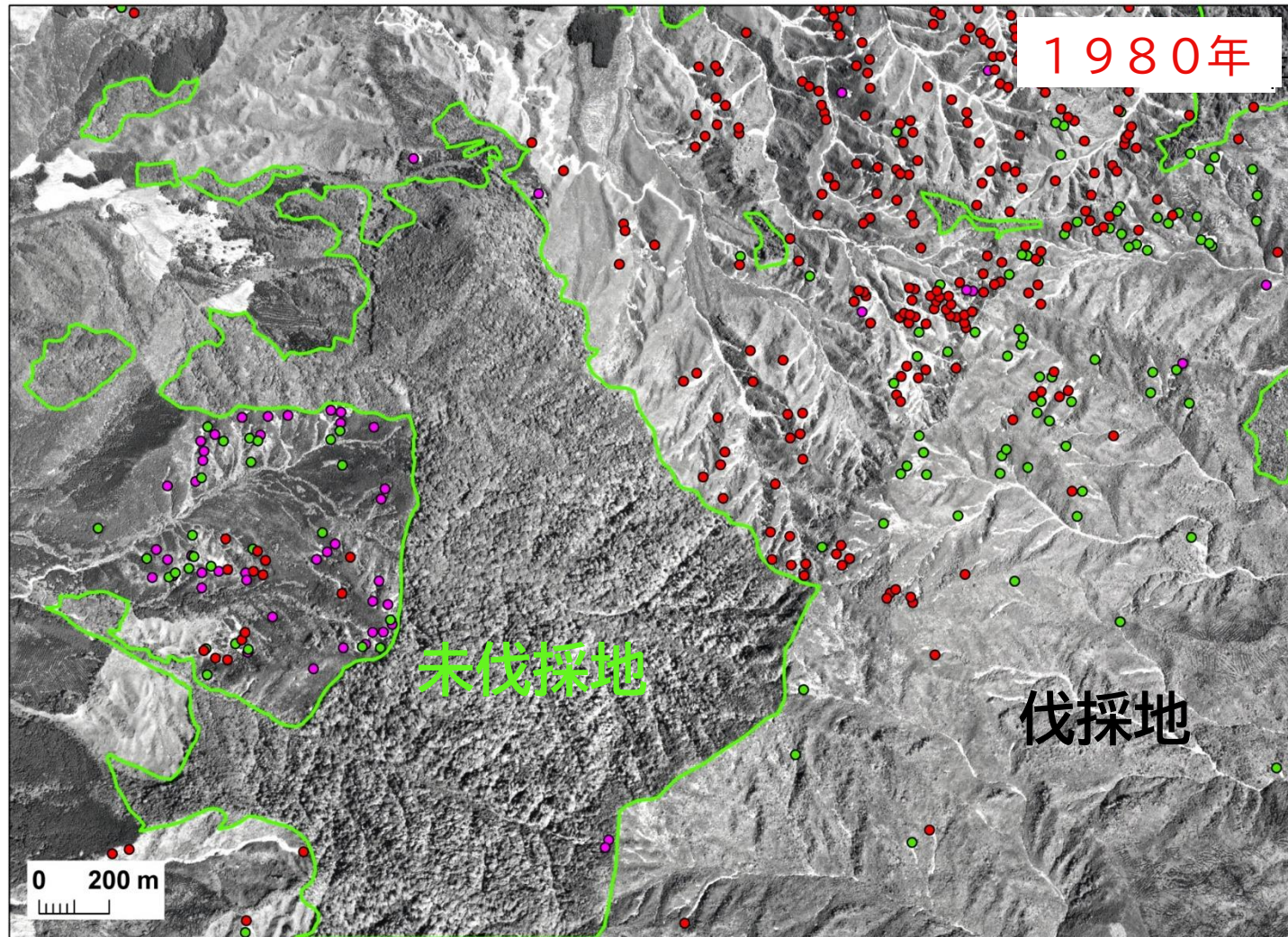
Saito et al., 2017



その後、伐採地で崩壊が多発するようになった

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

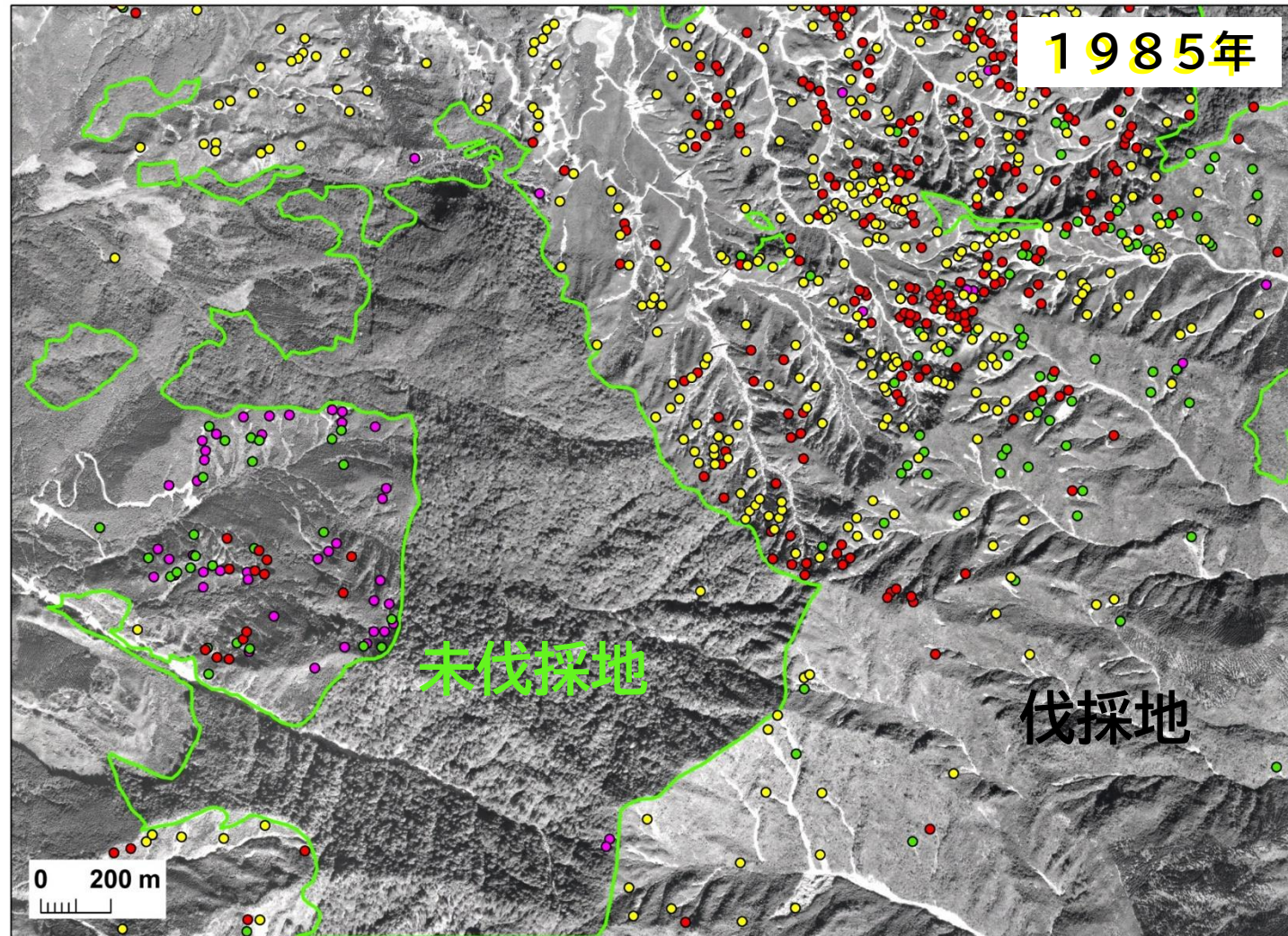
Saito et al., 2017



その後、伐採地で崩壊が多発するようになった

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

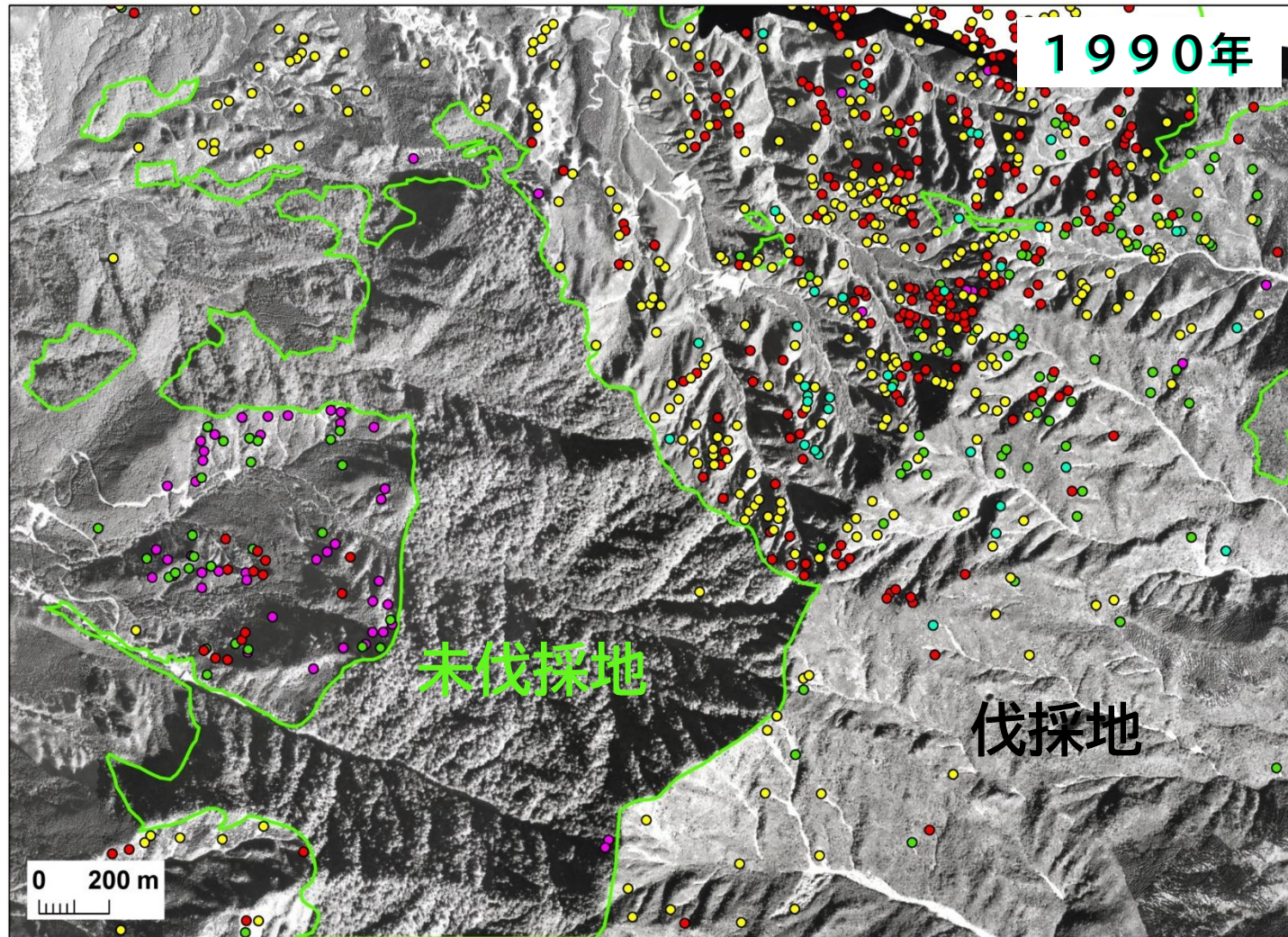
Saito et al., 2017



その後、伐採地で崩壊が多発するようになった

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

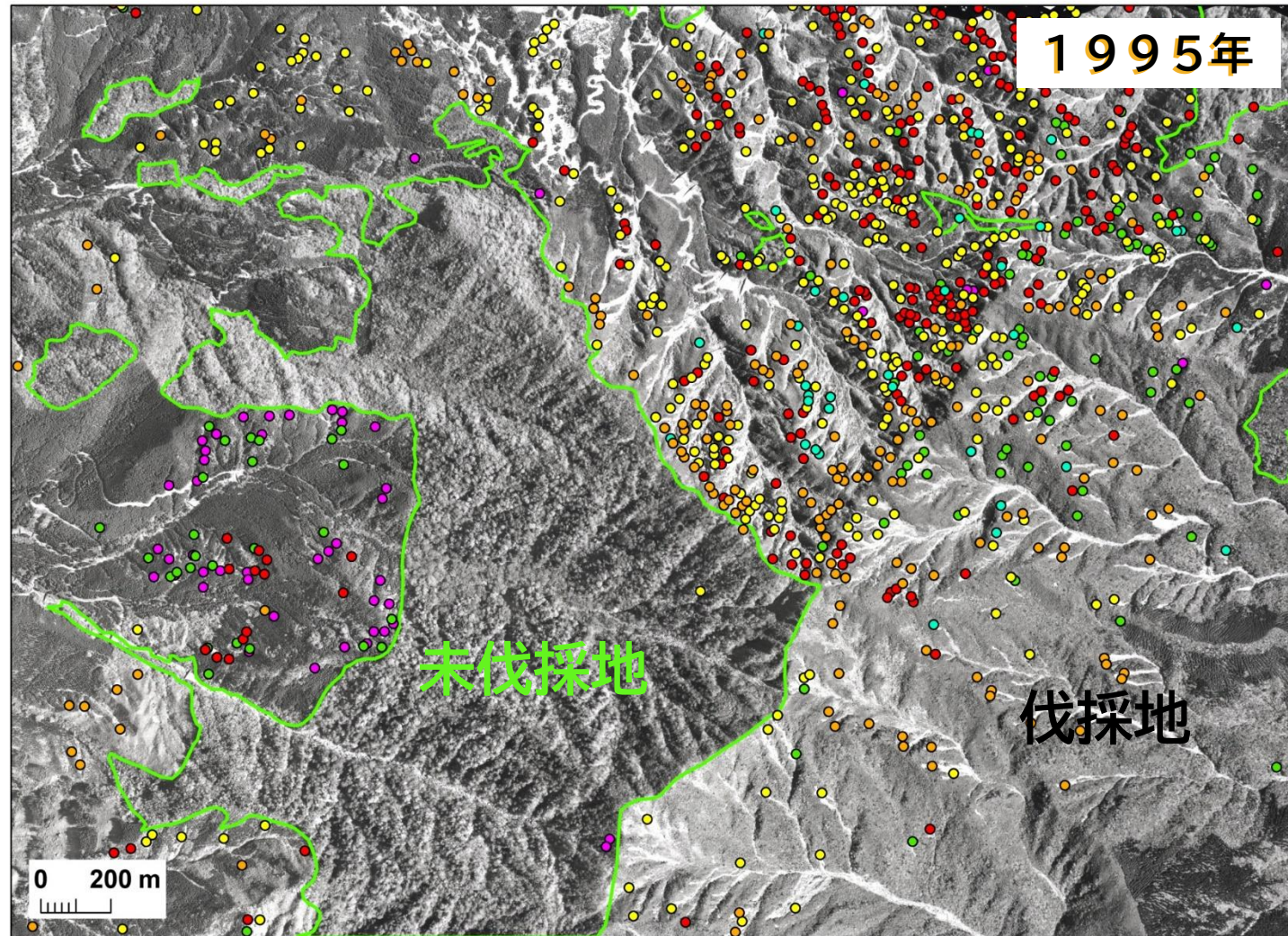
Saito et al., 2017



その後、伐採地で崩壊が多発するようになった

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

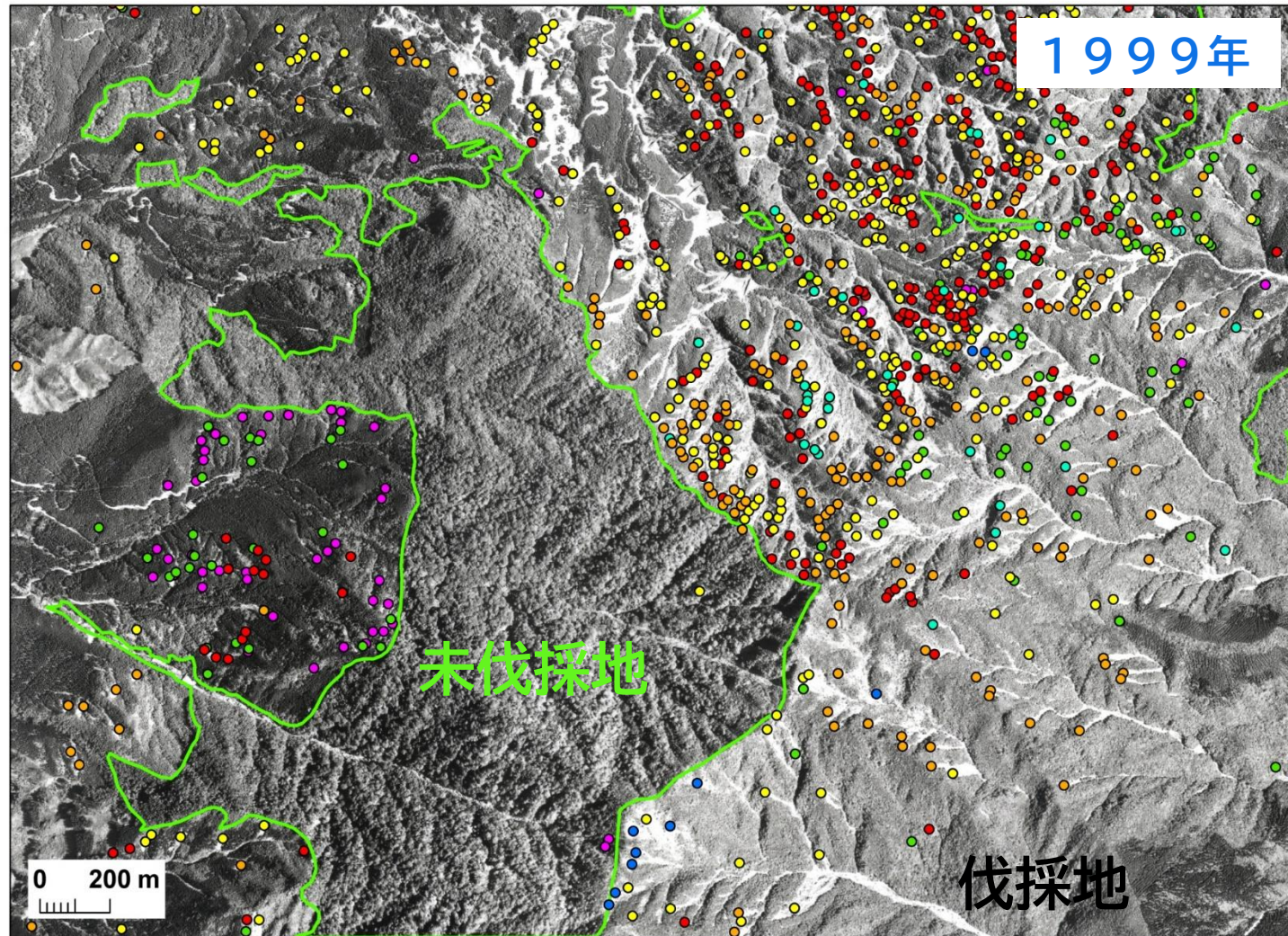
Saito et al., 2017



その後、伐採地で崩壊が多発するようになった

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

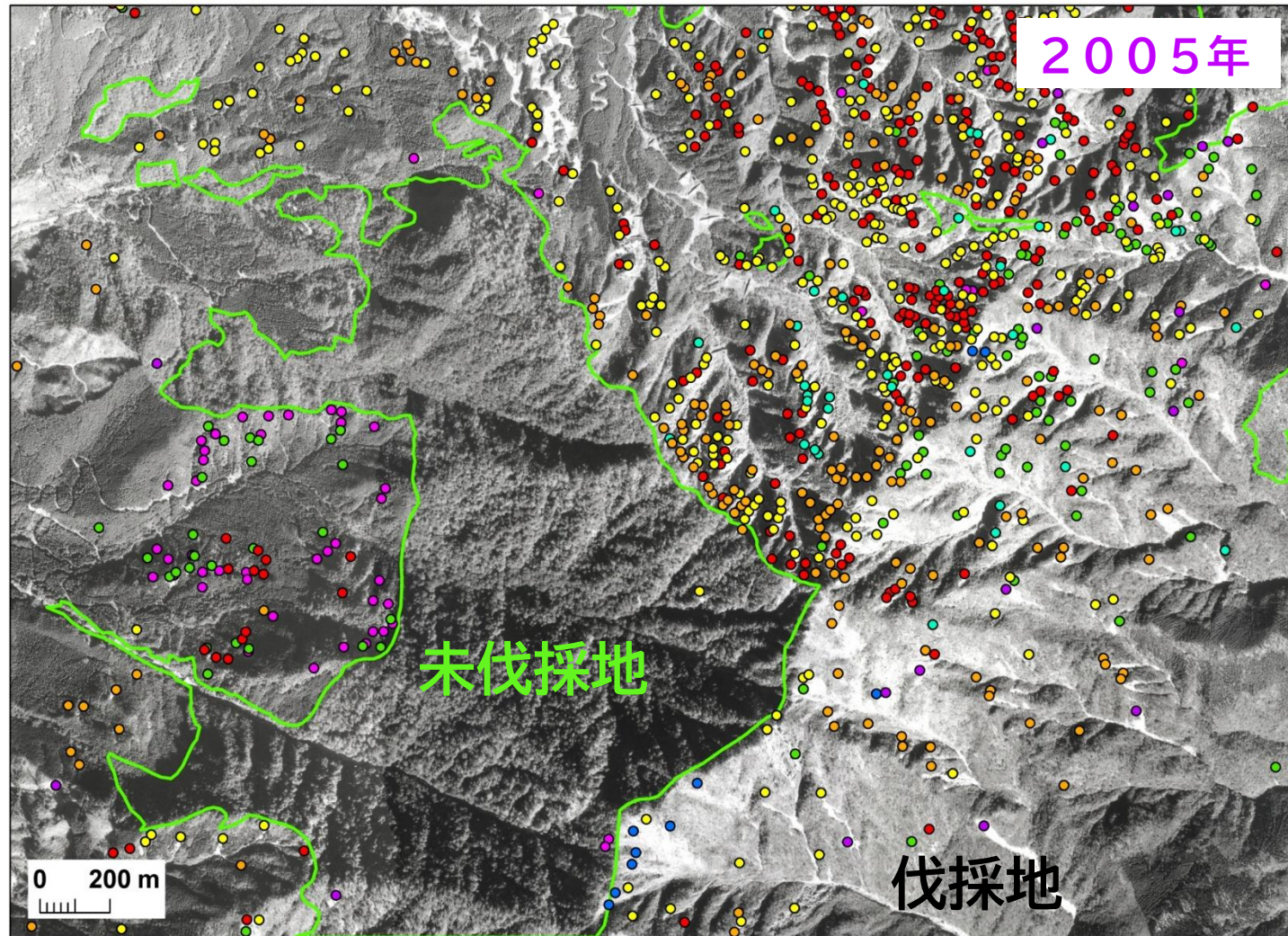
Saito et al., 2017



崩壊発生数が激減

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

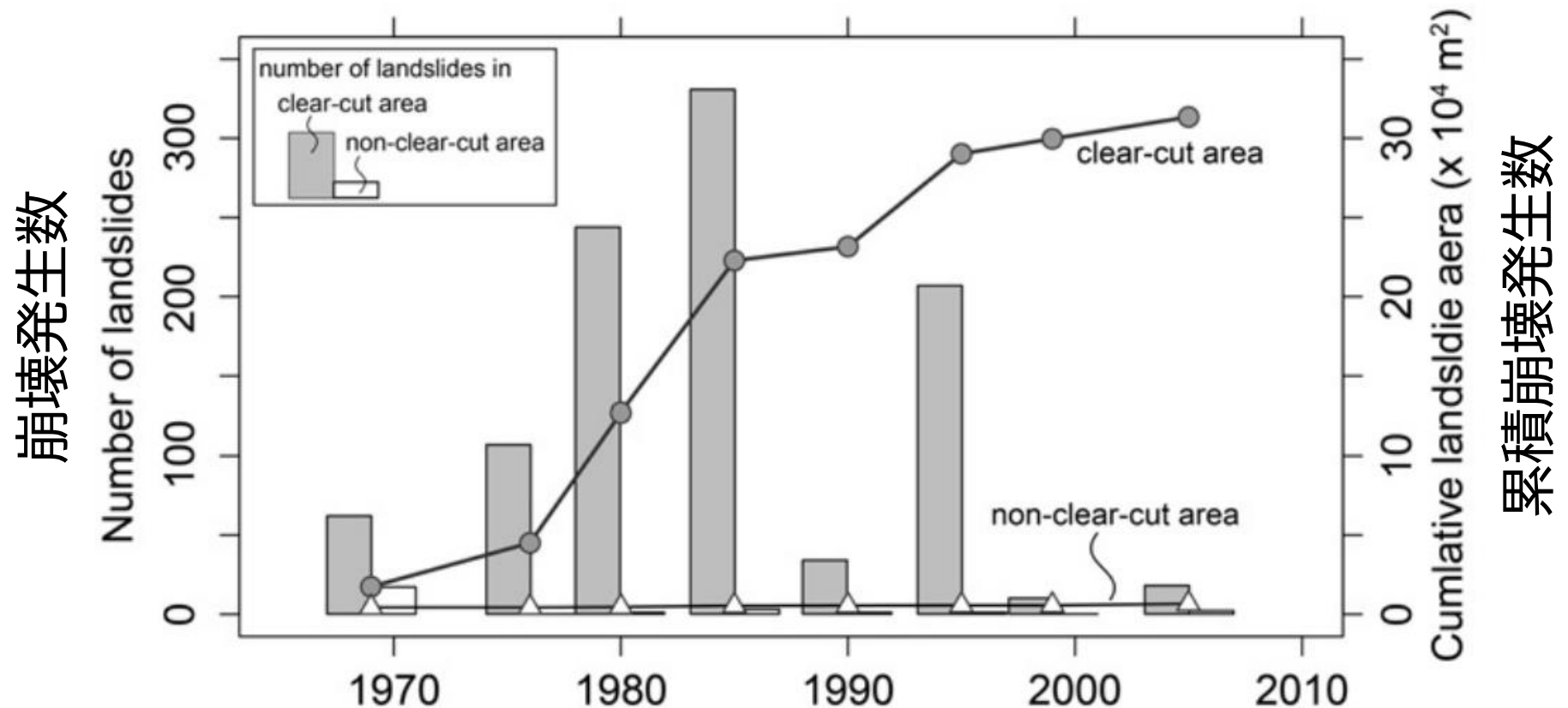
Saito et al., 2017



崩壊発生数が激減

実際に伐採後は斜面が崩れやすい

Saito et al., 2017



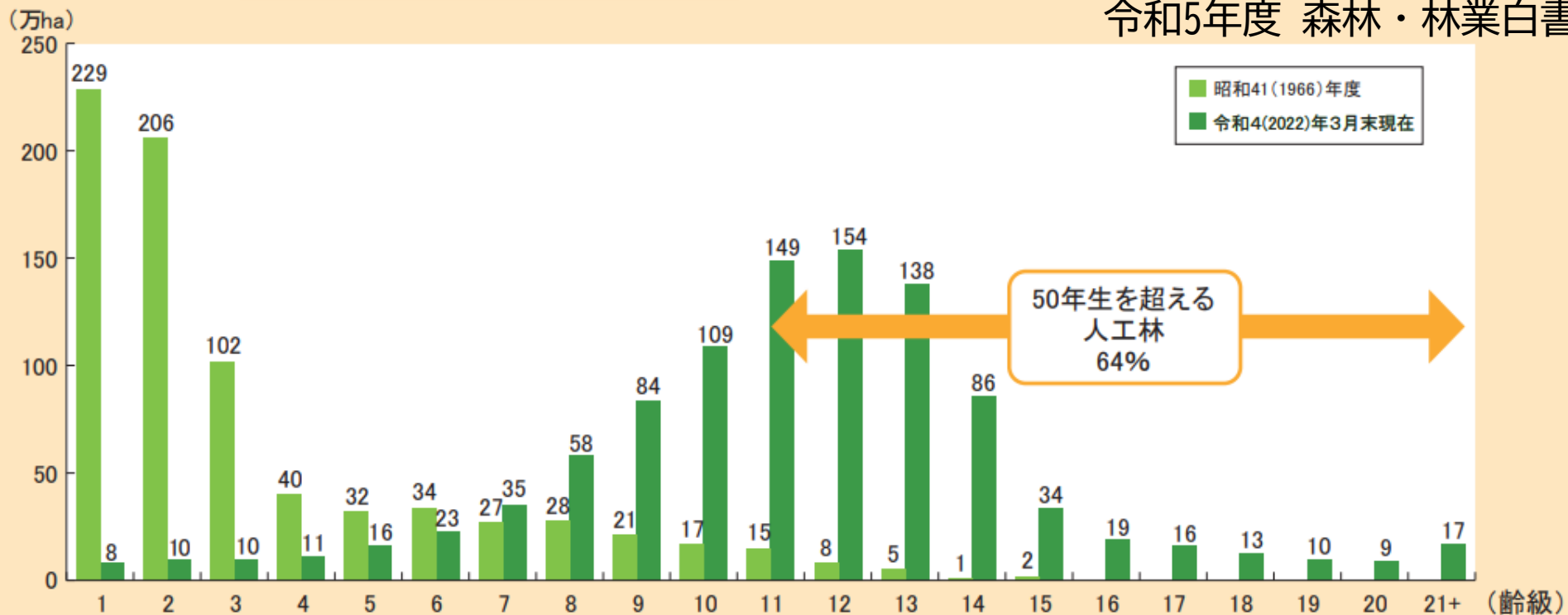
10～20年後の1980年前後に皆伐地（灰色棒グラフ）で崩壊が多発
40～50年後には皆伐地とその他の地域で大きな差はみられない

根系の腐食や成長による崩壊防止機能の変化は数十年で落ち着く

どの程度森林による減災効果が期待できるのか？

人工林（森林の約4割）の齢級構成の変化

令和5年度 森林・林業白書



注：「齢級」は、林齢を5年の幅でくくった単位。苗木を植栽した年を1年生として、1～5年生を1齢級と数える。

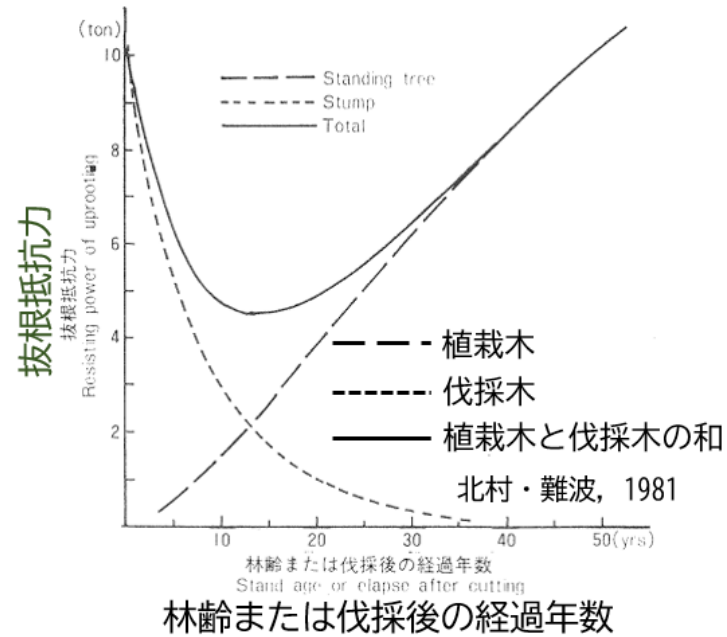
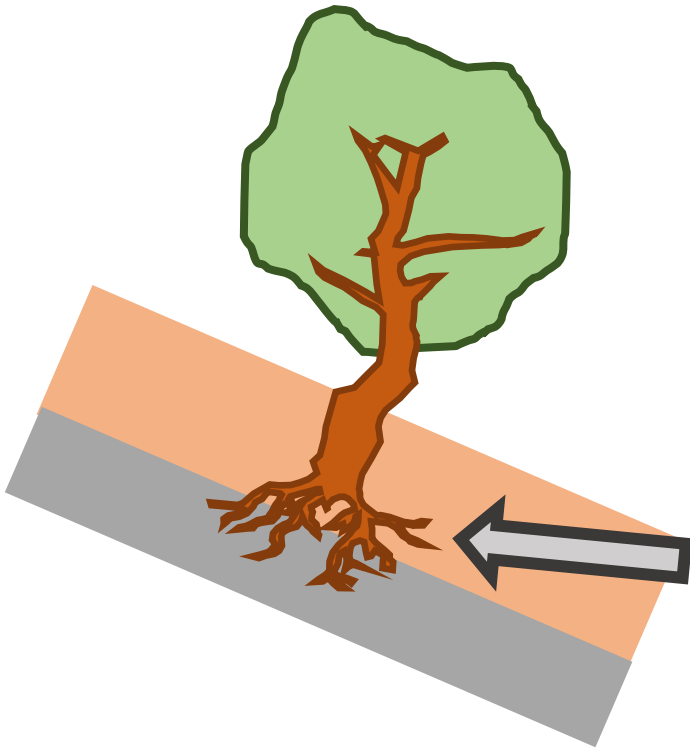
資料：林野庁「森林資源の現況」(令和4(2022)年3月31日現在)、林野庁「日本の森林資源」(昭和43(1968)年4月)

1966年にはほとんどが15年生未満だったが
2022年には約64%が50年生を超えた

ほとんどの森林が成熟している

つまり，成熟した森林によって

スギの植栽木と伐採木の抜根抵抗力



樹木根系による崩壊防止機能
→多くの斜面で最大限発揮されている

近年の土砂災害は森林の崩壊防止機能の限界を超える雨
(降水量が多い非常に稀な雨) によって発生している？

近年の土砂災害を引き起こした雨を調べる

近年の主要な土砂災害（斜面崩壊）合計10事例で検討

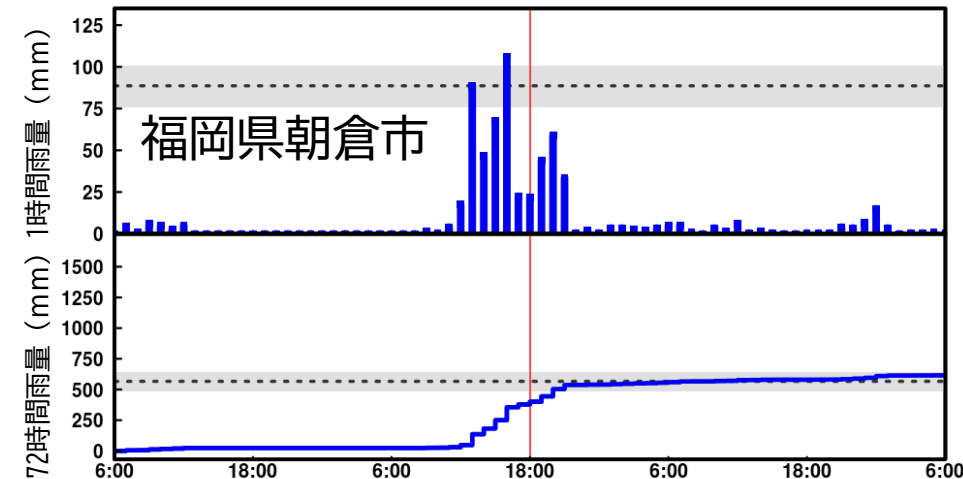
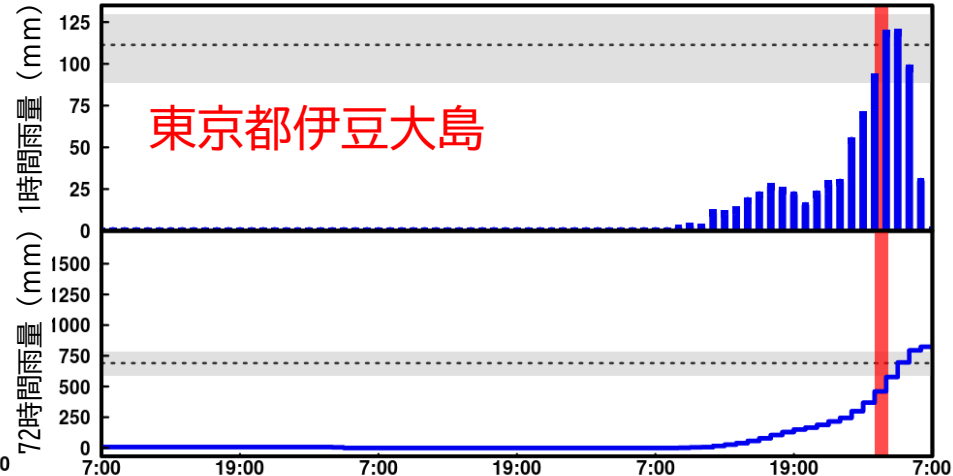
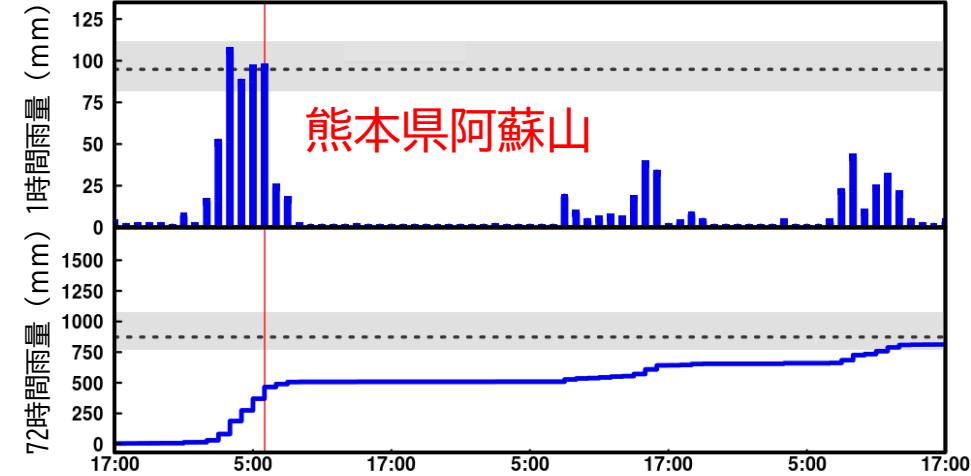
Tsunetaka, 2021



北海道十勝（2016年）
北海道日高（2003年）
宮城県丸森町（2019年）
長野県岡谷市（2006年）
東京都伊豆大島（2013年）
奈良県紀伊半島（2011年）
広島県東広島市（2018年）
愛媛県宇和島市（2018年）
福岡県朝倉市（2017年）
熊本県阿蘇山（2012年）

一般的な表層崩壊・火山地域での表層崩壊・深層崩壊など
異なる条件で発生した災害を比較する

土砂災害を引き起こす雨の降り方



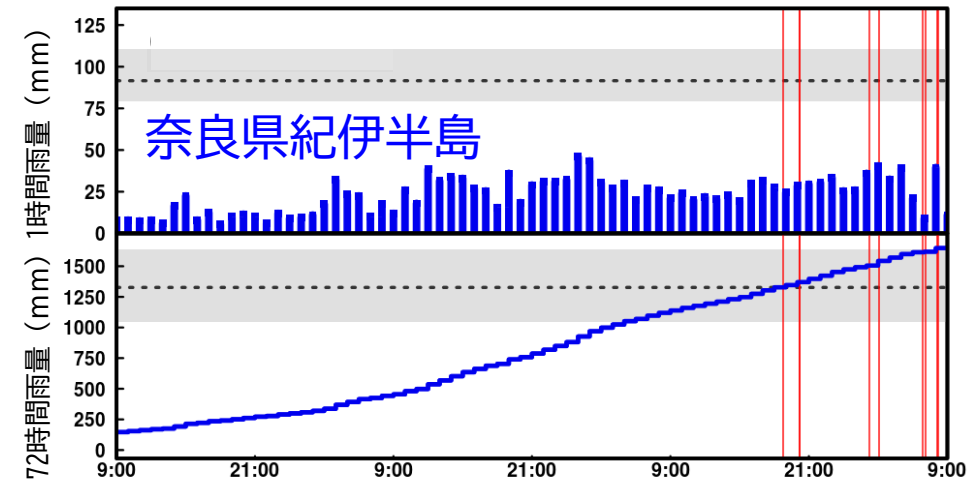
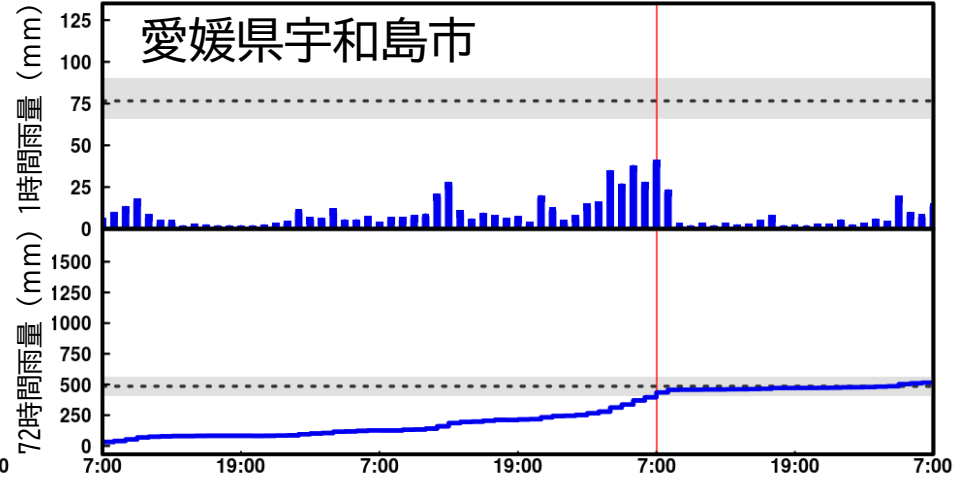
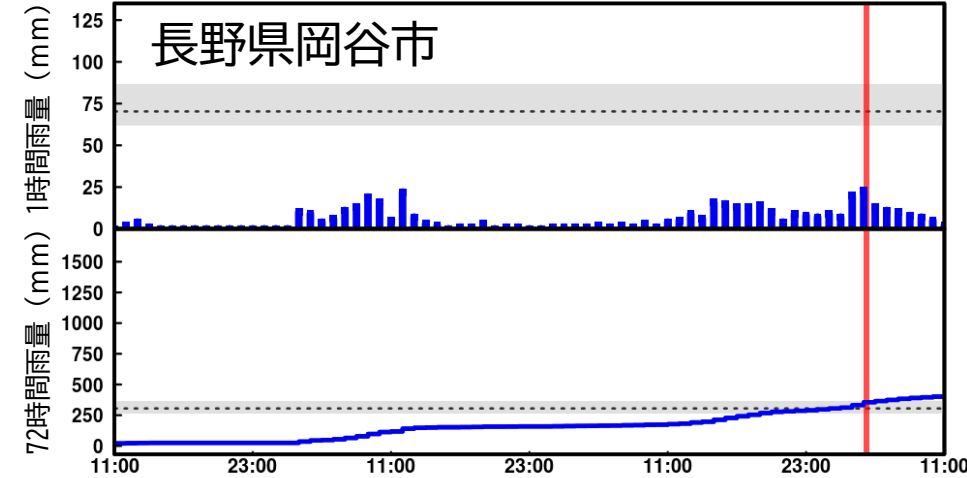
灰色領域：100年に一度の雨の強さ
(95%信頼区間)

赤線：災害発生時刻

青線：降雨量
(上段1時間雨量・下段72時間雨量)

100年に一度レベルの強さの1時間雨量が
数時間以内にまとまって降ることによって災害が発生

災害を引き起こす雨の降り方



灰色領域：100年に一度の雨の強さ
(95%信頼区間)

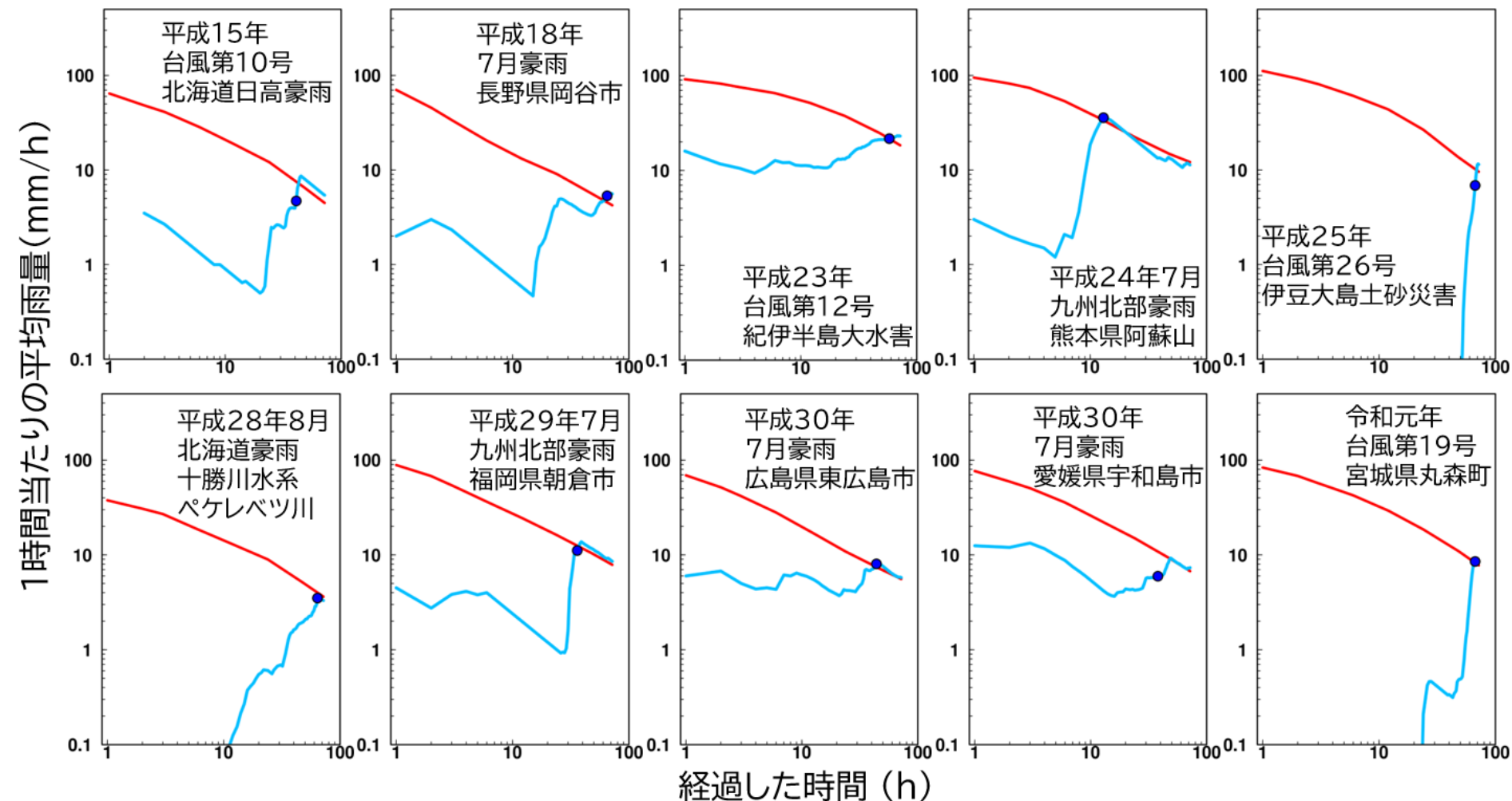
赤線：災害発生時刻

青線：降雨量
(上段1時間雨量・下段72時間雨量)

1時間雨量は大きくないが
雨が長く続き累積雨量が100年に一度レベルにまで増加し災害が発生
崩壊を引き起こす雨の降り方は災害事例毎に大きく異なる

災害発生時の雨の稀さ

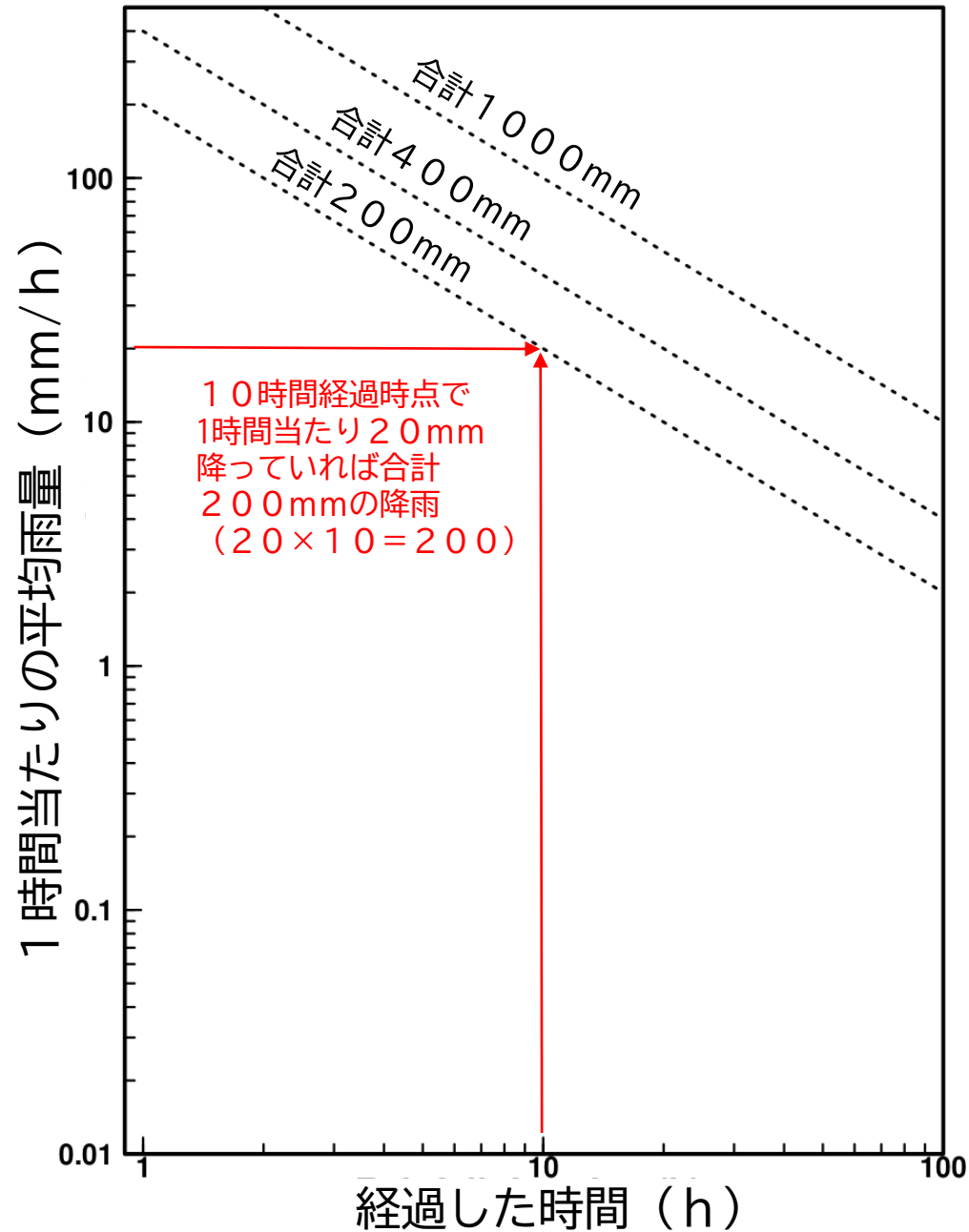
赤線:100年に一度の雨の強さ, 水色線:1時間当たりの平均雨量の変化, 青点:斜面災害の発生タイミング



1時間当たりの平均雨量が100年に一度の強さに達する前後で斜面崩壊が発生

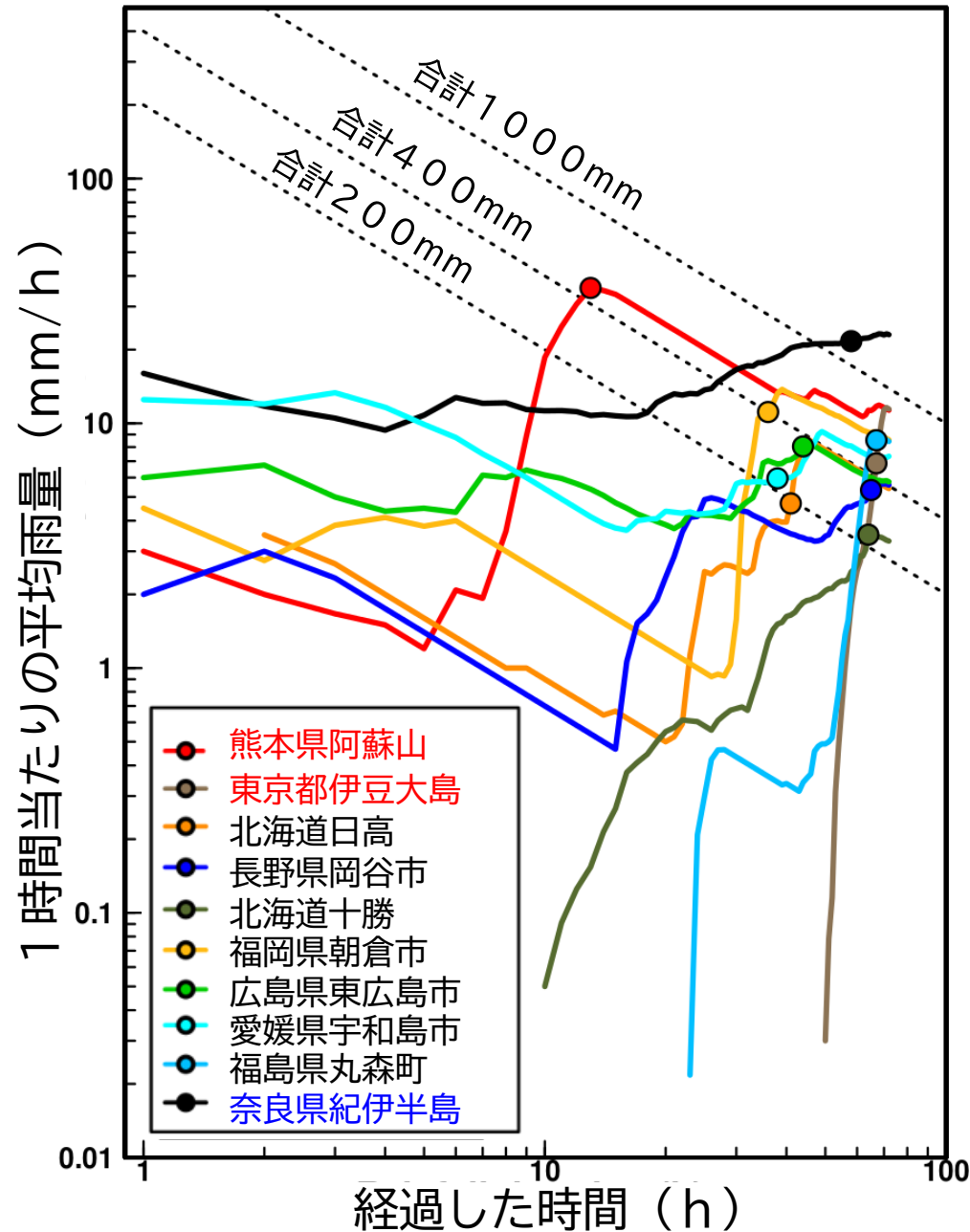
雨の降り方は違っても雨の稀さはいずれも100年に一度程度で共通

降雨量の比較



左の図のように崩壊発生時刻の
合計雨量について調べてみる

降雨量の比較



雨の降り方に関係なく,
200~400mm程度の雨量が
崩壊の発生に必要

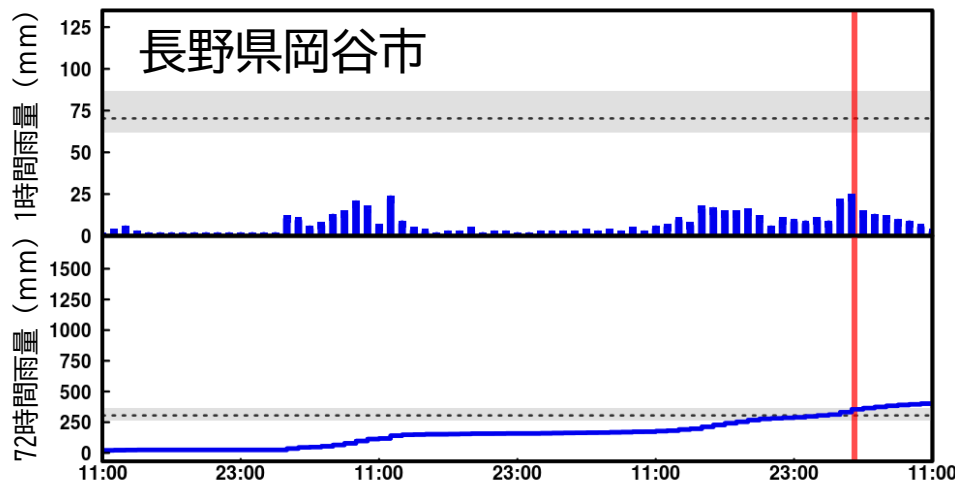
深層崩壊（紀伊半島）は
1000mm以上必要



瞬間的な100年に一度の強さの雨では
災害は発生しにくい
(1時間雨量の日本記録は約150mm)

近年の災害を引き起こした雨は
雨量・稀さともに桁違い
森林が十分に成熟していても
森林だけで崩壊を防ぐことは困難

森林の効果を超える雨が原因であれば何が崩壊箇所を決める？



72時間雨量の100年に一度の強さは
岡谷市では300mm程度であるのに対し、
紀伊半島では約1300mmと大きく異なる



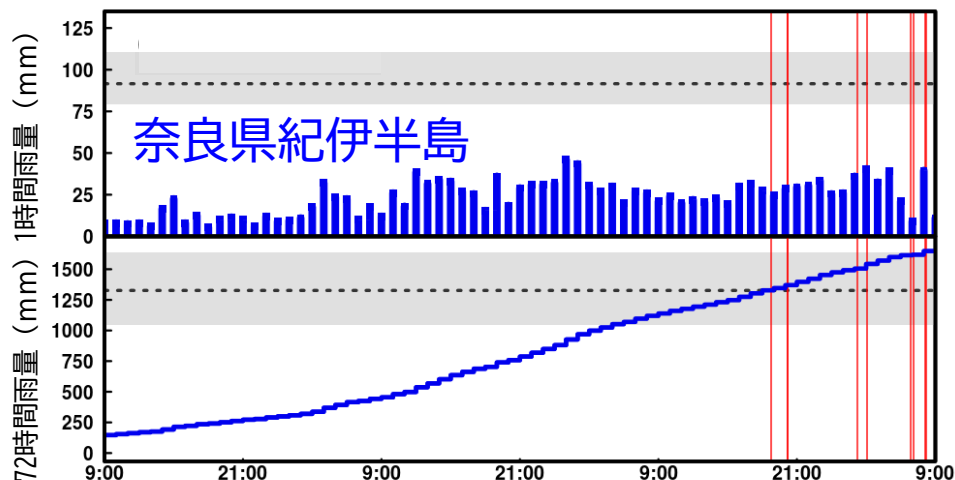
紀伊半島では300mm程度の72時間雨量は
頻繁に発生する



紀伊半島では300mm程度で崩壊するような
斜面は既に崩れ去っている
(土層の回復が間に合わない)



土層の回復には長い(百年単位)の時間が必要
危険な雨が襲来する頻度の方が高い



そのため、雨の稀さが崩壊の発生に重要

崩壊が発生箇所を土層が回復しているかどうかが決める場合がある？

新潟県村上市2022年豪雨による崩壊



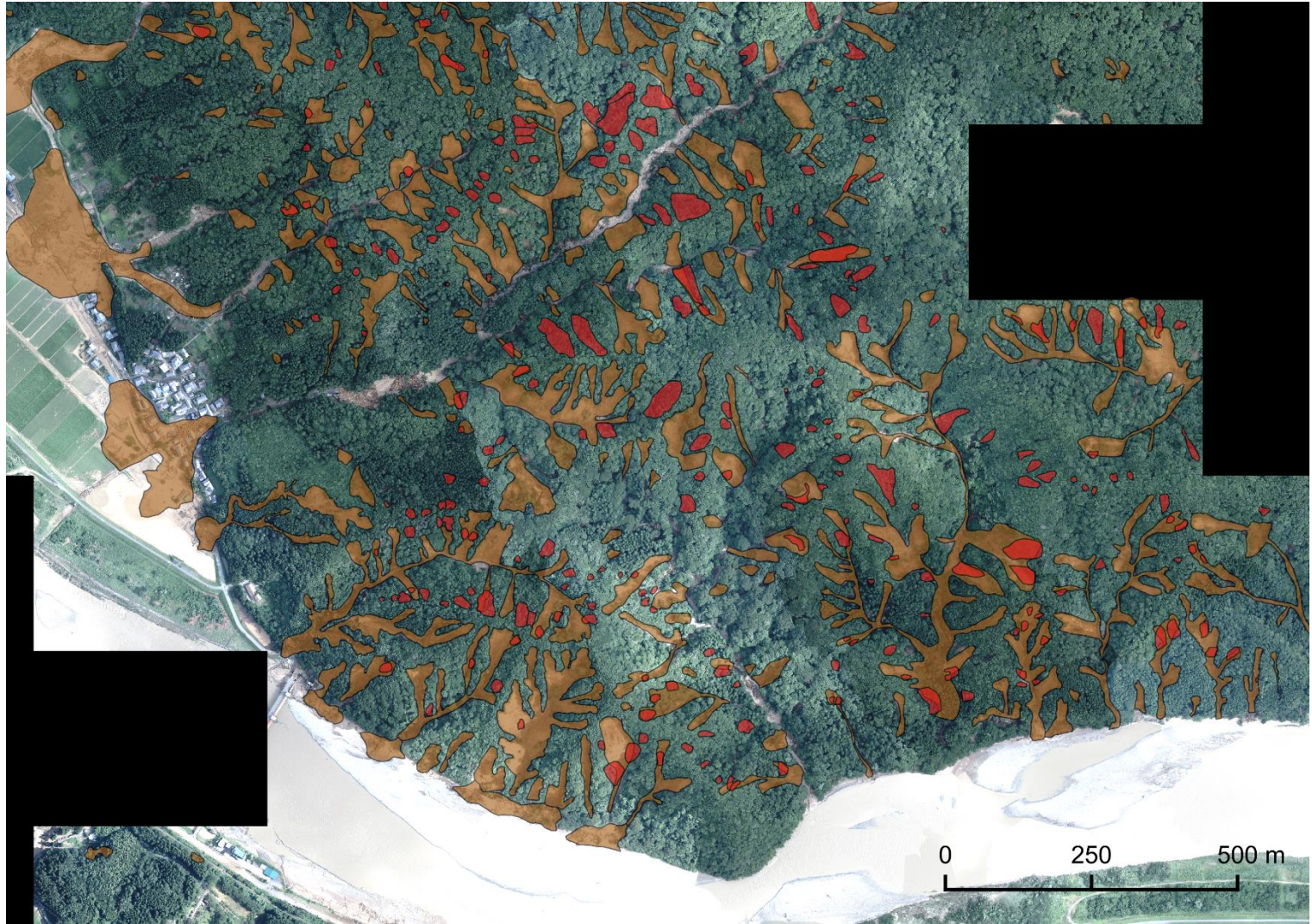
成熟した森林で覆われていたが多数の崩壊が発生
森林の比較だけでどこで崩壊するかを推定するのは困難

新潟県村上市 1967年羽越豪雨による崩壊



同じ地域で1967年羽越豪雨によっても崩壊が発生していた

新潟県村上市1967年羽越豪雨による崩壊

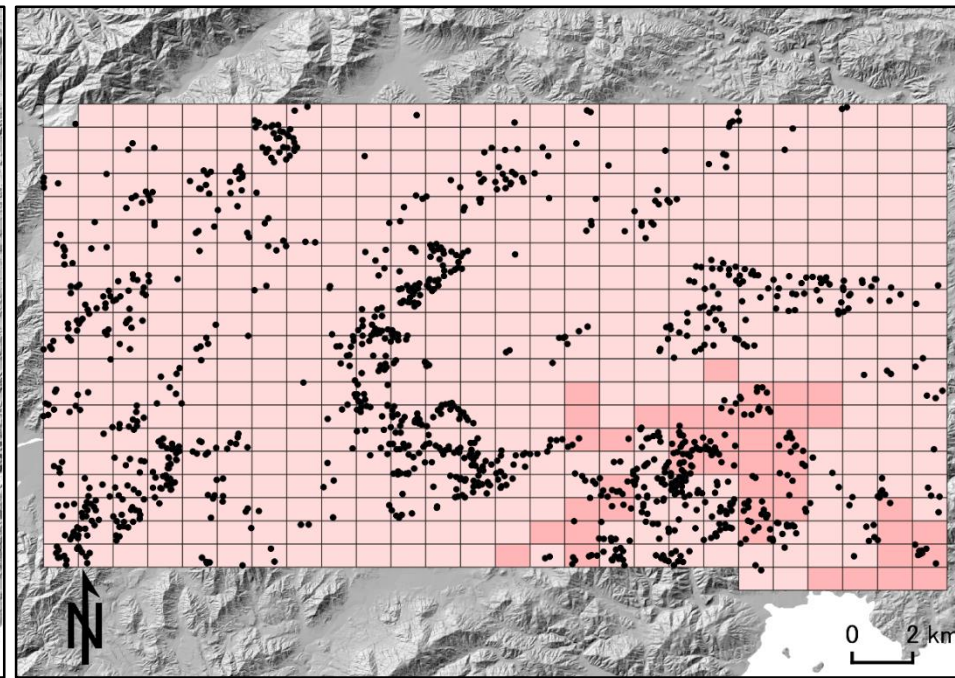
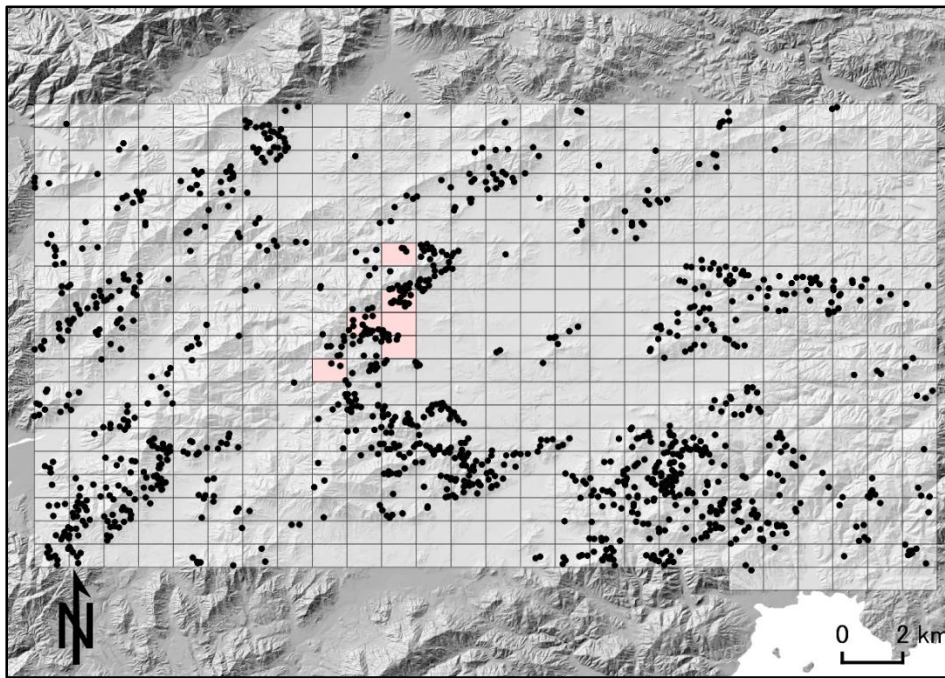


1967年と2022年で異なる箇所で崩壊が発生
豪雨の頻度（約60年）＞土層の回復速度であるため同じ斜面は崩れていない

2100年までに100年に一度の強さの雨は増加

温暖化対策が進んだシナリオ

深刻な温暖化が進んだシナリオ



72時間以内に100年に
一度の強さに達する雨の回数



0



1-2

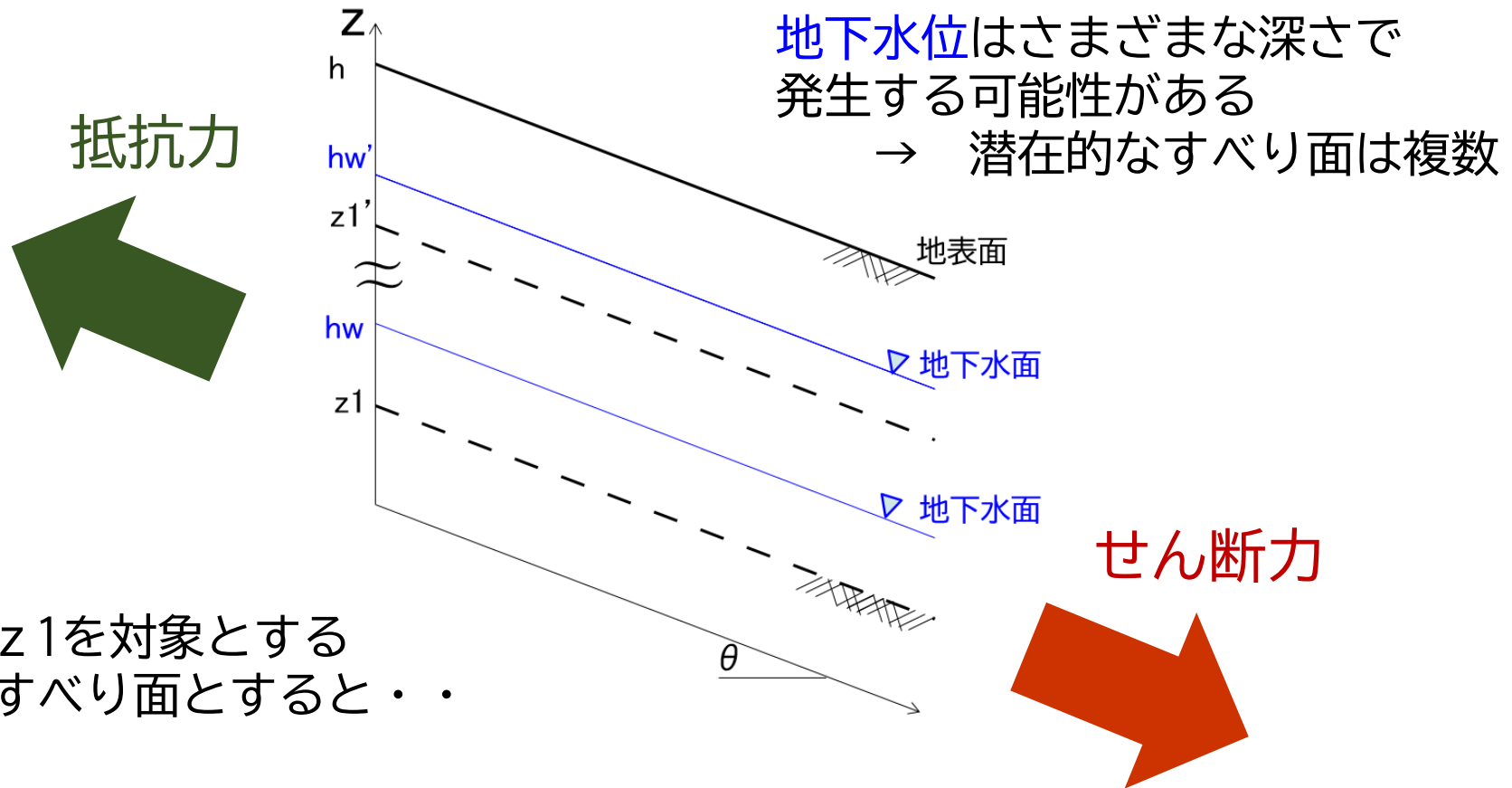


3-4

平成30年7月豪雨で災害が発生した広島県東広島市では
温暖化が深刻化するほど危険な雨の回数と範囲が増加

ただし土層が回復していなければ
土砂災害の回数と範囲が増加するとは限らない

森林の崩壊防止機能の限界に関する力学的考察



緑矢印の力（抵抗力）と 赤矢印の力（せん断力）
の関係はどうなるのか？

抵抗力 τ_r

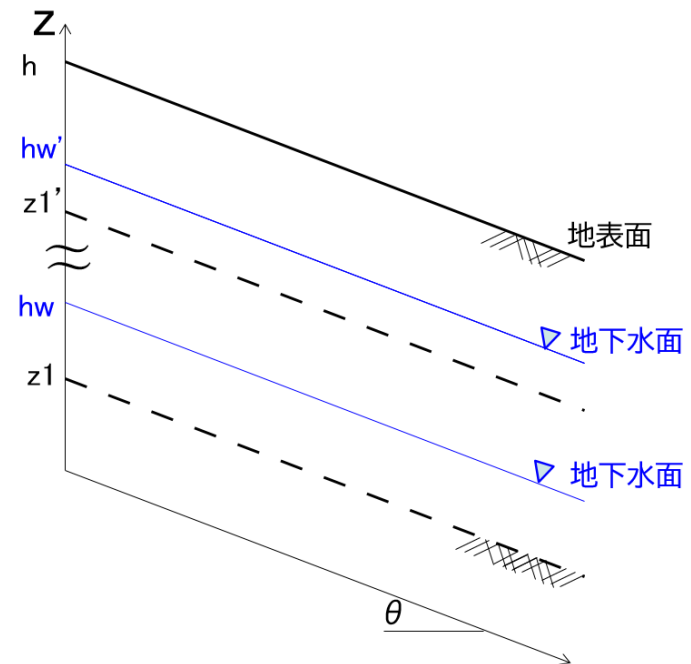
各式の詳細については
今泉ら, 2009

$$\tau_r = c + \left[\int_{h_w}^h \{ (1-n)\sigma g + nS\rho g \} dz + \int_{z_1}^{h_w} (1-n)(\sigma - \rho)g dz \right] * \cos\theta \tan\phi$$

n : 間隙率, $\sigma \cdot \rho$: 土粒子・水の質量密度, g : 重力加速度, S : 飽和度, ϕ : 摩擦角

せん断力 τ

$$\tau = \int_{z_1}^h \{ (1-n)\sigma g + nS\rho g \} dz \sin\theta$$



安全率 F

$F = \frac{\tau_r}{\tau} > 1$ 安全率が1以上, 抵抗力 > せん断力であれば斜面は崩れない

抵抗力 τ_r

地下水位の上昇で減る

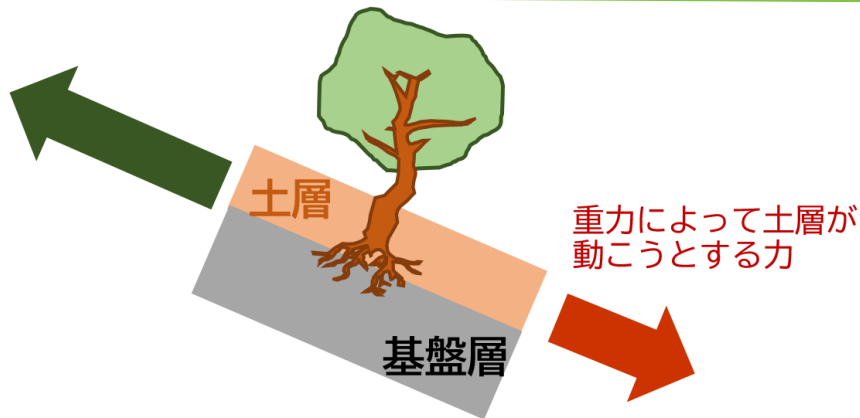
$$\tau_r = \boxed{c} + \left[\int_{h_w}^h \{ (1-n)\sigma g + nS\rho g \} dz + \int_{z_1}^{h_w} (1-n)(\sigma - \rho)g dz \right] * \cos\theta \tan\phi$$

樹木の根系で c が増える

抵抗力（摩擦によって抵抗する力 + 木の根によって抵抗する力）

せん断力 τ

$$\tau = \int_{z_1}^h \{ (1-n)\sigma g + nS\rho g \} dz \sin\theta$$



安全率 F

$$F = \frac{\tau_r}{\tau} > 1$$

樹木根系と地下水位の効果の変化によって安全率が決まる

安全率における樹木根系と地下水位の寄与は？

安全率の式に抵抗力とせん断力の式を代入して変形すると

$$F \frac{\tan \theta}{\tan \phi} = 1 - \underline{F_w} + \underline{F_c}$$

大きいほど危険 小さいほど危険

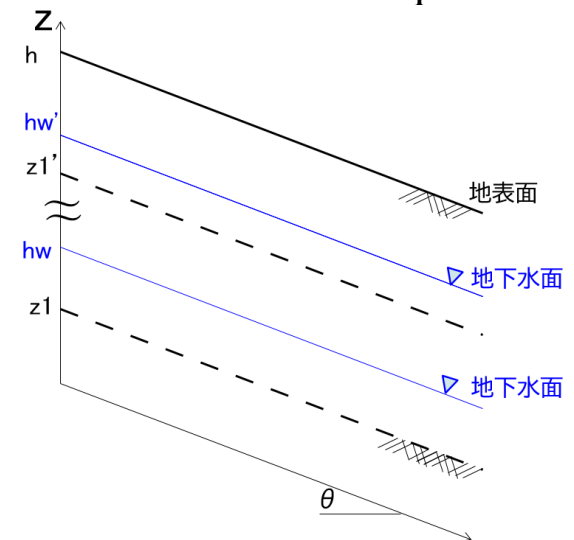
地下水位が安全率に対する影響を表す無次元量

$$F_w = \frac{\eta_w}{(1-n) \frac{\sigma}{\rho} + n\{S' + (1-S')\eta_w\}}$$

樹木根系が安全率に対する影響を表す無次元量

$$F_c = \frac{c}{(1-n) \frac{\sigma}{\rho} + n\{S' + (1-S')\eta_w\}}$$

$$\eta_w = \frac{h_w - z_1}{h - z_1}$$



安全率における樹木根系と地下水位の寄与は？

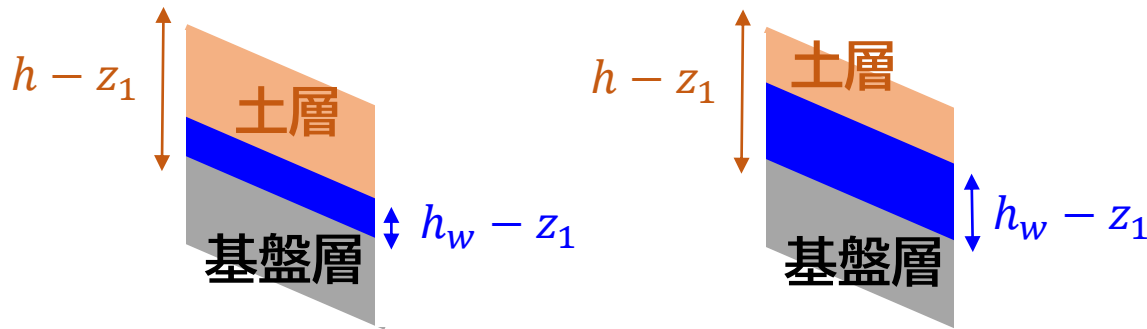
安全率の式に抵抗力とせん断力の式を代入して変形すると

$$F \frac{\tan \theta}{\tan \phi} = 1 - \underline{F_w} + \underline{F_c}$$

大きいほど危険 小さいほど危険

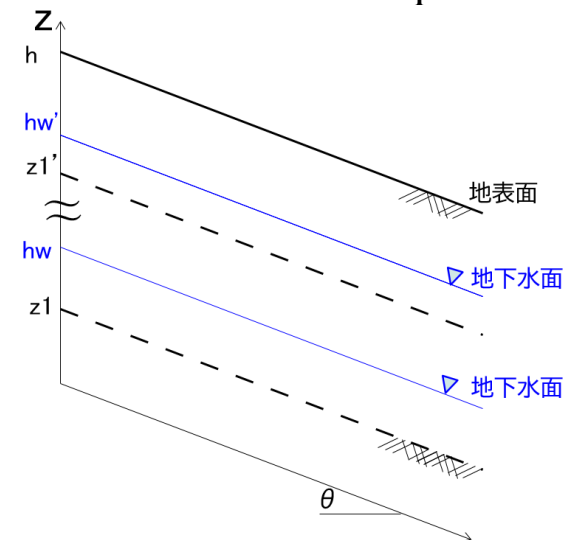
地下水位が安全率に対する影響を表す無次元量

$$F_w = \frac{\eta_w}{(1-n) \frac{\sigma}{\rho} + n\{S' + (1-S')\eta_w\}}$$



同じ土層厚 ($h - z_1$) であれば
地下水位 ($h_w - z_1$) が大きいほど崩れやすい

$$\eta_w = \frac{h_w - z_1}{h - z_1}$$



安全率における樹木根系と地下水位の寄与は？

安全率の式に抵抗力とせん断力の式を代入して変形すると

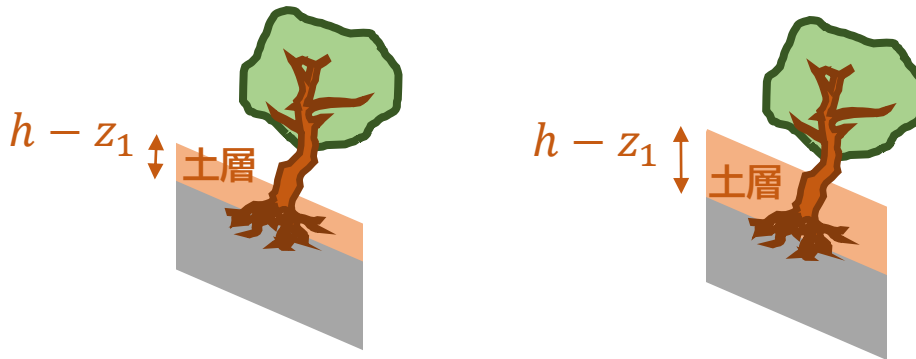
$$F \frac{\tan \theta}{\tan \phi} = 1 - \underline{F_w} + \underline{F_c}$$

大きいほど危険 小さいほど危険

樹木根系が安全率に対する影響を表す無次元量

$$F_c = \frac{\eta_c}{(1-n) \frac{\sigma}{\rho} + n\{S' + (1-S')\eta_w\}}$$

$$\eta_c = \frac{c}{(h - z_1) \rho g \cos \theta \tan \phi}$$



土層厚 ($h - z_1$) が大きいほど
分子が小さくなる (F_c が低下)

土層が厚いほど樹木根系の効果は小さい → 防止機能は浅い崩壊に対してのみ

安全率における樹木根系と地下水位の寄与は？

安全率の式に抵抗力とせん断力の式を代入して変形すると

$$F \frac{\tan \theta}{\tan \phi} = 1 - \underline{F_w} + \underline{F_c}$$

大きいほど危険 大きいほど安全

地下水位が安全率に対する
影響を表す無次元量

樹木根系が安全率に対する
影響を表す無次元量

$$F_w = \frac{\eta_w}{(1-n)\frac{\sigma}{\rho} + n\{S' + (1-S')\eta_w\}}$$

$$F_c = \frac{\eta_c}{(1-n)\frac{\sigma}{\rho} + n\{S' + (1-S')\eta_w\}}$$

分母は同じなので W と置いて、安全率に代入すると

安全率 F

$$F \frac{\tan \theta}{\tan \phi} = 1 - \frac{\eta_w - \eta_c}{W}$$

$\theta = \phi$ の条件下(勾配36～38度程度)を考えると

$\eta_w - \eta_c = 0$ の時, 安全率が1 (崩壊が発生)

$$\eta_w = \frac{h_w - z_1}{h - z_1} \quad (0 \sim 1 \text{ までの間で変化})$$

$\eta_c > 1$ の場合は安全率は常に1以上 (抵抗力 > せん断力)
つまり, 崩壊は発生しない

言い換えれば安全率1となり得る場合の η_c の最大は($\eta_c \doteq 1$)

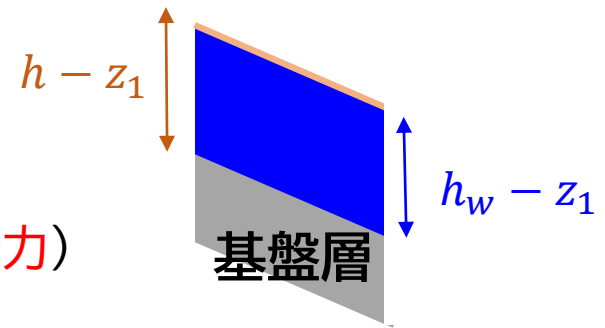
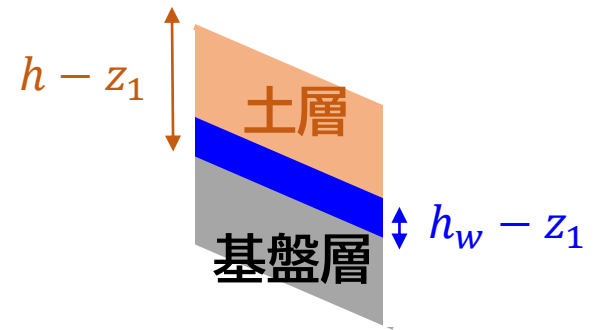
$\theta = \phi$, $\eta_c = 1$ の条件を代入すると

$$\eta_c = \frac{c}{(h - z_1) \rho g \cos \theta \tan \phi} \quad 1 = \frac{c}{(h - z_1) \rho g \cos \theta \tan \theta}$$

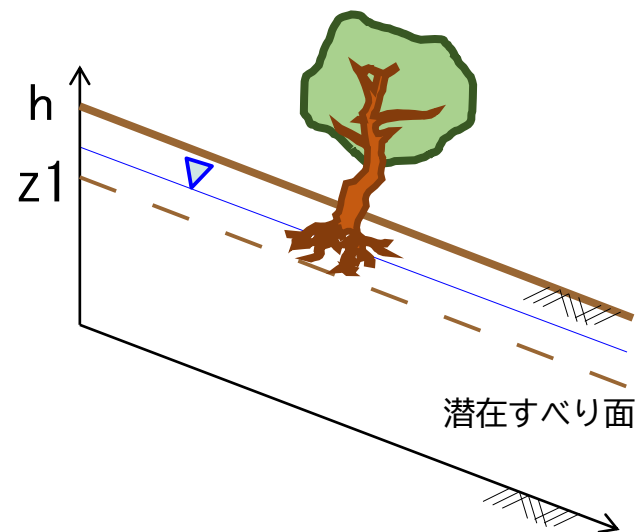
$$(h - z_1) = \frac{c}{\rho g \sin \theta}$$

ある樹木の根系の抵抗力 c の時, 崩壊するために
必要な土層厚 $(h - z_1)$ は一意に定まる

→ これが意味することは?

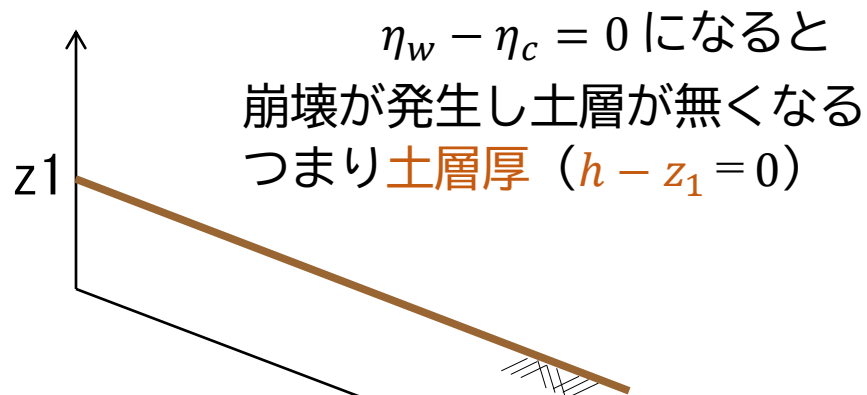


$$F \frac{\tan \theta}{\tan \phi} = 1 - \frac{\eta_w - \eta_c}{W}$$



潜在すべり面

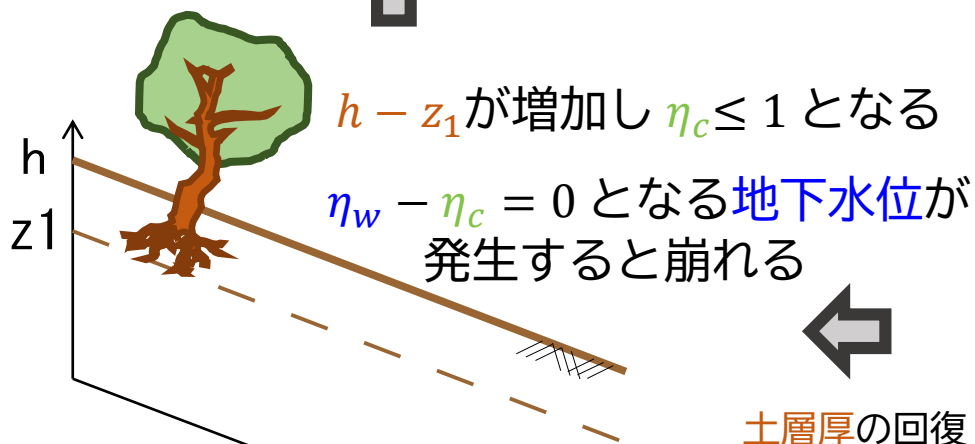
地下水位
の上昇



土層厚
の回復



$$\eta_c = \frac{c}{(h - z_1) \rho g \cos \theta \tan \phi}$$

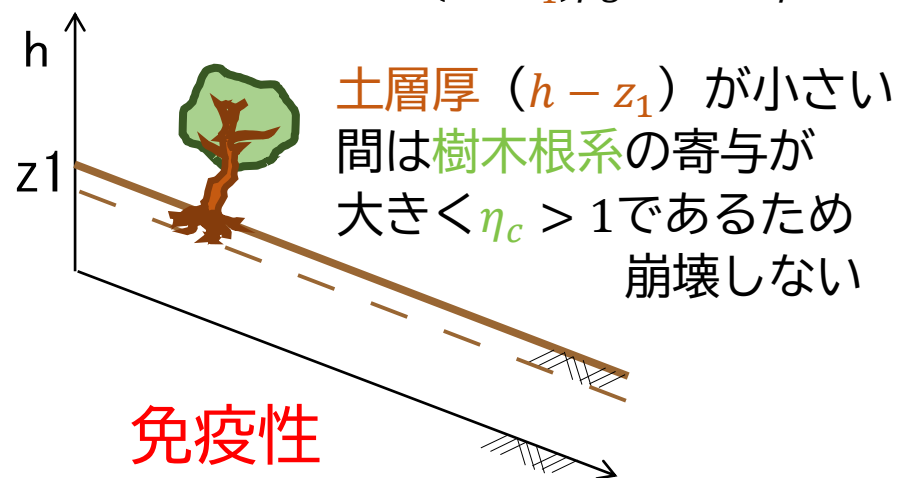


$h - z_1$ が増加し $\eta_c \leq 1$ となる

$\eta_w - \eta_c = 0$ となる地下水位が発生すると崩れる



土層厚の回復
森林の成熟

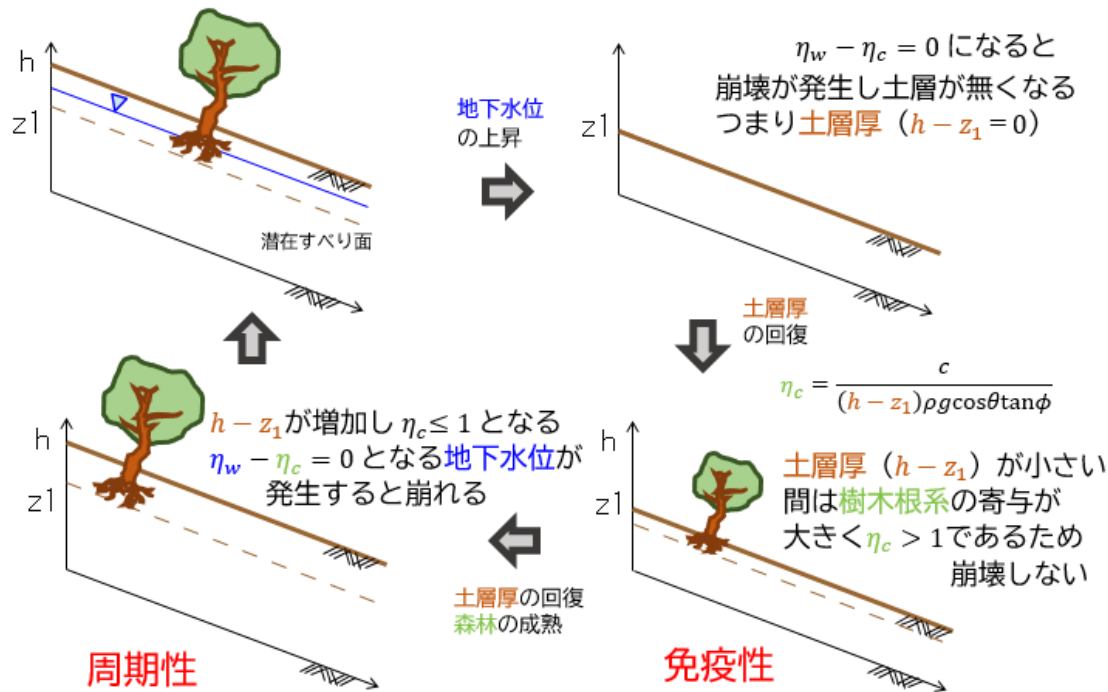


土層厚 ($h - z_1$) が小さい間は樹木根系の寄与が大きく $\eta_c > 1$ であるため崩壊しない

周期性

免疫性

森林の成長と土層厚の回復，斜面崩壊のサイクル



①森林が崩壊を防止



②斜面の土層厚が回復



③森林の崩壊防止機能が低下



④崩壊が発生，①に戻る

森林は斜面崩壊を防止する機能がある

しかし，斜面の安定への樹木根系の寄与は土層の回復で低下

この森林の効果の限界によって，近年の豪雨時には森林で覆われた斜面でも土層が十分に回復していると崩れてしまう

まとめ

斜面が崩れるかどうかには以下の3つの要素が重要

①森林の成長, ②豪雨の頻度, ③土層の回復速度

今, これらの要素はどのような状況にあるのか

①森林の成長: これまでの森林管理等により多くが成熟

②豪雨の頻度: ①によって高頻度な雨では崩れにくい

③土層の回復速度: ①で土層が回復し, ②で稀な雨を経験していない
地点が土層が回復していて危険

これまでの森林管理や気象条件で与えられた

①②③の状況が, 現在の斜面の危険性を決めている
→ 薪や製鉄のための炭を作る森林から, 木材生産
のための人工林への変化など

人工的な改変 (①: 伐採・植林, ③盛土・切土) は,
②どのような雨で崩壊が発生するかを変える

①②③すべてを考慮しなければ適切な対策を取ることは不可能

まとめ

将来、これらの要素はどのような状況になると予想されるのか

- ①森林の成長：高温・多雨で成長が早くなり伐採しても回復しやすい？
- ②豪雨の頻度：現在稀な強さの雨がより頻繁に発生し危険？
- ③土層の回復速度：土壌生成や風化の速度が気温や雨量の増加で加速？

②③は①に比べると人の力で劇的に変化させることは難しい

①の森林に将来に向けてどのように変化を加えるのかは、成熟した森林の持続的な管理だけではなく、避けられない斜面崩壊リスクと気候変動の中でどのように共存していくかという点も考慮して選択していく必要がある

手をできる限り加えないという選択も含めて
土砂災害リスクに対する何らかの温暖化適応策が必要

参考文献

国土交通省： https://www.mlit.go.jp/report/press/sabo02_hh_000143.html

令和5年度 森林・林業白書：

<https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/r5hakusyo/index.html>

北村・難波，1981：

<https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/bulletin/301/documents/313-9.pdf>

Saito et al., 2017：

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X16302276?via%3Dihub>

Tsunetaka, 2021： <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.5228>

今泉ら，2009： https://www.jstage.jst.go.jp/article/sabo/62/2/62_13/_article/-char/ja/