【2023年2月】

山地崩壊発生の自己組織化（SOC）から見る森林の崩壊発生抑制効果の考察

Elucidation of the Forest Effect on the Landslide Deterrence contemplating the Self Organized Critical State Hypothesis of Landslide Frequency





九州大学名誉教授（前所属：農学研究院 森林保全学研究室）
久保田哲也　Prof. Emeritus KUBOTA,Tetsuya

はじめに

近年の気候変動に伴う豪雨の増加

→ 山地崩壊の多発を危惧

→ 森林の崩壊発生抑制効果期待

その定量的評価は、地形・地質・林相などの要因に左右され難しい場合が多い。

→ 複雑系科学・自己組織化の考えを援用して巨視的（マクロ）な観点から見た森林の効果を考察。

森林の崩壊発生抑制効果とは

1．根系による斜面補強（杭・アンカー）効果

2．土壌水分抑制効果：　樹冠遮断、代謝による土壌水分消費（降雨初期）

3．比較的緩い斜面勾配での樹木荷重（垂直応力）による土層強度の増加

4．落葉や下層植生など地上被覆による表面浸食防止に伴う斜面不安定化防止





表層崩壊（がけ崩れ）の事例（福岡県2018年_豪雨、2004年_風倒木振動、熊本県2016年_地震）




深層崩壊（大規模）の事例（福岡県・福智町2009年、東峰村2017年_豪雨）

巨視的観点での森林の崩壊抑制効果の検証方法

森林の影響を推定するために、森林根系強度などに影響されない**深層崩壊**（大規模で、すべり面が約2mより深い）と、森林に影響される**表層崩壊**（比較的小規模ですべり面が浅い）を比較する。

☆ 深層崩壊のデータ（2011年度土木研究所研究報告、2012）からSOCに伴う「崩壊規模～崩壊頻度（個数）のべき乗則」を求め、それから表層崩壊の発生頻度を推定。

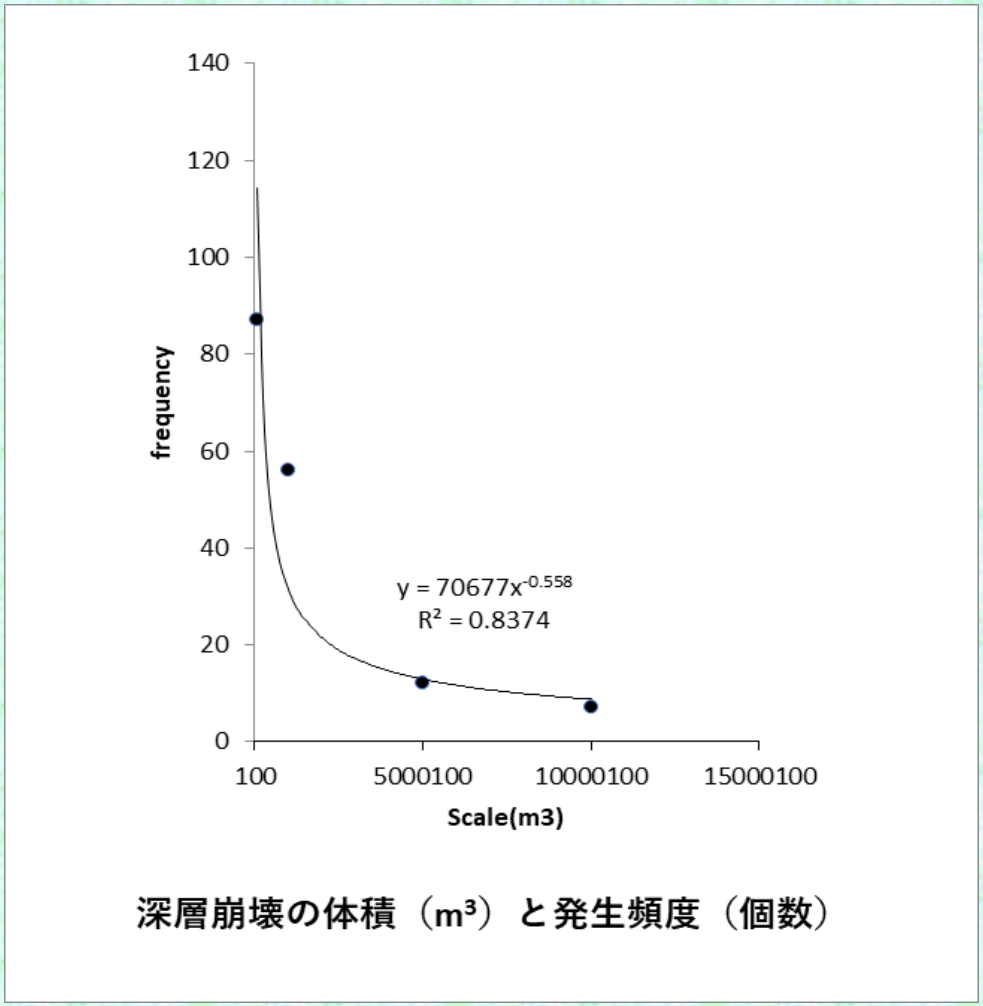
↓

☆ 実際の発生データ（がけ崩れ全国調査：国交省・国総研資料530、2009、人工斜面・のり面崩壊は含まない）と比較。

↓

☆ 上記から森林の影響を考察する。

巨視的観点での山地崩壊規模と発生頻度の関係



深層崩壊の体積（m³）と発生頻度（個数）

深層崩壊188箇所のデータ（上述 2012）から求めたSOC仮説に基づく「崩壊規模～崩壊発生個数のべき乗則」は下記の式(1)、となった（図１）。

$P = b \cdot V^{a}$ ・・・(1)

P:崩壊頻度（個数）、V:崩壊体積、a:べき乗係数、b:定数。

この場合、a＝-0.5581、b＝70677、相関係数は-0.888となった。

深層崩壊SOCからの表層崩壊発生頻度の推定と実発生頻度の比較

図1の深層崩壊SOCべき乗則から、表層崩壊の発生頻度を推定する際には、本研究での深層崩壊データが1962年～2010年発生の諸元詳細の分かるもの188ケースに限られていることを鑑み、該当する時期に近い平均深層崩壊発生頻度約600件（後藤 2012）を用いた割り増し率ρを式(1)からの推定値に乗じる。

すなわち、ρ=600÷188÷3.20となり、次式(2)が推定値の計算式となる。

$P=\rho \cdot b \cdot Va$ ・・・(2)

式(2)から、表層崩壊V=10000m^{3}に対しては1324件となり、実際の崩壊個数1551（前述の土木研究所、2009）とほぼ等しい上、このVはがけ崩れ（表層崩壊）としては比較的規模が大きく森林根系の影響などが少ない2mより深いものが多く含まれる（前記2009年）と考えられる。そこで、推定崩壊数も実際の崩壊数も、このVの値10000を基準にした発生数の比「P*」を求め相対化させて議論を進める。

ここで、P*=P/P10000、・・・(3)、P10000はV＝10000m3の時のP。

式(2)から表層崩壊規模であるV=100m^{3}に対する推定崩壊個数は17308、V=500m^{3}に対するそれは7046となり、各々をP10000の1324で除して、P*はそれぞれ13.07、5.320となる。
一方で、実際のがけ崩れ発生のP*は、それぞれ11487÷1551＝7.406、3970÷1551＝2.560となる。

結果的に、**V=100m^{3}に対するP*は、推定値13.07、実際が7.406となりその差は1.770倍と推定値の方が大きい。**また、**V=500に対しても推定値が5.320、実際が2.560と推定値が2.080倍大きい。**つまり、**SOCから推定できる表層崩壊発生数は実際の発生数より大きくなる。**これらの1.770倍、2.080倍という値は、前述の森林による崩壊発生抑制効果である1.50～2.50倍などに近く、**実際のがけ崩れ（表層崩壊）発生は森林の効果により抑制されたと理解できる。**このことは、既存の知見とも一致する。

実斜面での森林の崩壊抑制事例

◇　すべり面を自動探索できる臨界すべり面解析（極限平衡法と動的計画法の応用）による九州大学福岡演習林の崩壊斜面安全率Fsでは、森林がある場合のFsは無い場合の約1.14倍となる（久保田2010）。

◇　2014年広島災害の崩壊では実際の斜面の根系強度による粘着力Crを加味するとFEM安定解析では、森林の崩壊抑制効果は森林なしの場合の約1.05倍となる。

◇　2016年熊本地震時の熊本県阿蘇外輪山表層崩壊（図2）のFEM安定解析では、地震前にFs=1.16で、標準的なスギ（久保田2010、九州北部の崩壊現地の根系・根の直径分布よりCrは平均0.883 KN/m2）の森林があれば0.180～0.220ほどこれらのFsが上昇する。つまり、安全率が森林のない場合の約1.16～1.18倍になる（久保田 2017）。

◇　異なった条件の複数個所の崩壊前斜面を復元し、臨界すべり面解析により森林の有無についてFsを比較した研究では、森林がある場合は森林無しの**1.50～2.50倍安定**となる（Kubota他 2006）。

斜面安全率Fsと根系強度

表層崩壊

斜面安全率Fs＝R／D＝土塊の抵抗力／滑動力で、Rは土のせん断抵抗力、Dは重力、地下水圧、地震力などの合力。

Fs = (resistance force) / (driving force) = $\int_a \tau \, dA \; / \int_a D \, dA$ (1)

, where, $\int_a$: surface integral, A: slip surface, τ: shear strength that corresponds to resistance force per area, D: landslide driving force per area consists of downward component of gravity and seismic force, etc.

森林根系がある場合と無い場合の安全率Ｆｓの差をΔFsとすると、上記の式より、表層崩壊については、簡便的に、すべり面勾配と斜面勾配がほぼ一致すると近似され（小橋　1975）、

$\Delta Fs = Cr/(\gamma \cdot \sin\theta)$ (5)

ここで、根系による粘着力の補強効果Crは次式で表わされる。

$Cr = \Delta C = 1.12 \Sigma qi$ (6)

$\ln(qi) = 0.447 + 1.45 \ln(di)$ (7)

di：根の直径(mm)、qi根径を持つ根の引っ張り強度(kg)。

従って、森林根系の斜面安定効果は、斜面勾配θ、土の単位体積重量γ、根の直径とその本数の関数となる。

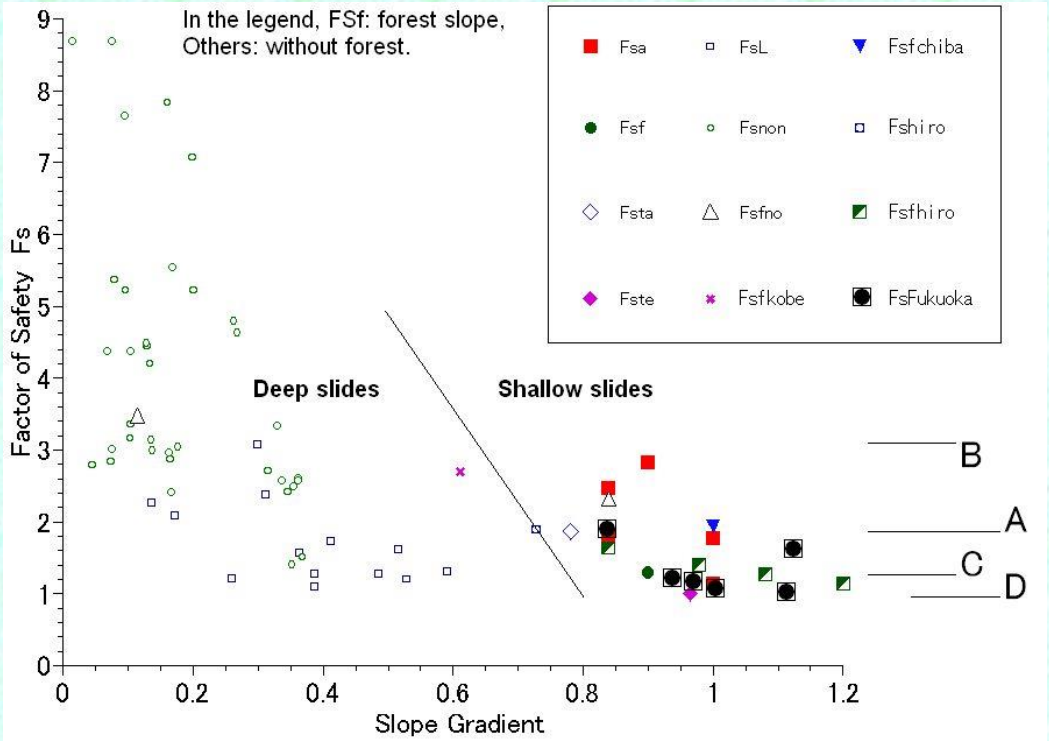


Fig. 2 Relation between slope gradient and antecedent Fs

FsFukuoka: Shallow landslides in Fukuoka 2004, 2005 with forest
Fste: Tottori 2000 on the forest slope, **Fsta:** Tottori 2000
on the deforested slope,
Fsf : Aso volcano area 2001 with forest, **Fsa:** Aso volcano area
2001 without forest.
Fsfhiro: Hiroshima 1999 with forest, **Fshiro**: Hiroshima 1999
without forest,
Fsfno: Non-landslide slopes adjacent to the deep ones from Chiba and Fukuoka with forest vegetation,
Fsnon: without forest from various places in Japan.

Judging by the difference between **line C, B** and **D, A** and so on, forest has certain influence i.e. slope reinforcement that is estimated up to approximately
1.5 ~ 2.5 times of Fs compared with slopes without forest.

全国のデータを用いた（九大福岡演習林や阿蘇山地含む）研究から、ΔFsは花崗岩地帯などで最大1.0程度、火山堆積物（クロボク）斜面で最大2.0程度であることが分かっている（久保田 2006、上図）。**森林の有無による安全率Fsの差は、1.5 ～2.5倍程度となる。**

◆　森林根系の効果事例

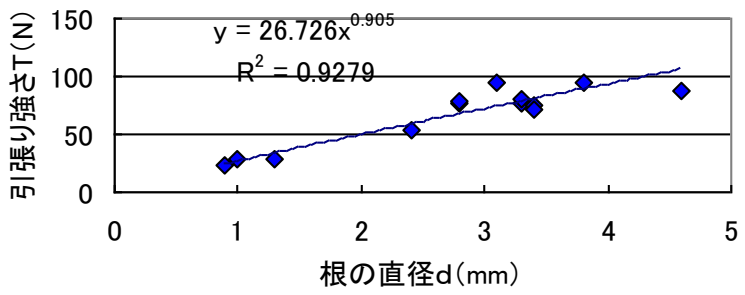




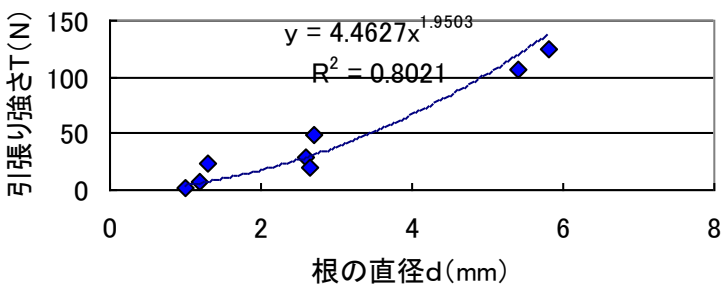


朝倉市汐井谷表層崩壊（左）　根系なしが影響か？小河内川の伐採地斜面崩壊（右）

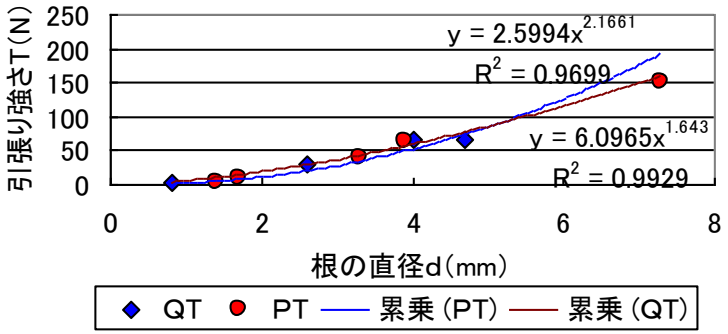
根系強度引張り試験結果の例



広島市安佐南区八木3丁目渓流上流斜面
シラカシ根系強度



福岡演習林新建流域(長伐期区)
スギ根系強度



Mexico, NL, Sierra Madore Orienta lクヌギ類QTと
マツ類PTの根系強度

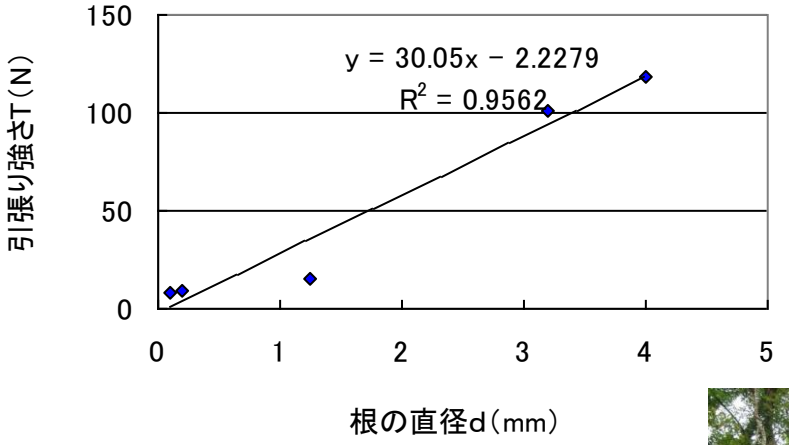




森林根系強度qi

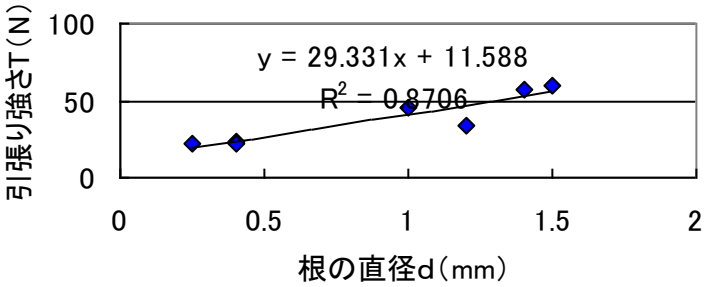
小径根から大径根強度の換算式あり

スギ：　$qi_{Large} = 0.04 \cdot qi_{Small}$　(N)

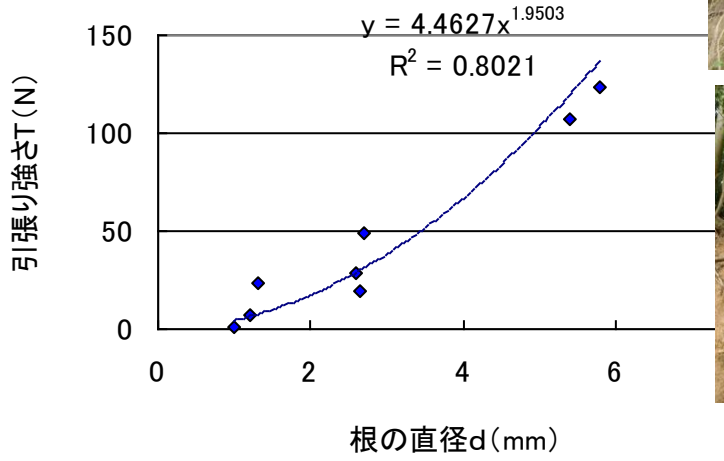


朝倉市奈良ヶ谷崩壊地
スギ根系強度



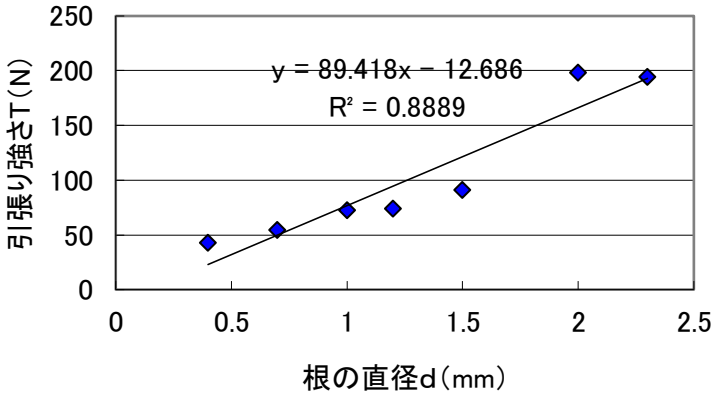


福岡県朝倉市妙見川上流
渓流浸食地スギ根系強度





福岡演習林新建流域(長伐期区)
スギ根系強度



福岡県朝倉市赤谷川右支乙石川石詰地区
崩壊地スギ根系強度

参考事例：2014年広島災害の森林植生

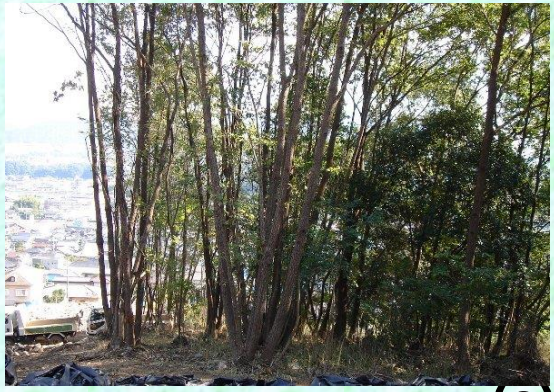
(a)



(b)



(c)



(d)

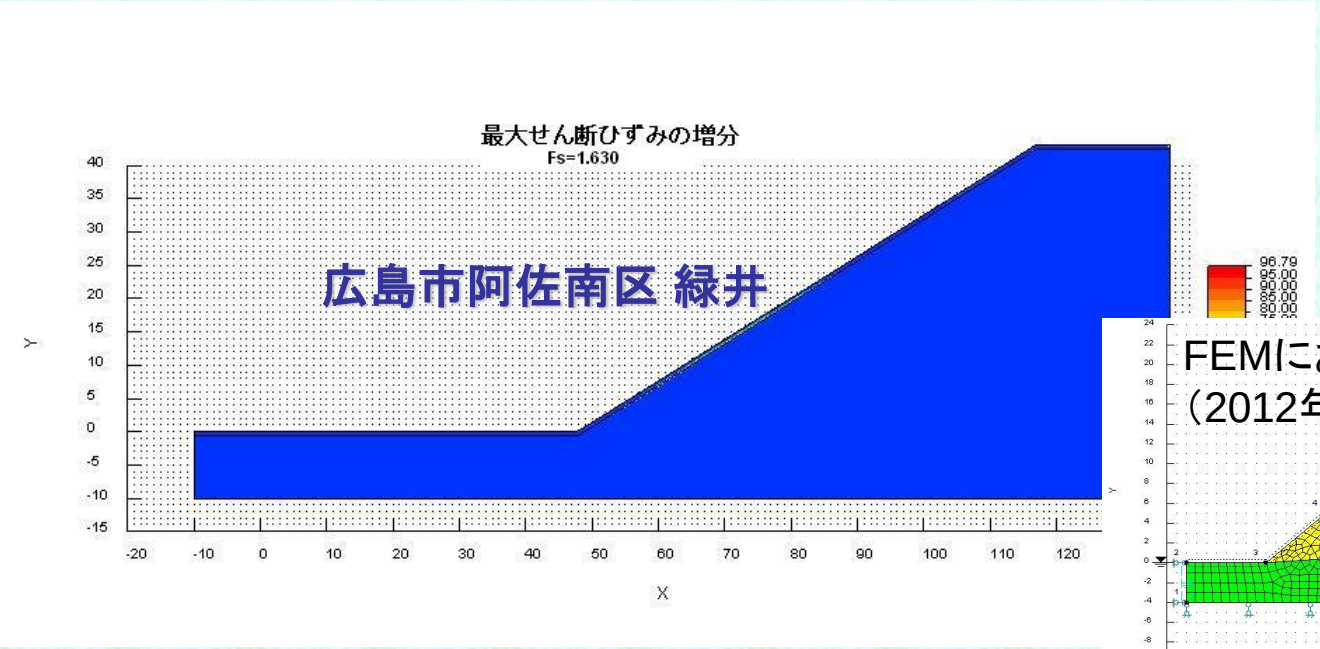


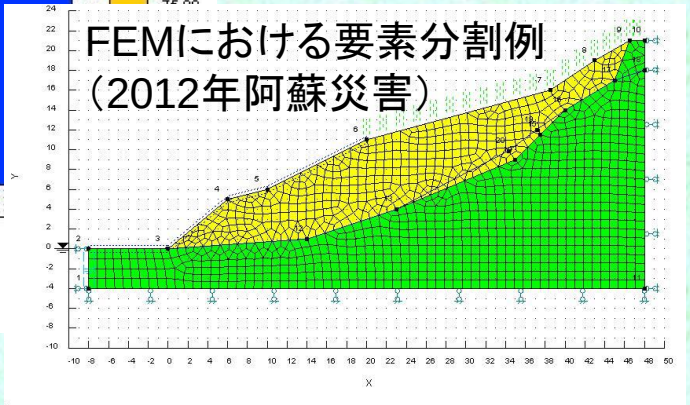
(e)



（a）八木2丁目上流部シラカシなど、(b) 可部東6丁目上流部スギなど、(c) 八木4丁目中流部コナラなど、(d) 緑井8丁目上流部シラカシなど、(e) 八木4丁目中流部スギ

参考事例：FEM斜面安定解析例（広島市）





根系による粘着力Crと安全率Fs（降雨なしで比較）

★　シラカシ：0.320 KN/m^2(RAR=0.459)，FS=1.63、
　　2014年8月20日の総降雨印加：Fs＝0.940

☆　スギ：　Cr＝0.140，FS=1.59、

☆　コナラ：Cr＝0.225，FS=1.61、

☆　森林なし：Cr＝0.00，Fs=1.55

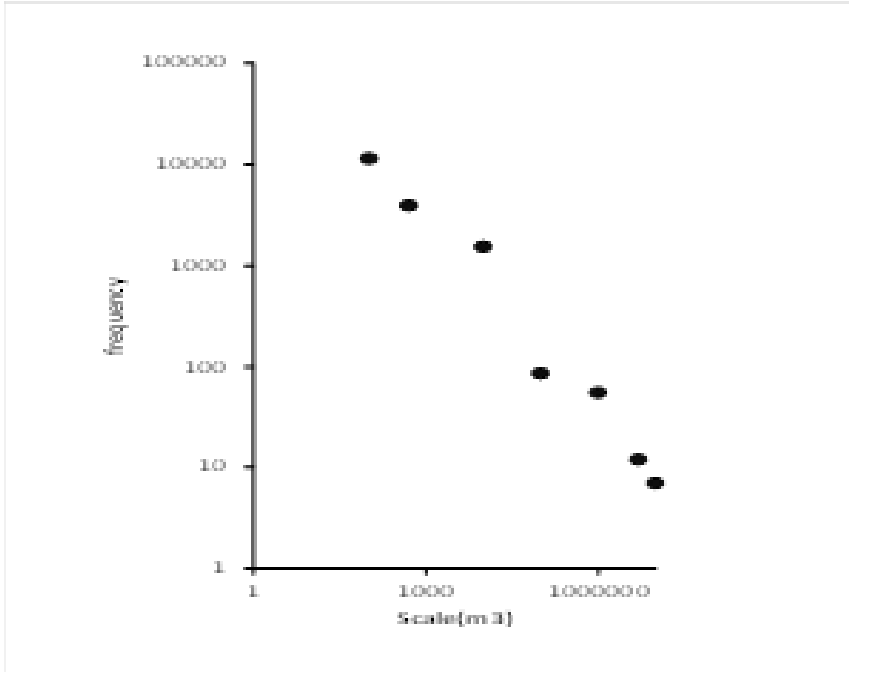


図３　参考：表層・深層崩壊全データSOC解析

Fig.3 Referential analysis: SOC example

　データ集計期間は少し異なるが、深層崩壊とがけ崩れ（表層崩壊）の全データを用いてSOCべき乗則解析を行って見た。

　結果は、図３のようにべき乗則が成立するが、相関係数は-0.401と低い。

　やはり表層崩壊は森林の影響を受け、SOCのあり方が深層崩壊とは異なると思われる。

まとめ

巨視的には、自己組織化SOCの観点から、表層崩壊においては、森林の発生抑止効果があるものと考えられる。

局地的には、森林による斜面補強が比較的小さい場合や、急峻な斜面でかつ土層が1m以下と薄く森林の樹木上載荷重が斜面を不安定化させる場合（久保田他 2011）など森林の崩壊抑制効果が小さい場合もある。

本研究においては巨視的・大局的な観点における森林の崩壊抑止効果が確認できたと考える。



おわり







九州大学
KYUSHU UNIVERSITY