

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

○久保田 哲也

九州大学名誉教授

1. はじめに

近年の気候変動に伴う豪雨の増加により山地崩壊の多発も危惧されており、森林の崩壊発生抑制効果に対する期待が高くなっている。しかし、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。そこで、ここでは複雑系科学の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崩壊抑制効果を考察した。

2. 山地崩壊における自己組織化

2.1 自己組織化臨界状態 (SOC)

ある系が、外部からの干渉や影響を受けない状況下で、自身で臨界状態を保つことを自己組織化臨界状態 Self-Organized Critical State (SOC) と呼ぶ (Per Bak 1987、1988、1999)。これは、複雑系に属する事象がある種のアトラクターに引き込まれ、「自ら安定化する状態や、構造を見出す様に振る舞う現象」を説明する仮説で、 $1/f$ ゆらぎなど自己相似構造つまりフラクタルな現象の発生や、生物の進化など「複雑適応系」すなわち「カオスの縁にある状態」の形成に関係するとされる (合原 1990、蔵本他 1991、井庭他 1998、Schroeder 1991)。フラクタル性は断層表面など地質構造に関して良く見かけられるもので (Barton 他 1995)、後述のクレオドの中に存在するであろうこのようなフラクタル現象が土砂移動に対する SOC 仮説の成立と関連するかも知れない。

いずれにせよ、山地崩壊は、Catastrophe (Rene Thom 他 1977、1985) 的な発生の仕方が多く、このような場合、ある「しきい値」付近で斜面等が臨界的な状態にあり、僅かな降雨など外部条件の変化で崩壊が発生し得ると考えられる。この臨界的な条件は、いわゆる自己組織化臨界状態となる。つまり、山地崩壊は、自然地形の自己組織化の過程で生じる構造不安定に伴う現象であり、弱層の形成など多数の小さな構造不安定 (カタストロフ) の集合である「クレオド」(最終的なカタストロフに至る経路) を経て生じるが、災害の発生・非発生パターンなど、現象の本質は少数の基質変数 (要因) で表現できる (Rene Thom ら 1977)。従



写真1 深層崩壊の事例(朝倉市 2017)
Photo 1 An example of deep landslide



写真2 表層崩壊の事例(阿蘇市 2016)
Photo 2 An example of shallow slide

って、巨視的には、比較的分かりやすい特徴が発現するものと考えられる。そして、このような SOC の場合は、臨界状態に達して発生する山地崩壊の規模（体積など）と発生個数には「べき乗則」が成立する（Bak, 1999）。すなわち、表層崩壊（がけ崩れ、小規模）は発生頻度が大きい、深層崩壊（大規模）は頻度が小さい。これがランダムな一般的な統計的揺らぎであれば、べき乗則は成り立たない。

2.2 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は、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、写真 1）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、写真 2）を比較する必要がある。ここでは、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し、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）と比較して、森林の影響を考察する。

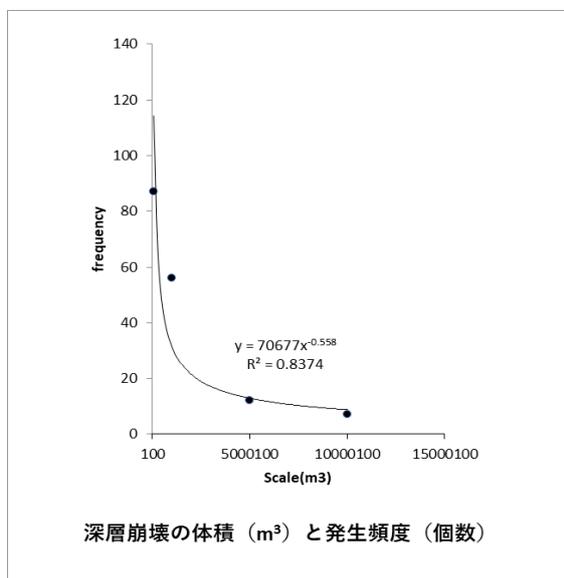


図 1 深層崩壊の SOC べき乗則

Fig. 1 The power law with the deep landslide

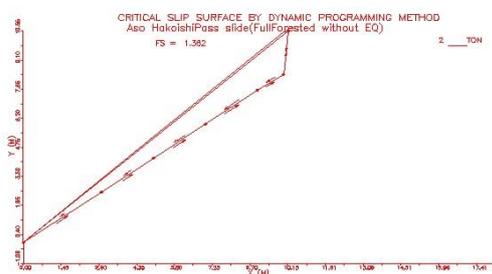


図 2 斜面安定解析例(阿蘇山地表層崩壊)

Fig.2 An example of slope stability analysis (Kumamoto, Aso 2016)

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 C_r は平均 0.883 KN/m^2 ）の森林があれば $0.180 \sim 0.220$ ほどこれらの F_s が上昇する。つまり、安全率が森林のない場合

2.3 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 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）。

$$P = b \cdot V^a \quad \dots (1) \quad P: \text{崩壊頻度 (個数)}, V: \text{崩壊体積}, a: \text{べき乗係数}, b: \text{定数}.$$
この場合、 $a = -0.5581$ 、 $b = 70677$ 、相関係数は -0.888 となった。

2.4 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 F_s では、森林がある場合の F_s は無い場合の約 1.14 倍となる（久保田 2010）。また、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 C_r を加味すると FEM 安定解析では、樹種ごとにそれぞれ次の様となる（久保田 2015）。シラカシ ($C_r = 0.320 \text{ KN/m}^2$) $F_s = 1.63$ 、スギ ($C_r = 0.140$) $F_s = 1.59$ 、コナラ ($C_r = 0.225$) $F_s = 1.61$ 、森林なし、 $F_s = 1.55$ 。従って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 $F_s = 1.16$ で、標準的なスギ

の約 1.16~1.18 倍になる (久保田 2017)。また、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 F_s 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)。

2.5 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) からの推定値に乘じる。すなわち、 $\rho = 600 \div 188 \approx 3.20$ となり、次式 (2) が推定値の計算式となる。 $P = \rho \cdot b \cdot V_a \dots (2)$

式 (2) から、表層崩壊 $V=10000\text{m}^3$ に対しては 1324 件となり、実際の崩壊個数 1551 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 (前述の土木研究所、2009) 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、 $P_* = P/P_{10000} \dots (3)$ 、 P_{10000} は $V=10000\text{m}^3$ の時の P 。

式 (2) から表層崩壊規模である $V=100\text{m}^3$ に対する推定崩壊個数は 17308、 $V=500\text{m}^3$ に対するそれは 7046 となり、各々を P_{10000} 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 P_* は、それぞれ $11487 \div 1551 = 7.406$ 、 $3970 \div 1551 = 2.560$ となる。

結果的に、 $V=100\text{m}^3$ に対する P_* は上記のように推定値 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とを見て取れる。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 (例えば、丸谷他 2019)。

また参考に、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。

7. まとめ

自己組織化 SOC の観点から山地崩壊を考察すると、表層崩壊においては巨視的に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が、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。

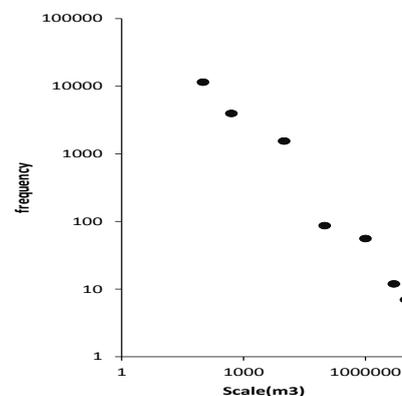


図 3 参考：表層・深層崩壊全データ SOC 解析
Fig. 3 Referential analysis: SOC example with all deep and shallow landslide data

引用・参考文献

合原一幸 編 (1990) : カオス、サイエンス社、65-108。

Bak, P.、Tang, C.、Wiesenfeld, K. (1987) : Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise, Phys. Rev. Lett. 59, 381-384.

Bak, P (1988): Self-organized criticality, Phys. Rev. A38, 364-374.

Bak, P (1999): How nature works; the science of self-organized criticality, Copernicus Springer-Verlag New York, 27-78.

Barton, C. C., La Pointe, P. R. (1995): Fractals in the earth sciences, Plenum Press, New York, 89-105, 131-140.

(法) 土木研究所 (2012) : 過去の深層崩壊事例について、土木研究所技術情報、2011 年度研究報告 (Web ページ)。

井庭 崇、福原義久 (1998) : 複雑系入門、NTT 出版、49-59、76-88

井上政義 (1996) : カオスと複雑系の科学、日本実業出版社、154-161。

Kauffman, S. (1999) : 自己組織化と進化の論理、日経新聞社、105-109。

Tetsuya KUBOTA, Prem Prasad PAUDEL, Hiroshi OMURA (2006): The influence of forests on susceptibility factors for slope stability - Some typical case for shallow landslides in western Japan -, Proc. of the International Conference on Geotechnical Engineering GEO-Singapore, 111-118.

久保田哲也、高橋 猛 (2010) : 臨界すべり面法を用いた森林根系の斜面安全率とすべり面深さに対する影響の解析、平成 22 年砂防学会研究発表会概要集、22-23。

久保田哲也、松井雅典 (2011) : 臨界すべり面解析を用いた森林地上部荷重が斜面安定に及ぼす影響の解析、第 50 回地すべり学会研究発表概要集、119-120。

久保田哲也、飯塚三太 (2015) : 2014 年広島災害における崩壊に対する森林根系の影響、第 71 回九州森林学会大会 研究発表会、702。

久保田哲也、武田 剛、Andang Suryana Soma (2017) : 熊本地震における斜面安全率の低下事例と森林の影響、平成 29 年度砂防学会研究発表会概要集、316-317。

蔵本由紀、川崎恭治、山田道夫、甲斐昌一、篠本 滋 (1991) : パターン形成、朝倉書店、149-160。

Laura Sanchez-Castillo, Tetsuya Kubota, Hasnawir and Israel Cantu Silva (2017): Influence of root reinforcement of forest species on the slope stability of Sierra Madre Oriental, Mexico, Journal of Faculty of Agriculture Kyushu University, 62(1), 177-181.

松田佳久、余田成男 (1985) : 気象とカタストロフィー、気象研究ノート NO151、18-23。

丸谷知巳編 (2019) : 砂防学、朝倉書店、27-31。

野口 広 (1977) : カタストロフィー、サイエンス社、105-122。

野口 広 (1982) : カタストロフィー理論とその応用/応用編、サイエンス社、116-130。

小山内信智、富田陽子、秋山一弥、松下智祥 (2009) : がけ崩れ災害の実態、国土交通省国土技術政策総合研究所資料 530。

Schroeder, M. R. (1991) : フラクタル・カオス・パワー則、森北出版、409-411。

Thom, R. (1977) : 形態と構造、みすず書房、30-224。

Thom, R. (1985) : 構造安定性と形態形成、岩波書店、67-116。