

## 崩壊発生につながる豪雨時の雨水流出機構

科研「地形・土壌・植生の入れ子構造的発達をふまえた流域水流出特性の変動予測」報告

谷 誠（元京大農）

### 1 はじめに

急斜面上では、豪雨時に表層崩壊が発生するが、土壌層はその後数百年以上かかって発達してゆき、再び崩壊発生に至る（下川、1983）。この土壌層の発達と崩壊のサイクルは、雨水の流出場にどのような影響を及ぼすのか？この雨水流出機構が表層崩壊発生に対してどのように作用するのか？こうした土と水との相互作用の解明は、砂防学における根幹課題である。また、この土壌層の発達は、より長期の時間スケールを持つ山地地形の発達過程に支配されるところが大きい一方（塚本・野口、1979）、短期スケールでの生態系遷移のかかわる樹木根系の粘着力増加もその重要な鍵を握っている（北原、2010）。

こうしたさまざまな時間スケールの変動に注目して水・土砂災害の対策に新しい視点を見いだすべく、筆者らは、科研費基盤 S「地形・土壌・植生の入れ子構造的発達をふまえた流域水流出特性の変動予測」（代表：谷）と題する研究を 2011 年から 5 年間推進してきた。そこで、その成果から、雨水の流出機構に関する成果を中心に報告する。

### 2 ゼロ次谷における土の生産輸送過程

近年の宇宙線生成核種を用いた調査から、風化基岩からの土粒子生成速度が推定可能になり、それははげ山状態で最大であるが、土壌層があっても土粒子がゆっくり生成されることが実証されてきた（Heimsath et al., 1999）。ゼロ次谷を考えると、生態系の作用を受けて土壌化した表層は、樹木根系に支えられてクリープの形で拡散移動し（園田、2000）、遷急点でうすくなる空間分布を形成するが、雨水の集中する凹地形に集積して厚くなる（松四、2014）。それゆえ、いずれ崩壊に至らざるを得ないし、崩壊発生後には土が凹地部に集積して土壌層が復活できる。はげ山のような植生のない環境ではこうした間歇的な土移動をともなう長期サイクルは成立せず、土粒子は毎年絶え間なく溪流に輸送される（鈴木・福嶋、1989）。

樹木根系の粘着力がクリープ移動にもゼロ次谷での崩壊抑止にも重要な役割を果たしているわけであるが、土壌層が斜面上に長期間安定に維持し厚さを増してゆくには不十分である。図 1 は、内田ら（1999）にならって、ゼロ次谷に物理性の均質な 1m の土壌層が 30° の斜面に存在していた場合における飽和地表面流の発生非発生を、土壌層内の地下水流に関するダルシーの法則に基づいて計算したものである。通常規模の降雨によってゼロ次谷中央部の凹地には飽和地表面流が発生することがわかる。土壌層の飽和透水係数は降雨強度よりは一般に大きい、1 時間に数ミリ程度の流出強度をもたらすほどには大きくないことになる。

このような推定から、ゼロ次谷凹地で崩壊後土壌層が再び厚くなってゆくプロセスが保証されるには、土壌層の不均質性が重要な役割を果たすことが理解できる。地表面流発生時の土石流発生条件（高橋、1977）を見てわかるように、はげ山では土と水が一体となって小規模土石流として移動する（内田ら、1999）。急斜面上においては、土が原位置にとどまり水が流下するという分別が生じること自体に、むしろ特別の説明が必要なのである。

### 3 不均質構造を持つ土壌層における雨水流出機構

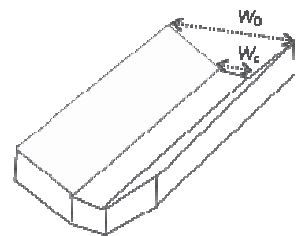
土壌層発達の必要条件として不均質性を捉えたとき、大気圧よりも大きい水圧を持つ地下水と表面張力で水を保持している土壌水の違いに注目しなければならない。もちろん、森林の地表面は不均質であるため、ホートン型の地表面流や樹幹流によって、正圧を持つ水の流れが生じるので、洪水流出に及ぼす影響も無視できない。しかしながら、崩壊を発生させるような豪雨時には地表面流が発達してゆくのではなく（五味ら、2008）、土壌層全体が湿潤になって、むしろ地中の水動態の役割が大きくなると考えなければならない。尾根付近では比較的均質であるかもしれないが、雨水の集中する凹地部では、地下水による細かい土粒子が侵食され、パイプ状の水みちが発達し、地下水面上昇の抑制、間隙水圧の減少に寄与していると考えられる（新藤、1993）。それゆえ、水みちが閉塞することは、排水不可能なほどの豪雨と同様、崩壊発生の引き金になるのである（堤、2005）。

### 4 降雨流出応答が単純なタンクモデルで再現できる根拠

数式的に見ると、不飽和帯の土壌水と地下水から成る地中水は、Richards 式で統一的に表現され、圧力水頭の移流拡散方程式によって、近似的ではあるが統一的に表現できる。このことは、土壌層を、降雨強度の変動を入力とし、大気圧を持つ湧水点での流出強度の時間変動を出力とする、圧力水頭の伝播システムとみなしていることにほかならない。そのシステムにおいては、不均質性がある場合、不飽和帯では、表面張力の強い小さい間隙を優先的に満たすように流れ、吸引力のないパイプ状水みちには水が入らない。一方、地下水帯では、湧水点に直結したパイプ状の水みちの方が周囲の土壌マトリクスよりも圧力水頭が小さいので、水みちに水が集中する。その結果、地下水変動が抑制されると同時に、不飽和帯での体積含水率の変動が生じ、土壌層全体での貯留量変動が不飽和帯の含水率変動の積分としてもたらされる。土壌層内のローカルな不均質性は問題になりにくいわけで、圧力伝播システムとしては、不飽和帯の貯留変動の総和があたかもタンクモデルの貯留水深であるかのような一体性が生じることになる。単純な貯留関数やタンクモデルで豪雨に対する洪水流出が表現されるのは、このような流出機構が成り立っているからである (Tani, 2013)。土壌層の物理性の空間不均質性は、流出機構の複雑さと降雨流出応答関係の単純さのコントラストの根拠となるのである。

### 5 今後の表層崩壊発生研究への貢献

砂防の問題としては、土壌層の発達と崩壊の繰り返しが崩壊発生に及ぼす影響が重要課題であるため、今回の科研では、そのサイクル過程のシミュレーションを (黒川・谷, 2014) 試みている。一方、本発表では、不均質な土壌層における土壌水と地下水の役割の違いをふまえた流出機構を検討した。そこで今後は、「不均質性がランダムに存在するのではなく、集水地形部分で排水効果が大きいような特徴を持つこと」が崩壊発生にどのような影響を及ぼすのかについて、現地調査とモデル開発が必要になるであろう。



### 謝辞

本研究に科研 (課題番号 23221009) の支援を受けたことに謝意を表するとともに、分担・連携研究者であった (内田太郎、黒川潮、野口正二、細田育広、北原曜、岩田拓記、藤本将光、葛葉泰久、中北英一、松四雄騎、小杉賢一朗、小杉緑子、勝山正則、鶴田健二：敬称略) の皆様に厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

五味高志・恩田裕一・寺嶋智巳・水垣 滋・平松晋也：「恩田裕一編：人工林荒廃と水・土砂流出の実態」所収、岩波、2008。Heimsath, A. M., Dietrich, W. E., Nishiizumi, K., Finkel, R. C.: *Geomorphology* 27, 1999。北原曜：水利科学 53(6)、2010。黒川潮・谷誠：平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集、2014。松四雄騎・松崎浩之・牧野久識：地形 35、2014。下川悦郎：林業技術 496、1983。新藤静夫：第四紀研究 32、1993。園田美恵子：京大理博士学位論文、2000。鈴木雅一・福嶋義宏：水利科学 33(5)、1989。高橋保：京大防災研年報 20B、1977。Tani, M.: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2013。塚本良則・野口晴彦：砂防学会誌、1979。堤大三・宮寄俊彦・藤田正治・Sidle, R. C.: 砂防学会誌 58(1)、2005。内田太郎・木本秋津・大手信人・水山高久：砂防学会誌 51 (5)、1999。

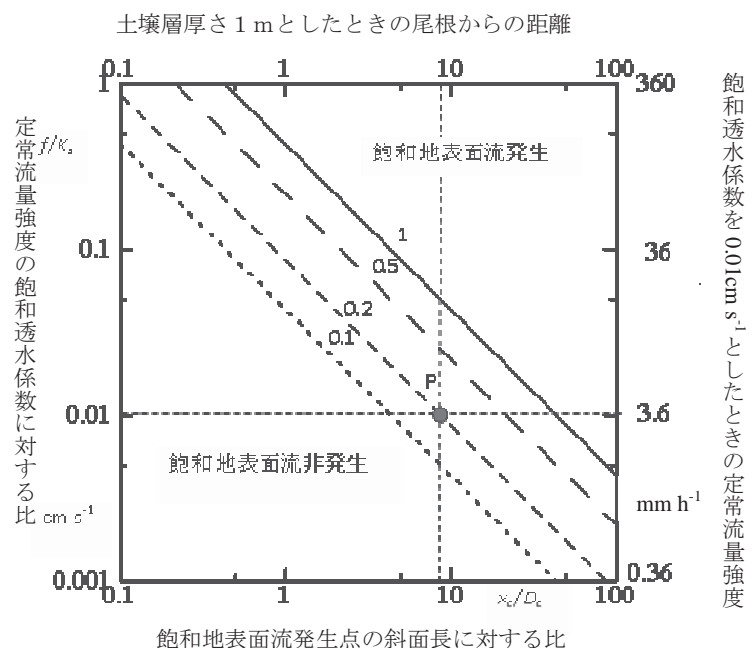


図1 物理性が均質であると仮定したゼロ次谷流域において、凹地部分に飽和地表面流が発生する水平位置と定常流量強度 (定常なので降雨強度に等しい) の関係  
土壌層の厚さを 1m、斜面勾配を 30° とした。図中の数字は、ゼロ次谷全体の幅  $W_0$  に対する中央凹地部の幅  $W_c$  の比 (1 のときは二次元斜面を、0.2 のときは中央部の 20% が両側 40% の斜面部分からの雨水集中を受けることを意味する。