

森林のグリーンインフラ機能維持による 河川の環境保全および安全性向上の効果計測

山田 歩¹・武藤 慎一²・奥脇崇太³

¹ 学生員 山梨大学 大学院医工農総合教育部工学専攻 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
E-mail: g20tc011@yamanashi.ac.jp

² 正会員 山梨大学准教授 大学院総合研究部工学域 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
E-mail: smutoh@yamanashi.ac.jp (Corresponding Author)

³ 学生員 山梨大学 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11)
E-mail: t17ce013@yamanashi.ac.jp

本研究では降雨時の斜面表層崩壊の発生頻度を斜面安全率で測るとともに、発生した土砂災害跡地から生ずる表面流量と土砂運搬量を推計するモデルの構築を行った。推計に際し、近年問題となっている放置林を表現するため管理人工林と管理放棄人工林とに分類し計算を行った。これより、管理人工林など下層植生の十分発達した林分では表面流の発生は微小であり、管理放棄人工林や裸地などの表面流量は比較して多大であるといえる。そうして得られた年平均流出土砂量は 41.6 t に及び、河川への影響は少なくない。

Key Words: *Green Infrastructure, Slope safety factor, Forest maintenance, River environment conservation effect, River safety improvement effect*

1. はじめに

近年、激甚化する豪雨による洪水リスクや土砂災害リスクへの懸念が高まっている。特に土砂災害は、それによって一時的に森林域が裸地となることによって浸透能が低下し、表流水流出量を増加させるため下流域での洪水リスクを高めることになる。また、森林域と比較すると裸地部は、流出土砂量も増加させる。土砂の流出は、下流の河川中の日光量を低下させ、河川環境の悪化にもつながる。

豪雨の激甚化は、地球温暖化が一因とされており、地球温暖化の緩和にこれまで以上の取組を行うことが重要である。そして、それとともに災害リスクに対する適応策を実施していくことも重要となってきた。地球温暖化に対する適応策については、ダム建設や砂防ダム、堤防強化等によってこれまで実施されてきた。しかし、想定以上の降雨が生じている現状では、それらの対策だけでは必ずしも十分でない可能性がある。豪雨に伴う災害の重要な発生要因である土砂災害への対策が重要であるとの指摘もある。実際、道路沿いや住宅地に近い地域では、のり面保護施設設置等の土砂災害対策が実施されている。しかし、そうした対策を山林の奥地にまで実施することは現実的でない。

こうした問題に対し、森林の有するグリーンインフラ機能を活用することに注目が集まっている。グリーンインフラ機能とは、以前は公益的機能と呼ばれ、昔から治山事業の一環としてその強化に取り組まれてきた。具体的には、森林整備や林業の活性化によって森林を健全な状態に保ち、水質保全機能や表層崩壊防止機能といったグリーンインフラ機能を向上させることによって、河川環境の保全や洪水への安全を確保するというものである。最近になり、改めて従来の治水施設整備に加えて、グリーンインフラ機能に着目した治山事業も強化しようという動きになったものである。しかし、グリーンインフラ機能の向上によって、どの程度の河川環境の保全効果が生じるのか、洪水に対する安全性が向上するのかが明らかにはされていない。

そこで本研究では、山地での斜面安全率計算から土砂災害の発生を推計するシステムを構築し、森林整備や林業活性化による森林保全によって土砂災害が抑止され、河川環境の保全と水害に対する安全性の向上に係る効果計測を目的とする。

2. 森林のグリーンインフラ機能

(1) グリーンインフラの位置づけ

グリーンインフラの捉え方は各国や地域でもそれぞれ

異なっている。先進的な欧米でも 2000 年代からグリーンインフラに着目して検討がなされている。日本では公益的機能としての議論はあったものの、従来のハード系インフラ施設に対してグリーンインフラという呼称を用いて本格的に議論されたのは 2011 年東日本大震災以降と言われている。自然災害の多い日本において、国土交通省は「社会資本整備・土地利用などのハード・ソフト両面において、自然環境が有する多様な機能を活用し、持続可能で魅力ある国土作りや地域作りを進めるもの」という位置づけを行った。また環境省でも Eco-DRR と呼ばれる取扱いを提唱し、防災・減災にグリーンインフラを活用することを提案している。

こうした背景には近年の森林の荒廃に係る問題がある。林業従事者の高齢化による就業者不足のため、人工林の手入れが不十分となり、放置林や切り捨て間伐が大きな問題となっている。日本の人工林の多くはスギやヒノキなどの生長の早い針葉樹林である。しかし、植林後の間伐が不足すると立木密度が高くなり、密集した樹冠によって陽光が遮られ、下層植生が十分に発達しなくなる。

こうした森林の荒廃が進んでいる。森林の荒廃は樹木根系の生長も阻害し、それが土砂災害発生要因となる。その結果土壌浸食・流出が頻発することになり、森林の水源涵養機能を低下させる。

(2) 森林の土砂災害抑止機能及び中小降雨における森林の浸透能と土壌流出防止機能

グリーンインフラとしての森林が、防災・減災において期待される機能として、「土砂災害防止機能」と「中小降雨にかかる水・土砂流出の低減」があげられる¹⁾。

集中豪雨などによって引き起こされる土砂災害には崖崩れ、土石流、地すべり等の種類がある。このうちがけ崩れ、地すべりなどの斜面崩壊において厚さ 0.5~2m 程度の表層度が基盤層の境界に沿って滑落する比較的小規模の崩壊を表層崩壊と呼ぶ。一般的にがけ崩れや土石流は表層崩壊によるものが多い。

表層崩壊は降雨によって浸透した水が透水層と不透水層の間にたまることでギャップを発生させ、上部の土層が滑動しやすくなる。このとき土の粘着力や土層同士の摩擦などの抵抗力を上回ると表層崩壊が発生する。

森林の根系は土層に対しせん断抵抗力（樹木根茎全体を鉛直方向上向き、あるいは斜面向下に引き抜くときの抵抗力をせん断方向への抵抗力に変換したもの）を持ち、表層崩壊を防止する。

山地斜面では、降雨の雨滴が地表にぶつかる時雨滴による浸食が生ずる。雨滴の衝撃により数mmから数cm地表の土粒子が削り取られ、削り取られた土粒子が表面流によって移動する。しかし林床に下層植生あるいはリター層(地面に堆積した葉や枝が積み重なってできた層)が

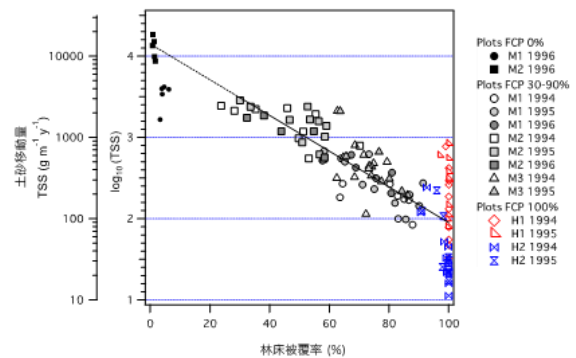


図2 ヒノキ林の林床被膜率と土砂移動量の関係 (出典 森林立地学会 土壌浸食)

存在する場合、この雨滴の衝撃を和らげ、土壌浸食を防止する。

また雨滴の衝撃により土壌の目詰まりが発生すると、土壌の浸透能が低下する原因ともなる。浸透能の低下は表面流の流量増加に繋がり、結果、土壌流出量が増加する。そのため、土壌流出は裸地や管理放棄人工林などの下層植生が十分に生育していない地表で発生しやすい。

3. 計測方法

(1) 表層崩壊発生確率の推計

表層崩壊の発生頻度を計測するため、該当地域を 1 km メッシュに分割し、各メッシュを森林域と都市域に分類した。なお表層崩壊は森林域のみで起こるものとする。

また放置林の影響を計測するため、森林域を管理人工林と管理放棄人工林とに分類し、それぞれのパラメータを設定する。天然林は管理人工林域と同等の下層植生、浸透能を有するものとし、管理人工林として扱う。

斜面の安定性を解析する方法の一つに限界平衡法というものがある。これはあらかじめすべり面を仮定し、自重、間隙水圧がこのすべり面に及ぼすせん断力と土の粘着力と摩擦力、森林根系により発揮されるせん断抵抗力を求め、この比を安全率として、仮定したすべり土塊の安定性を評価する。

表層崩壊の発生を推計するため、メッシュごとに斜面安全率を計測する。斜面安全率が 1 を下回ったときメッシュ全体で表層崩壊が発生し森林域が裸地となる。

斜面安全率は降雨量の影響をうけるため、降雨量をパラメータとして入力する。

なお斜面は無限延長斜面とする。

1 km メッシュあたりの平均斜面安全率 F は以下の式

(1a) (1b) のように表される。

$$F_1 = \frac{\gamma H \cos \alpha \tan \phi + c + \Delta k_1}{\gamma H \cos \alpha \sin \alpha} \quad (1a)$$

$$F_2 = \frac{\gamma H \cos a \tan \varphi + c + \Delta k_2}{\gamma H \cos a \sin a} \quad (1b)$$

ただし、 F_1 ：管理人工林域メッシュの単位面積あたりの斜面安全率、 F_2 ：管理放棄人工林メッシュの単位面積あたりの斜面安全率、 γ ：土の湿潤単位体積重量、 a ：斜面勾配、 H ：表層土層厚さ、 φ ：土の内部摩擦角、 c ：土の粘着力、 Δk_1 ：管理人工林樹木根系によるせん断抵抗力増分、 Δk_2 ：管理放棄人工林樹木根系によるせん断抵抗力増分とする。

ここで土の粘着力は降水量の影響を受ける飽和度によって変化するため (3) 式のように表される。

$$c_i = c_0 - \Delta c (Sr_i - Sr_0) \quad (3)$$

ただし、 c_i ： i 時刻における土の粘着力、 c_0 ：初期の土の粘着力、 Δc ：係数、 Sr_i ： i 時刻における飽和度、 Sr_0 ：初期の飽和度とする。

なお i 時刻の飽和度は (4) 式より算出する。

$$Sr_i = \frac{\rho_{(i)} - (1+e) - \rho_s}{e \rho_w * 100} \quad (4)$$

ただし、 $\rho_{(i)}$ ： i 時の湿潤密度(g/cm^3)、 ρ_s ：土粒子密度= $2.6(g/cm^3)$ 、 ρ_w ：水の密度(g/cm^3)、 e ：間隙比
 なお、 i 時刻の湿潤密度は (5) 式より得られる。

$$\rho_{(i)} = \frac{\rho_{(i-1)} + (q_{in} - q_{out})}{V * \rho_w} \quad (5)$$

ただし、 $\rho_{(i-1)}$ ： $i-1$ 時湿潤密度、 q_{in} ： i 時の流入量(m^3)、 q_{out} ： i 時の流出量(m^3)とする。

また、表層土厚 H は図-3.1 に示した斜面勾配との関係である逢坂、塚本の直線より次式を得る。

$$H = -0.0351\alpha + 2.012 \quad (6)$$

このとき α ：斜面勾配とする。

森林のせん断抵抗力は林齢と表層土層厚の影響を受けやすい。根系の生長は樹冠に比例するが、樹幹は立木密度や林齢によって変化する。管理人工林の樹木は根系の生長が十分であり、管理放棄人工林は根系の生長が不十分である。

根系のせん断抵抗力増分は以下の式を用いて計測する。

$$\Delta k_1 = 702.87 * \exp(-1.206 * H) \quad (7a)$$

$$\Delta k_2 = 612.02 * \exp(-1.235 * H) \quad (7b)$$

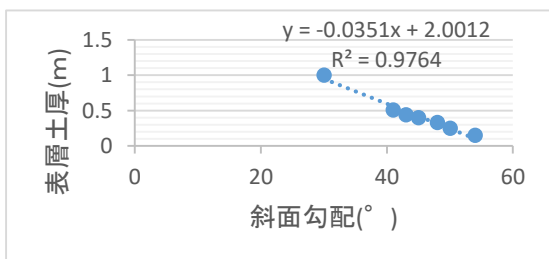


図-3.1 斜面勾配と表層土厚の関係図

「自然斜面の土層の厚さについて(逢坂興宏 塚本良則)より

日本における森林の所有構造は小規模かつ複雑化しており、人工林分布および管理放棄人工林位置の調査が難航している。そのため、本研究における管理人工林と管理放棄人工林の分布は推計により求めるものとする。森林メッシュのうち管理人工林は、材木を搬出する大型フォワーダの搬出コスト限界となる林道より 350m 距離圏内とする。

(2) 下流域へ流入する土砂量の推計

山地に降雨した水の行先は森林による吸収、蒸発散、土壌への浸透、表面流出の 4 つに分類される。このとき、初期の段階では表面流出は微小であり、土壌への浸透が優先されるが、終期の段階では土壌への浸透は微小となり、表面流出が優先される。

雨滴衝撃により削り取られた土粒子は表面流に運ばれ、河川へ流入する。ここでは表面流によって運び出される土砂の量を推計する。

a) 林分蒸散量

降雨した水の一部は森林によって吸い上げられ、やがて蒸散し大気に循環していく。

山梨県の人工林は 66% が林齢 46 年以上のスギヒノキを中心に成る。林分の蒸散は林齢に大きく影響され、林齢が高くなるほど蒸散量も比例して高くなる。

本論文では管理人工林と管理放棄人工林の蒸散量を樹冠面積に比例した葉量をパラメータとし林分の日蒸散量推定の精度を上げるため、上層と下層に分けて推計を行った。

b) 蒸発量

森林以外に生ずる蒸発量を計算する。ここでは計算が容易であり、気象要素が少なく済むマッキンク式を用いて蒸発散量を算出する。

なお、入力する全天日射量は各年の平均値を入力する。

$$PE_d = a \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{L} + b \quad (8)$$

ただし、 PE_d ：可能蒸散量[mm/日]、 a ：定数=0.8

b ：定数=0.5[mm/日]、 γ ：乾湿係数[hPa/°C]

R_s ：全天日射量[MJ/(m²・d)]、 L ：蒸発潜熱[MJ/kg]=25-0.0025T、 T ：気温、なお、 $\Delta/\Delta + \gamma = 1/(1.05 + 4 \exp(-0.0604T))$ とする。

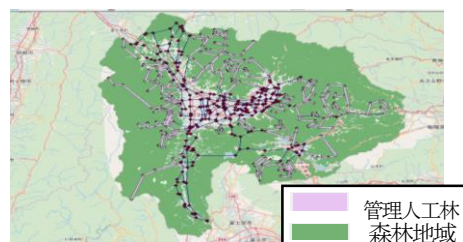


図-3.2 山梨県人工林位置推計図

c) 土壌浸透

降雨した水のうち蒸発散しないものは土壌へ浸透していく。森林の持つ浸透能は極めて高く、管理人工林域では最大浸透能は数百mm/hrとなり、ほとんどの降水は土壌へ浸透していく。対して、管理放棄人工林や裸地などの下層植生の乏しい土壌では数mm/hrから数十mm/hr程度に急減する。

管理人工林メッシュでは入力される降水量よりも浸透量が大きく上回るため、表面流が発生しない。管理放棄人工林においては、最終浸透能を土砂災害発生件数が観測された値に漸近させるように設定する。

d) 表面流出

降水した水は蒸発散及び土壌浸透しない場合、表面流として地表を流れ、河川へ流入する。メッシュごとに水の表面流出量を以下の式により計算する。

$$\text{(水の表面流出量)} = \text{(降水量)} - \text{(森林の蒸発散量)} - \text{(土壌の蒸発散量)} - \text{(土壌への浸透量)}$$

なお、表面流として流れる水はすべて損なわれることなく河川へ流入するものとし、河川の流量と表面流出量が一致することで現況に即していると判断することにする。

e) 土砂量の推計

本論文では土砂災害が発生したメッシュにおいてのみ表面流が発生し、土砂の流出が起こると仮定する。一般的に土壌は雨滴衝撃によって2mmから1cmほどを削るため、表面流が発生するメッシュでは2mm×メッシュ面積の土砂が表面流によって流出すると考えられる。

4. 計測結果

(1) 表層崩壊発生確率の計測結果

本研究では表-4.1にしめしたパラメータを採用する。

表-4.1 斜面安全率にかかるパラメータ

土の湿潤単位堆積重量 (kgf/m ³)	1,300
土の内部摩擦角 (°)	35
メッシュ面積 (m ²)	1000000
初期飽和度	0.13

a) 現況再現

降雨は山梨県の全14箇所の観測所を頂点としたティーセン分割を行い、それぞれの範囲に含まれるメッシュに各降雨量を与える(図-4.1)。

また、国土数値情報より山梨県の斜面勾配は図4.2に示す通りである。

各メッシュに各年の最大一時間降水量を与え、斜面安全率を計算した。これにより各年平均して10件程度の表

層崩壊が発生する。山梨県の土砂災害発生件数は年8回程度(平成19年～平成28年の平均値)であり、現実に近い数値を示している。

(2) 表面流出量の計算結果

斜面安全率が1を下回り表層崩壊が発生したメッシュにおいてのみ表面流出が発生する。ここで斜面安全率計算と同様に各年の一時間最大降水量を与え、表面流量を計測した。なお、一度発生した表面流出は蒸発などによって損なわれることはないものとする。

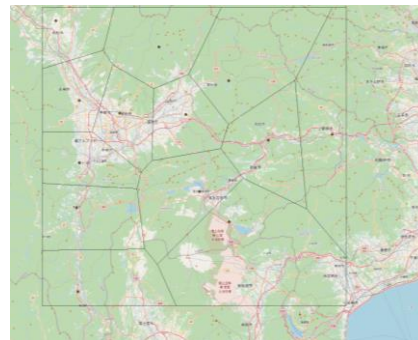


図-4.1 ティーセン法による山梨県降雨量分割

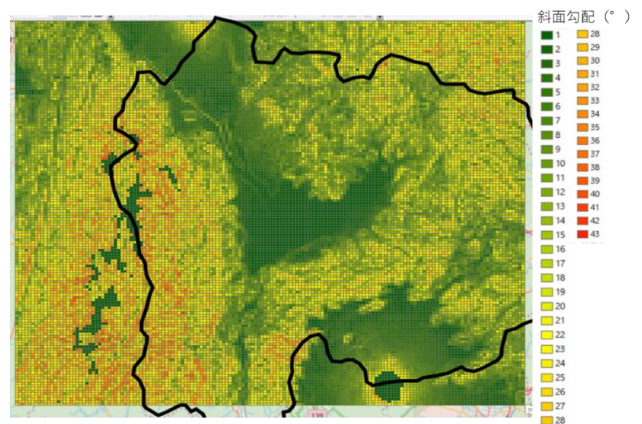


図4.2 山梨県の斜面勾配

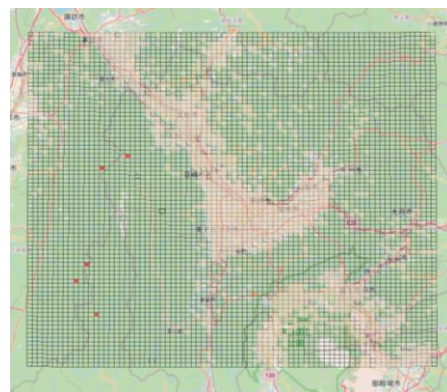


図4.3平成26年斜面安全率

なお、蒸発量計算に際し、土砂災害発生件数と実測値と漸近する 44mm/hr を浸透量とする。また管理人工林においては一般的に与えられる浸透能が高く、山梨県の最大降雨量を上回るため、表面流は発生しない。

加えて、浸透した水は山地にある程度は保水されるが、そのほとんどは時間を置くことなく河川へ流入する⁹⁾。

マッキンク式 (8) 式より求めた各年の蒸発量は表 4.2 に示す通りである。

表 4.2 各年の蒸発量

年	PEd	年	PEd	年	PEd	年	PEd
1973	2.367078	1985	2.791414	1997	2.978122	2009	3.062989
1974	2.842334	1986	2.842334	1998	2.757467	2010	3.113909
1975	2.944175	1987	2.859308	1999	2.978122	2011	3.062989
1976	2.417998	1988	2.757467	2000	2.995095	2012	3.062989
1977	2.316158	1989	2.689573	2001	3.029042	2013	3.130883
1978	2.248264	1990	2.791414	2002	2.995095	2014	3.046015
1979	2.944175	1991	2.655626	2003	2.808387	2015	3.046015
1980	2.808387	1992	2.791414	2004	3.062989	2016	3.062989
1981	2.927201	1993	2.6726	2005	3.012068	2017	3.181803
1982	2.876281	1994	2.910228	2006	2.808387	2018	3.21575
1983	2.876281	1995	2.927201	2007	3.029042	2019	3.062989
1984	2.944175	1996	2.910228	2008	3.046015	2020	3.249697

斜面安全率が 1 を下回り土砂災害が発生したメッシュは裸地となる。ここでは表面流が発生し、土砂の流出が起こる。表面流出量の計算から土砂災害が発生したメッシュでは 1 メッシュ当たり平均して約 1.55mm/hr の表面流が発生している。これに土砂災害発生メッシュ数を掛け合わせると、年平均 12.40mm/hr の表面流が山梨県全体で発生している。これを流量に換算すると 12408 m³の水が表面流として河川へ流入していることになる。この表面流によって運搬される土砂は 1 メッシュあたり 52 t、年間平均 41.6 t の土砂が河川へ流入していることになる。

5. おわりに

本論文では、斜面安全率より土砂災害発生頻度を推計した。森林域の計算において管理人工林と管理放棄人工林とに分類し、各パラメータを調整することで実現象に整合した斜面安全率の頻度が再現できた。森林域における表層崩壊の発生は明らかに管理放棄人工林のみで発生する。これは下層植生の有無による浸透能の差が原因と考えられる。

なお、本論文では、現況再現までを行ったが、グリーンインフラの河川環境保全効果については評価しきれていない。表面流出した土砂が河川に与える影響について今後調査・研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) 環境省自然環境局：生態系を活用した防災・減災に関する考え方、2016
- 2) 掛谷亮太・瀧澤英紀・小坂泉・園原和夏・石垣逸郎・阿部和時：スギ林の間伐が根系生長と表層崩壊防止機能に与える影響、日緑工誌、J.Jpn.Soc.Reveget.Tech42[2]pp299-307,2016
- 3) 阿部和時：樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能の評価方法に関する研究、森林総合研究所研究報告第 373 号 Bull.For.&For.Prod.Res.Inst.1997
- 4) 北原曜：森林根系の崩壊防止機能、水利科学 No.311 2010
- 5) 執印康裕・鶴見和樹、松永恵吾、有賀一広、田坂：分布型表層崩壊モデルによる樹木根系の崩壊防止機能の定量的評価、日本緑化工学会誌、第 35 巻、2009
- 6) 逢坂興宏・塚本良則：自然斜面の土層の厚さについて、緑化工技術 12 巻 3 号、1986
- 7) 高橋保、中川一：豪雨性表層崩壊の発生とその生産土量の予測、第 30 回水理講演会論文集、1986
- 8) 国土交通省：国土数値情報ダウンロードサービス <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 9) 浅野嘉文、川尻峻三、布川修、太田直之、杉山友康、渡邊諭：降雨時における斜面表層崩壊を再現する簡易解析モデルの提案、地盤工学ジャーナル Vol.8, No.4, 579-595

?
?