

豪雨による流木生産量の推算法

ESTIMATION OF AMOUNT OF DRIFTWOODS

CAUSED BY HEAVY RAINFALL

平野宗夫¹・原田民司郎²・疋田誠³

Muneo HIRANO, Tamishiro HARADA and Makoto HIKIDA

¹建設技術研究所九州支社 (〒810-0041 福岡市中央区大名 2-4-12)

²建設環境研究所九州支社 (〒812-0022 福岡市博多区神屋町 4-5)

³鹿児島工業高等専門学校 (〒899-5193 鹿児島県霧島市隼人町真孝 1460-1)

Key Words: driftwoods, slope failure, debris flow, heavy rainfall

1. はじめに

最近流木を伴う土砂災害が頻発しているが、流木が災害を激化させた例は、1953年6月西日本水害時の筑後川や白川の水害、1990年7月の竹田市水害と阿蘇・一の宮土石流災害など以前から数多く報告されている。また1991年19号台風により大量の風倒木が発生した筑後川の上流域では、流木災害が大きな社会問題となった。

流木量は崩壊面積に立木密度を乗じることにより計算できるから、流木量を予測するためには崩壊面積の予測が必要である。

筆者等は土石流のハイドログラフを推算するために土石流流出モデルを構築し、桜島・野尻川および雲仙・水無川の土石流に適用してその有用性を確認した^{1), 2)}。また、これら火山性土石流だけでなく、白川支川古恵川の土石流についても適用できることが示された^{3), 4)}。このモデルにおいて土石流の流量は、山腹崩壊条件を満たす斜面面積の割合に降雨強度を乗じて計算されている。したがって崩壊面積の時間変化はこのモデルにより計算でき、それに立木密度を乗ずることにより流木量のハイドログラフの推算が可能である。

阿蘇・一の宮の災害については、自然総合研究班による突発災害調査研究⁵⁾が行われており、崩壊面積、生産土砂量、流木量などについて詳細な報告がなされている^{6)~8)}。ここでは、崩壊面積および流木量の計算モデルを提示し、上記資料によりその適用性を検討する。

2. 土石流の流出モデル^{1), 3)}

(1) 土石流の発生限界

土石流の発生条件として、高橋⁹⁾は勾配が15°以上の溪流で表面流の水深が堆積物の粒径とほぼ等しいことと

している。一方、平野らは堆積物の表面には少なくとも粒径以上の凹凸が存在するから、表面流発生と同時にこの条件は満足されると考え、浸透水が地表面に達することを土石流発生の条件として下式を導いた¹⁰⁾。

$$D = \frac{1}{\lambda} \int_0^t r \cos \theta dt \quad (1)$$

および

$$l \geq k(t - t_s) \sin \theta / \lambda \quad (2)$$

ここに、 D : 斜面厚さ、 r : 降雨強度、 λ : 堆積物の空隙割合、 t_s : 降雨開始時刻、 θ : 斜面の傾斜角、 l : 斜面長、 k : 透水係数である。

上記の発生限界は室内実験¹⁰⁾で検証され、現地への適用性^{3), 11)}も確認されている。

(2) 土石流発生の場の面積

流域を長さ l の斜面の集合と考えると、流域面積 A は

$$A = \int_0^L l \cos \theta dx \quad (3)$$

で表される。ここに、 L : 溪流の総延長である。したがって、微小面積 ΔA は

$$\Delta A = l \cos \theta dx \quad (4)$$

となる。また長さ l 、厚さ D の斜面の密度関数を $\Psi(l, D)$ とすると

$$\Delta A = A \Psi(l, D) \Delta l \Delta D \quad (5)$$

と書くことができる。ここに、

$$\int_0^L \int_0^D \Psi(l, D) dl dD = 1 \quad (6)$$

である。

したがって、(1) および (2) 式の条件を満足する面積 a は次式で表される。

$$a = A \int_{k(t-t_s)\sin\theta/\lambda} \Psi(\ell, D) \Delta D d\ell \quad (7)$$

斜面の長さや厚さの関係については手持ちの資料がないが、両者の間に強い相関があるとは考え難い。図-1は福岡県の295の溪流について溪流長と堆積厚の実測結果を示したものである。図において相関係数は0.074で、溪流長と堆積厚には相関がないことが分かる。

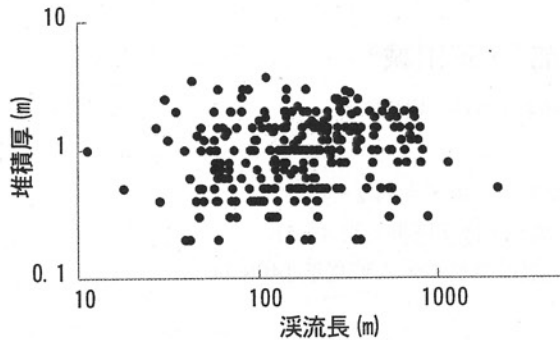


図-1 溪流長と堆積厚の関係

溪流と斜面との違いはあるが、斜面においても同じと考えると、斜面長と斜面厚は無相関で

$$\Psi(\ell, D) = \varphi(D) \psi(\ell) \quad (8)$$

とおくことができる。ここに、 $\varphi(D)$ および $\psi(\ell)$: それぞれ斜面長および斜面厚の密度関数である。さらに、斜面長と浸透流の到達時間 T との関係は

$$\ell = kT \sin \theta / \lambda \quad (9)$$

であるから

$$\psi(\ell) \Delta \ell = \xi(T) \Delta T \quad (10)$$

とおくことができる。ここに、 $\xi(T)$: T の密度関数である。したがって、(7) 式は

$$a = A \varphi(D) \Delta D \int_{-t_s}^{\infty} \xi(T) dT \quad (11)$$

となる。

さらに、(1) 式より

$$\Delta D = \frac{r \cos \theta \Delta t}{\lambda} \quad (12)$$

であるから、(11) 式は

$$a = A \varphi(D) \frac{r \cos \theta \Delta t}{\lambda} \int_{-t_s}^{\infty} \xi(T) dT \quad (13)$$

と表される。

流木生産量は崩壊面積に立木密度を乗ずることにより求められる。

(3) 斜面からの流出土砂量

斜面からの土砂流出量 q は下記のように表される¹⁾。

$$q = f_s r \ell \cos \theta \quad (14)$$

$$f_s = (1 - \lambda) / (1 - \lambda - C) \quad (15)$$

ここに、 f_s : 流出係数、 C : 土石流の体積濃度である。水だけが流出する場合は $C=0$ であるから $f_s=1$ となり、(13)式は流出に関する合理式に一致する。

斜面からの全流出量 Q は (14) 式を積分し、(1) および (2) 式の条件を適用すると下記ようになる。

$$\begin{aligned} Q &= \int f_s r \ell \cos \theta dx \\ &= f_s r A \int_{k(t-t_s)\sin\theta/\lambda} \Psi(\ell, D) \Delta D d\ell \quad (16) \end{aligned}$$

上式に (10) および (12) 式を代入すると下式となる。

$$Q = f_s r A \varphi(D) \frac{r \cos \theta \Delta t}{\lambda} \int_{-t_s}^{\infty} \xi(T) dT \quad (17)$$

3. 平成2年7月阿蘇・一の宮災害への適用

(1) 災害の概要

1990年7月1日から2日にかけて九州中北部に停滞した梅雨前線は、この地域に洪水、土石流、山崩れ、地すべりなどの豪雨災害をもたらした。被災地は長崎、佐賀、福岡、大分各県の広範にわたり、死者27名、重軽傷101名、家屋全壊198戸、半壊338戸、床上浸水10,362戸、床下浸水34,202戸という大規模な災害となった。阿蘇・一の宮町においては白川支川の古恵川に土石流が発生し、大量の流木が松原橋を閉塞したために橋の両岸に土石流と流木が氾濫した。大量の流木と土石に襲われた坂梨地T区では死者8名、家屋の全壊79戸、半壊72戸という激甚な災害となった。この日の一の宮土木事務所で見測された雨量記録を図-2に示す。

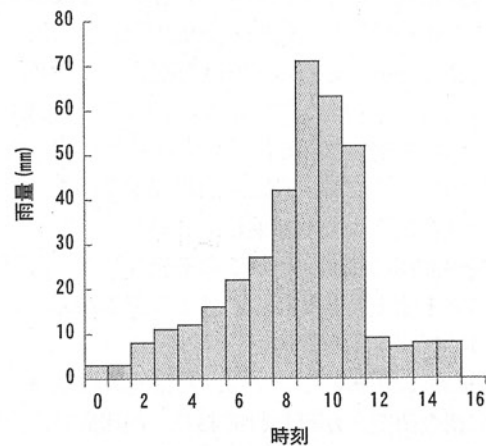


図-2 時間雨量の経時変化(7月2日)

(2) 山腹崩壊状況

林ら⁷⁾は古恵川流域における山腹崩壊状況を航空写真の判読により詳細に調査した。それによると表-1に示すように、古恵川(面積9.283km²)における崩壊箇所は474で、崩壊面積は流域面積の10%を超えている。また、

草本域と木本域の崩壊面積比はそれぞれ 6.43%および 12.12%となっており、木本域の崩壊面積比は草本域のその 2 倍に近い。一方、単位面積当たりの崩壊箇所は草本域で 79 箇所/ km^2 、木本域で 39 箇所/ km^2 となっており、木本域の方が草本域の半分となっている。

表-1 崩壊地誌元 (林らによる)

	面積 (km^2)	崩壊 箇所数	崩壊面積 (km^2)	面積比 (%)
草本域	2.739	217	0.176	6.43
木本域	6.545	257	0.793	12.12
合計	9.283	474	0.969	10.44

(3) 崩壊面積・流木量・生産土砂量の推算

古恵川流域に (13) 式を適用して崩壊面積比を計算する。モデルのパラメータは、到達時間および斜面厚の平均値と標準偏差の 4 個である。斜面長や到達時間の分布は、標準偏差は 2.2 の対数正規に近いことが知られている^{1,2)} ので、ここでは到達時間を標準偏差 2.2 の対数正規分布とする。斜面の厚さについてはデータがないので、正規分布を仮定する。したがって、パラメータは斜面厚の平均値 D_m と標準偏差 σ_D および到達時間の平均値 T_m の 3 個となる。到達時間の平均値は、流出解析^{1,2)} や崩壊発生限界降雨の検討結果¹⁾ などから 1~10 時間程度、斜面厚は 0.3~1m 程度と思われる。

そこで、斜面厚を $D_m=0.6\text{m}$ 、標準偏差 $\sigma=0.1\text{m}$ とし、到達時間の平均を変化させて崩壊面積比を計算すると図-3 のようになる。図より $T_m=4$ 時間のとき崩壊面積比は最終的に 12.1%となり、表-1 の木本域のその 12.12% と一致する。また $T_m=4$ 時間、 $\sigma=0.1\text{m}$ とし、堆積厚さの平均 D_m を変化させて崩壊面積比を計算したものが図-4 である。

つぎに $D_m=0.6\text{m}$ 、 $\sigma=0.1\text{m}$ および $\theta=18^\circ$ ³⁾、 $\lambda=0.5$ とし、 $T_m=3, 4, 5$ 時間として (16) 式により生産土砂量の累加値を計算すると図-5 のようになる。斜面における生産土砂量について、谷口⁶⁾ は 1,960,000 m^3 、橋本ら⁸⁾ は 1,000,000 m^3 と推定しているが、 $T_m=4$ および 5 時間とした計算値はこれらの範囲内にある。

以上の計算結果から、使用されたパラメータの値はほぼ妥当な範囲にあり、本手法の適用性が示されたと考えられる。

図-3 の計算値の中で $T_m=4$ 時間とした場合の崩壊面積比の経時変化を示すと図-6 のようになる。林ら⁷⁾ によると立木密度は 30 本/100 m 程度である。崩壊面積比に木本域面積 (6.545 km^2) とこの立木密度を掛けることにより流木生産量の経時変化を求めると図-7 のようになる。総流木生産量は 237,000 本となる。

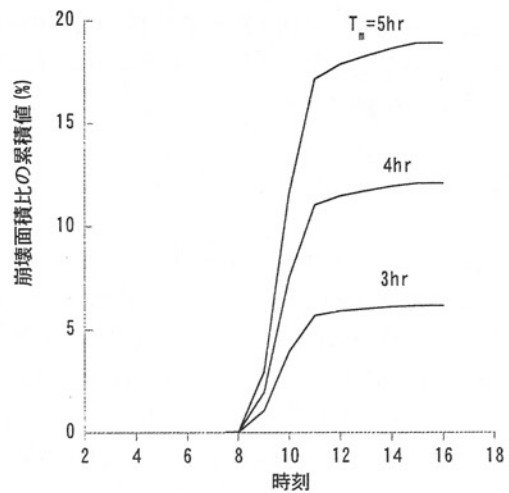


図-3 到達時間の平均値と崩壊面積比
($D_m=60\text{cm}$, $\sigma=10\text{cm}$)

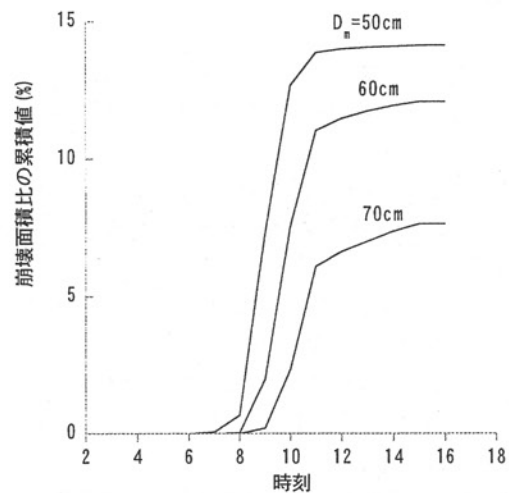


図-4 斜面厚の平均値と崩壊面積比
($T_m=4.0\text{hr}$, $\sigma=10\text{cm}$)

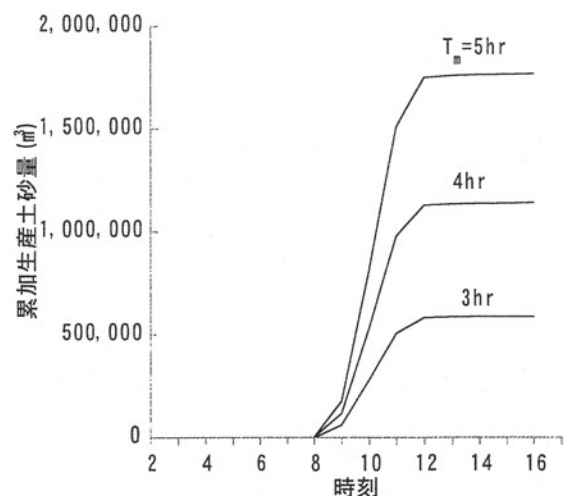


図-5 累加生産土砂量
($D_m=60\text{cm}$, $\sigma=10\text{cm}$, $T_m=4.0\text{hr}$)

また、同じパラメータ値 ($T_m=4$ 時間, $D_m=0.6m$, $\sigma=0.1m$) を用いて計算した生産土砂量の経時変化をプロットしたものが図-8である。

4. 結語

斜面における生産土砂量、崩壊面積、流木量の時間変化を与える式を導き、1990年7月2日の阿蘇・一の宮災害に適用した。その結果、パラメータに適当な値を与えることにより、崩壊面積、生産土砂量、流木量などの経時変化の計算が可能であることが示された。

古恵川流域においては500箇所近くの斜面崩壊が発生している。このように多数の斜面崩壊を予測する場合には、斜面の長さや厚さなどについての統計量を用いる本手法が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 平野宗夫・疋田誠・森山聡之：活火山流域における土石流の発生限界と流出規模の予測，第30回水理講演会論文集，1986
- 2) 原田民司郎・平野宗夫・川原恵一郎：雲仙・水無川における土石流の流出特性と流出解析，砂防学会誌，Vol. 52, No.1, 1999
- 3) 平野宗夫：土石流の発生予測と流出解析，土砂移動に関するシンポジウム論文集，1992.5
- 4) 原田民司郎・平野宗夫・川原恵一郎：雲仙・水無川における土石流の氾濫シミュレーション，砂防学会誌，Vol. 52, No.5, 2000
- 5) 自然災害総合研究班：1990年7月九州中北部豪雨による災害の調査研究（研究代表者平野宗夫），突発災害調査研究成果 NoB-2-1, 1991
- 6) 谷口義信：古恵川における流木の特性，突発災害調査研究成果 NoB-2-1, 1991
- 7) 林重徳・梅村順：古恵川流域における土砂と流木の発生，突発災害調査研究成果 NoB-2-1, 1991
- 8) 平野宗夫・橋本晴行：古恵川において発生した土石流の特性，突発災害調査研究成果 NoB-2-1, 1991
- 9) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究，京都大学防災研究所年報，第20号，B-2，1977
- 10) 平野宗夫・岩元賢・原田民司郎：人工降雨による土石流の発生機構に関する研究，第31回土木学会年次学術講演会概要集，1976
- 11) 平野宗夫：降雨による土石流の発生予測と流出解析，水工学シリーズ99-A-5，1999
- 12) 平野宗夫：山地小河川における流出過程について，土木学会論文報告集，第308号，1981

(2006. 5. 19 受付)

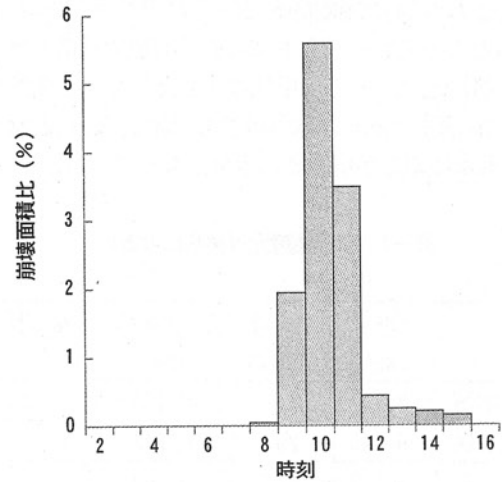


図-6 崩壊面積比の経時変化
($D_m=60cm$, $\sigma=10cm$, $T_m=4.0hr$)

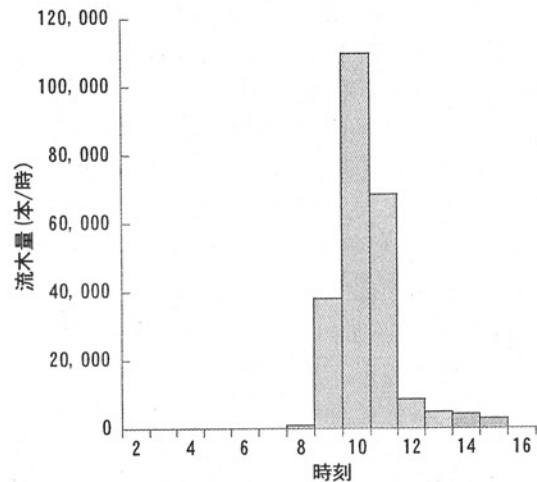


図-7 流木生産量の経時変化
($D_m=60cm$, $\sigma=10cm$, $T_m=4.0hr$)

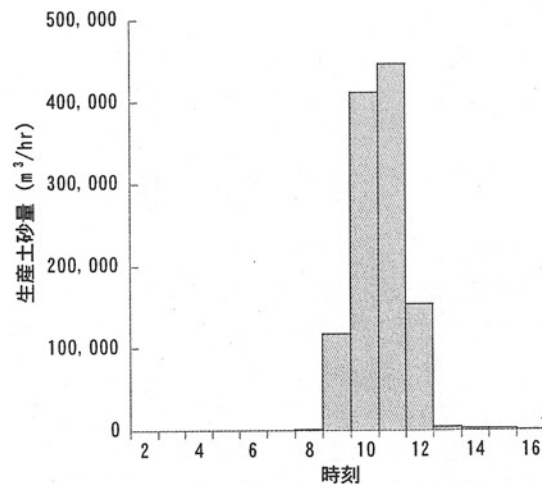


図-8 生産土砂量の経時変化
($D_m=60cm$, $\sigma=10cm$, $T_m=4.0hr$)