

# 崩壊・土石流の解析に基づく災害発生限界降雨曲線の設定 ～2013年伊豆大島豪雨災害への適用例～

山崎祐介・江頭進治・岩見洋一

## 1. はじめに

近年の土砂災害における犠牲者の発生状況を見ると、危機的状況が迫っていても、人が避難行動を起こすことがいかに難しいかがわかる。このような状況を改善していくためには、これらの原因を抽出し、一つ一つ除去していく不断努力が必要である。これらの一つとして、行政と地域住民が同じ土俵で、洪水や土砂移動現象を学ぶことのできるツールがあれば、それをを用いることによって災害情報の共有化が進み、上述のような状況はいくらかでも改善されることが期待できる。このようなツールの備えるべき要件として、次のようなものが考えられる。1)行政はハード・ソフトの災害対策のための有用な情報を得ることができ、住民は自分たちの生活の場が災害に対してどんな条件のところにあるのかを容易に知ることができる。2)危機が予測される状況においては、行政は各地域における時々刻々の災害情報を知ることができ、住民は生活の場においてどんなことが起こるのか、あるいは起ころうとしているのかを知ることができる。著者らは、以上のことを実践していくために、土砂災害シミュレーターの開発に努めている。ここではこのシミュレーターを簡単に紹介した後、これを2013年伊豆大島災害に適用し、これから得られる崩壊情報等を用いた災害発生限界降雨条件等について検討する。

## 2. シミュレーターの構成と基礎原理

土砂災害シミュレーターは、任意の降雨に対する山腹表層崩壊の発生、土石流の発生および洪水流量の時空間分布、ならびに土砂災害発生危険度等に関する情報を提供しようとするものである。これは、水深平均2次元支配方程式を基礎とする降雨流出モデル、山腹斜面の崩壊発生モデル、溪

流における土石流発生モデルおよび洪水流モデルから構成されている<sup>1)</sup>。

### 2.1 斜面における表面流と浸透流のモデル

図-1は、山腹斜面における降雨に伴う浸透流・表面流の模式図である。ここに、 $r$ は降雨強度、 $p_w$ は表土層の水分含有率、 $h_s$ は浸透流水深、 $h$ は表面流水深、 $\theta$ は局所最急勾配、 $D$ は表土層厚、 $\lambda$ は表土層の間隙率、 $c_s$ は表土層の体積土砂濃度、 $f_{s1}$ は地表面の浸透能、 $f_{s2}$ は表土層から下層への浸透能、 $z_s$ は下層の標高、 $z$ は地表面の標高である。透水性の低い層の上部に厚さ $D$ の表土層があって、降雨が生じると、雨水の鉛直浸透が起こり表土層の水分含有率 $p_w$ が増加する。これがある値 $p_{wc}$ を超えると浸透流が発生する。浸透流水深が増加して表土層厚を超えると表面流が形成される。降雨が停止すると、蒸発散によって表土層から水分が失われる。

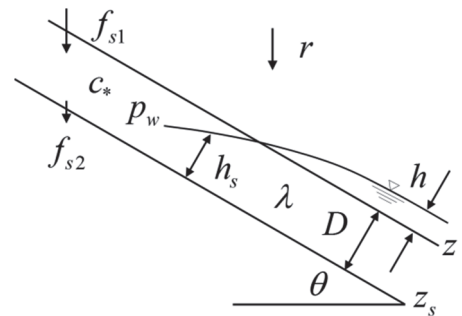


図-1 山腹斜面における降雨に伴う浸透流・表面流の模式図

浸透流は、最急勾配の方向に流れ、ダルシー則に従うものとし、表面流は、浸透流と同様に最急勾配の方向に流れ、運動は拡散波近似に従うものとし、水深平均の2次元支配方程式を用いてこれら进行评估する。

### 2.2 山腹斜面における斜面崩壊の発生条件

斜面における崩壊の発生または非発生は、無限長斜面に作用する力の釣り合い条件式を用いてこれを判定する。このとき、斜面に沿う重力成分は、表土層の土粒子、浸透流および表面流に作用する

Critical Rainfall Condition Resulting from Landslides and Debris Flows Predicted by Simulator of Sediment Related Hazards

重力の流れ方向成分から構成され、抵抗力は、クーロン摩擦および粘着力から構成される。釣り合い条件式を勾配 $\theta$ について解くと次式を得る。

$$\tan\theta_c = \frac{\left\{ \left( \frac{\sigma}{\rho} - \frac{h_s}{D} \right) c_* + \left( 1 - \frac{h_s}{D} \right) p_w + c' \right\} \tan\phi}{\left( \frac{\sigma}{\rho} - \frac{h_s}{D} \right) c_* + \left( 1 - \frac{h_s}{D} \right) p_w + \frac{(h_s + h)}{D}} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $\theta_c$ は崩壊発生の限界勾配、 $\sigma$ は土粒子の質量密度、 $\rho$ は水の質量密度、 $\phi$ は内部摩擦角、 $c'$ は粘着力の無次元量で、 $c' = c/\rho g D \cos\theta \tan\phi$ 、 $g$ は重力加速度、 $c$ は表土層とその下層の境界の粘着力である。 $\theta_c < \theta$ の斜面において崩壊が発生するものとする。

### 2.3 河道モデル、土石流の発生条件、洪水流量

斜面崩壊、土石流および洪水を同時に議論する際には斜面と河道を区別すると便利である。ここでは、表面流の形成を支配する集水面積と水で飽和した河床堆積物が河道に安定して存在しうる条件に着目して、斜面と河道を区別する。水で飽和した非粘着性材料が存在し得る勾配の上限値は、材料の内部摩擦角 $\phi$ を $\phi = 35$ 度とすれば19.2度となる。河道堆積物は降雨により頻繁に飽和すると考えられることから、非粘着性の堆積物がこれよりも急な領域に存在している可能性は低い。このことを考慮して、河床勾配が20度未満である領域のうち、ある面積以上の流域を持つ領域を河道とする。

河道における土石流の発生は、浸透流や表面流の作用下において、非粘着性の河道堆積物が不安定になる条件を用いてこれを判定する。この条件は次式で表される。

$$\tan\theta_c = \frac{(\sigma/\rho - 1)c_*}{(\sigma/\rho - 1)c_* + 1 + h/D} \tan\phi \quad \text{式(2)}$$

河道の流れは、浸透流と表面流から構成される。浸透流については、斜面の場合と同様に、ダルシー則に従うものとする。表面流の抵抗則には、開水路流のマニング則を用いている。

### 3. 崩壊・土石流の解析

2013年10月台風26号に伴う豪雨において、伊豆大島では山腹崩壊や土石流・泥流によって激甚な災害が発生した。ここでは、災害が甚大であった大金沢流域を対象として、土砂災害シミュレーターを適用し、崩壊や土石流の発生分布および洪水流量の分布を算定する。計算期間は、2013年

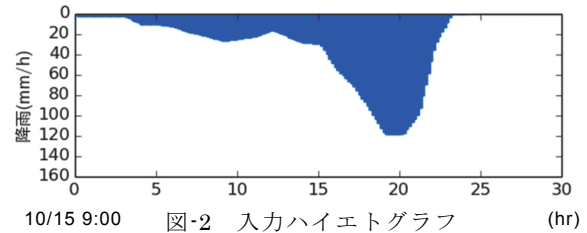


図-2 入力ハイエトグラフ (hr)

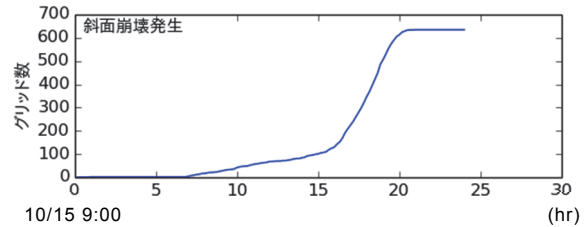


図-3 斜面崩壊発生の累加メッシュ数の時間変化

10月15日9:00から30時間とし、雨量データには、気象庁東京都大島地点の時間データを用いる。地形データは、国土地理院の基盤地図情報5mメッシュデータを10mに平均して変換している。河床勾配が20度未満で集水面積が10,000m<sup>2</sup>より大きいメッシュを河道、それ以外を斜面としている。計算に用いている斜面や河道の水理水文条件は、対象としている豪雨時における、洪水や氾濫状況に適合するように、次のとおり与えている。 $D$ (斜面)=1.0(m)、 $D$ (河道)=0.5(m)、 $c_*=0.6$ 、 $\lambda$ (土層の空隙率)=0.4、 $p_{wc}=0.1$ 、 $f_{s1}=200$ (mm/h)、 $f_{s2}=0$ (mm/h)、 $k$ (斜面の飽和透水係数)=0.5(cm/s)、 $k$ (河道の飽和透水係数)=5.0(cm/s)、 $N$ (斜面の等価粗度係数)=0.6、 $n$ (河道のマニングの粗度係数)=0.05、 $\phi = 35^\circ$ 、 $c = 3.7$ (kN/m<sup>2</sup>)、 $\sigma = 2650$ (kg/m<sup>3</sup>)、 $\rho = 1000$ (kg/m<sup>3</sup>)である。斜面崩壊や土石流が発生したメッシュでは、その後は発生しないが、これらの発生は降雨流出場には影響を与えないとしている。河岸、道路の法面や急勾配斜面を計算対象から外している。

図-2～4は、上述の条件のもとに得られた土砂災害シミュレーターの出力例である。ここに、図-2は入力ハイエトグラフ、図-3は計算開始からの斜面崩壊発生の累加メッシュ数の時間変化、図-4は斜面崩壊発生メッシュのタイミングとその時間空間分布である。土石流の発生については紙面の都合上省略する。図-3に示す崩壊の発生数は、実際の発生数ではなく、発生頻度や崩壊の起こり易さを表すものと解釈される。このことを念頭に置いて、崩壊発生数を見ると、これらは、15時間(10月16日0時)から20時間(16日午前5時)の間に急

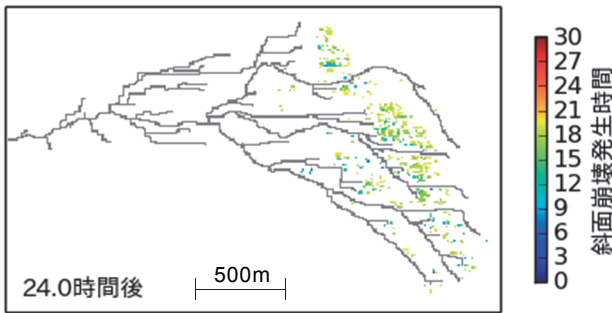


図-4 大金沢水系および斜面崩壊発生メッシュのタイミングとその時間空間分布

激に増加しており、これはこの間の降雨強度の増加に対応しているのが分かる。図-4は、崩壊の時間空間分布であり、土石流や山腹崩壊が“いつ”、“どこで”発生しているかを知るための有効な情報であって、避難行動のための有効な情報である。

崩壊の急激な増加は、この流域における災害の発生時刻ともほぼ対応している<sup>2)</sup>。さらに、厳密な比較はできないが、図-4に示す崩壊の発生場所の分布をみると、これは実際の山腹崩壊領域<sup>2)</sup>にかなりよく一致している。

#### 4. 土砂災害の限界降雨条件の設定

過去の災害データによれば、伊豆大島大金沢およびその一帯においては、2013年10月災害に加えて、小規模ではあるが1958年の狩野川台風における土砂災害によって犠牲者を出している。1981年および1982年にも大雨の記録があるものの犠牲者は出ていない。これらの降雨条件および土砂災害シミュレーターによる崩壊・土石流の発生に関する計算結果に基づいて、土砂災害発生の限界降雨条件について検討する。このため、大金沢流域において、時間雨量30mm、60mm、90mm、120mmおよび150mmをそれぞれ30時間与え、斜面崩壊および土石流の発生メッシュの累加数を調べ、これらのデータを用いて所定の発生数をもたらす降雨条件について調べた。図-5は、これらの結果を積算雨量と1時間雨量の平面に示したもので、崩壊発生メッシュ数200～700をもたらす降雨条件(降雨曲線)とともに、前述した狩野川台風を含めて、いくつかの降雨事例を示している。各降雨事例は、気象庁ホームページの大島の時間雨量のうち、12時間以上の無降雨期間で区切られた降雨を一雨とし、総雨量が300mm以上のものである。図において、災害記録のない

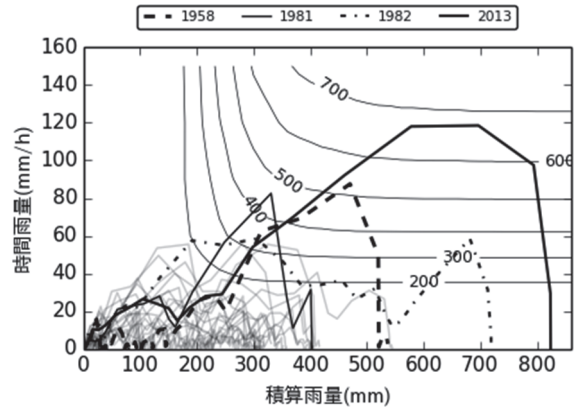
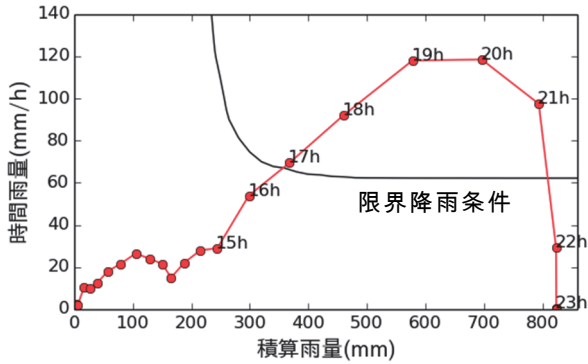


図-5 積算雨量と時間雨量平面における所定の斜面崩壊発生メッシュ数をもたらす降雨条件(降雨曲線)

1981年および1982年の降雨、および災害をもたらした1958年および2013年の大雨に着目すると、崩壊メッシュ数500個の曲線で表される降雨曲線を越えるものは、1958年狩野川台風および2013年の降雨のみであることが分かる。この結果は、災害発生の降雨条件を上述の方法によって設定できることを示している。現状においては、崩壊発生メッシュ数500個で設定される曲線は、この地域における災害発生の限界降雨条件であることを示唆している。なお、土石流の発生メッシュ数についても同様の解析を行い、斜面崩壊により得られた限界降雨条件と同様の結果を得ている。

図-6は、前述の方法によって設定した災害発生の限界降雨曲線であって、図には2013年の降雨経過が示されている。これは、土砂災害発生限界降雨曲線に対して、これまでの降雨がどの位置にあり、予測される降雨がどこに位置するかを示すものであって、降雨経過にともなう危機を知る上で極めて有効である。これによれば、リードタイムは短いものの、15時間(16日0時)あるいは16時間(16日午前1時)の時点で避難行動を起こすことができたとすれば、犠牲者は少なくなったと考えられる。なお、避難行動のためのリードタイムと降雨の予測精度との関係は避難予警報システムの根幹をなす重要な課題である。

上述の方法によると、対象とする地域において土砂災害記録があれば、災害発生の限界降雨曲線が容易に設定できる。一連の降雨には降雨停止時間が必ず含まれており、積算雨量を表現する座標軸において、それをいかに評価するかが課題であったが、代表的な斜面を抽出した水収支の計算により、降雨スネーク曲線(折れ線)の中で容易に



図・6 限界降雨条件とスネーク曲線

評価できることが判明している。

1時間雨量と積算雨量の平面上における災害発生限界降雨曲線に関する議論は、1970年から1980年代に活発に行われた。しかし、降雨停止の影響評価が難しいことや、データの分析の困難さのため、あまり発展を見なかった。その後、連続雨量の代わりに実効雨量の概念が導入されて、水収支の意味があいまいになったが、予測精度は向上したと云われている。最近では、タンクモデルに基づく土壤雨量指数と災害発生の関係が論じられるようになって、降雨と土砂移動現象の物理的な意味がさらに希薄になってきている。ここで、紹介した災害発生の限界降雨曲線の設定法は、このような状況の中での議論である。

## 5. おわりに

本報文においては、先に提案した土砂災害シミュレーターを2013年伊豆大島災害に適用して得られたいくつかの重要な知見を紹介した。

(1) 本シミュレーターを2013年伊豆大島豪雨災害に適用して、崩壊・土石流発生の時空間分布を算定し、これらと実際の崩壊や災害の発生状況と比較し、ほぼ妥当な結果が得られた。さらに、本シミュレーターは崩壊・土石流ばかりでなく、洪

水流量の時空間分布も算定するものであって、これらは避難予警報のための有用な情報となる。

(2) 災害発生の限界降雨条件は、積算雨量と時間雨量の平面上において、所定の崩壊発生メッシュ数を生ずる降雨条件と過去の降雨データを用いることによって設定できる。

(3) 土砂災害警戒情報は、土壤雨量指数に基づくものであって、これと山腹崩壊のメカニズムとの関係は希薄であり、これに、地域性を導入して土砂災害と降雨の関係を議論することには限界がある。しかし、ここで提案している災害発生限界降雨曲線に基づく方法は、土砂災害警戒避難に関わる有用な情報が得られるものと思われる。今後、パラメータの検討や限界降雨条件の地域性についての解析を行っていく予定である。

本報文においては、土砂災害シミュレーターから得られる出力の一部について報じている。崩壊・土石流の流動・氾濫過程とその制御を含めた部分まで研究を推進し、土砂災害のハード・ソフト対策に対する有用な情報をうるための努力をしていく所存である。

## 参考文献

- 1) 山崎祐介、江頭進治、岩見洋一：避難予警報のための土砂災害シミュレーターに関する研究、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.72、No.4、pp.I\_1327~I\_1332、2016
- 2) 平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害緊急調査団：平成25年10月台風26号による伊豆大島豪雨災害調査報告書、土木学会・地盤工学会・日本応用地質学会・日本地すべり学会、<http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/20140526.pdf>、pp.32、2014

山崎祐介



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 専門研究員  
Yusuke YAMAZAKI

江頭進治



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター 研究・研修指導監  
Shinji EGASHIRA

岩見洋一



土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター水災害研究グループ 上席研究員  
Yoichi IWAMI