土石流発生の「誘因」と「素因」との関係*

(伊豆大島・南木曽町・広島市で発生した土石流災害を事例として)

Relationship between Trigger and Inherent Factor of Debris Flow Occurrence
(Experience of Debris Flow Disasters in Izuoshima, Nagiso-Town and Hiroshima-City as Example)

本 田 尚 正**
HONDA Naomasa

Abstract Large-scale debris flow disasters take place due to heavy rainfall recently. The present study discusses the relationship between the trigger and the inherent factor of debris flow occurrence. Three debris flow disasters in Izuoshima, Nagiso-town and Hiroshima-city are chosen for investigation. Debris flow occurrence due to rainfall is greatly dependent on two factors: previous prolonged rainfall and the last short strong rainfall. Rainfall index R^* can express with one value combining the long-term effective rainfall R_w and the short-term effective rainfall r_s . In addition, it is necessary to clarify the inherent factors of a natural place, such as topography, geology and vegetation. Especially, slope gradient has strong influences on the sediment runoff characteristics, such as flow depth, velocity, discharge and sediment concentration. We should learn more about formation in land, land-use history and the history of disasters as preparations to a natural disaster.

Keywords: Debris flow, Trigger, Inherent factor, Characteristics of rainfall, Slope gradient

1. 緒 言

近年、豪雨に起因して全国各地で土石流が頻発し、それによる被害も年々激しさを増す傾向にある。なかでも 2013 年 10 月の伊豆大島[1]、2014 年 7 月の長野県南木曽町[2]、同年 8 月の広島市[3]で発生した土石流災害によって尊い人命が多数失われ、市街地での土砂氾濫により家屋等の甚大な資産が喪失されたことは、まだ記憶に新しい。

土砂災害による被害規模が激化する要因として、災害発生の主な「誘因」である雨の最近の降り方が、過去に経験したことのないような局所性と激甚性を有している点が挙げられる[4-6]。そのような豪雨による作用力は時として、自然場が潜在的に有する土砂災害に対する抵抗力をはるかに超えたものとなる。さらに近年、山麓部では市街化の進行によって社会的にも災害ポテンシャルが高まっており、災害発生の新たな「素因」と

なっている。それらの誘因と素因の複合によって、まったく想定外の災害が引き起こされていることは否めない。よって、土砂災害の危険性が内在する地域では今後、未曾有の豪雨にいつでも見舞われることを前提として、地域の有する抵抗力とその限界について今一度検証し、防災・減災体制を根本から見直す時期に来ているといえる。

以上を背景として、本稿は伊豆大島、南木曽町、広島市で発生した土石流災害を事例として、土石流発生の誘因と素因との関係について考察し、土石流災害に対する今後の備えの一助とすることを目的とする。

具体的には、まず土石流災害の諸因子を「誘因」と「素因」に分けて概観する。次に 3 つの土石流災害について、それぞれの降雨特性（誘因）と土石流発生との関係ならびに地形勾配（素因）と土石流の流下特性との関係を調べる。最後に土石流

* 2015.4.16 受付

** 東京農業大学地域環境科学部教養分野 〒156-8502 東京都世田谷区桜丘 1-1-1

TEL: (03)5477-2485 FAX: (03)5477-2620 E-mail: nh205379@nodai.ac.jp

の流動解析の一例として、南木曾町で発生した土石流に関する数値計算の結果を示す。以上の検討結果をもとに、土石流災害に対して今後具備すべき事項についてまとめる。

2. 土石流災害の諸因子

2.1 誘因

(1)土砂の供給源 土石流のもととなる土砂の供給源は、主として崩壊土砂と溪床堆積物であり、①斜面が崩壊し、崩壊土砂がその移動過程で流動化する。

②崩壊土砂が溪流を閉塞して土砂ダムを形成し、これが決壊して流動化する。

③永年にわたり生産された土砂が溪床に不安定に堆積し、それらが侵食されて流動化する。の3つの発生形態が考えられる[7] (Fig.1)。しかし、それらの観測事例はほとんどなく[8]、実際には発生直後の崩壊地調査や画像解析などによって推定することになる。

溪床堆積物は土石流の流動過程でも侵食されて取り込まれ、土石流の大規模化に寄与する。

(2)水の供給源 土石流に引き金となる水の供給源は主として降雨であるが、その他にも地下水や湧水の存在が挙げられる。

降雨起因の土砂災害の発生には「長期間の先行降雨」と「直前の短期間の降雨強度」の2つの降雨因子が大きく影響する。長期雨量指標には総雨量・24 時間雨量・長期実効雨量などが、短期雨量指標には 1～3 時間雨量・短期実効雨量などがそれぞれ用いられる。

土砂災害は現在の雨量だけでなく過去に降った雨量の影響を受けており、その度合は現在の降雨との時間差が大きくなるほど減少するものと考えられる。この考え方にに基づき、過去に降った雨量の影響を時間とともに減少させて計算し、雨量指標としたものが実効雨量である。

実効雨量の算定式は次のとおりである[9]。

$$R_t = r_t + a_1 r_{t-1} + a_2 r_{t-2} + \cdots + a_x r_{t-x}$$

$$= r_t + \sum_{n=1}^x a_n r_{t-n} \quad (1)$$

$$a_n = 0.5^{n/T} \quad (2)$$

Fig.1 Debris flow occurrence system.

ここに、 R_t は時間 t の実効雨量、 r_t は時間 t の時間雨量、 a_n は減少係数、 T は半減期である。 T には長期 72 時間、短期 1.5 時間がよく用いられる。

なお、本稿では以下、長期実効雨量を R_w 、短期実効雨量を r_w と、それぞれ区別して表記する。

2.2 素因

(1)地形 谷地形や尾根地形、微地形としての凸地形や凹地形といった地形形状や勾配の変化は、土石流の発生形態や発達過程、氾濫形態に大きく影響する。

土石流は、勾配の急な箇所では土砂を侵食し、勾配が緩くなると堆積に転じ、その勾配に対応した濃度にやがて落ち着く。そのような勾配の変化と土石流の性質の変化との関係は、次式がよく知られている[10]。

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1)c + 1} \tan \phi \quad (3)$$

ここに、 θ_e は平衡勾配であり、土石流の断面平均濃度（体積濃度） c に対して侵食も堆積も生じない勾配である。 σ は砂礫粒子の密度、 ρ は間隙水の密度、 ϕ は砂礫粒子の内部摩擦角である。間隙水が微細砂を含む場合、それによる浮力の影響は無視できないため[11]、 ρ は次式による。

$$\rho = (\sigma - \rho_w)c_s + \rho_w \quad (4)$$

ここに、 ρ_w は清水の密度、 c_s は間隙水中の微細砂濃度である。

Fig.2 は、土石流の発生および流出過程を模式的に示したものである。土石流が濃度 c で勾配 θ の溪流を流下するとき、 $\theta > \theta_e$ の間は溪床を侵食して土砂を取り込み、濃度は上昇する。一方、 $\theta < \theta_e$ の場合には堆積に転じて濃度は減少し、流れの場の勾配に対応した濃度に落ち着く。

Fig.2 Debris flow runoff process.

(2)地質・粒度分布 地質は斜面の地下構造を構成し、山体の体質を示す重要情報である。地質年代や岩相区分のほか、亀裂や節理、地下水や湧水などの存在や、それらによる風化の程度といった情報も重要である。

流下土砂の粒度分布は、土石流の衝撃力や流体力に大きく影響する。石礫を含む土石流の破壊力は強大で、人命・家屋の甚大な損失が生じる。一方、火山灰のように粒子サイズの小さい材料と水の混合物の流れは泥流となり、大量の泥水の流体圧による被害が卓越する。

(3)植生 表層植生の根系による土壤緊縛力は崩壊の抑止に有効に働くが、その能力を上回る規模の崩壊が発生して土石流化すると、崩壊地の立木は土石流に巻き込まれて流木となる。土石流の流動過程においても、溪岸侵食に伴って倒木が発生し、流木化する。

流木による橋梁や暗渠の閉塞は、流下方向の変化やそれによる氾濫範囲の拡大を引き起こす。よって、土石流に流木が加わることにより、氾濫域における被害規模はさらに甚大化する。

(4)氾濫域の土地利用形態 近年、都市域の拡大化によって、かつては人家のなかった山麓部でも市街化が進み、勾配が比較的急な箇所にも住宅開発が行われている。そのような土地利用形態の変化は、新興住民の自然災害に対する知識や経験の欠如とも相まって、社会的にも災害ポテンシャルを高め、被害拡大の新たな素因となっている。

3. 最近発生した土石流災害の特徴－伊豆大島・南木曾町・広島市－

3.1 災害の概要

(1)伊豆大島（2013年10月，東京都大島町）[1]

伊豆大島では2013年台風26号により、24時間雨量824mmの豪雨に見舞われ（気象庁大島観測所、Fig.3(a)）、島西部に位置する大金沢で10

月16日未明に大規模な土石流が発生した。この土石流により多数の家屋が被災し、死者・行方不明者39名を出すなど甚大な被害が生じた。

土石流発生を引き金となった降雨（誘因）は最大1～3時間雨量、最大24時間雨量ともに大島観測所史上最大かつ500年超過確率規模を上回る記録的な豪雨だった。同観測所から4km離れた大島北ノ山観測所（気象庁）では最大時間雨量61.5mm、最大24時間雨量412.5mmであり、きわめて局地性が高かったといえる。さらに、最初の土石流が発生した後も時間当たり100mm近い豪雨が継続したことが、被害範囲を拡大させた。

Fig.3(a)には、大島観測所における時間雨量（正時） r および累加雨量 Σr と、式(1)および(2)による長期実効雨量 R_w （ $T=72\text{hr}$ ）および短期実効雨量 r_w （ $T=1.5\text{hr}$ ）が記載されている（雨量指標 R' については後述）。 R_w と r_w の時間変化から、土石流は時間雨量が最も大きい時間帯に発生したが、それ以前の降雨の影響も強く受けていたことがわかる。伊豆大島は台風の常襲地帯で、侵食を受けやすい火山体でもあるが、過去に今回のような大規模な土砂災害が発生したことはなく、まさに未曾有の豪雨だったといえる。

大金沢は三原山の噴火によって形成された西側山麓斜面を流下する溪流であり、山腹斜面は三原山に由来する溶岩流とスコリア丘を基盤岩とし、細粒の降下火砕物を含む1m未満の薄い表層土層で覆われている。それらの堆積層は形成年代が比較的新しいため、斜面は概して開析が進んでおらず、火山山麓特有の緩い尾根や未発達谷地形を呈している（Fig.3(b)）。斜面上の樹木根系は表層直下の難透水層である風化火山灰層（レス層）によって侵入を妨げられ、比較的水はけの良い表層内を斜面に平行して発達している。

以上のような素因を有する火山山麓斜面が局所的な豪雨に見舞われ、表層の根系部分がマット状に広く浅く崩壊する「根系層崩壊」（崩壊深1m以下）[12]が多数発生した。火山灰（細粒土砂）を主体とする崩壊土砂は多量の水を含んで流動化し、未発達な谷地形の流域界を超えて流下し、表層土層を幅広く侵食しながら発達した。より起伏の少ない中・下流部では複雑な経路で流下して海にまで達し、広範囲にわたって氾濫した。また、崩壊地内の立木や溪岸沿いの倒木は流木化し、氾濫域の被害をさらに大きくした。

(a) Rainfall data (Oshima rainfall gauging station)

(b) Bed profile of Okanazawa Valley [1]

Fig.3 Rainfall data and bed profile (Izuoshima debris flow, October in 2013).

(a) Rainfall data (Nagiso rainfall gauging station)

(b) Bed profile of Nashizawa Valley [2]

Fig.4 Rainfall data and bed profile (Nagiso debris flow, July in 2014).

(a) Rainfall data (Miiri rainfall gauging station)

(b) Mountain slope profile as an example

Fig.5 Rainfall data and mountain slope profile as an example (Hiroshima debris flow, August in 2014).

(2)南木曾町 (2014 年 7 月, 長野県木曾郡) [2]

南木曾町では 2014 年台風 8 号に伴う集中豪雨により (気象庁南木曾観測所、Fig.4(a))、梨子沢流域で 7 月 9 日 17 時 40 分頃に大規模な土石流が発生した。この土石流により多数の家屋や JR 中央本線、国道 19 号が被災し、死者 1 名を出すなど大きな災害となった。

土石流発生の引き金となった降雨 (誘因) は南木曾岳付近の局所的豪雨だったが、梨子沢流域内の南木曾観測所の既往最大 1 時間雨量 (89mm) を超える規模ではなかった。一方、先行雨量が多く (72 時間雨量 111.5mm)、斜面は土壌水分量が高く、不安定な状態にあったと推察される。その結果、強雨開始から 2 時間程度 (最大 2 時間雨量 88.5mm) で土石流が発生した。

Fig.4(a)には、南木曾観測所における r 、 Σr 、 R_w および r_w が記載されている。 R_w の時間変化から、土石流発生日時の 2 日前および 1 日前に降った雨の影響は、土石流の発生時点でもまだ残っていたことがわかる。それに短時間の強雨が作用して、既往最大ではない降雨規模であったにもかかわらず大規模な土石流が発生した。

梨子沢流域は大梨子沢と小梨子沢から成り、南木曾岳を源流として木曾川に合流する急峻な溪流である (Fig.4(b))。土石流は地元では「蛇抜け」と呼ばれ、梨子沢流域でも幾度となく発生していた。今回被災した住宅地も、木曾川の河岸段丘上に梨子沢からの土石流の繰返しによって形成された扇状地が覆い被さった地形上にあった。上流域に上松花崗岩、中・下流部に木曾駒花崗閃緑岩がそれぞれ分布する。いずれも地質的には脆弱で、多雨地域とも相まって、溪床には永年にわたる生産土砂が不安定に堆積していたと推察される。今回の土石流により下流域で堆積した礫の 9 割以上が木曾駒花崗閃緑岩だったことから、主たる土砂供給源は溪床堆積物だったと考えられる [13]。

以上のような素因を有する急溪流の溪床堆積物が豪雨時に多量の表流水によって土石流化し、流動過程で溪床堆積物をさらに侵食しながら大規模化した。土石流は谷出口下流の流路工湾曲部を越流して、住宅地内で氾濫堆積した。氾濫開始地点より下流の流路工の勾配は約 $7 \sim 8^\circ$ 、氾濫域の勾配は約 $5 \sim 6^\circ$ といずれも比較的急であったことから、土石流は氾濫開始地点からさらに約 300m 下流の木曾川本川まで達した。

(3)広島市 (2014 年 8 月, 広島県) [3] 広島市では 2014 年 8 月の停滞前線に伴う集中豪雨により

(気象庁三入観測所、Fig.5(a))、安佐北区～安佐南区の山麓部の狭い帯状の範囲を中心に、8 月 20 日 2:00～4:00 にかけて複数の土石流が発生した。この土石流により多数の家屋が被災し、死者 74 名を出すなど甚大な災害となった。

土石流発生の引き金となった降雨 (誘因) は時間雨量、3 時間雨量、24 時間雨量のいずれも三入観測所史上最大を記録し、とくに時間雨量と 3 時間雨量はともに 500 年超過確率規模を上回るなど記録的な豪雨だった。さらに、土砂災害の発生箇所の分布が 3 時間雨量の強雨域の分布と一致していることから、この短時間の豪雨が今回の土砂災害の誘因になったと考えられる。

Fig.5(a)には、三入観測所における r 、 Σr 、 R_w および r_w が記載されている。 r と Σr の時間変化から、今回の降雨はまさに短期集中豪雨であったことがわかる。さらに土石流発生前後の R_w と r_w の関係は、短時間に強雨が連続したことが土石流発生につながったことを裏付けけるものである。

被災地周辺には主に広島花崗岩が広く分布し、上流域の一部には付加体堆積物が分布する。いずれも風化の進行によって地質的には脆弱である。それらの地質の違いは地形上でも谷密度の違いとして現れており、花崗岩類地域の方が谷密度は大きい。さらに源頭部の崩壊地の多くでパイピング孔が多数確認されたことから、溪流の多くで地下水が地表近くを流れていたと推測される。

以上述べたような素因を有する溪流において、集中豪雨に起因して源頭部で崩壊が発生し、あるいは多量の表流水によって溪床堆積物が流動化し、いずれも土石流となって流下した。

被害の集中した地域の中には、宅地開発が進行した結果、勾配が 10° を超える所に住宅地が形成されていた所もあり (Fig.5(b))、それらが土石流の氾濫による被害を拡大させた。さらに、団地内道路が土石流の流下経路となって、溪流から離れた所にも氾濫被害が及ぶなど、新たな被害形態が出現した。

3.2 降雨特性と土石流発生との関係

降雨と土石流発生との関係は r 、 Σr 、 R_w および r_w の傾向を関連付けることにより、ある程度推定できる。ここでは雨量指標 R' を用いて 3 つの土石流災害の特性について考察する。

Fig.8 Relationship between c and θ .

層が水面まで広がった土石流の状態であり、式(3)と一致する。式(7)は粒子サイズの小さい材料と水からなる泥流の方が、石礫と水からなる土石流よりも流動性が高いことを示している。

式(3)と(7)に σ 、 ρ 、 ϕ および h_s/h を与えて濃度 c と勾配 θ との関係を示すと、Fig.8 のとおりである。なお、式(7)では $\rho = \rho_w$ とし、泥流の性質を示す h_s と h の比は、 $h_s/h=0.3$ とした[12]。

まず、伊豆大島の大金沢下流部の平均勾配は、Fig.3(b)より 3.8° である。これを Fig.8 中の式(7)でみると、泥流は最大で 20%以上の濃度を有した可能性があった。そのため、高い流動性をもって海にまで達し、広範囲にわたって氾濫した。

次に、南木曽町の大梨子沢下流部の平均勾配は、Fig.4(b)より 6.5° である。これを Fig.8 中の式(3)でみると、土石流は最大で 10 数%の濃度を有し、谷出口下流でもなお土砂流の性質をもっていた可能性があった。そのため、流路工湾曲部を越流して氾濫し、木曽川本川まで達した。

最後に、広島市の例として Fig.5(b)に示した山腹斜面では標高 100m 付近にも住宅があり、平均勾配は 13.1° である。これは土石流の発達域にあたり、Fig.8 中の式(3)により 20 数%~30%以上の濃度を有した可能性があった。そのため、土石流の流下経路上にあった住宅地が大きく被災した。

4. 土石流の流動解析の一例—南木曽町の場合—

河道条件と水・土砂の供給条件が定まれば、その他の条件を適宜仮定することにより、土石流の一次元支配方程式[17]に基づいて土石流の挙動を追跡できる。ここではその一例として、南木曽町の大梨子沢土石流の流動過程を再現する。

Fig.9 Bed profile and flow width of Onashizawa Valley.

4.1 数値計算に必要な条件

(1)計算対象区間および河道形状の条件 大梨子沢の最上流端を $x=0\text{m}$ として木曽川合流点に至る 4240m を計算対象区間とする (Fig.4(b))。小梨子沢土石流の大梨子沢への流入は、木曽川と大梨子沢の合流点付近に設置された高感度地震観測網計 (Hi-net) の傾斜計データを利用した振動波形解析結果から、大梨子沢土石流と小梨子沢土石流は流出ピークがずれて合流したと推察されている[2]。よって、ここでは小梨子沢からの流入量は考慮せずに木曽川合流点までの追跡を行う。

初期河床縦断形状および流動幅は、平松ら (砂防学会緊急調査団) [2]による調査報告をもとに Fig.9 のとおりとする。同図中、河床縦断形状は Fig.4(b)と同じであり、流動幅は調査報告による侵食痕跡幅の 2 分の 1 と仮定した。同図に示すとおり、大梨子沢には砂防ダムが 2 基配置されている。その効果をみるため、数値計算上は満砂になるまで土砂を貯留し (その間は水のみ下流に流す)、その後は全流量を越流させる条件とした。

(2)土砂供給源に関する条件 ここでは溪床堆積物の移動のみを考える。非粘着性材料の飽和時の安定限界勾配に着目し、河床勾配が 22° よりも緩い所には堆積物が存在するものとする。溪床堆積物の堆積厚 (限界侵食深) は、前出の平松ら[2]による調査報告をもとに 2.0m と仮定した。

(3)水の供給条件 渓流水に関するデータはないが、数値計算上は、ほぼ飽和状態の溪床堆積物が移動開始するための少量の水が供給されれば十分である。そこでここでは $Q_m=0.10 \text{ m}^3/\text{sec}$ の水を沢の最上流端から定常的に供給する。

(4)土砂濃度の表示法 土砂濃度の表示法には、次の断面平均濃度 c と輸送濃度 c_f の2つがある。

$$c = \frac{\int_V cdV}{V} = \frac{V_s}{V} \quad (7)$$

$$c_f = \frac{\int_A cvdA}{\int_A vdA} = \frac{Q_s}{Q} \quad (8)$$

ここに、 Q_s は流砂量、 V_s はある領域における土砂の絶対体積、 V はある領域の体積である。土砂濃度が鉛直方向に変化するような条件では c と c_f は異なり、とくに土砂流の領域になると c は c_f よりもかなり大きくなる。そのため、数値計算では土砂濃度を c_f で示すこととする。

(5)その他の条件 数値計算は leap-frog 法により、 $\Delta t=0.025\text{sec}$ 、 $\Delta x=5.0\text{m}$ の差分条件で行った。各定数は $\sigma=2.70\text{g/cm}^3$ 、 $\rho=1.17\text{g/cm}^3$ ($\rho_w=1.00\text{g/cm}^3$ 、 $c_s=10\%$)、 $\phi=39^\circ$ 、堆積物の代表粒径 $d=5.0\text{cm}$ 、静止堆積濃度 $c_*=0.50$ と仮定した。

4.2 計算結果および考察

Fig.10 に通水開始 600 秒後の砂防ダム付近の河

床縦断変化を示す。同図より、2 基の砂防ダムはそれぞれの堆砂域に土砂を堆積させ、河床勾配を緩やかにすることによって土石流の減勢に効果を発揮したことがわかる。なお、砂防ダム直下流の河床侵食は、ダム越流水によるものである。

Fig.11(a)～(d)に各地点における土石流特性値（流動深 h 、流速 v 、輸送濃度 c_f および水と土砂の総流量 Q ）の時間変化を示す。同図(a)および(d)から、土石流は河床を侵食しながら流下して規模を増し、 $x=2,000\text{m}$ 付近で流動深および総流量が

Fig.10 Temporal changes of bed elevation as example (Onashizawa Valley).

Fig.11 Temporal changes of debris flow characteristics value (Onashizawa Valley).

最大となっていることがわかる。(d)ではさらに、2基の砂防ダムの前でいずれも流量が低減されており、砂防ダムによる調節効果が確認できる。

Fig.11 (c)から、土石流は $x=1,000\text{m}\sim 2,000\text{m}$ といった中・上流域では20数%~50%近くの高濃度の流れであるが、下流に流下し、河床勾配が緩やかになるにつれて輸送濃度は小さくなり、小梨子沢合流点の $x=3,600\text{m}$ では14%程度のいわゆる土砂流へと流れの形態が変化していることがわかる。同図において、 $x=3,900\text{m}$ 地点は谷出口下流の流路工湾曲部(氾濫開始地点)に相当するが、この地点でも輸送濃度は通水開始600秒を経てなお、13%程度の大きさを保っている。

Fig.11において、 $x=3,900\text{m}$ 地点では最大流動深 3.3m 、最大流速 4.5m/sec 、最大流量 $176\text{m}^3/\text{sec}$ である。それらはいずれも平松ら[2]による調査報告結果(平均流動深 3.4m 、平均流速 6.5m/sec 、土石流流量 $197\text{m}^3/\text{sec}$)と同じオーダーであり、当数値計算結果の妥当性を裏付けるものである。

5. 結 語

以上の検討結果をもとに、土石流災害に対して今後具備すべき事項について述べ、結語とする。

2および3より、定性的には、土石流災害の素因を有する自然場に誘因としての降雨が作用し、降雨の量質が自然場の有する抵抗力の限界を超えた時に土砂移動が開始され、土石流化するといえる。したがって、土石流への備えとしては、保全対象区域に関して次の3点が重要となる。

- ①土石流災害の危険性の有無について、素因と誘因の2つの観点から調べ、情報を得ておく。
- ②土石流に対する抵抗力の限界の目安として、過去の災害履歴を調べ、情報を得ておく。
- ③土石流を誘起させるような降雨の発生が予測される場合には、上記①と②の情報をもとに、できるだけ早めに避難体制をとる。

①に対する方策としては、行政によるハザードマップの配布と周知が挙げられるが、その他にも災害にまつわる地域独自の伝承などは、災害の予備知識として重要である。しかし一方、とくに新興住宅地の場合、新しい住民にはそれらの伝承が生活の知恵として継承されない恐れがある。土石流災害の危険性が内在する地域の住民は、災害情報を「自ら獲得する努力」が今後より一層求められるといえる。

②の過去の災害履歴は、保全対象区域が土砂災害に対してどれだけの大きさの降雨に耐えられたかを示すものである。これまで土砂災害発生の危険性は、一定の目安となる時間雨量や累加雨量などで一律に示されることが多かった。しかし、本稿の3事例をみてもわかるとおり、同じ時間雨量数十ミリの雨であっても、ある地域では土砂災害の危険性が高く、別の地域ではその危険性が低い場合がある。土砂災害の発生の有無は降雨の強弱とともに、その雨を受ける自然場の有する抵抗力に依存するといえる。よって、過去の災害履歴から土砂災害に対する抵抗力の限界の目安値を得ておくことはきわめて重要である[5]。

③では、近年の豪雨の特徴である大規模化や、生起時間帯が深夜におよぶ場合などの点から、行政は避難勧告や避難指示を出すタイミングに苦慮しているのが現状である。一方、土石流は概して高速であり、発生直後の避難はほとんど期待できない。遅くとも土石流発生の数時間前には避難体制が確立されていることが理想である。よって、今後は3.で示した雨量指標 R' などを活用して、現在の降雨にあとどれだけの降雨が加わったら土石流発生の危険性が高まるかを予測し、早期の避難体制の確立に繋げていく必要がある[6,18]。

4.で示したとおり、土石流の挙動の追跡は条件設定を適切に行うことにより、ある程度まで可能である。今後、防災・減災の観点から実用上、最も重要なことは、土石流発生のタイミングをいかに正確に捉えるかであるが、それは2.1で述べたとおり、土砂供給源の特定の観点からもきわめて難しく、大きな課題である。

人命確保を第一とした避難体制の確立には、リアルタイムの災害情報にも増して、土地の成り立ちや利用の歴史を知り、過去の災害から学ぶといった、平時における備えが重要な鍵となる。まさに「備えあれば患い(うれい)なし」である。

最後に、今回の土石流によって亡くなられた方々のご冥福をお祈りするとともに、被災地の一日も早い復興を心より祈念する次第である。

謝 辞

(独) 土木研究所 ICHARM 江頭進治先生には、本稿の執筆にあたり、貴重なご助言を賜った。関係学協会の調査報告書からは多くのデータを引用させていただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- [1] Ishikawa, Y., Ikeda, A., Kashiwabara, Y., Ushiyama, M., Hayashi, S., Morita, K., Tobioka, S., Onodera, T., Miyata, N., Nishio, Y., Ogawa, H., Suzuki, T., Iwasa, N., Aoki, T. and Ikeda, T., Debris Disasters caused by Typhoon Wipha (T 1326) in Izu Oshima on Oct. 16, 2013, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 66(5), 61–72 (2014).
- [2] Hiramatsu, S., Fukuyama, T., Yamada, T., Ohsaka, O., Nakatani, K., Matsumoto, N., Fujimura, N., Kato, N., Shimada, T., Kubo, T., Matsuo, S., Nishio, Y. and Yoshino, K., Disaster Report on the Debris Flow occurred on 9 July 2014 in Nagiso, Nagano prefecture, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 67(4), 38–48 (2014).
- [3] Kaibori, M., Ishikawa, Y., Satofuka, Y., Matsumura, K., Nakatani, K., Hasegawa, Y., Matsumoto, N., Takahara, T., Fukutsuka, K., Yoshino, K., Nagano, E., Fukuda, M., Nakano, Y., Shimada, T., Hori, D. and Nishikawa, T., Sediment-related Disasters induced by a Heavy Rainfall in Hiroshima-city on 20th August, 2014, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 66(2), 31–39 (2013).
- [4] Hayashi, S. and Yamada, T., Study on the Coefficient of Effective Rainfall Amount in Recent Sediment Disasters, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 66(3), 24–31 (2013).
- [5] Kinoshita, A., Kitagawa, S., Uchida, T., Takemoto, H., and Tadakuma, N., Rainfall Conditions Result in Intensive Deep-seated Landslides: Rainfall Analysis for Typhoon No.12 in 2011, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 66(3), 24–31 (2013).
- [6] Kosugi, K. and Mizuyama, T., Analyses of Storm Event Triggering Debris Flows in Nagiso-Town, Nagano Prefecture, on July 9, 2014, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 67(4), 18–22 (2014).
- [7] Yamazaki, Y., Mizuyama, T. and Kakiyama, Y., Characteristics of Debris Flow Hydrographs at the Outlet of a Basin in Different Generation Conditions, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 67(4), 13–17 (2014).
- [8] Ikeda, A., Takahama, J. and Yoshino, K., Outbreak Process of Debris Flow occurred at the Kitamata Valley of Name River on June 27, 1999, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 63(1), 31–38 (2010).
- [9] Yano, K., Study of the Method for Setting Standard Rainfall of Debris Flow by the Reform of Antecedent Rain, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 43(4), 3–13 (1990).
- [10] Takahashi, T., A Mechanism of Occurrence of Mud-Debris Flow and their Characteristics in Motion, Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No.20B-2, 405–435(1977).
- [11] Egashira, S., Honda, N. and Miyamoto, K., Numerical Simulation of Debris Flow at the Gamaharazawa in the Hime River Basin, Annuals of Hydraulic Engineers, Japan Society of Civil Engineering, Vol.42, 919–924(1998).
- [12] Japan Society of Civil Engineering, the Japanese Geotechnical Society, Japan Society of Engineering Geology and the Japanese Landslide Society, Investigation Report of Heavy Rainfall Disasters caused by Typhoon No. 26 in Izuoshima on October, 2013(in Japanese), 1–90(2014).
- [13] Wakatsuki, T., Yamada, R., Sakai, M. and Takeda, H., Sediment-related Disasters in Nagiso on July 9, Iwakuni on August 6 and Fukuchiyama and Tanba on August 17, 2014 (in Japanese), News of the Geological Society of Japan, Vol. 17(11), 45–46(2014).
- [14] Nakai, S., Kaibori, M., Sasaki, Y. and Moriwaki, T., Applicability of a New Rainfall Index R' for Recent Cases and Proposal of the Method for Warning against Sediment-related Disaster, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 60(1), 37–42 (2007).
- [15] Kato, N. and Honda, N., Relation between Rainfall Index R' and Debris Flow Occurrence - Experience of Debris Flow Disaster of the Osumi District in Kagoshima Prefecture due to Typhoon No. 4 in July, 2007 as example - Kanto Journal of Forest Research -, Vol.65(1), 45–48 (2014).
- [16] Egashira, S., Sato, T. and Chishiro, K., Effect of Particle Size on the Flow Structure of Sand-Water Mixture, Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, No.37B-2, 359–369(1994).
- [17] Egashira, S., Mechanism of Sediment Deposition from Debris Flow (Part 2) (in Japanese), Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 46(2), 51–56(1993).
- [18] Nakai, S., Kaibori, M., Sasaki, Y. and Moriwaki, T., Study on Setting Up of a Critical R'-value and Proposal of a New Index R_R as a Remarkable Rainfall Intensity - Its Applicability Reflected Rainfall History -, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, Vol. 60(6), 4–10 (2008).