

降雨に伴う土砂災害発生メカニズムとその予測手法

だん じょう とおる†
檀 上 徹

日本では毎年のように豪雨による土砂災害が全国各地で発生し、人命、財産、社会基盤への被害が生じている。土砂災害による被害を軽減するためには、土砂災害がなぜ発生するのか？どこで発生するのか？いつ発生するのか？について正しく理解することが重要である。そこで本稿では、降雨に伴う土砂災害の種類について解説し、災害発生の要因となる素因と誘因について述べると共に、土砂災害が発生するメカニズムについて示す。また、土砂災害が、「どこで発生するのか？」「いつ発生するのか？」という疑問に対する、研究または実際に利用されている手法について解説する。

キーワード：土砂災害，降雨，メカニズム，予測

1. はじめに

日本では、梅雨期・台風期の降雨に伴う土砂災害が毎年のように発生している。近年においても、熊本地震後の平成 28 年 6 月の梅雨前線に伴い、九州地方を中心とした西日本各地で記録的な大雨がもたらされたことから、各地で土砂災害による人的被害が生じた。8 月には、昭和 26 年に統計を取り始めて以来初めて、太平洋側から東北地方に台風 10 号が上陸したことから、東北地方で土砂災害が発生した。また、同月には観測史上初となる 3 つの台風が 1 週間のうちに北海道に上陸したため、北海道内においても大雨による土砂災害が発生するなど、日本各地で土砂災害による被害が生じた。

今年に入ってから、平成 29 年 7 月に九州北部豪雨に伴い、福岡県朝倉市、東峰村、大分県日田市を中心に、局所的な大雨に見舞われたことから、水害をはじめとする数多くの土砂災害が発生するなど、人々の生活に甚大な被害が生じた。このように土砂災害による人命ならびに社会基盤が毎年のように失われているのが現状である。

そこで本稿では、降雨に伴う土砂災害（特に、がけ崩れによる表層崩壊）の発生メカニズムについて解説し、さらに降雨に伴う土砂災害発生に対する予測手法について紹介する。

2. 土砂災害について

土砂災害により被害が生じた土砂災害発生件数は、年間平均 1 000 件以上発生している（図 1）。土砂災害とは、社団法人地盤工学会が刊行した地盤工学用語辞典によると、斜面の地盤を構成する土砂、礫、玉石などによる土塊移動により発生する災害であり、形態として、がけ崩れ、土石流、地すべりに分類されると記されている¹⁾。

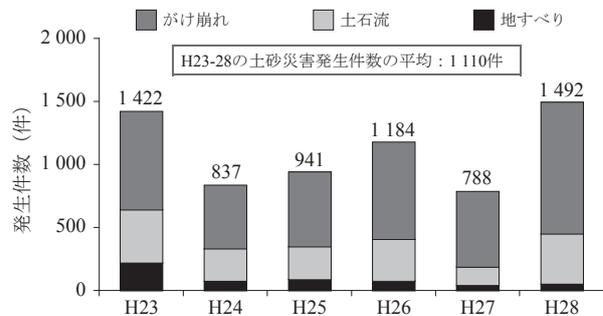
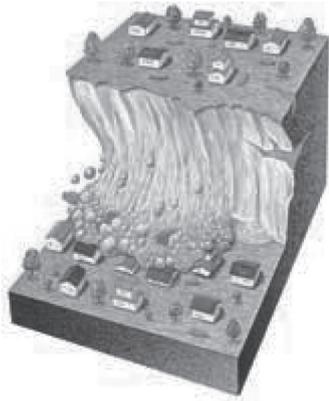


図 1 H23-28 年の土砂災害の発生件数²⁾

2.1 土砂災害の分類

がけ崩れ（図 2 (a)）とは、地すべりと比較して小規模で、急傾斜部分で比較的急速に斜面が崩壊する現象を示す。類似語として、山崩れ、土砂崩れ等がある。がけ崩れは、崩壊土砂が原型を留めず崩落するものとのある程度原型を留めたまま滑落するものがある³⁾。小規模な崩壊も含むため、土砂災害の中で最も発生件数が多い。災害事例として、平成 29 年九州北部豪雨に伴い、大分県日田市小野地区において、がけ崩れが発生し、小野川に土砂が流れ込んだため河道閉塞が起

† 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 水土砂防災研究部門：〒 305-0006 茨城県つくば天王台 3-1
E-mail : t.danjo@bosai.go.jp



(a) がけ崩れ (資料提供 NPO 法人土砂災害防止広報センター)



(b) 土石流 (資料提供 NPO 法人土砂災害防止広報センター)



(c) 地すべり (資料提供 NPO 法人土砂災害防止広報センター)

図2 土砂災害の分類

こり上流域で浸水被害が生じた(写真1)。

土石流(図2(b))とは、山体を構成する土砂や礫の一部が、水と混合し河床堆積物とともに溪岸を削りながら急速(5~20 m/s)に流下する現象である⁴⁾。一度発生すると、土砂が流動化しているため、下流域の広範囲で土砂による被害が発生することが多い。災害事例として、平成26年8月豪雨に伴い、広島県広島市安佐北区において土石流が発生し、多数の被害が生じた(写真2)。

地すべり(図2(c))とは、斜面を構成する物質が

重力の影響で斜面化法へ移動するような斜面移動現象である⁵⁾。地すべりは、ごく緩慢な滑動が長期間続き、雨期や融雪期に比較的大きな移動量を示し、運動の継続性と反復性が認められるものが多い。災害事例として、平成28年の熊本地震に伴い、熊本県阿蘇郡南阿蘇村の高野台地区において、緩傾斜地における大規模な地すべりが発生した(写真3)。



写真1 平成29年九州北部豪雨に伴う大分県日田市小野地区におけるがけ崩れ



写真2 平成26年8月号に伴う広島県広島市安佐南区における土石流



写真3 熊本地震に伴う熊本県阿蘇郡南阿蘇村高野台地区における地すべり

2.2 土砂災害の素因と誘因

土砂災害は、誘因が素因に作用することによって生じる。誘因とは、土砂災害を引き起こす引き金となる自然力のことをいい、その主なものとして降雨、地震、融雪、風化、強風等が挙げられる。素因には、地形、地質、土質、植生、水文環境等の斜面の性質がある。

誘因の一つである降雨に着目すると、日本は世界でも有数の多雨地域であるモンスーンアジアの東端に位置し、年平均降水量は1690mm（昭和56年～平成22年の平均）と世界（陸域）の年平均降水量810mmの約2倍となっている⁶⁾。また、日本の降雨の多くは、梅雨期、秋雨や台風期にまとまって降ることも土砂災害の発生に大きく影響していると考えられる。

素因として、日本の国土の地形を「山地」、「丘陵地」、「台地」、「低地」、「内水域等」に分類すると（図3）、「山地」と「丘陵地」の合計は72.8%になる。また、

国土の傾斜度別面積割合（図4）をみると、0-3°の平地が14.0%と少ないことが分かる。そのため、日本は山が多く平地が少ない国土であるため、土砂災害が発生し得る素因を有することが分かる。

3. 土砂災害の発生メカニズム

斜面内には水を通しやすい土層（透水層）と水を通しにくい土層（不透水層）が存在することで、層と層の間に境界が形成される。また、同じ透水層同士であっても、土質や密度の違いにより透水性が異なる層が形成されている。これら層と層の境では、水の浸透量が異なることから、層境において水が溜まるという現象（地下水、宙水）が発生し、斜面崩壊が発生する要因の一つとなる。

図5に、降雨に伴う雨水浸透から斜面が崩壊するまでのがけ崩れの一例を示す。斜面崩壊を理解する上で、力のつり合いを示す必要がある。透水層と不透水

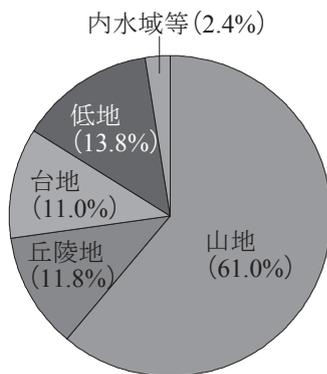


図3 日本の地形別面積割合⁷⁾

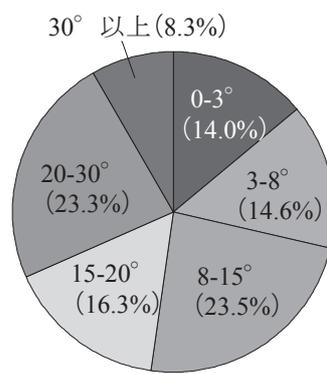


図4 日本の傾斜地別面積割合⁷⁾

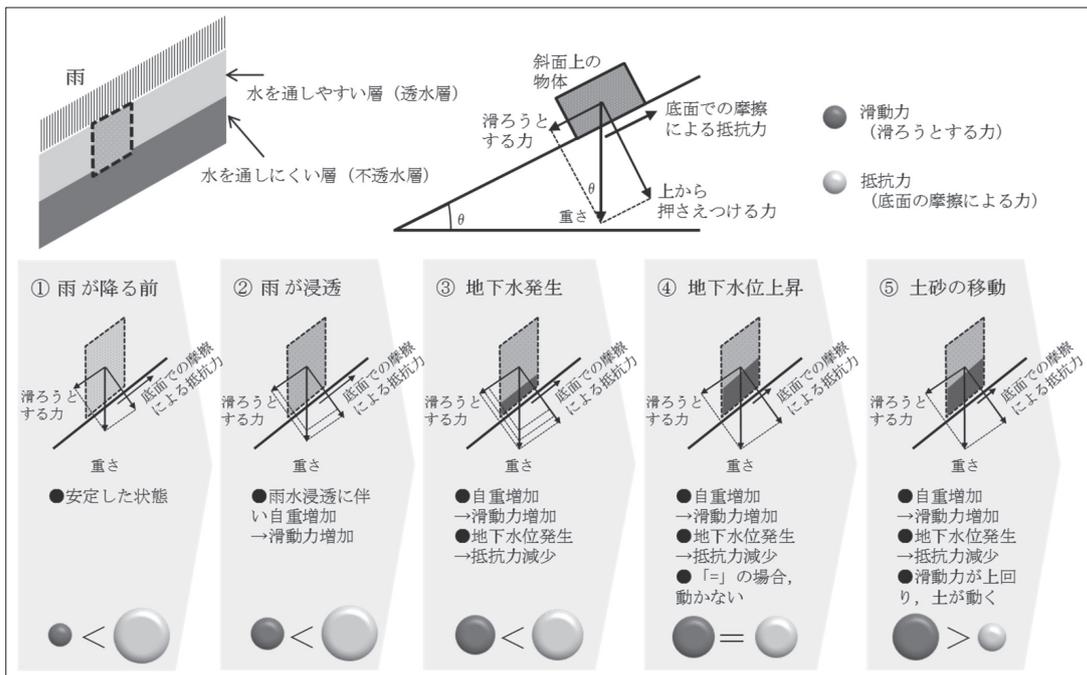


図5 降雨に伴う雨水浸透から斜面が崩壊するまでのがけ崩れの一例

層の層境で斜面崩壊が発生すると仮定した場合、層境より上の層の重さは、滑ろうとする力（以後、滑動力と呼ぶ。）と上から押さえつける力に分解することができる。また層境において、上の層の底面での摩擦による力（以後、抵抗力と呼ぶ。）が発生する。雨が降る前の段階では、土層の滑動力が抵抗力を上回っているため、安定した状態が維持される。続いて、降雨後には雨水が土層内に浸透し空気の部分が水に変わっていくため、土層の自重が増加し、滑動力が増加する。なおこの段階で、滑動力が抵抗力を超えている場合は、斜面は崩壊している。続いて浸透量が増えると、層境において地下水が発生する。そのため、雨水による土層の自重は増加することから、滑動力が増える。さらに、地下水が発生したことにより、土粒子に浮力が働くため、土粒子同士の粘着力が低下することから、抵抗力が減少する。さらに地下水が上昇することで、土層の自重が増加し、粘着力が低下し続け、滑動力と抵抗力がつり合った後、滑動力が抵抗力を上回ることによって、土が動き斜面崩壊が発生することとなる。

図5では、読者に分かり易いよう非常に単純な例を挙げたが、実際の現地斜面は非常に複雑であり、斜面が崩壊する過程を捉えることは非常に難しく、これら現象メカニズムを詳細に把握し、予測に繋げることは長年の課題となっている。

4. 土砂災害の予測

土砂災害を予測するに当たり、「どこで（場所）」「いつ（時間）」「どれくらい（規模）」を把握することが重要であると言われている⁸⁾。本稿では、「どこで（場所）」と「いつ（時間）」の予測に関して述べる。

4.1 「どこで（場所）」の予測について

土砂災害がどこで発生するかということは、住民の避難計画や都市計画を考える上で非常に重要である。土砂災害の発生場所を予測する、言い換えると、危険度の高い斜面を抽出する方法については、1. 採点方式による方法、2. 統計的処理による方法、3. 力学的解析手法による方法に大別できる⁹⁾。

4.1.1 採点方式による方法

採点による方法の採点項目として、a) 崩壊発生に影響する素因（斜面高さ、角度、土質、植生等）、b) 斜面の対策状況や斜面表層の状況（亀裂や浮石・転石、湧水の有無等）、c) 崩壊に影響する誘因（経験雨量等）が挙げられる。これら評価点の合計から、斜面の危険度の評価を行うものであり、道路や鉄道といった運営管理者によって評価項目、各項目の点数、評価点の合計の算出方法が異なる（例えば、図6）。斜面崩壊の危険度が高い斜面に対しては高い点数が付き、

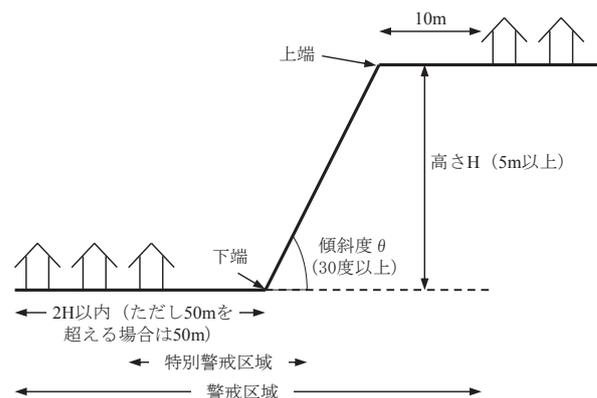


図6 急傾斜における警戒区域・特別警戒区域の概念図

危険度が低い斜面には低い点数がつくことから、予算が限られた中での対策工設置の優先順位決めにも使われている。

4.1.2 統計的処理による方法

危険度が高い斜面を抽出するもっとも代表的な手法は前述した採点方法である。この手段とは別に、危険度の高い斜面を抽出する手法として統計的手法が1970年代から現在まで多用されてきた¹⁰⁾。統計的処理による方法は、数量化Ⅱ類や自己組織化マップ(SOM)を用いた斜面崩壊の危険度評価の事例があるので以下に概略を紹介する。

数量化Ⅱ類とは、質的な形で与えられた外的基準を質的な要因に基づいて予測・判別する方法であり、表層地質や土地利用など数量で表せないデータを扱うことができる解析手法である。本手法を用いた斜面の危険度評価として、例えば、北園ら¹¹⁾が素因情報に注目するため、地形図、地質図、土地利用図等を用いて地盤情報データベースを作成し、危険度評価点数を設定することで斜面崩壊の危険度を予測している。

次に、自己組織化マップ(SOM)とは、ニューラルネットワークの一種で与えられた入力情報の類似度をマップ上での距離で表現するモデルのことである。本手法を用いた斜面の危険度評価として、例えば、小山¹²⁾が道路防災総点検により得られた道路斜面の安定度調査表を基に、過去に被災した斜面に似た崩壊要因を持つものを分類することで、斜面崩壊の危険度が高い斜面の抽出を提案している。

4.1.3 力学的解析手法による方法

力学的解析手法による方法とは、3章で示した斜面崩壊のメカニズムにおける3次元での水分挙動（浸透流解析）を把握し、斜面の安定性を評価（斜面安定解析）することで、解析範囲内における斜面のどこが危険かを把握する手法である。例えば沖村ら¹³⁾は、DEM（標高数値モデル）を用いて、対象斜面を10m

メッシュに分割し各メッシュに一定の土層厚を与え、地盤内での雨水流動を追跡した結果を踏まえて安定性を評価するモデルを作成している。また、浅野ら¹⁴⁾や鳥居ら¹⁵⁾は、沖村らのモデルを基本とし、雨水が浸透し地下水が形成されるまでの過程を現地計測や浸透モデルの改良により雨水浸透過程を詳細に考慮することで、斜面の安定性を評価するために重要なパラメータの一つである地下水位の推定の精度向上を目指している。力学的解析手法による方法は、今後のコンピューターの発展および詳細な地形データの入手により、さらなる広域かつ精度の高いリアルタイムな予測が期待できると筆者は考えている。

4.1.4 土砂災害のハザードマップ

このように危険度の高い斜面を抽出した結果を示したものがハザードマップであり、様々なものが存在する。例えば、都道府県または市町村単位で公表されている土砂災害に関わるハザードマップ（急傾斜、土石流、地すべり）がある。これは、「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」に基づき、土砂災害から国民の生命を守るため、土砂災害のおそれのある区域について危険の周知、警戒避難態勢の整備、住宅等の新規立地の抑制、既存住宅の移転促進等のソフト対策を推進しようとするもの。つまり、事前に土砂災害の危険性が高い箇所を抽出

し、建築物に被害が生じる可能性が高い区域を土砂災害警戒区域や土砂災害特別警戒区域に指定し、警戒避難や規制を行うソフト対策である。

例えば急傾斜の土砂災害警戒区域とは、①傾斜度が30度以上で高さが5m以上の区域、②急傾斜地の上端から水平距離が10m以内の区域、③急傾斜地の下端から急傾斜地高さの2倍（50mを超える場合は50m）以内の区域、と定められている（図7）。さらに、急傾斜地の崩壊等が発生した場合に、建築物に損壊が生じ住民等の生命又は身体に著しい危害が生ずるおそれがあると認められる区域においては、土砂災害特別警戒区域として指定される。このように、危険度の高い場所が分かり易いマップとして、自治体のHP等で公表されている。

4.2 「いつ（時間）」の予測について

発生時期の予知に関しては大別して2つの方法がある。一つは崩壊発生を支配する主な誘因の変化、特に雨量から予測しようとするものであり、もう一つは崩壊発生前における斜面の前兆現象を検知しようとするものである。前者は、降雨量を用いた雨量指標に基づく予測であり、後者は斜面計測に基づく予測である。

4.2.1 雨量指標に基づく予測

雨量指標に基づく予測として、統計的方法と土中の水分量に着目した水文学的方法が挙げられる。

項目	要 因	のり面		自然斜面	
		評点区分	配点	評点区分	評点
地盤の性状	G1: 崖地形	G1に該当する	3	G2の内 崖地形該当	2
	G2: 傾斜地	G2に該当する	3	G2の内 1: 地形該当	2
	G3: 谷地の崖部、脚部浸食、 ハング、崖水型崩壊、 土石流地帯など	G3に該当する	2	G2の内 2: 地形該当	2
	G4: 崖部先端の凸凹斜面、ハング	G4に該当する	0	G2の内 3: 地形該当	0
土質の性状	浸食しやすい土質	該当する	8	該当する	8
	水を含むと強度低下しやすい土質	該当する	4	該当する	4
	その他	該当せず	0	該当せず	0
	割れ目や割層の密度が高い	該当する	12	該当する	12
崩壊の性状	浸食しやすい状態	該当する	6	該当する	6
	風化が早い岩質、その他	該当する	0	該当せず	0
	割れ目(層理面、割層)	該当する	8	該当する	8
	不透水性基盤上の土砂	該当する	6	該当する	6
崖部の性状	土質及び浮石・転石の状況	不安定	12	不安定	24
	浮石・転石が不安定→やや不安定	やや不安定	6	やや不安定	12
	安定	0	安定	0	
	湧水状況	湧水あり	8	湧水あり	4
地形	表面の被覆状況	裸地～植生主体	5	裸地～植生主体	16
	勾配(1)、高さ	H>30m	18	H>30m	10
	土砂	H<30, 1>2: 標準	15	30≦H<50m	8
	土砂	15≦H<30	10	15≦H<30m	6
崖の性状	崩壊の性状	H<15m	5	H<15m	4
	崩壊の性状	H<50m	18	H<70	10
	崩壊の性状	30≦H<50m	16	45° ≦α<70°	10
	崩壊の性状	15≦H<30m	12	α<45°	5
崖の性状	崩壊の性状	H<15m	10	H<15m	5
	崩壊の性状	崩壊数・明確なものあり	12	崩壊数・明確なものあり	10
	崩壊の性状	あり、不明なものあり	6	あり、不明なものあり	5
	崩壊の性状	なし	0	なし	0
崖の性状	崩壊の性状	崩壊数・明確なものあり	5	崩壊数・明確なものあり	4
	崩壊の性状	あり、不明なものあり	3	あり、不明なものあり	2
	崩壊の性状	なし	0	なし	0
	合計		73 点 (A1)		77 点 (A2)

注(1)は各項目の満点を示す。
該当する場合は配点欄に○印をつけると共に点数を記入する。
不明な場合は中間的な値を使用する。

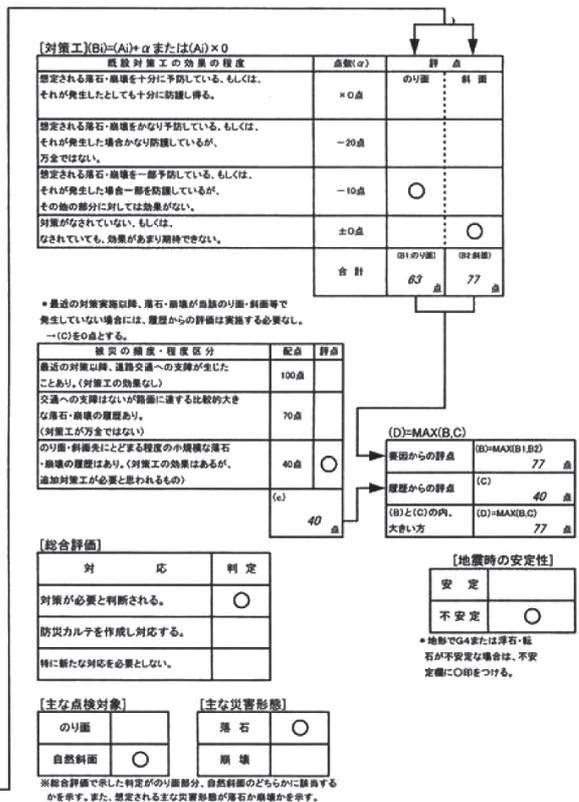


図7 平成18年度に使用された安定度調査表（落石・崩壊）¹⁶⁾

前者は、どれくらいの降雨によって斜面崩壊が発生したかを過去の事例から統計的に調べ、雨量がある基準を超えると警戒・避難を開始しようとするものである。この基準雨量は、観測された値をそのまま用いる場合と数学的演算を行って求めたものがある。数学的演算によって求めた雨量指標の例として、実効雨量が挙げられる。前期雨量の影響を考慮するために半減期という概念を用いて、雨量が半減するための期間を1.5時間、12時間、24時間、72時間等の期間を設定し用いられている。これら手法を用いて、図8に示すような長期雨量指標（累積雨量や72時間半減期実効雨量、土壌雨量指数等）と短期雨量指標（1時間雨量や1.5時間半減期実効雨量等）を組み合わせて、過去の災害事例から危険ラインを段階的に設ける。降雨によりスネーク曲線がそのラインに達すると、警戒・避難の体制を実施するなど、道路や鉄道管理において用いられている。

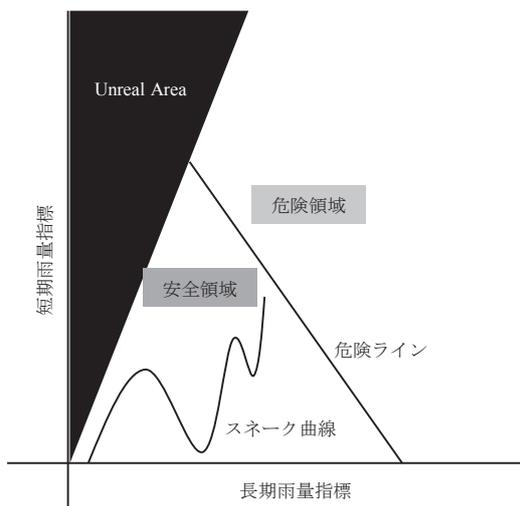


図8 土砂災害発生危険基準線概念

後者は、降雨による斜面崩壊は土中にある水分量がある値に達したときに発生すると考え、地盤内の貯留量を求めようとするものである。代表的なものとして、タンクモデルを用いた土壌雨量指数が挙げられる¹⁷⁾。土壌雨量指数は、降雨に伴う地盤内の浸透と流出を3つのタンクで表し、3つのタンクに残っている水分量（貯留量）の合計が地盤内の水分量に相当するとしている（図9）。気象庁ではタンクモデルによる土壌雨量指数を採用し、日本全国5 kmメッシュごとに土砂災害に対する注意、警報の閾値を決めている。また、過去に土砂災害が発生した事例を用い、ニューラルネットワークの一種であるRBFN（Radial Basis Function Network）により、土砂災害警戒基準（クリティカルライン）を決めている。現在、気象庁

各タンクの貯留量の合計が土壌雨量指数

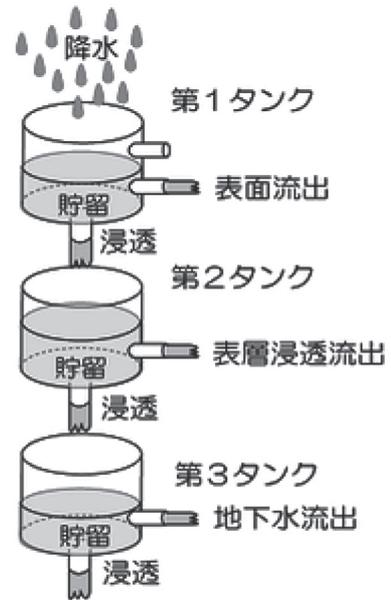


図9 土壌雨量指数概念¹⁸⁾

では土砂災害判定メッシュによる情報による2時間先までの土砂災害発生の危険度を5段階に判定した結果をHPで公表している¹⁹⁾。

4.2.2 斜面計測に基づく予測

斜面計測に基づく予測として、斜面の変位や変形を計測することで予測に繋げる手法が最も有名である。これらの元になっている基本の考えは、クリープ変形・破壊の概念である。このクリープ破壊現象は、ひずみ速度が三つの段階を経るものであり、最初に速度が減少する遷移クリープ（1次クリープ）が生じ、次に速度が一定となる定常クリープ（2次クリープ）段階となり、更に変形が進むと、累乗的に加速する加速クリープ（3次クリープ）段階へと移行して、最終的に破壊する。この2次クリープ現象を利用した斎藤ら²⁰⁾の予測手法や、3次クリープ現象を利用した福岡ら²¹⁾、斎藤ら²²⁾の予測手法が、斜面崩壊発生時期の予測手法として広く利用されている。今後、斜面崩壊に関わる知見が増えることで、更なる精度向上ならびに早期予測が可能になると筆者は考える。

5. おわりに

日本は山地が多く多雨であるため、今後も土砂災害が毎年のように発生するのは避けられないことである。科学技術の進歩により、予測技術や対策技術などが向上し、今後、更なる早期避難が可能になると考えられる。また技術の発展とは別に、土砂災害に限らず、災害による被害を少なくするためには、自助・共助・公助の役割も非常に重要である。その中で

も基本となるのは自助であり、普段から災害に関する知識を身につけ、災害を正しく理解し、何を備えておけばよいかを考え、災害に対する準備をすることで、自らの身は自分で守ることが大事である。そのため、個人や地域といった枠組みで防災に対する取り組みや対策を行うことは、被害軽減に向けて不可欠である。

参 考 文 献

- 1) 地盤工学用語辞典, 社団法人地盤工学会, p.459 (2006)
- 2) 土砂災害発生事例, 国土交通省砂防部, <http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/jirei.html> (2017/10/9)
- 3) 地盤工学用語辞典, 社団法人地盤工学会, pp.202-203 (2006)
- 4) 地盤工学用語辞典, 社団法人地盤工学会, p.208 (2006)
- 5) 地盤工学用語辞典, 社団法人地盤工学会, p.196 (2006)
- 6) 平成 26 年度版日本の水資源, 国土交通省水管理・国土保全局, p.57 (2014)
- 7) 第六回日本統計年鑑, 日本統計協会, p22-23 (2016)
- 8) 小橋澄治, 斜面安定, 鹿島出版会, pp.18-58 (1975)
- 9) 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測, 社団法人地盤工学会, pp.73-87 (2006)
- 10) 沖村孝, 杉本博: 統計的手法による自然斜面崩壊の研究, 土木学会論文集, No.290, pp.89-97 (1979)
- 11) 北園芳人, 仲宗根典子, 寺園忠彦: 地盤情報データベースの作成と斜面崩壊予測の応用, 自然災害科学, Vol.20, No.1, pp.75-87 (2001)
- 12) 小山倫史: 自己組織化マップを用いた道路斜面の健全性評価手法に関する提案, 社会安全学研究, Vol.6, pp.147-155 (2016)
- 13) 沖村孝, 市川龍平: 数値標高モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法, 土木学会論文集, No.358, pp.69-75 (1985)
- 14) 浅野嘉文, 川尻峻三, 布川修, 太田直之, 杉山友康, 渡邊諭: 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, pp.579-595 (2013)
- 15) 鳥居宣之, 大西剛史: 斜面崩壊危険度評価のための表土層内の降雨浸透過程を簡略化した地下水位算定モデル, 土木学会論文集 C, Vol.67, No.4, pp.441-452 (2011)
- 16) 道路土工切土工・斜面安定工指針 (平成 21 年度版), 公益社団法人日本道路協会, p.475 (2009)
- 17) Yasuo Ishihara, and Shigeki Kobatake: Runoff Model for Flood Forecasting, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Vol.29, No.260, pp.27-43 (1979)
- 18) 土壌雨量指数, 国土交通省気象庁, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html> (2017/10/6)
- 19) 土砂災害警戒判定メッシュ情報, 国土交通省気象庁, <https://www.jma.go.jp/jp/doshamesh/> (2017/10/9)
- 20) 斎藤迪孝, 上沢弘: 斜面崩壊時期の予知, 地すべり, Vol.2, No.2, pp.7-12 (1966)
- 21) 福園輝旗: 表面変位速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法, 地すべり, Vol.2, No.2, pp.8-13 (1985)
- 22) 斎藤迪孝: 第 3 次クリープによる斜面崩壊時期の予測, 地すべり, Vol.4, No.3, pp.1-8 (1968)