

# 雨観測の不確実性と土壌雨量指数

## UNCERTAINTIES OF RAIN OBSERVATION AND SOIL WATER INDEX

岡田憲治  
Kenji OKADA

気象庁予報部予報課 土砂災害気象官 (〒100-8122 東京都千代田区大手町 1-3-4)

### 1. はじめに

「我が国は、急峻な山地や谷地、崖地が多い上に、地震や火山活動も活発である等の土地条件に、台風や豪雨、豪雪に見舞われやすいという気象条件が加わり、土石流、地すべり、がけ崩れ等の土砂災害が発生しやすい条件下にある。特に、近年の林地や傾斜地又はその周辺における都市化の進展など土地利用の変化と相まって、土砂災害による犠牲者は、自然災害による犠牲者の中で大きな割合を占めている」(平成15年防災白書)。

この文章は少なくとも平成10年から毎年変わることなく防災白書の最初に掲載されており、土砂災害発生には、素因である土地条件と誘因である気象条件の両方の存在が大きいことを示している。

気象条件(雨、雪、風など)の中でも、土砂災害との関係が最も深い「雨」を観測する上での問題点と、土砂災害の危険度を見積もるために気象庁で開発した土壌雨量指数を紹介する。

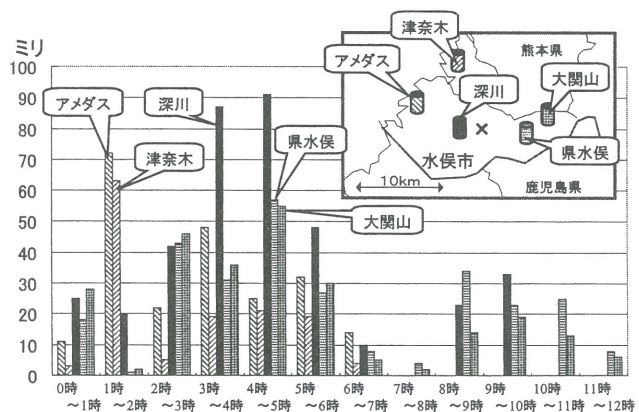
### 2. 雨の観測の不確実性

雨を観測する方法としては正確な雨量を測ることが出来る地上の雨量計が一般的である。ただし、土砂災害の発生現場に雨量計が設置されていれば、土砂災害が発生した場合に雨との関係を詳細に分析することができるが、このような理想的な事例は極めて希である。また、土砂災害を発生させるような雨は面的に一樣に降ることではなく局地的な大雨のことが多いため、1つの雨量計のデータで広い範囲を包括して表現することは困難な場合が多い。昭和59年の山陰豪雨では、浜田測候所(島根県浜田市)の雨

量データに3段直列タンクモデル<sup>1)</sup>を使ってタンクモデルと土砂災害の相関の高さが確認できた<sup>2)</sup>が、これは測候所の近傍で土砂災害が多発したという希な事例であって、10kmも20kmも離れた地点に設置された雨量計によって土砂災害を論じ、その結果土砂災害発生の危険度を判定する雨量基準を低くしていることも多い。1つの雨量計の相関が及ぶ範囲を数値的に決定する手法もあるが、雨の特性を考えると毎回異なると考えるべきである。さらに雨量基準を低くしている要素の1つに、正時~正時を単位とするため雨量が分割される問題もある。

雨域は時間と共に発達・衰弱を繰り返しながら移動するため、1つの雨量計だけで雨の全容を把握することは出来ない。図-1に昨年7月20日早朝に水俣市で土石流が発生した時のアメダスと熊本県の雨量計の時間推移を示す。西から東への雨域が移動する局地的な大雨だったことが読み取れる。土石流が発生した現地(図中のX印)の雨量はさらに多かったかも知れない。

図-1 水俣市の雨の時間推移(平成15年7月20日)



最近では、防災を目的として数km四方に1か所程度の

きめ細かな雨量観測網を設置した自治体もあるが、局地的な雨は、その観測網すらすり抜けることもある。そのため、単一の機関で雨量計を増やすよりも、複数の機関が保有する既存の観測網をネットワーク化の方が効果的である。気象庁の場合は、従来のアメダス約1,300か所に加えて、2003（平成15）年からは国土交通省道路局・河川局、都道府県等、4,000か所以上の雨量データがリアルタイムで入電するようになっている。

地上の雨量計は、その地点の雨量を正確に測定できるものの、雨の局地性に起因する問題を抱えているため、気象庁では地上の雨量計とレーダーの長所を結合し、全国をくまなく5km×5kmの格子に区切って雨を正確に算出する「レーダー・アメダス解析雨量」を開発して平成3年から運用している。レーダーは電波を使って雨雲を確実に観測できるが、地上の雨量に換算した場合に量的な誤差が生じる。これを地上の雨量計で補正することにより、局地的な雨も見逃さず正確な雨量を算出するシステムである。

開始当時は5km×5km格子単位で1時間間隔であったが、2001（平成13）年からは2.5km×2.5kmの格子へと面的な分解能を高め、2003（平成15）年6月からは30分間隔で算出して時間分解能も高め、同年10月からは前述のアメダス以外の雨量データも取り込んで面的な分解能の精度をさらに高めた。

このレーダー・アメダス解析雨量により土砂災害発生現場の雨量が詳細に把握できるようになった結果、大雨注意報レベル以下の雨で発生する土砂災害や、雨が降っていなくても発生する土砂災害の存在が明確になり、雨は土砂災害が発生するための必要条件とは限らないことが分かってきた。例えば、瀬戸内海地方のマサ土地域では、何週間も雨が降っていないのに道路パトロールを行う度に道路脇の崩壊が発見されることも多い。しかし、このような状況下で発生する土砂災害の数は少なく、崩壊規模も比較的小さい。やはり、大雨時に発生する土砂災害は発生数が多く、崩壊規模も大きいことから、大雨を無視することは出来ない。

### 3. 土壌雨量指数

気象庁では、雨を入力値として土砂災害発生を予測し危険度を判断する、積算雨量、実効雨量、タンクモデルの3種類の手法を使って、1981（昭和56）年から1990（平成2）年の10年間のアメダス雨量と土砂災害事例の関係を分

析した結果、市町村程度の広さを単位とした場合、全ての都道府県でタンクモデルが最も土砂災害発生との相関が高いことを見出した<sup>3)</sup>。

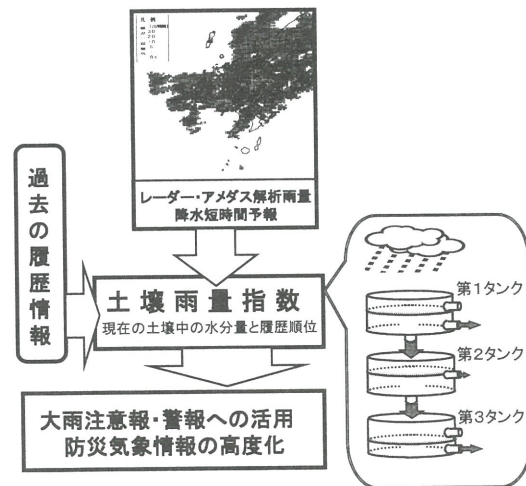
そこで、1991（平成3）年からは、レーダー・アメダス解析雨量を3段直列タンクモデルの入力値として、3つのタンクの貯留量の合計値（指数値）と土砂災害の関係を調査したが、発生時の値にはばらつきが大きく、土砂災害発生予測の実用化はほど遠いのが現状だった。

1996（平成8）年になり、1981年から1990年のデータを再度調査した結果、発生時の指数値はアメダス毎の差が大きいものの、それぞれのアメダスでの指数値の上位の雨ほど土砂災害発生が多いという履歴の概念を見出した。

そこで、「レーダー・アメダス解析雨量+タンクモデル」に、履歴順位の概念を導入したものを「土壌雨量指数」<sup>3)</sup>と名付け、1998（平成10）年と2000（平成12）年に土砂災害事例を使った検証を行い、履歴順位の有効性を確認した。

図-2が土壌雨量指数の概念図である。5km×5km格子毎に過去の（雨、土砂災害）履歴情報と比較して土砂災害発生の危険度を推定することが特長である。

図-2 土壌雨量指数の概念図



履歴順位とは、一雨の期間中で最も高かった指数値を前年までの10年間について集め、高い順に並べ直して順位付けした履歴ファイルを使って、現在の雨の指数値と比較して現在の相対的な危険度を順位付けするものである。例えば、現在の雨の順位と同等の履歴順位の雨で土砂災害が発生していれば、土砂災害発生の危険度は大きいと考えられる。これにより、過去の土砂災害発生記録が保存されていない格子であっても、記録が保存されている周囲の格子の情報から危険度を類推することが可能となる。

この種のモデルで必ず問題視されるのが、地質のパラメータである。3段直列タンクモデルでは5種類のパラメータ<sup>3)</sup>が提示されているが、全国様々に分布する地質に対し

て僅か5種類しか選択の幅が無い。しかし、パラメータを変更した場合に指数値には系統的な差が出るが、希な大雨である履歴順位上位の履歴順位の変動はほとんど無いことから、パラメータを考慮しなくても希に降る大雨と普段降る雨との分離が出来ることが判明した。現在は、花崗岩を多く含む奈良県木津川流域の観測から導かれたパラメータを使っている。

例えば、地頭園他(2004)<sup>5)</sup>による鹿児島県出水市土石流現場のタンクモデルによる再現では実際の観測によりパラメータを設定したが、そのパラメータと土壌雨量指数で使っているパラメータを比較したところ、履歴10位以内の雨では履歴7位と8位が入れ替わっているだけで、最も指数値が高かった時刻はほとんど一致していた。

#### 4. 土壌雨量指数の性能

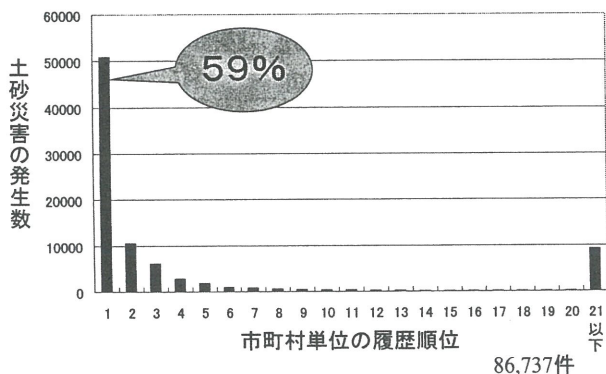
##### (1) 統計的分析結果

県消防防災課などの協力により1991(平成3)年から2000(平成12)年の10年間に全国で発生した土砂災害を収集し約8万7千件が集まったが、隣接する県同士でも保存数の差が大きかった。収集数が多かった上位10県の平均が10年に約2,900件であることから、実際に発生しているのは10万件を軽く超えるのではと推定している。

単発発生している場合ほど発生地点や発生時刻が詳細に保存されている傾向が見られ、多発した際には市町村毎の総数しか保存されていない傾向が強く、結果的には8割以上の事例が、発生場所は市町村単位、発生時刻は日単位でしか保存されていなかった。そこで、全事例を用いた統計的分析は市町村単位・日単位で行い、発生日にそれぞれの市町村が属する5km×5km格子の中で最も高い履歴順位を、その事例が発生した際の履歴順位と仮定した。

その結果、市町村単位で見た場合、全体の59%が履歴1位の雨で発生していること、履歴順位が下がるほど発生数も指数関数的に減少していること等、履歴順位と土砂災害発生との相関の高さが見出された(図-3)。

図-3 履歴順位と土砂災害の関係



この結果と、甚大な土砂災害が発生し〇〇豪雨というような名称が付いた雨では履歴1位の格子が広範囲に出現していたことが多いことから、気象庁では平成12年7月から土壌雨量指数の履歴1位が広域に出現した場合には、発表中の大雨警報を更新して「〇〇市では、過去数年間で最も土砂災害発生の危険性が高まっている」旨のキーワードを用いて、土砂災害に対する更なる警戒を呼びかけている。平成12年の東海豪雨では、大雨警報を発表した25府県のうち8県で土壌雨量指数を使った大雨警報の更新を行った。山崩れ・がけ崩れ461件中431件(警察庁調べ)がこの8県で発生しており、大雨警報だけの府県よりも面積当たりの発生率は約20倍高かった<sup>6)</sup>。

一方、精度を低下させている一因である融雪に関しては、新潟県では約半数の土砂災害が3月から5月の融雪期に発生しており、融雪の影響無視をできないことは判明したが、融雪期を除いた期間では履歴順位の有効性が確認できた。

発生地点と発生時刻が詳細に判明している事例9,570事例については、発生地点を含む5km×5km格子の発生時刻の履歴順位と指数値(タンクモデルの値)を比較した。履歴順位では図-4のように図-3と同様の傾向が見られるが、指数値では図-5のように分布のばらつきが大きく、発生-非発生を分離できるような状況ではなかった。これは、多雨地域・小雨地域問わず、普段降らないような雨が降った場合に土砂災害が発生しやすいことや、広範囲の危険度を一律の数値基準で示すことの困難さを示している。

図-4 発生時の履歴順位と発生数

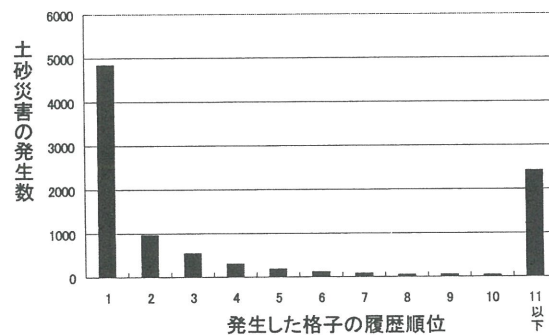
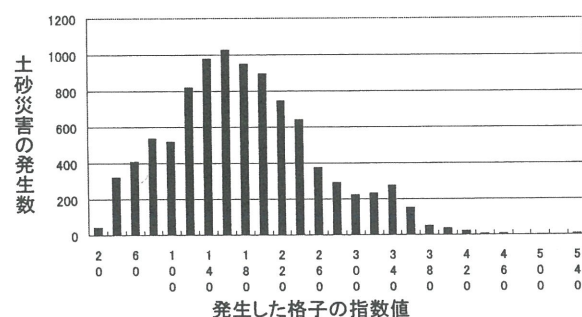
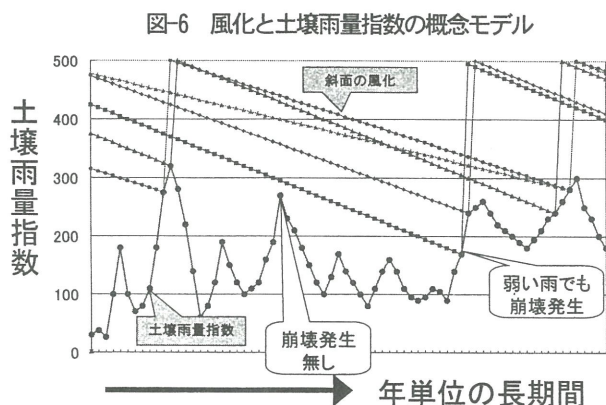


図-5 発生時の指数値と発生数



弱い雨でも土砂災害が発生することは、様々な理由が考えられるが、雨が面的にも時間的にも均一には降らないことに加え、図-6 のように風化の状況が異なる斜面が多数存在していることも、大雨の度に土砂災害が発生する理由として考えられる。



## (2) 個々の土砂災害事例

雨の降り方から土砂災害の発生タイミングを分類すると、

1. 雨が最も強いピーク時間帯に発生するもの
2. 雨が弱くなるか、止んだ後に発生するもの
3. 数日前に降った先行降雨が寄与しているものに大別できる。ただし、3. は1. 2. それぞれと複合することもある。

以下、これらの典型的な事例を過去の土砂災害の中から紹介する。

1は表層崩壊が多い。第一タンク値（3段直列タンクの一番上のタンク）のピーク時点に相当することから、第一タンク値だけでしきい値を決めた場合に良好な結果が得られた事例もあるが、多くの場合は第一タンク値が増加・減少を繰り返して安定しないため、広域の危険度判断という目的には適さない。

図-7は、平成10年に高知市内100か所以上でがけ崩れ・土石流が発生した際の、最も大規模の土石流が発生した5km×5km格子の土壌雨量指数時系列図である。

がけ崩れと2回の土石流が隣接した場所で発生しており、がけ崩れが1.のタイミングに相当している。

2の場合は大規模な崩壊や深層崩壊が多く報告されている。これを土壌雨量指数で見ると最も高い指数値は1.ではなく2.で出現しており、2.で発生している土砂災害が最も多いことから、土砂災害に対するタンクモデルの有効性は高い。

図-8の高知県繁藤の事例では、雨がほとんど止んだ時

点で大規模な山崩れが発生し60人の方が亡くなった。

図-7 平成10年高知市内の事例

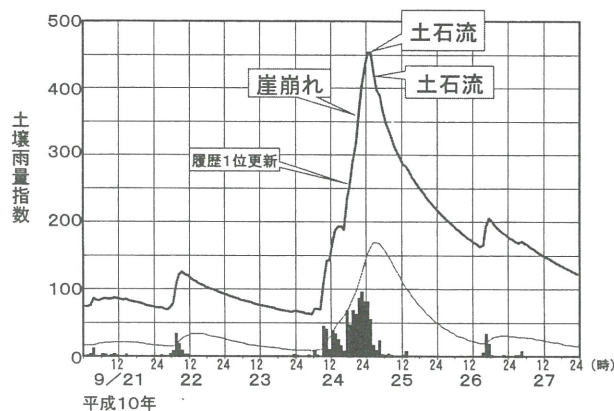
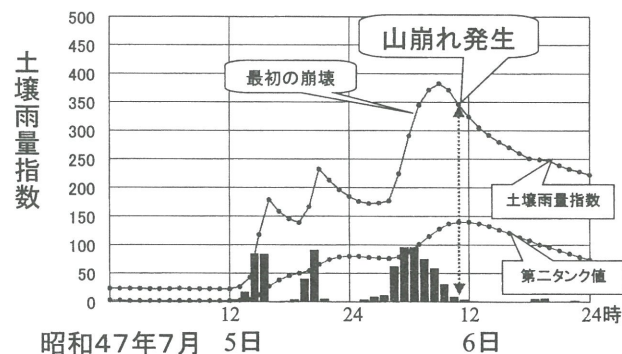


図-8 高知県繁藤の事例



このほかにも、1983（昭和58）年の山陰豪雨の際に島根県浜田市で発生した4万立方mの深層崩壊は雨のピークから12時間後の発生であった。平成9年の鹿児島県出水市の土石流では、山を隔てた地点にある雨量計を使い、雨のピークから15時間後、降雨が終了して4時間後に発生したという報告があるが、レーダー・アメダス解析雨量では直前までの降雨を算出しており地元住民の記憶と一致している。雨のピーク後に発生する土砂災害に対して、雨のピークからの時間で議論することや、離れた雨量計を使つての議論はかえって危険である。

では、いつまで危険なのかという問題が生じる。図-8に第二タンク値と記載した線は3段直列タンクモデルの第二タンク（真ん中のタンク）の値の推移である。雨が止んでから発生した大規模な深層崩壊の多くが第二タンク値のピーク付近での発生であることから、第二タンクと深層崩壊に関係があると推測している。前述の浜田市の深層崩壊も発生時と第二タンク値のピークが一致している。

図-4、図-5で使ったデータの中から2年に一度程度の大雨である履歴5位以内の雨で発生した山崩れ・がけ崩れを抽出すると、90%が第二タンク値のピークまでで発生し

ており、土石流では97%とさらに高かった。このことから、第二タンク値のピークを極めて危険な状態からの解除の指標に使える可能性がある。

なお、第二タンク値のピークを過ぎてから発生している事例には小規模かつ地すべり性の崩壊が多いが、天然ダムが形成されてから土石流性の鉄砲水が発生した事例(平成5年9月3日鹿児島県川辺町で9人死亡)もある。

3の先行降雨が効いている事例で典型的なのは平成11年6月29日に広島県で多発した土砂災害である。広島市では表層崩壊の誘発による土石流、呉市ではがけ崩れが多発した。当日の雨量程度の雨は数年に1回程度の頻度で発生しているため、共に2日前の先行降雨が誘因として効いていたと推定される。

特に、呉市は2日前の雨が大きく効いており、図-9で示す呉市清水を含む格子では2日前に履歴2位まで高まり、小さな崩壊が発生していた。

このように、先行降雨は無視できないのだが、数時間から数十時間の無降水時間で先行降雨をリセットしている手法が多い。これは、タンクモデルでは貯留量が多いほど減衰率が高くなるが、他の手法では一定減衰率のため大雨時の減衰(解除)に時間がかかることが理由の1つであろう。

図-9 呉市の事例

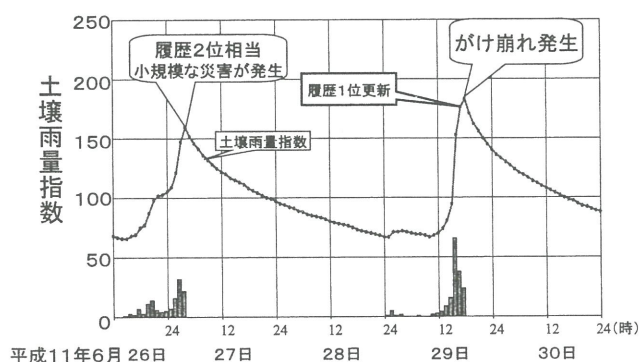
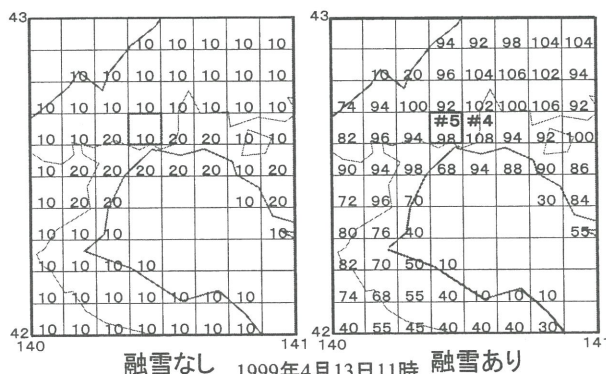


図-10 融雪の組み込み事例



### (3) 融雪

土砂災害は雨だけでなく融雪によっても多発している。例えば新潟県では融雪期の土砂災害は年間発生数の半数を占めている。

融雪期に発生している個々の土砂災害をレーダー・アメダス解析雨量で見ると、発生の半日から数時間前にまとまった雨が降っている場合が多く、雨は雨量だけでなく融雪を促進する熱の供給という2つの働きをしていると考えられる。

融雪量を推定する手法には、気温と融雪開始日から算出

するデグリー・ディ法、風速と気温の積で熱量を計算するバルク法、積雪深の差を雨に換算する積雪深差法等がある。これらの手法はピンポイントである観測地点の融雪量は精度良く算出出来るが、レーダー・アメダス解析雨量におけるレーダーのような面的な観測手法が無い場合、面的な展開が困難である。

そこで、アメダスに併設してある積雪深計の毎時間の差を気温がプラスの場合に雨量に換算(換算係数は0.5)し、メッシュ気候値を使って各格子に内挿展開したものをレーダー・アメダス解析雨量と合算して土壌雨量指数に入力した。平野部の例として、北海道長万部の道央自動車道法面で8,000立方メートルの崩壊が発生した事例を図-10に示す。融雪を組み込んだ場合(右図)、発生時には図のほぼ全域にわたって指数値が高くなっていたが、10位以内の履歴順位が出現したのは、発生地点を含む格子とその東に隣接する格子だけだった。このように平野部では土砂災害との相関が高い事例を確認出来たが、山間部では積雪深計と積雪深計の間に山があるために内挿展開による推定に難があり土砂災害と融雪の間には相関は芳しくなかった。

今後、積雪深差よりも分布推定の精度が得られやすい気温分布を使ったデグリー・ディ法の利用や、面的には20km×20km格子での算出、時間的には3時間間隔での算出など、元データの分解能や精度に準じた算出も検討している。

## 5. 地震及び地震後の雨により発生する土砂災害

雨で発生する土砂災害ではないが、地震及び地震後の雨で発生する土砂災害について現況をまとめておく。

計測震度計が全国展開されて以降、市町村ごとの震度が判明するようになり、例えば、平成12年10月の鳥取県西部地震では震度5強・5弱を境界として山崩れ・がけ崩れの発生・非発生に明瞭な差が見られた。ため池被災でも同様の結果が得られている<sup>7)</sup>。しかし、鳥取県西部地震以外ではこのような明瞭な震度境界は見られない。また、各地

の地震発生後の雨による土砂災害の収集を継続しているが、傾向を分析出来るだけの収集数には至っていない。このように、地震が関係する土砂災害の実態把握については計測震度計の全国展開によりスタートしたばかりであり、今後の土砂災害発生事例の収集に期待している。

## 6. 今後の方向性

雨と土砂災害は密接な関係があるとはいえ、雨が降ったら必ず土砂災害が発生するというのではなく、個々の斜面で見た場合には発生する確率は非常に小さい。しかし、一旦発生した場合には甚大な被害をもたらすため、油断は出来ないのが土砂災害である。

また、雨により危険度が大きい領域を市町村単位程度の広さまで絞り込むことは可能であるが、刻々と降雨域が移動し雨量も変化する雨の降り方を考えると、雨の情報だけで領域内にある個々の斜面の危険度に言及することは不可能である。

このように雨は土砂災害を考える上で重要なウエイトを占めているが、雨だけで土砂災害発生を予測することには限界がある。

土壌雨量指数についても同様で、過去の雨と比較した履歴順位という概念を用いているため多雨地域・小雨地域を問わず適用できる特長があり、しかも先行降雨をすべて取り込んでいるため無降水期間の判別を考慮する必要はないという長所がある一方で、斜面の存在しない平坦部にも危険度が計算されるという欠点がある。

この問題を解消するには、平常時に地盤情報（風化、傾斜角、集水、地震発生により出現する地盤の脆弱性）だけ

でも危険度がある斜面を抽出しておき、降雨時にはリアルタイムの土壌雨量指数で雨による危険度が大きい格子を絞り込めば、定性的ではあるが両者の「and」により雨による危険度が大きい格子内の斜面の中でも危険度が大きい個々の斜面が判別され、効果的かつ漏れのない防災対策につながるはずである。さらに、図-6 に雨や風化以外の各種素因が加わり、これらが同じスケール上で定量化されれば、誘因や素因をポイント積算した危険度判断の可能性も期待される。

## 参考文献

- 1) 木下武雄：水害の日本で生まれ世界に広まったタンクモデル、20世紀ニッポン土木のオリジナリティ考 シリーズ⑧、土木学会誌、5、2001。
- 2) 清水正義・柴田徹・八嶋厚・三村衛：斜面崩壊の実態と発生時刻の予測-58年山陰豪雨時の浜田市の場合-、第21回自然災害科学総合シンポジウム 477-480、1984。
- 3) 岡田憲治：土壌雨量指数、測候時報、69-5 67-100、2001。
- 4) Ishihara, Y. and S. Kobatake : Runoff Model for Flood Forecasting, Bull. D. P. R. I., Kyoto Univ. 29 27-43.
- 5) 地頭蘭隆・下川悦郎・迫正敏・寺本行芳：鹿児島県出水市針原流域の水文地形的特性と深層崩壊、新砂防、56-5 15-26、2004。
- 6) 岡田憲治：土壌雨量指数、農地防災のための先端的フィールドモニタリング技術、農水省農林交流センターワークショップ、77 2-11、2002。
- 7) 谷茂：豪雨災害の防災と減災に向けた新たな取り組み、降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究委員会講演要旨集、地盤工学会、2004。

(2004. 6. 18 受付)