

財団法人国土地理協会 平成 24 年度学術研究助成

長期間の事例解析に基づく

豪雨災害・土砂災害モニタリングシステムの運用と防災情報への活用

研究成果報告書

齋藤 仁（関東学院大学 経済学部）

松山 洋（首都大学東京 大学院都市環境科学研究科）

## 目次

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| 1. はじめに.....                               | 3  |
| 2. 2種類の降雨パターンと斜面崩壊発生との関係 .....             | 5  |
| 3. SWING system の概要と改良 .....               | 6  |
| 3. 1. SWIN system の概要 .....                | 6  |
| 3. 2 SWING system の構成とインターフェイスの改良 .....    | 7  |
| 4. 豪雨災害のモニタリング.....                        | 10 |
| 4. 1. 平成 24 年 7 月九州北部豪雨による阿蘇山周辺での土砂災害..... | 11 |
| 4. 2. 平成 25 年台風第 26 号による伊豆大島での土砂災害 .....   | 13 |
| 4. 3. 平成 26 年 8 月豪雨による広島県広島市での土砂災害 .....   | 16 |
| 4. 4. 今後の課題 .....                          | 19 |
| 5. まとめ .....                               | 20 |
| 引用文献.....                                  | 20 |

## 1. はじめに

我が国では、毎年、斜面崩壊による土砂災害が発生し、社会に大きな損害を与えている。また斜面崩壊は、土砂災害を引き起こすだけでなく、山地における重要な地形形成プロセスでもあるため、その発生予測や危険度評価に関する研究が世界各地で行われてきた (e.g., Keefer and Larsen, 2007; Larsen et al., 2010)。斜面崩壊は降雨や地震などの誘因や、地形・地質といった素因など、様々な要因によって発生する。それらの中でも、降雨は斜面崩壊発生の主要因である (Wieczorek and Glade, 2005)。このため、斜面崩壊の発生と降雨量との関係を明らかにする研究や、降雨データに基づいた斜面崩壊の予測・警戒システムの構築に関する研究が行われてきた (e.g., Onodera et al., 1974; Keefer et al., 1987; Saito et al., 2010a; Saito et al., 2014)。降雨のみに基づいた斜面崩壊の解析は、斜面における水文プロセスを直接的には考慮していないものであるが、日本列島といったような広域を対象とした斜面崩壊の危険度評価の際には有用である。我が国においても、建設省河川局砂防部 (1984) により土石流警戒の基準雨量が設定され、現在は土壌雨量指数 (Soil Water Index: SWI, 岡田ほか, 2001) を用いた土砂災害警戒情報が運用されている (国土交通省河川局砂防部ほか, 2005; Osanai et al., 2010)。土砂災害警戒情報では、ある時刻における 60 分積算雨量と SWI に注目し、過去の事例解析より得られた土砂災害発生危険基準線を用いて、現在の土砂災害発生の切迫性を判断する (国土交通省河川局砂防部ほか, 2005; Osanai et al., 2010)。

しかし、斜面崩壊を発生させる降雨を明らかにするためには、一連の降雨 (ひと雨) を時間単位で分解し、ある時刻のみにおける降雨量に注目するだけでなく、一連の降雨の特徴を理解することも重要である。また IPCC (2007) では、地球温暖化が、日本列島などのアジアモンスーン地域での降雨パターンの変化をもたらす可能性が示されている。つまり、一連の降雨と斜面崩壊の発生との関係を解析・蓄積することは、地球温暖化が斜面崩壊の発生に与える影響の評価や、今後の防災を考える上で重要である。そこで Saito et al. (2010b) では一連の降雨の時系列変化に注目し、基準化土壌雨量指数 (Normalized Soil Water Index: NSWI, 第 2 節) を用いて、日本列島において斜面崩壊を発生させる降雨イベントが短時間集中 (Short-duration High-intensity: SH) 型と長時間継続 (Long-duration Low-intensity: LL) 型の 2 パターンに定量的に分類できることを示した。また、齋藤ほか (2011) では、SH 型と LL 型の 2 種類の降雨パターンに基づいて、日本列島において斜面崩壊を発生させる降雨イベントのリアルタイムモニタリングシステム (the system with Soil Water Index Normalized by Greatest value: SWING system, プロトタイプ, 図 1) を構築した。しかしながら、齋藤ほか (2011) では、SWING system の運用および検証が短時間であり、いくつかの課題が残されていた。具体的には、1: Web ページでの表示方法の改良, 2: 長期の運用による土砂災害事例での検証, である。

そこで本研究では、齋藤ほか (2011) で示された上記 2 つの課題を踏まえて、SWING system の表示方法 (インターフェイス) の改良 (第 3.2 項) と、長期運用による土砂災害事例の検証を行った (第 4 節)。運用期間は、2012 年 9 月~2014 年 8 月までの 2

年間である。本研究では、運用直前に発生した平成 24 年 7 月九州北部豪雨による熊本県阿蘇市での土砂災害の再解析と、運用中に発生した平成 25 年台風第 26 号による伊豆大島での土砂災害、平成 26 年 8 月豪雨による広島県広島市での土砂災害事例を検証した。

なお、本システムは斜面崩壊が発生する正確な時刻を予測するものではなく、一連の降雨に着目し、SH 型と LL 型の特徴から斜面崩壊を発生させやすい降雨パターンであるか否かをリアルタイムでモニタリングすることを目標とした。特に 2 種類の降雨パターンに注目することで、例えば SH 型の際は迅速な土砂災害の警戒が必要であり、LL 型の際は長時間の警戒が必要というような、土砂災害情報への活用可能性が考えられる。

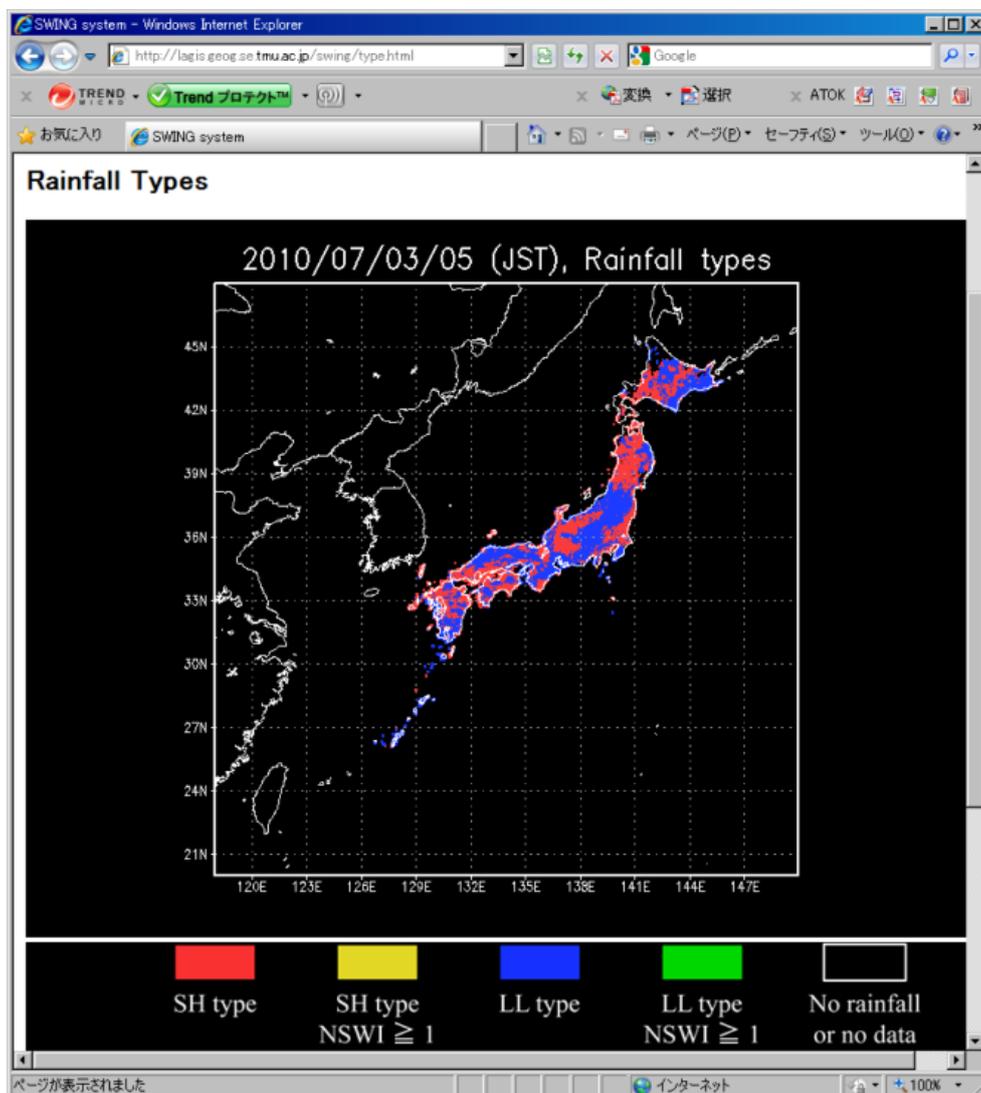


図 1 齋藤ほか (2011) による SWING system のインターフェイス (改良前)。Web ページでの降雨イベントの分類結果の表示例 (2010 年 7 月 3 日午前 5 時の事例)。

## 2. 2種類の降雨パターンと斜面崩壊発生との関係

短時間の強雨や長時間継続する降雨が斜面崩壊を発生させることは、これまでに個々の斜面崩壊事例や、斜面崩壊発生の力学的なメカニズムの観点から指摘されてきた(武居, 1983; Wieczorek and Glade, 2005; 地盤工学会, 2006). そこで Saito et al. (2010b) では、日本列島で発生した降雨に起因する 1,174 件の斜面崩壊災害から、斜面崩壊を発生させる 2 種類の降雨パターン (SH 型・LL 型) を解析し、それらを定量的に分類した. この研究では、解析雨量 (レーダー・アメダス解析雨量) を用いて、基準化した SWI (NSWI) の時系列変化から、SH 型と LL 型の特徴を示した. ここで、一連の降雨は 24 時間の無降雨継続時間で区切られる降雨イベントである. NSWI の有用性は、Saito et al. (2010b) , および Saito and Matsuyama (2012) で検証されており、以下のように定義される.

$$NSWI = SWI / SWI_{\max 10} \quad (1)$$

NSWI は、任意の場所・時刻における SWI を、同一箇所の過去 10 年間における SWI の最大値 ( $SWI_{\max 10}$ ) で基準化したものである (Saito et al., 2010b).

SWI は、3 段直列タンクモデルにより算出される. これは、降った雨がどの程度土壌中に貯まっているかを、これまでの降雨量を基に数値化したものである (岡田ほか, 2001). これまでの研究により、SWI と土砂災害の発生には高い相関関係があることが示されている (岡田ほか, 2001; 岡田, 2007). また、現在の降雨による SWI を過去 10 年間の SWI の履歴と比較することが、土砂災害の発生と最も対応がよいとされている (地盤工学会, 2006). つまり、SWI が過去 10 年間の履歴を更新する (NSWI が 1 以上になる) ことは、その場所において過去 10 年間で最も土砂災害が発生しやすい状況を示している.

図 2 は、NSWI の時系列変化から、SH 型と LL 型の降雨イベントの特徴 (Saito et al., 2010b) を示したものである. SH curve と LL curve は、それぞれ過去複数の SH 型と LL 型の降雨イベントにおける、NSWI 時系列変化の中央値の変化である. SH 型と LL 型の特徴は以下の通りである.

SH 型は、降り始めから早い時間に強い降雨があり、NSWI が急上昇して斜面崩壊を発生させる降雨イベントである. つまり、SH 型の際は降雨の開始から斜面崩壊が発生するまでの期間が短い.

一方で LL 型は、断続的な降雨が長時間続くことで NSWI が上昇した状態が続き、その後強い降雨があって斜面崩壊が発生する. この際も斜面崩壊が発生する最終的な要因は強雨である. しかし、LL 型では降雨の開始から長時間が経過してから斜面崩壊が発生する点の特徴である. ここで、図 2 の LL curve は、降雨継続時間が長くなると NSWI が 0.4 程度で一定となる. ただし、NSWI が 0.4 程度で斜面崩壊が発生するわけ

ではない。LL型では断続的な降雨により NSWI の上昇と下降を繰り返すため、それらの降雨イベントの中央値の変化が LL curve となる。よって LL curve は、NSWI が 0.4 程度の高い状態が続き、その状態で強い降雨があると斜面崩壊が発生しやすくなることを示す。つまり LL 型は、断続的な降雨により降雨が小康状態となっても斜面崩壊が発生しやすい状況の降雨イベントと言える。

なお、実際の降雨イベントは、SH 型と LL 型の 2 種類だけでなく、その中間型なども定義できると考えられる。しかし本研究では、Saito et al. (2010b) に基づいた 2 種類の降雨パターンに注目し、現在の降雨イベントを SH 型または LL 型に分類した。

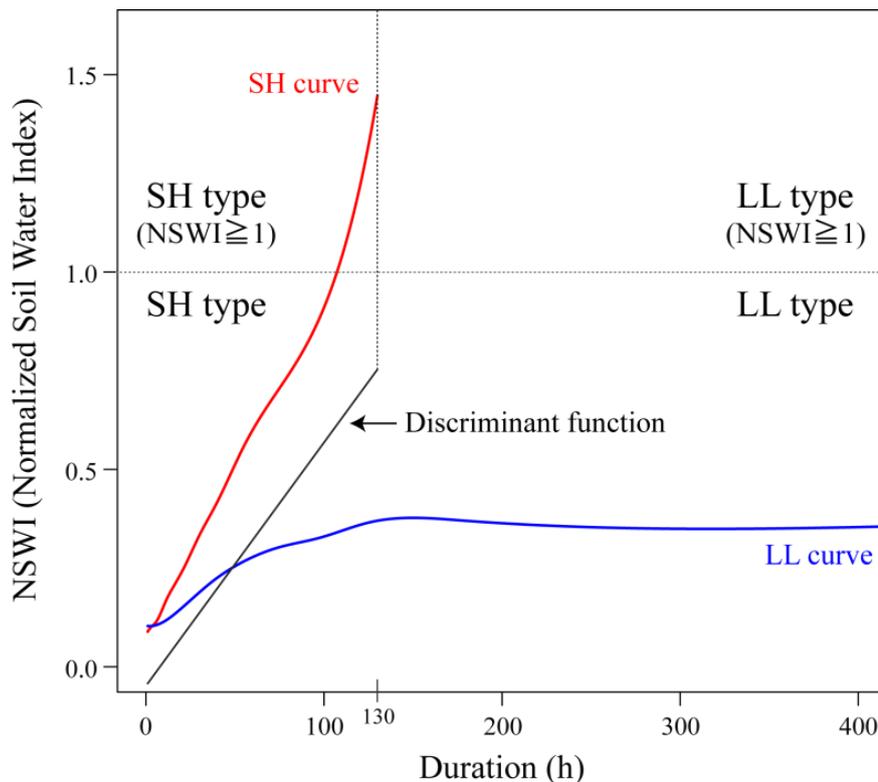


図2 SH型とLL型の降雨イベントの特徴 (SH curve, LL curve, Saito et al., 2010b), およびSH型とLL型の降雨イベントを分類する線形判別関数 (Discriminant function, 齋藤ほか, 2011)

### 3. SWING system の概要と改良

#### 3. 1. SWING system の概要

SWING system では、(財) 気象業務支援センターより配信される、気象庁発表の「1 km メッシュ解析雨量 GPV」と「土壌雨量指数」を受信する。次に、データをリアルタ

イムで解析することで、日本全国を対象に現在の降雨イベントを SH 型または LL 型に分類し、その結果を図化・Web 上で表示することで降雨イベントのモニタリングを可能とした（齋藤ほか，2011）。

### 3. 2 SWING system の構成とインターフェイスの改良

使用するデータは、「1 km メッシュ解析雨量 GPV」と「土壌雨量指数」である。「1 km メッシュ解析雨量 GPV」は、気象レーダーの観測値と AMeDAS などの地上雨量計の観測値から作成された毎正時 00 分および 30 分の前 1 時間降水量データである。データの空間解像度は、緯度 30 秒・経度 45 秒（約 1 km メッシュ）である。また「土壌雨量指数」は、日本国内の陸上メッシュを対象に、岡田ほか（2001）に基づいて計算された毎正時 00 分と 30 分における SWI の実況値である。データの空間解像度は、緯度 0.05 度・経度 0.0625 度（約 5 km メッシュ）である。

計算機環境は、CPU : Intel Xeon E5420×2, メモリ : 16 GB, OS : CentOS 5.3 である。本研究では、比較的高性能の計算機を用いることでデータ解析にかかる時間を短縮した。また、大量のデータを処理する必要があるため、4 TB の HDD を使用した。「1 km メッシュ解析雨量 GPV」と「土壌雨量指数」は(財)気象業務支援センターより FTP(PUT)により配信され、本システムで受信する。また、解析結果は Web サーバを用いて公開している (<http://lagis.geog.ues.tmu.ac.jp/swing/>)。

本システムでは、「土壌雨量指数」と同様の、日本全国の陸上メッシュ（空間解像度 5 km）を対象とした。また、計算間隔を 1 時間とするため、毎正時 00 分の「1 km メッシュ解析雨量 GPV」と「土壌雨量指数」を用いた。これは、降雨データだけによる土砂災害の発生危険度の絞り込みの実用上の限界が、空間解像度 5km, 時間解像度 1 時間とされているためである（岡田, 2007）。

「1 km メッシュ解析雨量 GPV」と「土壌雨量指数」の毎正時 00 分のデータは、それぞれ毎時 14 分, 19 分ごろに配信される。本システムでは、それぞれのデータの受信後、以下の解析を行う。まず、「1 km メッシュ解析雨量 GPV」は、「土壌雨量指数」のメッシュと同じ空間解像度 5 km に編集して使用する。次に、日本全国の各メッシュにおいて、Saito et al. (2010b)に基づき、毎正時 00 分における降雨継続時間および NSWI（式 1）を算出する。ここでは、24 時間の無降雨継続時間で区切られる降雨イベントを一連の降雨とした。得られた降水継続時間と NSWI の時系列変化から、SH 型と LL 型への分類を行う。

図 2, 図 3 には、Saito et al. (2010b)に基づいた、SH 型と LL 型への分類ルールを示す。具体的には、「降雨なし」、「SH 型」、「SH (NSWI $\geq$ 1) 型」、「LL 型」、「LL (NSWI $\geq$ 1) 型」の 5 分類とした。なお本システムにおいて、現在の降雨イベントは SH 型, LL 型のいずれかに分類される。よって SH 型と LL 型のすべてが、斜面崩壊が発生しやすい降雨イベントではない。それらの中でも、NSWI が大きくなるほど斜面崩壊が発生しやすい降雨イベントである。とくに「SH (NSWI $\geq$ 1) 型」と「LL (NSWI $\geq$ 1) 型」は、

過去 10 年間で最も斜面崩壊が発生しやすい切迫した状況の降雨イベントである。それぞれの分類ルールは以下の通りである。

まず, NSWI が 0 よりも大きく, かつ降雨継続時間が 0 h でないメッシュを選び出し, それ以外は「No rainfall」に分類した。次に, 降雨継続時間が 130 h を超える降雨イベントは, 「LL 型」とした。これは, Saito et al. (2010b)において, SH 型の最大降雨継続時間が 130 h であったためである。また, 130 h を超えた降雨イベントのうち, 特に NSWI が 1 以上の場合は, 「LL 型 (NSWI $\geq$ 1)」と区別した。

降雨継続時間が 130 h 以下の降雨イベントについては, 線形判別関数による分類を行った。つまり, 線形判別関数よりも NSWI が大きくなる場合に SH 型, 小さくなる場合に LL 型へと分類した。また, SH 型についても, NSWI が 1 以上の場合は, 「SH 型 (NSWI $\geq$ 1)」と区別した。ここで線形判別関数は, Saito et al. (2010b)での SH 型と LL 型の降雨イベント (それぞれ 557 件, 617 件) を線形判別分析することで得た (図 2)。なお図 2 における SH curve と LL curve はそれぞれの降雨イベントの中央値の変化であるため, SH curve と LL curve の中間を線形判別関数を通るわけではない。

解析結果は分布図として, Web ページ (<http://lagis.geog.ues.tmu.ac.jp/swing/>) で公開した。齋藤ほか (2011) での Web ページ (図 1) は, 毎時における全国の解析結果のみを簡易的に表示させるものであった。公開項目は, 降雨イベントの分類結果 (図 1), NSWI (図省略), 解析雨量 (図省略) である。これら一連の解析にかかる時間は, 数分程度である。そのため Web ページでの解析雨量の更新は毎時 20 分, NSWI と降雨イベントの判定結果の更新は毎時 30 分となっている。

SWING system では, 「1 km メッシュ解析雨量 GPV」と「土壌雨量指数」をリアルタイムで解析し, 現在の降雨パターン分布図を表示することで, 現在どの地域で SH 型または LL 型の降雨イベントが起こっているかを把握可能である。また NSWI 分布図と見比べることで, 一連の降雨に着目して現在, どこで斜面崩壊が発生しやすい状況かも推測可能である。特に降雨イベントの分類結果において「SH (NSWI $\geq$ 1) 型」と「LL (NSWI $\geq$ 1) 型」の場合は, 過去 10 年間で最も斜面崩壊が発生しやすい降雨イベントである。

齋藤ほか (2011) では, 解析結果を日本列島スケールで示すのみであった (図 1)。この表示方法は, 日本列島スケールでの把握に適しているが, 個々の場所を見ることは難しい。また背景地図がないため, 個々の地域の地形や地質, 土地利用などを考量することができない。よって, 実際の Web ページを見る際には, 結果の拡大・縮小や, 背景地図が必要である。そこで本研究では, 新たに地理院地図 (電子国土 Web, 国土地理院, <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse4/>) を実装することで, これらの課題を解決した (図 4)。背景地図には, 標準地図, 色別標高図, 空中写真 (~2007 年) を用い, 日本列島スケールから個々の地域まで拡大・縮小に対応した。改良後の SWING system は, これまでと同様の URL (<http://lagis.geog.ues.tmu.ac.jp/swing/>) で公開する。

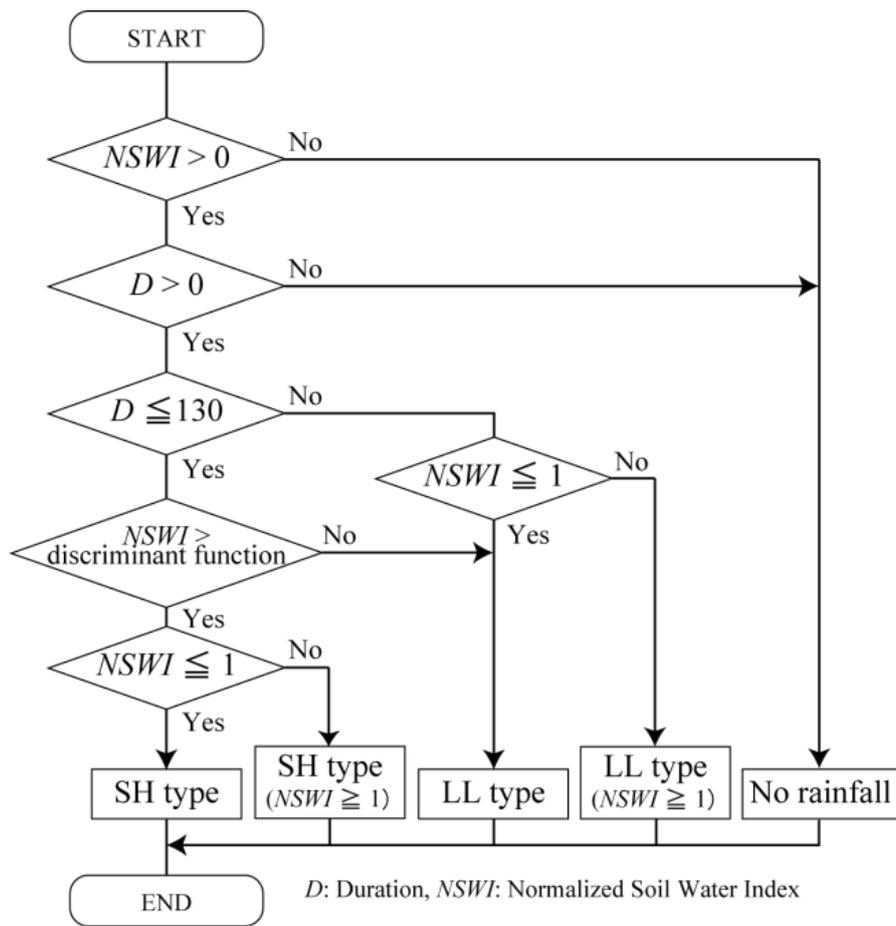


図3 SWING systemにおけるSH型とLL型の降雨イベントを分類するフローチャート  
(齋藤ほか, 2011)

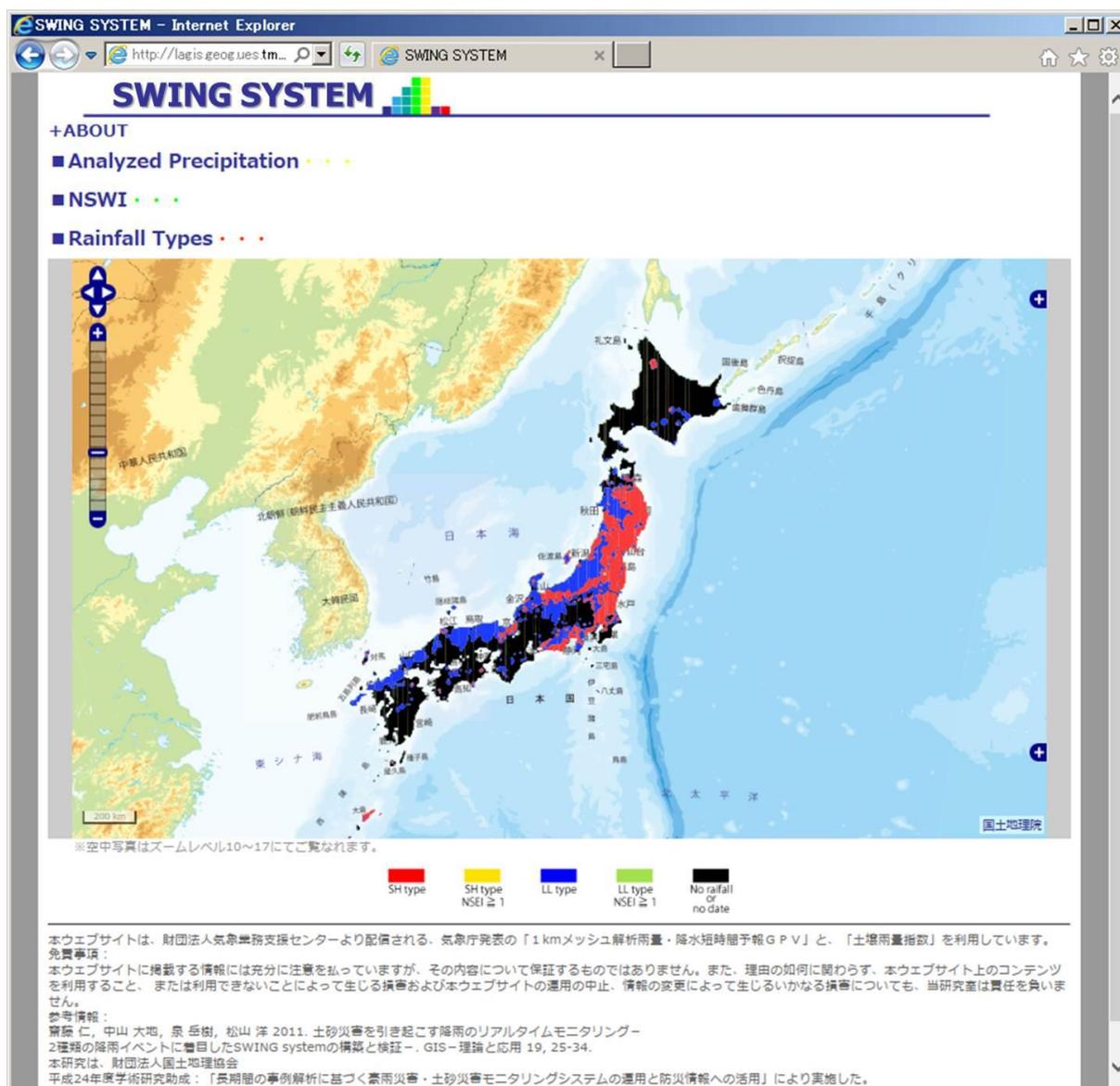


図 4： 改良後の SWING system のインターフェイス。Web ページでの降雨イベントの分類結果の表示例（2014 年 10 月 7 日 21 時の事例）。

#### 4. 豪雨災害のモニタリング

SWING system を 2012 年 9 月～2014 年 8 月まで運用し、土砂災害のリアルタイムモニタリングを行った。特に運用開始前の 2012 年 7 月には、平成 24 年 7 月九州北部豪雨が発生し、阿蘇山周辺で甚大な土砂災害が発生した。本研究では平成 24 年 7 月九州北部豪雨の再解析をおこなった。また運用期間中に発生した、平成 25 年台風第 26 号による伊豆大島での土砂災害、平成 26 年 8 月豪雨による広島県広島市での土砂災害事

例を検証した。これらの土砂災害について、本システムにおける降雨イベントの分類結果や NSWI の時系列変化、および豪雨イベントの累積雨量と最大 NSWI の空間的分布に注目した。なお、当時の気象条件に関する情報や土砂災害の概要には、速報値も含まれるため、数値などは変わることがある。

#### 4. 1. 平成 24 年 7 月九州北部豪雨による阿蘇山周辺での土砂災害

2012 年 7 月 11 日から 14 日にかけて、福岡県、熊本県、大分県、佐賀県で大雨となった。11 日朝に朝鮮半島付近で停滞していた梅雨前線が、12 日朝には対馬海峡まで南下した。梅雨前線の南側にあたる九州北部地方では、東シナ海上から暖かく湿った空気が流入し、大気の状態が非常に不安定となった。発達した雨雲が線状に連なり次々と流れ込んだ熊本県熊本地方、阿蘇地方、大分県西部では、12 日未明から朝にかけて猛烈な雨が継続した（福岡管区气象台，2012）。特に、阿蘇市にある AMeDAS 阿蘇乙姫では、同日午前 1 時から午前 7 時までに 459.5 mm（7 月の月降水量平年値の 80.6%）を観測するなど、記録的な大雨となった。この大雨により、阿蘇谷における中央火口丘や外輪山のカルデラ壁において、7 月 12 日午前 6 時台にかけて多数の斜面崩壊が発生した（土志田ほか，2012；松四ほか，2013）。

図 5 には、阿蘇山周辺における、7 月 11 日午前 1 時～12 日 24 時までの 48 時間累積雨量分布を示す。阿蘇谷を中心に、外輪山西側～東側にかけて 700mm を超える大雨となっていることがわかる。一方で、SWING system で観測された同期間の最大 NSWI の分布（5km グリッド，図 6）を見ると、特に外輪山東側で NSWI が高まっていたことがわかり、手野・古城周辺（図 6A）では 1.6 を超えている。この値は、土壤雨量指数が過去 10 年の最大値の約 1.6 倍になっていたことを表しており（第 2 節）、斜面崩壊が発生しやすい状況であったことをモニタリング出来ていた。実際に、手野や古城をはじめとする外輪山東側のカルデラ壁では多数の斜面崩壊が発生しており（土志田ほか，2012；松四ほか，2013）、SWING system でのモニタリング結果とも整合的である。

ここでは特に NSWI が大きく、多数の斜面崩壊が発生した手野・古城のグリッド（図 6A）における降雨イベントのモニタリング結果と NSWI の時系列変化を図 7 に示す。当時、手野・古城周辺では SH 型の降雨イベントとして、斜面崩壊が発生しやすい状況であったことがモニタリングできていた。手野・古城周辺では、11 日午前 3 時頃から一連の降雨が始まった。その後数時間は弱い雨により NSWI も低い状態であったが、12 日午前 2 時頃から急激に上昇し、午前 4 時には NSWI=1 を超えた。また斜面崩壊が発生した午前 6 時前後は NSWI が 1.5 を超えていた。阿蘇市では、午前 2 時 40 分に土砂災害警戒情報第 1 号が発表された（福岡管区气象台，2012）。SWING system においても、午前 2 時頃からの NSWI の急激な上昇からは、当時 SH 型として斜面崩壊が起こりやすい状況になりつつあることを把握可能であったと考えられる。

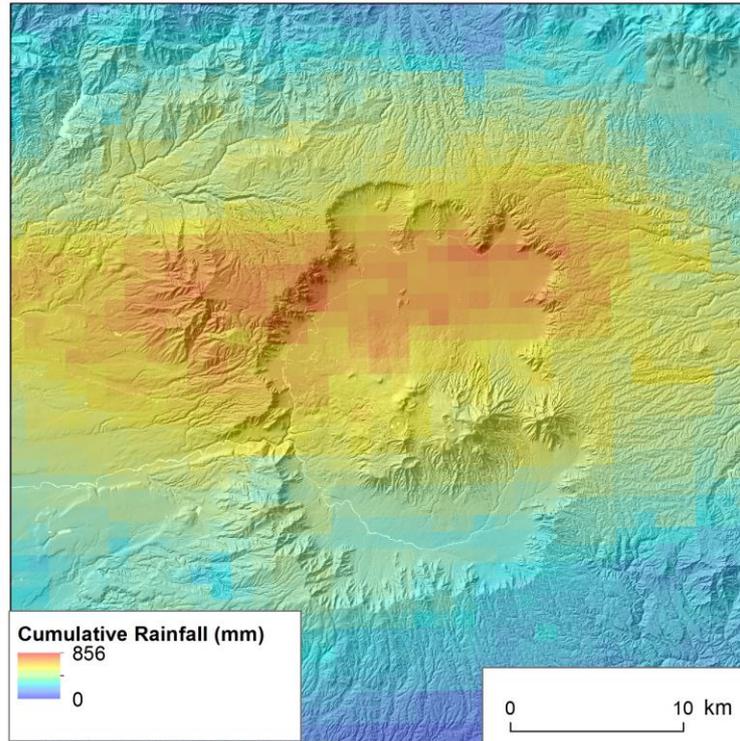


図5 阿蘇地域における、2012年7月11日午前1時～12日24時までの累積雨量の分布。SWING systemによる気象庁発表の1kmメッシュ解析雨量より算出。

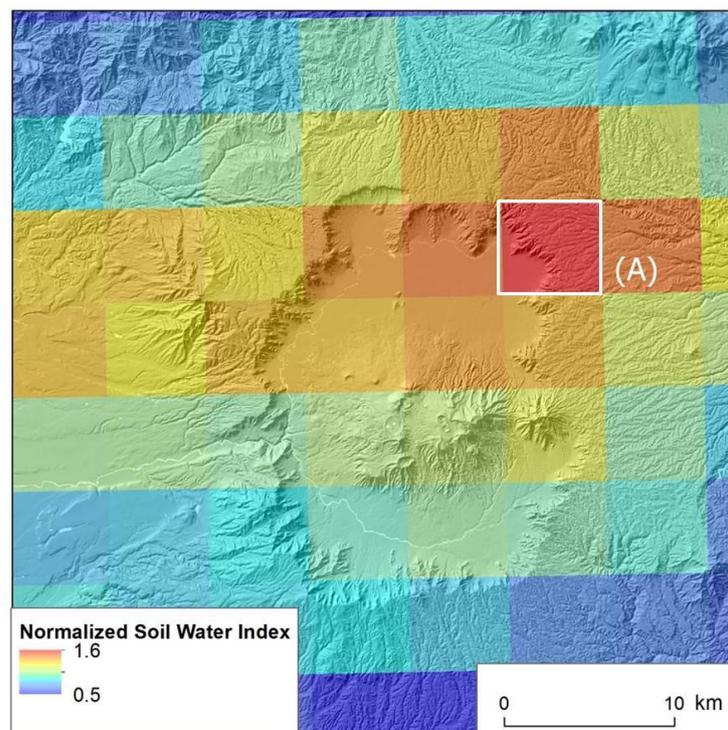


図6 SWING systemによる2012年7月11日午前1時～12日24時（JST）までの最大基準化土壌雨量指数（Normalized Soil Water Index: NSWI）の分布。解像度は約5 x 5 km。白域（A）は手野・古城を含むグリッド。

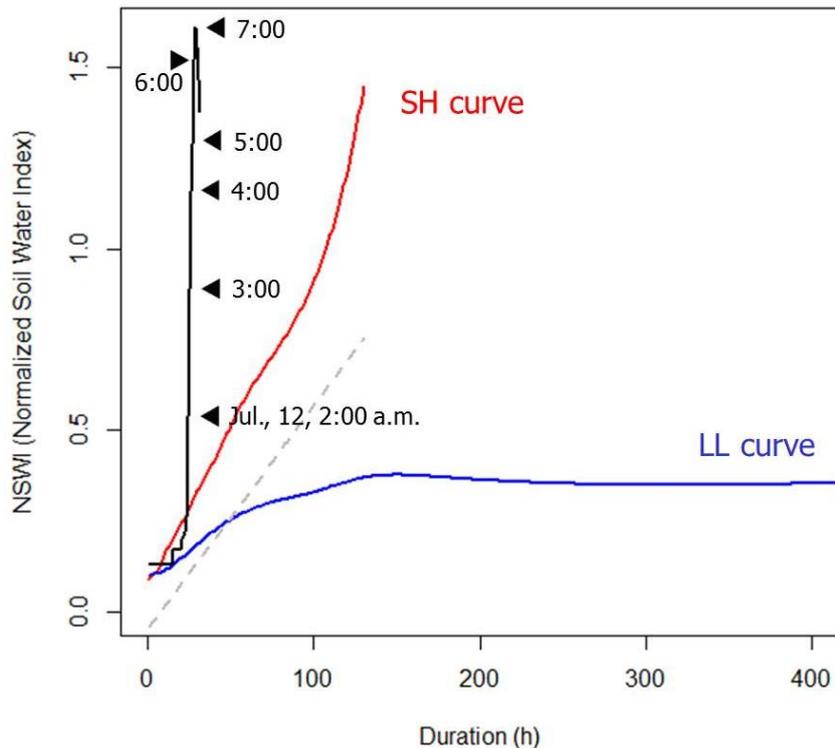


図7 手野・古城（図6A）における一連の降雨開始からのNSWIの時系列変化（黒線、赤線・青線は図2と同様。破線は線形判別関数。）

#### 4. 2. 平成25年台風第26号による伊豆大島での土砂災害

2013年10月11日3時にマリアナ諸島付近で発生した台風第26号(Typhoon Wipha)は、発達しながら日本の南海上を北上し、大型で強い勢力のまま、16日明け方に暴風域を伴って関東地方沿岸に接近した。その後、台風は関東の東海上を北上し、16日15時に三陸沖で温帯低気圧に変わった。この台風および台風から変わった温帯低気圧により、15日と16日を中心に、西日本から北日本の広い範囲で暴風、大雨となった（気象庁，2013；東京管区气象台，2013；山本ほか，2014）。とくに、東京都の大島町では、台風がもたらす湿った空気の影響で、16日未明から1時間100mmを超える猛烈な雨が数時間降り続き、24時間の降水量が800mmを超える大雨となった。14日の降り始めからの総降水量は、関東地方や東海地方では300mmを超え、また、宮城県女川町江ノ島で33.6m/s、千葉県銚子市銚子で33.5m/sの最大風速を観測するなど、各地で暴風を観測した（気象庁，2013；東京管区气象台，2013；山本ほか，2014）。この大雨により、東京都大島町本町地区を中心に、16日午前2時30分頃から斜面崩壊（土砂流）が発生し、大規模な土砂災害が発生した（山本ほか，2014）。

図8には、10月15日08時～16日07時までの24時間累積雨量分布を示す。大規模

な土砂流出が発生した本町地区(図 8 灰色域)を含む, 伊豆大島の北部を中心に 700mm を超える大雨となっていた. また, SWING system で観測された最大 NSWI の分布(5km グリッド, 図 9)を見ると, 伊豆大島全域で NSWI が 1 を超えており, 元町地区周辺では 1.7~1.9 に達していた. よって, 斜面崩壊が発生しやすい状況であったことをモニタリング出来ていた.

次に, 元町地区グリッドにおける降雨イベントのモニタリング結果と NSWI の時系列変化を図 10 に示す. 当時, 元町地区では SH 型の降雨イベントとして, 斜面崩壊が発生しやすい状況であったことがモニタリングできていた. SWING system によるモニタリングでは, 元町地区周辺では, 14 日 22 時頃から一連の降雨が始まった. その後 15 日午前 10 時ころより雨が強まり, 15 日 22 時までには NSWI が 0.6 を超えた. さらにその後も強い雨により NSWI は急上昇し, 16 日午前 2 時までに NSWI が 1 を超え, 午前 3 時には 1.3 を超えた. なお大島町では, 15 日 18 時 5 分に土砂災害警戒情報第 1 号が発表されている(東京管区気象台, 2013). 斜面崩壊(土砂流)は午前 2 時 30 分頃から発生したとされており(山本ほか, 2014), SWING system においても, 15 日夕方以降の NSWI の急上昇からは, SH 型として斜面崩壊が起こりやすい状況になりつつあることを把握可能であったと考えられる. その一方で, NSWI は伊豆大島全域で高まっていたにも関わらず, 大規模な斜面崩壊(土砂流)の発生は主に元町地区周辺である. よって, 降雨だけでなく, 地形や地質, 植生条件等を含めて, 斜面崩壊の発生個所を検討する必要がある.

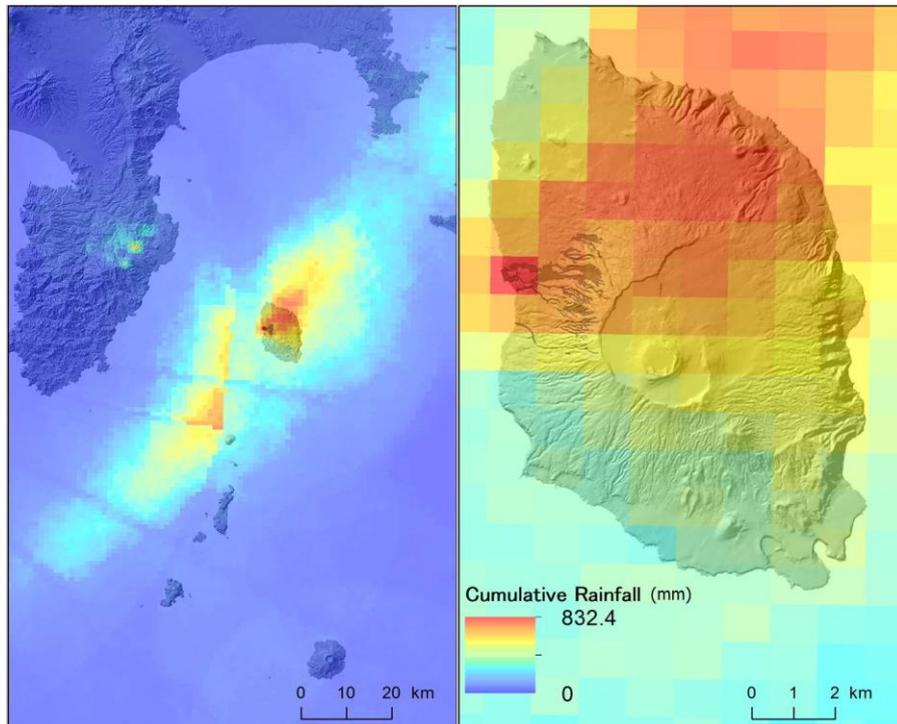


図 8 伊豆大島周辺における 2013 年 10 月 15 日 08 時～16 日 07 時までの 24 時間累積雨量 (mm) 分布 (右図は大島の拡大図). SWING system による気象庁発表の 1km メッシュ解析雨量より算出. 灰色域は土砂流出範囲 (国土地理院, 2013).

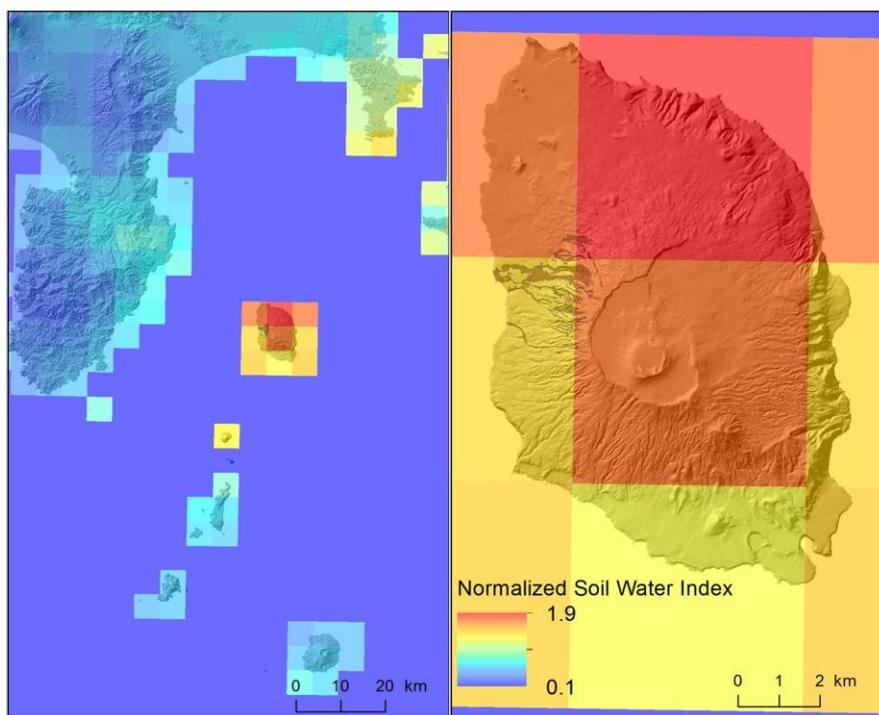


図 9 SWING system による 2013 年 10 月 15 日 08 時～16 日 07 時までの最大基準化土壌雨量指数 (Normalized Soil Water Index: NSWI) の分布 (右図は大島の拡大図). 紫色は計算領域外. 解像度は 約 5 x 5 km. 灰色域は土砂流出範囲 (国土地理院, 2013).

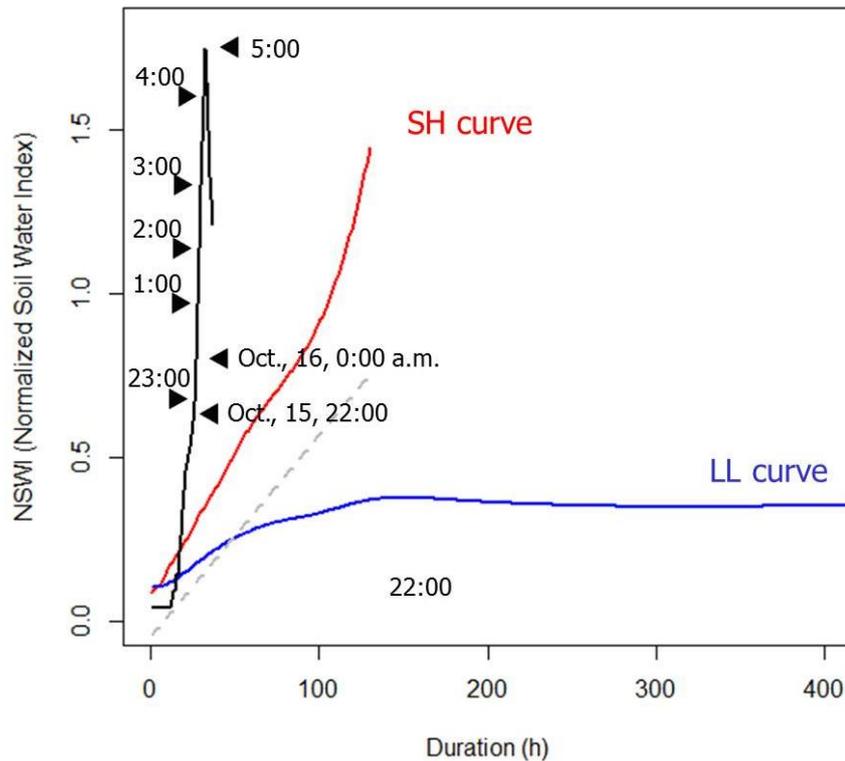


図 10 伊豆大島本町地区のグリッドにおける一連の降雨開始からの NSWI の時系列変化（黒線、赤線・青線は図 2 と同様。破線は線形判別関数。）

#### 4. 3. 平成 26 年 8 月豪雨による広島県広島市での土砂災害

2014 年 8 月 19 日には、日本海に停滞する前線に向かい、暖かく湿った空気が流れ込み、広島県では大気の状態が非常に不安定となっていた。とくに 8 月 19 日夜から 20 日明け方にかけて、広島市を中心に猛烈な雨となった。広島市安佐北区三入では 1 時間降水量が 101.0 mm、3 時間降水量が 217.5 mm、24 時間降水量が 257.0 mm となり、これまでの観測史上 1 位を記録した（広島地方气象台，2014）。この大雨の影響で、20 日朝にかけて広島市安佐南区・安佐北区で斜面崩壊・土石流による土砂災害が発生した。20 日午前 3 時過ぎから救助の要請が入り始めていることから（朝日新聞デジタル，2014 年 8 月 20 日），斜面崩壊・土石流が発生したのは午前 3 時前頃からと考えられる。

図 11 には、8 月 20 日午前 2 時～4 時までの 3 時間累積雨量の分布を示す。安佐南区・北区周辺では、3 時間で 160 mm を超える大雨となっていた。斜面崩壊・土石流が頻発した地域は限られており、降雨の分布とよく対応する。また、SWING system で観測された最大 NSWI の分布（5km グリッド，図 12）も斜面崩壊・土石流の分布とよく対応する。特に安佐南区・北区周辺では NSWI が 1 を超えており、斜面崩壊が発生しやすい状況であったと言える。

次に、安佐南区のグリッドにおける降雨イベントのモニタリング結果と NSWI の時系列変化を図 10 に示す。当時、安佐南区では LL 型の降雨イベントとして、斜面崩壊が発生しやすい状況であったことがモニタリングできていた。SWING system によるモニタリングでは、安佐南区周辺では、8 月 13 日午前 11 時頃から一連の降雨が始まった。その後、断続的な雨により、NSWI は緩やかに上昇・下降をした。しかし、20 日 1 時頃からのまとまった雨により NSWI が急上昇した。斜面崩壊・土石流の発生時刻を考えると、午前 1 時頃からの雨が斜面崩壊・土石流の引き金になったと言える。

しかしながら、斜面崩壊・土石流が発生し始めた午前 3 時頃は、NSWI は 0.8 程度であった。また、より長期の NSWI の時系列（図 14）を見ると、8 月上旬にまとまった降雨があり、NSWI が高まっていた。よって、LL 型の降雨イベントとして、より長期の降雨が斜面崩壊・土石流の発生に影響していたことが示唆された。なお広島市には 20 日午前 1 時 10 分に土砂災害警戒情報第 1 号が発表されており、SWING system でのモニタリング結果と整合的であった。

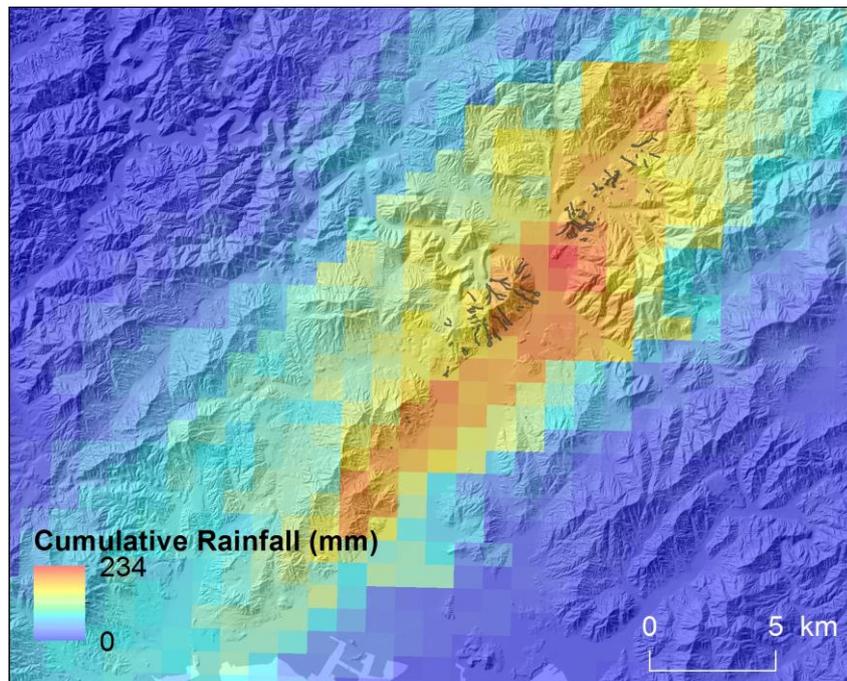


図 11 広島市周辺における 2014 年 8 月 20 日午前 2 時～4 時までの 3 時間累積雨量 (mm) 分布。SWING system による気象庁発表の 1km メッシュ解析雨量より算出。灰色域は斜面崩壊・土石流域（松四ほか，2014）。

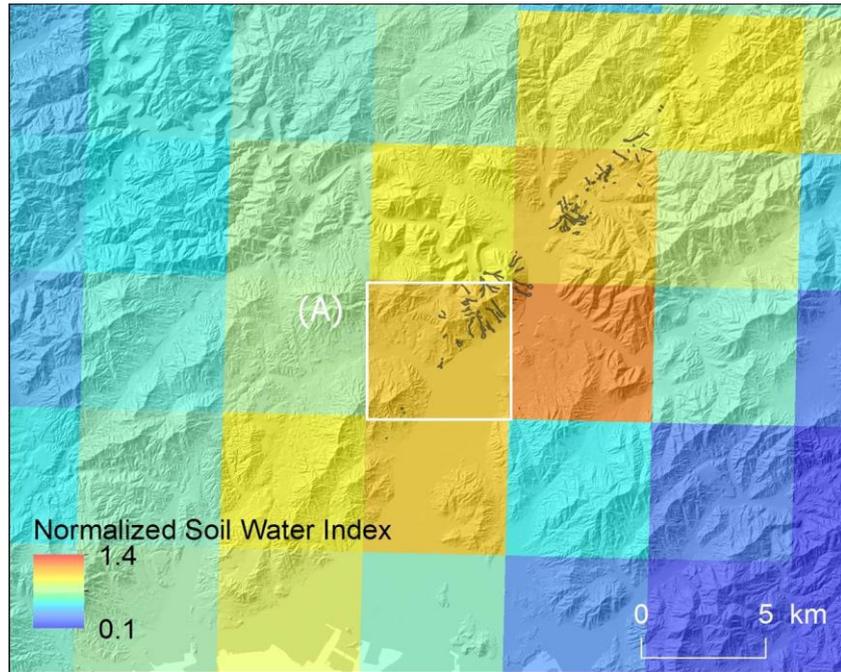


図 12 SWING system による 2014 年 8 月 20 日午前 2 時～4 時までの最大基準化土壌雨量指数 (Normalized Soil Water Index: NSWI) の分布. 解像度は 約 5 x 5 km. 灰色域は斜面崩壊・土石流域 (松四ほか, 2014). 白域 (A) は安佐南区を含むグリッド.

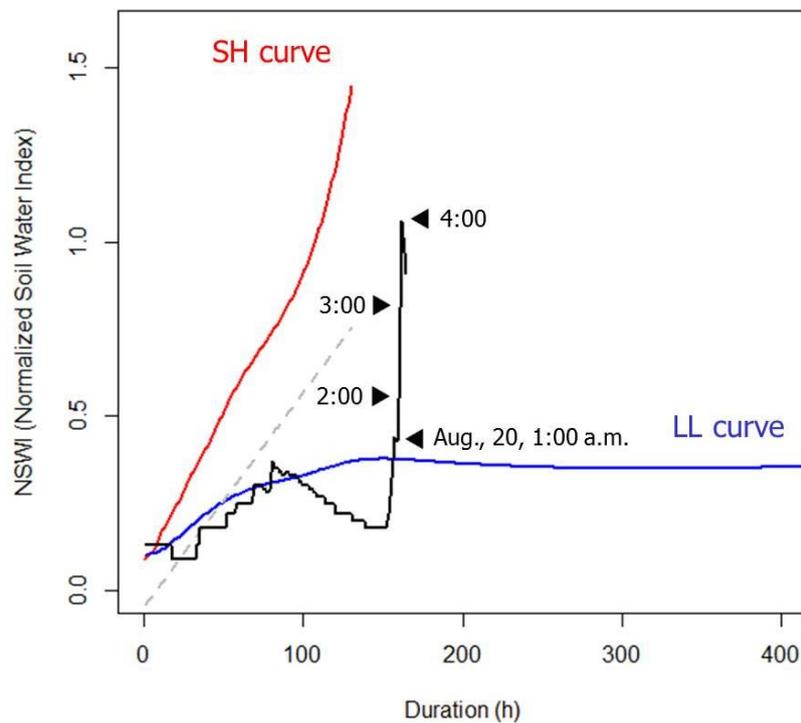


図 13 広島市安佐南区のグリッド (図 12A) における一連の降雨開始からの NSWI の時系列変化 (黒線, 赤線・青線は図 2 と同様. 破線は線形判別関数.)

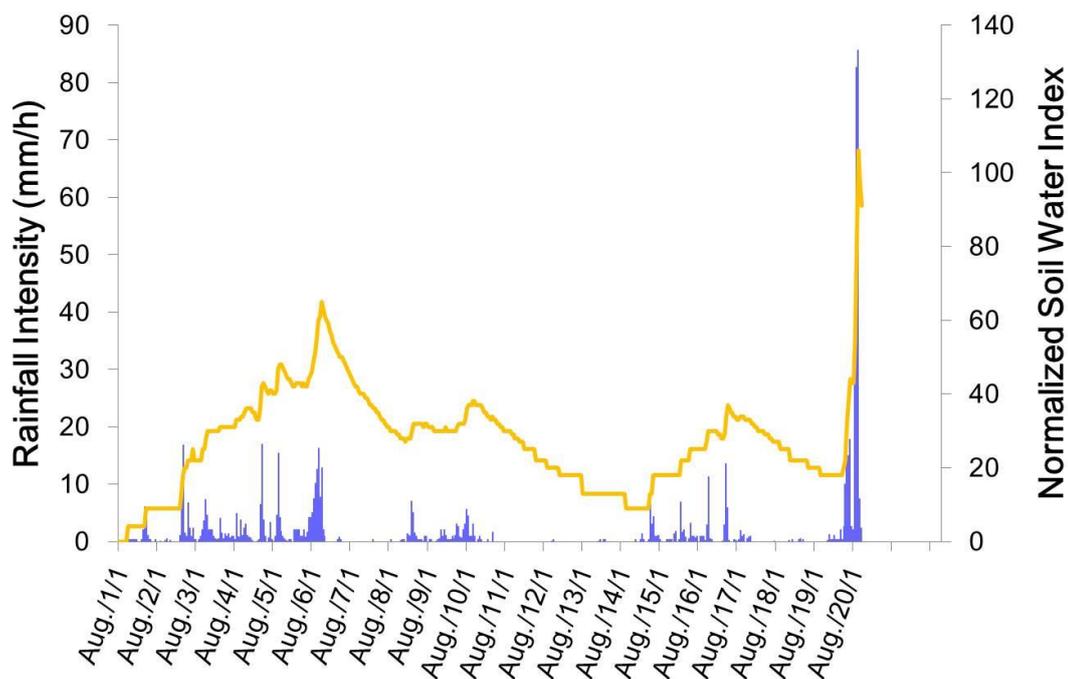


図 14 安佐南区のグリッドにおける 8 月 1 日午前 1 時から 20 日午前 6 時までの 1 時間降水量と NSWI の時系列変化.

#### 4. 4. 今後の課題

土砂災害の防災情報として、まず人命を救助でき、次に財産を救助するのに必要なリードタイムが得られることが重要である。本システムでは、上述の土砂災害事例において、斜面崩壊が起こりやすい降雨イベントの特徴を把握することが可能であった。よって、本システムを応用することで、今後より高い精度の災害情報として活用できる可能性が考えられる。例えば SH 型の際は迅速な土砂災害の警戒が必要であり、LL 型の際は長時間の警戒が必要と言える。そのためにいくつかの課題が挙げられる。

まず、本システムではとくに  $NSWI=1$  を基準として、斜面崩壊の起こりやすさの評価を行った。 $NSWI=1$  以外の基準については、今回は定性的な議論にとどまったが、斜面崩壊が発生しやすくなるタイミングの定量的な検討が課題である。このため、降水短時間予報などの予測値データを用いて、将来の降雨パターンや斜面崩壊の発生しやすいタイミングを予測することが必要である。さらに、土砂災害が発生した降雨イベントだけでなく、発生しなかった降雨イベントを用いて、より多くの事例での検証が必要である。

降雨のみに基づいた斜面崩壊の解析は、斜面における水文プロセスを直接的には考慮していないものであるが、日本列島といった広域を対象とした斜面崩壊の危険度評価の際には有用である。このため本システムでは、5 km メッシュ、1 時間間隔で降雨イベントのモニタリングを行った。これは、降雨データだけによる土砂災害の発生危

陰度の絞り込みの実用上の限界が、空間解像度 5km、時間解像度 1 時間とされているためである（岡田，2007）。しかしながら、より詳細な時空間スケールでの解析のためには、降雨データだけでなく地形や地質の情報を用いる必要がある。

## 5. まとめ

本研究では、2 種類の降雨イベント（SH 型と LL 型）の特徴に基づく、斜面崩壊を発生させる降雨イベントのリアルタイムモニタリングシステム（SWING system）の改良と運用をおこなった。本システムを用いて 2012 年～2014 年に発生した土砂災害をモニタリングし、システムを検証した。その結果、平成 24 年 7 月九州北部豪雨での阿蘇山周辺での事例、平成 25 年台風第 26 号による伊豆大島での土砂災害では、SH 型の降雨イベントとして過去 10 年間で最も斜面崩壊が発生しやすい状況であったことをモニタリングできた。また、平成 26 年 8 月豪雨による広島県広島市での土砂災害事例では、LL 型の降雨イベントとして、斜面崩壊が発生しやすい状況であることがモニタリングできた。またこれらのイベントでは、事前に斜面崩壊が発生しやすい降雨イベントの特徴を把握可能であった。つまり本システムの有用性が示され、災害情報に応用できる可能性が示唆された。

一方で、本システムでの結果を災害情報として活用するためには、いくつかの課題がある。今後は降水短時間予報などの予測値の活用や、災害非発生事例による検証により、斜面崩壊が発生しやすい降雨イベントを事前に予測することが課題である。また、地形・地質を含めた解析が必要である。

## 引用文献

- 朝日新聞デジタル（2014 年 8 月 20 日）『広島で大規模土砂災害 39 人死亡，7 人行方不明』，<http://www.asahi.com/articles/ASG8N22FWG8NPITB002.html>（2014 年 10 月 6 日参照）
- 岡田憲治（2007）土壌雨量指数による土砂災害発生危険度予測の現状。「土と基礎」，55（9），4-6.
- 岡田憲治・牧原康隆・新保明彦・永田和彦・国次雅司・斉藤 清（2001）土壌雨量指数。「天気」，48，349-356.
- 気象庁（2013）台風第 26 号による暴風・大雨，平成 25(2013)年 10 月 14 日～10 月 16 日  
[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2013/20131014/jyun\\_sokuji20131014-1016.pdf](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2013/20131014/jyun_sokuji20131014-1016.pdf)（2014 年 10 月 6 日参照）
- 建設省河川局砂防部（1984）『総合土石流対策（II）土砂災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針（案）』，建設省河川局砂防部。

- 国土交通省河川局砂防部・気象庁予報部・国土交通省国土技術政策総合研究所（2005）『国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法（案）』，国土交通省河川局砂防部・気象庁予報部・国土交通省国土技術政策総合研究所。
- 国土地理院（2013）平成 25 年（2013 年）台風第 26 号及び第 27 号による大雨に関する情報，<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h25-taihu26-index.html>（2014 年 10 月 6 日参照）
- 齋藤 仁・中山大地・泉 岳樹・松山 洋（2011）土砂災害を引き起こす降雨のリアルタイムモニタリング—2 種類の降雨イベントに着目した SWING system の構築と検証—。GIS—理論と応用 19, 25-34.
- 地盤工学会（2006）『地盤工学・実務シリーズ 23 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。
- 武居有恒（1983）『地すべり・崩壊・土石流—予測と対策』，鹿島出版会。
- 東京管区气象台（2013）平成 25 年台風第 26 号に関する東京都気象速報。[http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub\\_index/bosai/disaster/ty1326/ty1326\\_tokyo.pdf](http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/bosai/disaster/ty1326/ty1326_tokyo.pdf)（2014 年 10 月 6 日参照）。
- 土志田正二・内山庄一郎・石澤友浩・齋藤 仁（2012）平成 24 年 7 月九州北部豪雨における土砂災害調査（速報）。防災科学技術研究所：<http://lweb1.ess.bosai.go.jp/disaster/201207rain/201207rain.html>（2014 年 10 月 6 日参照）。
- 広島地方气象台（2014）平成 26 年 8 月 19 日から 20 日にかけての広島県の大雨について。[http://www.jma-net.go.jp/hiroshima/siryu/20140820\\_sokuhou.pdf](http://www.jma-net.go.jp/hiroshima/siryu/20140820_sokuhou.pdf)（2014 年 10 月 6 日参照）
- 福岡管区气象台（2012）『災害時気象速報 平成 24 年 7 月九州北部豪雨』，福岡管区气象台：[http://www.jma-net.go.jp/fukuoka/chosa/kisho\\_saigai/20120711-14.pdf](http://www.jma-net.go.jp/fukuoka/chosa/kisho_saigai/20120711-14.pdf)（2014 年 10 月 6 日参照）
- 松四雄騎・齋藤 仁・福岡 浩・古谷 元（2013）平成 24 年 7 月九州北部豪雨による阿蘇山カルデラ壁および中央火口丘での斜面崩壊。京都大学防災研究所年報 56B, 237-241.
- 松四雄騎・鄒 青穎・千木良雅弘（2014）2014 年広島豪雨災害時の斜面崩壊・土石流について（速報その 3：崩壊の発生密度と地質条件・降雨条件），[http://www.slope.dpri.kyoto-u.ac.jp/disaster\\_reports/20140820Hiroshima/201408Hiroshima\\_Rep3.html](http://www.slope.dpri.kyoto-u.ac.jp/disaster_reports/20140820Hiroshima/201408Hiroshima_Rep3.html)（2014 年 10 月 6 日参照）。
- 山本晴彦・小林北斗・山本実則（2014）2013 年台風 26 号により伊豆大島で発生した豪雨と土砂災害の特徴。自然災害科学 32, 337-351.
- IPCC（2007）Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- Keefer, D. and Larsen, M.（2007）Assessing landslide hazards. Science, 316, 1136–1138.

- Keefer, D., Wilson, R., Mark, R., Brabb, E., Brown, W., Ellen, S., Harp, E., Wieczorek, G., Alger, C. and Zatkan, R. (1987) Real-time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, 238, 921–925.
- Larsen I., Montgomery, D. and Korup, K. (2010) Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nature Geoscience*, 3, 247–251.
- Onodera, T., Yoshinaka, R. and Kazama, K. (1974) Slope failures caused by heavy rainfall in Japan. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology*, 15, 191–200.
- Osanai, N., Shimizu, T., Kuramoto, K., Kojima, S. and Noro, T. (2010) Japanese early-warning for debris flows and slope failures using rainfall indices with Radial Basis Function Network. *Landslides*, 7, 325–338.
- Saito, H., and Matsuyama, H. (2012) Catastrophic landslide disasters triggered by record-breaking rainfall in Japan: Their accurate detection with Normalized Soil Water Index in the Kii Peninsula for the year 2011. *SOLA (Scientific Online Letters on the Atmosphere)* 8, 81-84.
- Saito, H., Nakayama, D. and Matsuyama, H. (2010a) Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity–duration threshold in Japan. *Geomorphology*, 118, 167–175.
- Saito, H., Nakayama, D. and Matsuyama, H. (2010b) Two types of rainfall conditions associated with shallow landslide initiation in Japan as revealed by Normalized Soil Water Index. *SOLA (Scientific Online Letters on the Atmosphere)*, 6, 57–60.
- Saito, H., Korup, O., Uchida, T., Hayashi, S., and Oguchi, T. (2014) Rainfall conditions, typhoon frequency, and contemporary landslide erosion in Japan. *Geology*, in press.
- Wieczorek, G. and Glade, T. (2005) Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob, M. and Hunger, O. eds. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, Berlin: Springer, 325–362.