

# 土砂移動マグニチュードと土砂災害の特徴の関連性及び 早期算出方法

内田太郎・林 真一郎

## 1. はじめに

豪雨や地震により、土砂災害が多発した場合、いち早く被害の程度を把握し、適切な体制を整えることが、被害の拡大の防止、早期の復旧・復興のために重要である。これまで、土砂災害については、被災者数や被災家屋数などにより災害の程度が示されてきている。

しかし、被災者数や被災家屋数は、判明するのに時間を要する。このため、応援体制の整備（体制の規模の決定）等、災害直後の対応には適さない。また、被災者数や被災家屋数といった指標は、自然現象の物理的な規模と社会状況（集落の有無、対策の有無）が重なり合って決まるもので、気候変動の影響や過去の施策の効果などを客観的に評価するには適さない。また、一般に防災の分野では、①自然現象の物理的な規模（地震のマグニチュードなど）と②社会状況の影響を受けて決まる被害の程度（被災者数など）について、それぞれ指標が用いられている。

そこで、国土技術政策総合研究所砂防研究室（以下「国総研」という。）では、土砂災害の物理的な規模の表現方法に関する研究を進めてきた。国総研では、土砂災害に関する自然現象の物理的な規模の指標として、土砂移動により失われた位置エネルギーと関連性のある「土砂移動マグニチュード（以下「*SMM*」という。）」を提案した<sup>1)</sup>。

しかしながら、*SMM*は現時点まで本格的に運用するまでに至っていない。本格運用に向けては、災害後速やかに*SMM*を算出する手法を構築することが必要である。特に、斜面崩壊・土石流が広域で同時多発した場合に適用できる手法を開発することが求められる。さらに、その上で、*SMM*の値から容易に災害の規模や特徴が想起できるようにすることが必要となる。

そこで、本研究では、これらの課題の解決に向けて、以下の2点について改善・検討した。

- 1) 斜面崩壊・土石流が同時多発した場合であっても、災害後速やかに*SMM*を算出する手法として、代表事例の調査から*SMM*を概算する手法の適用可能性を検証する。
- 2) *SMM*から災害規模を容易に想起できるように既往の代表的な災害の*SMM*を算出し、*SMM*ごとの土砂移動現象の規模・特徴、被災状況、対応状況を分析・整理する。

## 2. 既往の土砂移動マグニチュード

内田ら（2005）<sup>1)</sup>は、土石流、崖崩れ、地すべりなど多様な土砂移動現象について、統一的に評価できる指標として、下記の式を提案した。

$$SMM = \log_{10}(HV) \quad \text{式(1)}$$

ここでは、*SMM*は移動現象ごとの土砂移動マグニチュードで以下では単に*SMM*と呼ぶ。*V*は移動土砂量（ $\text{m}^3$ ）、*H*は移動比高（ $\text{m}$ ）である。ここで、移動比高は1つの土砂移動現象の移動開始点と堆積域末端の標高差として算出する。

さらに、林ら（2014）<sup>2)</sup>は、1つの豪雨で崩壊や土石流が同時多発する現象に対して、個別の土砂移動現象を積算した「1つの豪雨や地震（以下「1イベント」という。）による土砂移動マグニチュード（*SMM<sub>event</sub>*）」を式(2)で算出した。

$$SMM_{event} = \log_{10}\left(\sum_{i=1}^n H_i V_i\right) \quad \text{式(2)}$$

ここで、*n*は1イベントで発生した土砂移動現象数、*H<sub>i</sub>*、*V<sub>i</sub>*はそれぞれ1イベントで発生した土砂移動現象のうち*SMM*が大きい方から*i*番目の土砂移動現象の移動比高、移動土砂量とする。

## 3. 同時多発災害の算出方法の検討

1イベントで1000以上の斜面崩壊が発生することも珍しくない。このような場合、全ての土砂移動現象の移動土砂量と移動比高を計測し、*SMM<sub>event</sub>*を求めることは多大な労力を要するため、災害直後の速やかな*SMM*の算出には適さな

い。実際、過去のイベントにおいても、全ての土砂移動現象の移動土砂量及び移動比高の調査が行われている事例は数少ない。一方、*SMM*の大きい土砂移動現象が *SMM<sub>event</sub>* に占める割合が大きいと考えると、*SMM*の大きい土砂移動現象のみでも評価ができれば、一定の精度で *SMM<sub>event</sub>* を評価できる可能性が考えられる。そこで、本研究では、*SMM*の大きい土砂移動現象のみを評価した場合の *SMM<sub>event</sub>* の推定誤差を検証する。具体的には、*SMM*が上位の  $n_c$ 個の事象に関する土砂移動マグニチュード (*SMM<sub>c</sub>*) を想定し、*SMM<sub>c</sub>* が *SMM<sub>event</sub>* に比べて、どの程度過小評価になるか検証する。なお、本研究では、データの取得が比較的容易な崩壊地ごとの崩壊面積のデータセットを用いて、分析することとした。

崩壊面積 (*A*) と崩壊土砂量 (*V*) の関係については数多くの研究があり、一般に以下の式で定式化されている。

$$V = \alpha A^\beta \tag{3}$$

ここで、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、は係数で、 $\beta$ は1.1~1.6程度であり、広く用いられている Guzzetti の経験式では1.45である<sup>3)</sup>。また、崩壊面積と移動比高 (*H*) の関係について、全国の深層崩壊の事例<sup>4)</sup>や中越地震、岩手・宮城内陸地震、熊本地震の崩壊地<sup>5)</sup>

を対象に分析結果がある。これらの研究では、両者の関係は以下の式で表すことができることが示されている。

$$H = \chi A^\delta \tag{4}$$

ここで $\chi$ 、 $\delta$ は係数で、 $\delta$ は前述の事例<sup>4),5)</sup>ではいずれのケースも0.5程度である。そこで、式(1)~(4)より式(5)がえられる。

$$SMM_c = \log_{10}(\alpha \chi \sum_{i=1}^{n_c} A_i^{(\beta+\delta)}) \tag{5}$$

ここで、 $A_i$ は1イベントで発生した土砂移動現象のうち崩壊面積が *i*番目に大きい崩壊地の崩壊面積とする。ここで、 $\beta+\delta$ は、前述の一般的に用いられている値 ( $\beta=1.45$ 、 $\delta=0.5$ ) から概ね2と仮定すると *SMM<sub>event</sub>* と *SMM<sub>c</sub>* の差 ( $\Delta SMM$ ) は式(6)が得られる。

$$\Delta SMM = \log_{10}(\sum_{i=1}^n A_i^2 / \sum_{i=1}^{n_c} A_i^2) \tag{6}$$

そこで、本研究では、式(6)を用いて、 $n_c$ 及び  $n_c/n$  と  $\Delta SMM$  の関係を算出する。算出に用いたデータセットを表-1に整理した。算出結果を図-1に示す。図に示したように、イベントによって差はあるものの、*SMM*上位1割程度の土砂移動現象の調査ができれば、*SMM<sub>event</sub>* の推定誤差は0.2以下となると考えられた。また、深層崩壊等の大規模崩壊が多発したイベント（紀伊半島大水害、岩手・宮城内陸地震、中越地震）では *SMM*上位1%程度の土砂移動現象の調査で *SMM<sub>event</sub>* の推定誤差は0.1以下となる可能性が考えられた。

土砂移動現象数が非常に多い場合、上位10%であっても、調査する現象数は多くなる。そこで、調査する土砂移動現象数と  $\Delta SMM$  の関係を整理した。その結果、上位の100現象を調査すれば、*SMM<sub>event</sub>* の推定誤差は0.3以下となり、多くの場合で0.1以下となると考えられた。すなわち、多数の崩壊が発生する場合、大規模な崩壊も併せて発生するため、上位の100現象の調査で *SMM<sub>event</sub>* の推定誤差が小さくなると考えられる。

#### 4. 既往災害の土砂移動マグニチュード算出

##### 4.1 対象災害の抽出

対象災害は、表-2に示す16事例とした。ここ

表-1 検討対象事例

	発生年	誘因	崩壊数*	大規模崩壊 <sup>※</sup>
紀伊半島大水害	2011	豪雨	3077	119
九州北部豪雨	2017	豪雨	7676	5
熊本地震	2016	地震	1756	40
戸島別	2016	豪雨	691	6
岩手宮城内陸地震 <sup>#</sup>	2008	地震	2964	63
中越地震	2004	地震	1422	19
沙流川	2003	豪雨	4994	12
新居浜	2004	豪雨	1694	2
宮川	2004	豪雨	99	1
広島	1999	豪雨	264	0

\*: 検討に用いたデータセットの崩壊数 ※崩壊面積1ha以上の崩壊  
#: 荒砥沢の地すべりは除外

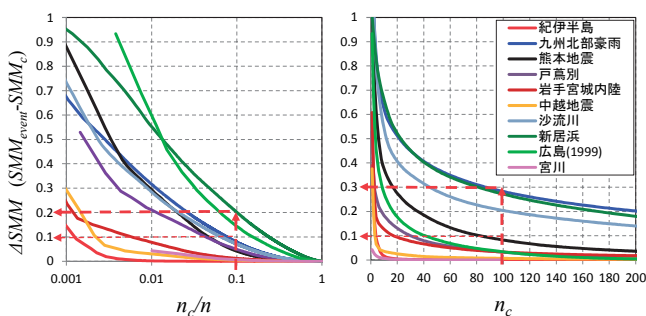


図-1 同時多発イベントの *SMM<sub>event</sub>* の推定誤差

では、2000年以降に発生した土砂災害であって、都道府県の依頼等により国総研において専門家派遣を実施した災害を対象とした。その上で、*SMM<sub>event</sub>*の算出に資するデータ・資料が取得可能だった16災害とした。

対象災害は、災害範囲全域についてのデータ・資料が存在していることが望ましいが、前述の通り、全域で調査が行われている事例は少ない。3章の分析から、規模の大きい現象を取り込めている場合、*SMM<sub>event</sub>*の推定誤差は比較的小さいと考え、深層崩壊など大規模な現象が調査されている災害は対象災害に含めた。また、西日本豪雨のように災害範囲が広域な場合は被害が集中した範囲のみを対象とした調査が行われていることが多いが、調査範囲が十分に広いものは対象に加えた。

4.2 算出方法

本研究では、式(2)を用いて、土砂移動マグニチュードを算出した。

算出に用いた移動土砂量のデータは、2010年以降の災害事例についてはレーザープロファイラによる地形計測データの差分(LP差分)に基づくものが多い。一方、2010年以前のイベントの多くは、崩壊面積に現地調査等で求めた平均崩壊深を乗じることによって算出されたデータが多い(表-2)。

また、用いた移動比高のデータについては、全数調査されている事例は少ない。そこで、本研究では、文献・資料等に示されている図面から計測することにより求めることを基本とした。ただし、土砂移動現象が単発のイベントを除き、全ての土

砂移動現象について、移動比高が算出できる図面等がなかったため、代表事例のみ、移動比高を計測した。代表事例の抽出にあたっては、3章の検討も踏まえて、深層崩壊等規模大きい土砂移動現象が生じている事例は大規模現象を優先的に抽出し、移動比高を計測した。その他のイベントでは、人的または家屋被害が集中した地域の現象を主な対象として、移動比高を計測した。事例数は、イベントによって異なるが、10~20程度である。

4.3 算出結果

算出結果を表-2に示す。表からわかるように、*SMM<sub>event</sub>*ごとに、土砂移動現象の特徴が異なる。すなわち、*SMM<sub>event</sub>*が概ね10以上の災害は、深層崩壊が多発したイベント(紀伊半島大水害、岩手宮城内陸地震、中越地震)であり、複数の大規模な河道閉塞が生じた。

一方、*SMM<sub>event</sub>*は9程度と評価された現象は、西日本豪雨(広島県のみ)や九州北部豪雨(福岡県のみ)のように、斜面崩壊・土石流が広域(複数の市町にまたがる範囲)で多発したイベントであった。これらのイベントでは、土砂・洪水氾濫による被害が生じている。

*SMM<sub>event</sub>*が8程度の現象は、①比較的狭い範囲(概ね1市町内)で斜面崩壊・土石流が同時多発した災害(平成26年広島市、防府市、丹波市の土砂災害など)、②概ね1つの土石流危険渓流内のみで生じた場合であっても、極めて規模の大きい(移動土砂量が概ね10万m<sup>3</sup>)現象(南木曾、伊豆大島、水俣市集川の土石流災害など)の2つのタイプが見られた。*SMM<sub>event</sub>*が6~7は比較的

表-2 土砂移動マグニチュード算出の結果

発生日	災害名	<i>SMM<sub>event</sub></i>	移動土砂量の算出			移動比高の算出		人的被害	家屋被害
			土砂量(m3)	対象現象	計測方法	対象現象			
2011	紀伊半島大水害	10.5	10,000万	概ね全域	LP差分+崩壊地判読	代表事例(大規模)	62	190	
2008	岩手・宮城内陸地震	10.4	13,000万	全域	LP差分	代表事例(大規模)	18	3	
2004	新潟県中越地震	9.9	10,000万	全域	崩壊面積から推定	代表事例(大規模)	4	93	
2005	台風12号(九州地方)	9.9	2300万	大規模のみ	現地調査+崩壊地判読	代表事例(大規模)	11	76	
2018	西日本豪雨(広島県)	9.4(9.6)	800万	概ね全域	LP差分+崩壊地判読	代表事例(被害集中)	87	711*	
2017	九州北部豪雨(筑後川右岸)	9.3(9.5)	1100万	概ね全域	LP差分	代表事例(被害集中)	41	1,134	
2015	関東・東北豪雨(日光芹沢流域)	8.3(8.5)	80万	全域	LP差分	代表事例(被害集中)	0	7	
2014	長野県南木曾土石流	8.1	10万	全域	LP差分	全数	1	13	
2014	広島豪雨	8.0	50万	全域	LP差分	全数	74	429	
2009	山口県防府市	8.0	240万	被害集中範囲	LP差分+崩壊地判読	代表事例(被害集中)	14	91	
2013	伊豆大島豪雨	7.9	18万	被害集中範囲	現地調査+崩壊地判読	代表事例(被害集中)	39	203	
2014	京都府丹波市	7.8	100万	全域	LP差分	全数	1	43	
2006	長野県岡谷市	7.4	10万	被害集中範囲	現地調査+崩壊地判読	代表事例(被害集中)	8	27	
2003	熊本県水俣市集川	7.5	9万	全域	現地調査+崩壊地判読	全数	19	16	
2003	福岡県大宰府市	6.7	1.5万	全域	現地調査+崩壊地判読	全数	1	40	
2013	秋田県仙北市	6.4	1.5万	全域	LP差分	全数	6	6	

※人的被害は死者・行方不明者数、+家屋被害は全壊・半壊・一部損壊戸数、+は2019年2月時点の値、()内は計測した移動比高の90%値を用いて算出した結果

規模の大きい土石流・斜面崩壊（移動土砂量が1万m<sup>3</sup>程度）や複数の斜面崩壊・土石流が集中する現象であった。

次に、人的被害についても整理する。近年においては、*SMM<sub>event</sub>*が9程度の現象では、数10名の人的被害が出るなど被害の程度が極めて深刻な事例が続いている。また、*SMM<sub>event</sub>*が8程度の土砂災害では、数名から数10名の人的被害が生じた場合がある。さらに、*SMM<sub>event</sub>*が6～7の現象であっても、人的被害が生じた場合がある。

過去の対応状況を見ると、*SMM<sub>event</sub>*が概ね10以上の現象では、大規模な河道閉塞が生じるなど応急・復旧対策の期間や住民の避難の期間が長期化（数年以上）するケースが多い。また、過去の*SMM<sub>event</sub>*が9以上の現象では、国による直轄事業による復旧・復興に向けた対策が実施されてきた。

以上の算出結果を踏まえ、土砂移動マグニチュードごとの過去の代表的災害事例を整理した上で、各マグニチュードに分類された災害の特徴、被害の状況について整理し、結果を図-2に示した。

## 5. おわりに

本研究では、土砂移動マグニチュードの本格運用のために、まず、早期に土砂移動マグニチュードを算出する手法を検討し、規模の大きい現象を中心に全体の10%程度の事例の調査から、土砂移動マグニチュードを概算する手法の妥当性を示した。その上で、土砂移動マグニチュードから容易に災害の特徴がイメージできるように、近年の代表的な土砂災害の土砂移動マグニチュードと土砂移動現象の特徴、被害の規模の関係を明確にした。

これらの成果を活用し、災害発生直後（数日以内）に土砂移動マグニチュードを算出、公表することにより、今まで以上に行政及び社会全体が災害の規模を客観的に認識できるようになること、それを踏まえた効率的な応援体制の整備など迅速な対策が実施できるようになることが期待される。また、気候変動の影響などが客観的に評価できるようになることが期待される。

最後に、今後の技術開発課題について整理する。衛星リモートセンシングなどの観測技術や画像の自動判読技術などの画像解析技術を組み合わせることで、即時性が高めていくことが重要である。さらに、衛星画像を用いることにより、

**SMM 10**  
 特徴 規模の大きい台風や地震によって生じる現象で、崩壊土砂量100万m<sup>3</sup>以上の**深層崩壊が複数発生**するとともに**数1000箇所**の崩壊・土石流等が**同時多発**する現象。深層崩壊による**大規模な河道閉塞**が生じ、影響が長期化するケースが多い。  
 過去の事例 2011年紀伊半島大水害、2008年岩手宮城内陸地震、2004年中越地震  
 過去の事例の被害状況 大規模な河道閉塞により、長期間の避難が必要な場合がある。土砂災害により**数100戸以上**の人家が被災し、**数10人**の人的被害が生じる場合がある。

**SMM 9**  
 特徴 **広い範囲(複数の市町にまたがって)**で**斜面崩壊・土石流が多発(1000以上)**する現象。**土砂・洪水氾濫**による被害が生じ、影響範囲が広域に及ぶ。  
 過去の事例 2018年西日本豪雨(広島県)、2017年九州北部豪雨(筑後川右岸流域)  
 過去の事例の被害状況 土砂災害により**数100戸以上**の人家が被災し、**数10人**の人的被害が生じる場合がある。

**SMM 8**  
 特徴 ①比較的狭い範囲(1市町内)に集中的に**100以上の斜面崩壊・土石流が多発**する現象や②**極めて規模の大きい(移動土砂量10万m<sup>3</sup>程度)**の土砂災害。近年では、1～2年に1度程度の頻度で国内で発生。  
 過去の事例 ①2014年広島豪雨、2009年防府市、  
 ②2013年伊豆大島土砂災害、2014年南木曾土砂災害、  
 過去の事例の被害状況 土砂災害により**数10戸から数100戸**の人家が被災し、**数人から数10人**の人的被害が生じる場合がある。

**SMM 6～7**  
 特徴 ①比較的狭い範囲(1市町内)に集中的に**複数の斜面崩壊・土石流が同時発生**する現象や②**規模の大きい(移動土砂量1万m<sup>3</sup>程度)**の土砂災害。  
 近年の事例 ①2006年岡谷土砂災害、  
 ②2013年秋田県仙北市の土砂災害など  
 近年の事例の被害状況 土砂災害により**数戸から数10戸**の人家が被災し、**数人から10数人**の人的被害が生じる場合がある。

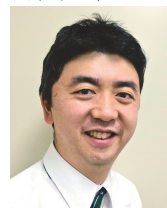
図-2 土砂移動マグニチュード別の土砂災害特徴と過去の事例

発展途上国など海外の災害への適用可能となれば、緊急支援体制の整備などにも活用が期待される。

## 参考文献

- 1) 内田太郎ほか：土砂災害の規模の表現方法に関する一考察、砂防学会誌、57(6)、pp.51～55、2005
- 2) 林真一郎ほか：土砂災害被害と降雨確率規模、災害発生頻度の関係、土木技術資料、第56巻、第1号、pp.40～43、2014
- 3) Guzzettiほか：Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. Earth Planet. Sci. Lett., Vol.279, pp.222-229, 2009
- 4) 西口幸希ほか：深層崩壊の発生に伴う土砂移動現象と被害発生位置の実態、砂防学会誌、68(6)、pp.31～41、2016
- 5) 坂井佑介ほか：地震による斜面崩壊の影響範囲の推定に関する研究、第9回土砂災害に関するシンポジウム論文集、pp.145～150、2018

内田太郎



国土交通省国土技術政策  
 総合研究所土砂災害研究  
 部砂防研究室長  
 Taro UCHIDA

林 真一郎



研究当時 北海道大学農  
 学部特任助教、現 土木  
 研究所土砂管理研究グ  
 ループ火山・土石流チ  
 ム主任研究員  
 Shin'ichiro HAYASHI