

# 地形面の変化に基づく斜面崩壊地形の数学表現

植田 允教\*・根本 達也\*・サムブッタ ダル\*・ベンカテッシュ ラガワン\*

## Mathematical Expression of Slope Failure Features Based on Topographic Surface Transformation

Mitsunori UEDA\*, Tatsuya NEMOTO\*, Sambuddha DHAR\* and Venkatesh RAGHAVAN\*

\*大阪公立大学大学院理学研究科 Graduate school of Science, Osaka Metropolitan University, 3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan. E-mail: so22000t@st.omu.ac.jp

キーワード：地形変化，局所座標系，斜面崩壊地，地形分類

Key words：Topographic transformation, Local coordinate system, Slope failure area, Terrain classification

### 1. はじめに

斜面崩壊は，世界中で発生する代表的な地質災害の一つであり，崩壊の発生によって形成される地形面は複数の形態的特徴に区分される (Schuster *et al.*, 1978). そのため，地形面の特徴は，崩壊地の識別に有効だけでなく，規模，形状，流下方向や移動土量を明らかにするための重要な情報を提供する。したがって，斜面崩壊地形を数学的に表現し，自動的に識別する手法の開発が重要である。

本研究では，斜面崩壊の発生域を斜面崩壊地とし，地形面の変化から崩壊地形を数学的に表現するとともに，崩壊地における形態的特徴の識別を行う。

### 2. 斜面崩壊地形の数学表現

#### 2.1 斜面崩壊地形の定義

斜面崩壊地形は，斜面崩壊によって形成される地形であり，滑落崖とその直下にある移動体から構成される。斜面崩壊地の概念を第 1 図に示す。滑落崖は，斜面崩壊の地下にあるせん断面が地表に露出することで形成される急崖をなす地形面である。せん断面を境にして既存の斜面から切り離された領域を移動体と呼び，移動体における地形面を移動体上面とする。移動体上面をせん断沈降面と末端隆起面に分類する。せん断沈降面は，斜面の構成物質が移動することで標高が低下した地形面とし，末端隆起面は，崩壊による押出または崩積土の堆積により標高が上昇した面とする。

斜面崩壊地形は，滑落崖と移動体上面（せん断沈降面もしくは末端隆起面）に分類される。一方，変化が認められない地形面を不動域と定義する。

#### 2.2 時間経過による地形面の変化

3次元空間を  $\Omega$  とし， $\Omega$  には原点  $O$ ，水平東向きに  $x$  軸，水平北向きに  $y$  軸，鉛直上向きに  $z$  軸を持つ座標系  $O-xyz$  が設定されているとする。  $\Omega$  において，ある時間における地形面があるとし，一価関数  $z=f(x, y)$  で表現できるとする。ただし， $z=f(x, y)$  は任意の閉区間  $[a, b]$  で連続，開区間  $(a, b)$  で微分可能であるとする。過去から現在に向かって時間を切り取って並べた離散的な数列を  $T = \{1, 2, \dots, t, \dots, n\}$  とし，斜面崩壊前のある時間  $t \in T$  における地形面を  $S_t: z_t = f_t(x, y)$ ，崩壊後の地形面を  $S_{t+1}: z_{t+1} = f_{t+1}(x, y)$  と定義

する。  $S_t$  と  $S_{t+1}$  の局所的な相対的变化に着目する。鉛直方向における曲面の変化は，ある基準面からの変化であり，地形面では標高差に対応する (式 (1))。よって，地形面の変化は各地点において標高が上がった地点  $P_u$  と標高が下がった地点  $P_s$  に分けられる (式 (2) (3))。

$$\delta_t(x, y) = f_{t+1}(x, y) - f_t(x, y) \quad (1)$$

$$P_u(x, y, z) = \{P_{t+1}(x, y, f_{t+1}(x, y)) \in S_{t+1} | \delta_t(x, y) > 0\} \quad (2)$$

$$P_s(x, y, z) = \{P_{t+1}(x, y, f_{t+1}(x, y)) \in S_{t+1} | \delta_t(x, y) < 0\} \quad (3)$$

曲面の幾何的な変化を導入するため，  $S_{t+1}$  上の点  $P_{t+1}$  を含む近傍の領域  $U$  をとり，  $P_{t+1}$  と同じ  $(x, y)$  座標で  $S_t$  上にある点  $P_t$  を考える。  $P_t$  における地上方向を向く単位法線ベクトルを  $b_{pt}$  とし，平行移動により始点を  $P_{t+1}$  に移したベクトルを  $b_{pt+1}$  と定義する。近傍の領域  $U$  と  $\phi(U)$  の間に同相写像  $\phi$  を定めると，  $U$  における局所座標系  $\phi(U) = (\mathbf{d}, \mathbf{s}, \mathbf{a})$  を定義できる。3つのベクトルは次の通りとする。

$\mathbf{d}$ : 地形面の最大傾斜方向の単位ベクトル

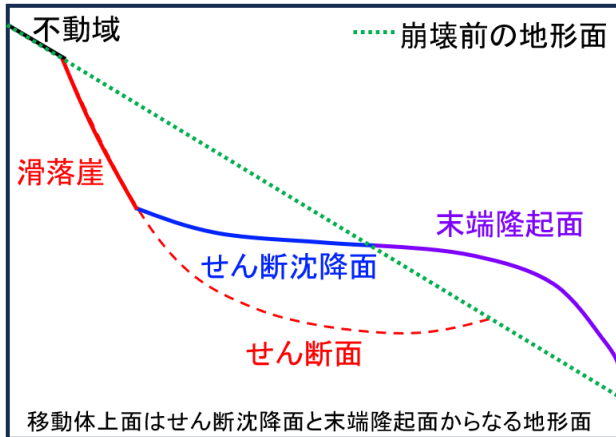
$\mathbf{s}$ : 地形面の傾斜している方向からみて，水平右方向を向く単位ベクトル

$\mathbf{a}$ : 地形面に垂直でかつ地上方向を向く単位法線ベクトル  
各ベクトルはそれぞれ直交する関係にある。傾斜角  $\theta$  は，  $U$  に対する接ベクトル平面  $\mathbf{ds}$  と水平面のなす角とする。傾斜角  $\theta$  を一定とした場合，  $\phi(U)$  上にあるベクトル  $b_{pt+1}$  は  $|b_{pt+1}| = 1$  であるため，  $\mathbf{a}$  と  $b_{pt+1}$  間の変化は  $\phi(U)$  における天頂角と方位角により定まる。それぞれを相対傾斜角  $\phi$  と相対傾斜方位  $\mu$  と呼ぶ (第 2 図)。  $\phi$  は  $\mathbf{a}$  と  $b_{pt+1}$  のなす角，  $\mu$  は  $\mathbf{d}$  と  $\mathbf{q}$  のなす角であり，  $\mathbf{q}$  は  $b_{pt+1}$  を  $\mathbf{ds}$  平面上に投影したベクトルである。よって，  $S_t$  から  $S_{t+1}$  への局所的な変化は，  $\delta$ ，  $\theta$ ，  $\phi$ ，  $\mu$  により定まる。また，不動域は，  $\mathbf{a} = b_{pt}$  が成り立つ地点であるため，次式により定まる。

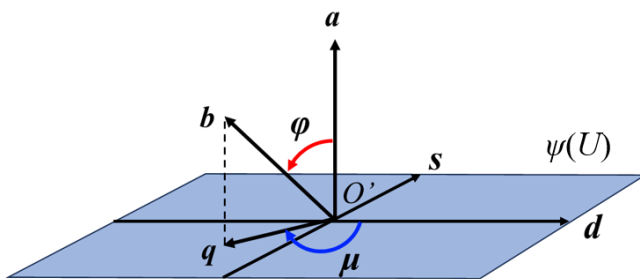
$$\mathbf{a} = \delta R b_{pt} \quad (4)$$

$$R\delta = \begin{bmatrix} R & \delta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = I \quad (5)$$

ここで，  $\delta$  は  $b_{pt}$  から  $b_{pt+1}$  への移動量，  $R$  は  $\phi$  と  $\mu$  からなる  $\mathbf{a}$  と  $b_{pt+1}$  間の変化の大きさ，  $I$  は単位行列である。



第1図 斜面崩壊地形の概念



第2図 地形面における相対傾斜角と相対傾斜方位

### 2.3 地形面を分類する関数 $F$

地形変化から斜面崩壊地の滑落崖、せん断沈降面、末端隆起面を識別する。変化後の地形面  $S_{t+1}$  上の各点に対し、局所的な変化を示す  $\delta, \theta, \phi, \mu$  に基づいて、地形  $i$  が与えられるとする。各地点で地形  $i$  を定める関数を  $F$  とすると次式のように定義できる。ただし、 $S_{t+1}$  上の各地点は必ずただ1つの地形に分類されるとする。

$$F: (\delta, \theta, \phi, \mu) \rightarrow L \quad (6)$$

$$L = \{i_1, i_2, \dots, i_n\} \quad (7)$$

斜面崩壊地形を  $L$  と対応づけると変化の特徴から地形面を斜面崩壊地形に分類する関数  $F$  は式 (8) となる。

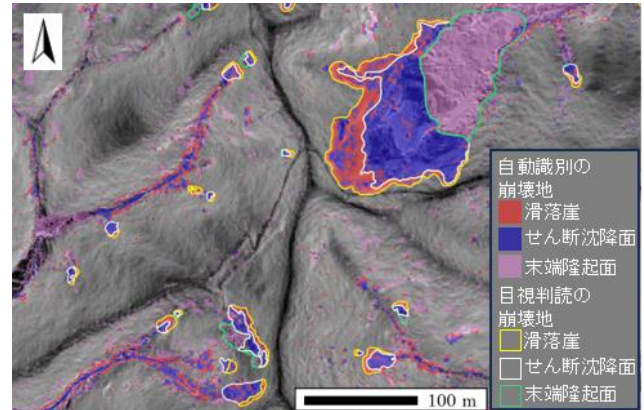
$$F(\delta, \theta, \phi, \mu) = \begin{cases} \text{滑落崖} \\ \text{せん断沈降面} \\ \text{末端隆起面} \\ \text{不動域} \end{cases} \quad (8)$$

これにより、地形面の変化から斜面崩壊地の特徴を分類することが可能になる。

## 3. 豪雨による斜面崩壊地の識別

### 3.1 斜面崩壊地の識別および評価方法

地形面の変化に基づいて定義された  $\delta, \theta, \phi, \mu$  を用いて、斜面崩壊地の識別を行う。斜面崩壊が発生した領域内の各地点において  $\delta, \theta, \phi, \mu$  を算出し、それぞれにしきい値を設定することで斜面崩壊地形に分類する。分類には Random Forest classifier を用いる。決定した各変数のしきい値により領域内の各地点が滑落崖、せん断沈降面、末端隆起面、不動域のいずれかに分類される。



第3図 斜面崩壊地抽出結果

第1表 評価結果

	滑落崖	せん断沈降面	末端隆起面	不動域
Precision	0.80	0.83	0.90	0.86
Recall	0.82	0.81	0.88	0.88
Accuracy	0.85			
Kappa	0.80			

識別結果は Accuracy, Precision, Recall および Cohen の  $\kappa$  係数を用いて評価された (Wang *et al.*, 2021)。

### 3.2 対象崩壊地とデータ

対象崩壊地は 2014 年 8 月に兵庫県丹波市で豪雨により発生した斜面崩壊とした。使用データは、斜面崩壊前後の LiDAR DEM と目視の判読により作成された斜面崩壊地分布図である。2 時期の DEM から  $\delta, \theta, \phi, \mu$  を算出し、学習特徴量とした。分布図は、学習と検証のための分類ラベルとして使用された。領域内の各分類において、1,000 点ずつランダムサンプリングを行い、データセットを構築した。データセットを 7:3 に分割し、70% を学習データ、30% を検証データとした。

### 3.3 結果

結果を第 3 図に示す。本手法により識別された斜面崩壊地の各特徴が目視で判読された分布図と良好に一致していることがわかる。各評価指標の検証結果を第 1 表に示す。すべての評価指標において、0.8 を上回っており高精度なモデルを構築できた。

## 4. おわりに

地形面の変化に基づいて斜面崩壊地形を数学的に表現した。また、地形面の変化と機械学習手法を用いて斜面崩壊地形の識別モデルを開発した。これにより、地形面の局所的な変化から斜面崩壊地の構造を識別し、より詳細な情報をもつ斜面崩壊地分布図の生成が可能になる。

今後、本手法が他地域で適用可能か検証を行う必要がある。

## 文献

- Schuster R.L. and Krizek R.J. (1978) *Landslides: Analysis and Control*, National Academy of Science, 234p.
- Wang H., Zhang L., Yin K., Luo H., Li J. (2021) *Landslide identification using machine learning*, Geoscience Frontiers, vol.12, no.1, pp.351-364.