

火山災害研究センター中間報告 サブテーマ<B1>

代表者:中山大地

1. はじめに

サブテーマ B1 では IT 技術を駆使した火山ハザード予測, 火山防災マップ, 噴火頻度に関する研究をおこなっている. 機械学習ならびにコンピュータシミュレーションを用いた火山泥流シミュレーションを行い, 結果を地図化することを目的としている. 2018 年度は伊豆大島を対象として, レーザー測量により得られた 1m 解像度数値地形モデルを用いて土砂災害ポテンシャルの推定をおこなった. 2019 年度は三宅島を対象として機械学習による火山泥流予測モデルの構築ならびに火山泥流ハザードマップを作成した. 以下では三宅島における火山泥流ハザードマップについて報告する.

2. これまでの研究成果

三宅島は 2000 年に噴火をしており, 大量の火山ガスと火山灰を放出した. これに梅雨や台風の降水が加わり, 2000 年の 1 年間で大規模な火山泥流が 5 回ほど確認されている. これらの火山泥流により, 橋の流失, 道路・家屋の埋積などの被害が出ている. 本研究では, 三宅島における火山泥流の侵食域と堆積域について, 機械学習の一種である決定木を用いて予測することを目的とする.

2.1 研究手法の概略

データとして三宅島 1m メッシュ数値標高モデル(東京都が 2015 年 12 月にレーザー測量したデータを元に作成, 以下「1m DEM」と表記)および堆積域と侵食域の空中写真判読結果(2000 年 11 月 8 日撮影, 中山・黒田 2002)を用いた. まず, 空中写真判読により土砂の侵

食域と堆積域を求めた. 次に全島の 1m DEM から 8 種類の地形量(標高, 傾斜量, 水平曲率, 横断曲率, 侵食高, 未侵食高, 土砂移動指数, 湿潤度指数)を計算した.

得られた 8 種類の地形量の記述統計量(最大値, 最小値, 平均値, 値域, 標準偏差, 中央値)を 50m メッシュで集計し, これに空中写真判読から求めた 50m メッシュごとの侵食・堆積状況を加えてデータベースを作成した.

このデータベースを元に, 機械学習の一種である決定木を用いて土砂災害判別モデルを作成した. 得られた土砂災害判別モデルから土砂災害予測モデルを作成して地図化した.

2.2 地形量の計算

以下では本研究で計算した 8 種類の地形量について説明する.

● 標高

標高 1m DEM そのものの値について, 50m メッシュごとに 6 個の記述統計量を求めて集計した.

● 傾斜量(勾配)

傾斜量は土砂動態に大きく関係していると考えられる. 傾斜量が大きいほど土砂を下方へ移動させる営力を増大するため, 火山泥流の判別には重要な地形条件である. グリッド型の標高データ上での傾斜量の計算方法は複数あるが, ここでは Burrough and McDonnell (1998)に従って周囲 4 近傍(求点の上下左右の 4 メッシュ)の標高値を用いて傾斜量を算出した. 計算式は以下である.

$m \times n$ メッシュの標高モデルDEMを考える.

$$DEM = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & z_{31} & \cdots & z_{m1} \\ z_{12} & z_{22} & z_{32} & \cdots & z_{m2} \\ z_{13} & z_{23} & z_{33} & \cdots & z_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{1n} & z_{2n} & z_{3n} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix}$$

任意の点 (i, j) に置ける傾斜量 $Slope_{ij}$ は以下のように定義できる.

$$Slope_{ij} = \sqrt{G^2 + H^2}$$

ここで G および H は以下となる.

$$G = \frac{-z_{(i-1,j)} + z_{(i+1,j)}}{2d}$$

$$H = \frac{z_{(i,j-1)} - z_{(i,j+1)}}{2d}$$

求まった傾斜量を附図 B1-1-1 に示す. 海岸沿いの集落近辺では緩傾斜だが, 島の中腹はやや急傾斜となる. また, 附図 B1-1-1 のA近辺は緩傾斜となっており, 村営牧場などに利用されていた. 得られた傾斜量は 50m メッシュごとに集計し, 6 個の記述統計量を求めた.

● 水平曲率 (Plan Curvature; PIC)

平面曲率は斜面の水平断面の曲率を表す量である. 値が負なら谷型斜面, 正であれば尾根型斜面, 0 であれば直線斜面となる. 尾根谷の度合いを示す地形量であるため, 水や物質の集中・拡散を表す. 水平曲率の計算は Burrough and McDonnell (1998)に基づいて計算を行なった. 定義は以下となる.

$m \times n$ メッシュの標高モデル DEM を考える.

$$DEM = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & z_{31} & \cdots & z_{m1} \\ z_{12} & z_{22} & z_{32} & \cdots & z_{m2} \\ z_{13} & z_{23} & z_{33} & \cdots & z_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{1n} & z_{2n} & z_{3n} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix}$$

任意の点 (i, j) に置ける水平曲率 PIC_{ij} は以下のように定義できる.

$$PIC_{ij} = \frac{-2(DH^2 + EG^2 - FGH)}{(G^2 + H^2)}$$

ここで D, E, F, G および H はそれぞれ

$$D = \frac{\left(\frac{z_{(i-1,j)} + z_{(i+1,j)}}{2}\right) - z_{(i,j)}}{d^2}$$

$$E = \frac{\left(\frac{z_{(i,j-1)} + z_{(i,j+1)}}{2}\right) - z_{(i,j)}}{d^2}$$

$$F =$$

$$\frac{-z_{(i-1,j-1)} + z_{(i+1,j-1)} + z_{(i-1,j+1)} - z_{(i+1,j+1)}}{4d^2}$$

$$G = \frac{-z_{(i-1,j)} + z_{(i+1,j)}}{2d}$$

$$H = \frac{z_{(i,j-1)} - z_{(i,j+1)}}{2d}$$

となる.

前述のように水平曲率(PIC)は $PIC < 0$ なら谷型斜面, $PIC = 0$ なら直線斜面, $PIC > 0$ なら尾根型斜面であるが, 実際にはこれらのしきい値には幅があると見なせるため, 本研究では $PIC < -0.05$ を谷型斜面, $-0.05 \leq PIC \leq 0.05$ を直線斜面, $PIC > 0.05$ を尾根型斜面とした(附図 B1-1-2). これを集計し, 50m メッシュ内の尾根型斜面, 直線斜面, 谷型斜面の面積比を算出した.

● 縦断面曲率 (Profile Curvature; PrC)

縦断面曲率は斜面の縦断方向の斜面形状を表す量である. 値が負であれば凸型斜面, 正であれば凹型斜面, 0 であれば直線斜面となる. 斜面の従順化理論に基づくと, 凸型斜面では侵食, 凹型斜面では堆積, 直線斜面では運搬の場になることから, 断面曲率は土砂動態に影響していると考えられる. 縦断面曲率の計算は Burrough and McDonnell (1998)に従った. 定義は以下となる.

$m \times n$ メッシュの標高モデル DEM を考える.

$$DEM = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & z_{31} & \cdots & z_{m1} \\ z_{12} & z_{22} & z_{32} & \cdots & z_{m2} \\ z_{13} & z_{23} & z_{33} & \cdots & z_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{1n} & z_{2n} & z_{3n} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix}$$

任意の点 (i, j) に置ける縦断面曲率 PrC_{ij} は以

下のように定義できる.

$$PrC_{ij} = \frac{2(DG^2 + EH^2 + FGH)}{(G^2 + H^2)}$$

ここで D , E , F , G および H はそれぞれ

$$D = \frac{\frac{(z_{(i-1,j)} + z_{(i+1,j)})}{2} - z_{(i,j)}}{d^2}$$

$$E = \frac{\frac{(z_{(i,j-1)} + z_{(i,j+1)})}{2} - z_{(i,j)}}{d^2}$$

$$F = \frac{-z_{(i-1,j-1)} + z_{(i+1,j-1)} + z_{(i-1,j+1)} - z_{(i+1,j+1)}}{4d^2}$$

$$G = \frac{-z_{(i-1,j)} + z_{(i+1,j)}}{2d}$$

$$H = \frac{z_{(i,j-1)} - z_{(i,j+1)}}{2d}$$

となる.

前述のように縦断面曲率 (PrC) は $PrC < 0$ なら凸型斜面, $PrC = 0$ なら直線斜面, $PrC > 0$ なら凹型斜面であるが, 実際にはこれらのしきい値には幅があると見なせるため, 本研究では $PrC < -0.05$ を凸斜面, $-0.05 \leq PrC \leq 0.05$ を直線斜面, $PrC > 0.05$ を凹型斜面とした (附図 B1-1-3). これを集計し, 50m メッシュ内の凹型斜面, 直線斜面, 凸型斜面の面積比を算出した.

● 侵食高

侵食高は接峰面と現在の標高の差である. 接峰面を侵食が始まる前の原地形であると仮定すれば, 侵食高は現在まで侵食された高さを表す. 接峰面はあくまでも仮想的な原面であるため, 実際には侵食高はローカルな谷の深さを表す. このため, 侵食高は堆積の場となる谷部を示すことになる.

接峰面の計算方法は以下の定義となる. まず $m \times n$ メッシュの標高モデル DEM を考える.

$$DEM = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & z_{31} & \cdots & z_{m1} \\ z_{12} & z_{22} & z_{32} & \cdots & z_{m2} \\ z_{13} & z_{23} & z_{33} & \cdots & z_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{1n} & z_{2n} & z_{3n} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix}$$

ここで, 任意の点 (i, j) におけるカーネル (例として 3×3 メッシュのカーネル) 内の平均標高 m_{ij} を求め, 配列 $MEAN$ とする.

$$MEAN = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{32} & \cdots & 0 \\ 0 & m_{23} & m_{33} & \cdots & 0 \\ 0 & m_{24} & m_{34} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

次に DEM と $MEAN$ を比較し, 値の大きい方を新しい標高配列 DEM_{new} とする.

$$DEM_{new} = \begin{cases} DEM & (DEM \geq MEAN) \\ MEAN & (DEM < MEAN) \end{cases}$$

この計算により, 元標高が低い部分は周囲との平均標高で置き換えられ, 元標高が高い部分はその標高が残る. この操作を反復計算することにより, 谷が埋まった DEM (接峰面) を取得できる. カーネルのサイズと反復計算の回数によりどのくらいの大きさの谷を埋めるのかを指定できるが, 本研究ではカーネルサイズを 11×11 メッシュ ($11m \times 11m$) とし, 反復回数を 50 回とした. これにより, 谷幅が 10~100m 程度の谷が埋まることになる.

この方法で求めた接峰面と現在の標高値との差を取り, 侵食高とした (附図 B1-1-4). 図からは細かい谷部で侵食高が大きくなっていることがわかる. 侵食高は 50m メッシュごとに 6 個の記述統計量を求めて集計した.

● 未侵食高

未侵食高は現在の標高と接谷面の差である. 接谷面を侵食が究極まで進んだ地形と仮定すれば, 未侵食高は将来的に侵食される高さを表す. 接谷面は仮想的な面であり, 実際には周囲よりも標高が高い部分との標高差を表す. このため,

未侵食高は侵食の場のポテンシャルを表すと考えられる。

接谷面の計算方法は以下となる。まず $m \times n$ メッシュの標高モデル DEM を考える。

$$DEM = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{21} & z_{31} & \cdots & z_{m1} \\ z_{12} & z_{22} & z_{32} & \cdots & z_{m2} \\ z_{13} & z_{23} & z_{33} & \cdots & z_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{1n} & z_{2n} & z_{3n} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix}$$

ここで、任意の点 (i, j) におけるカーネル (例として 3×3 メッシュのカーネル) 内の平均標高 m_{ij} を求め、配列 $MEAN$ とする。

$$MEAN = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{32} & \cdots & 0 \\ 0 & m_{23} & m_{33} & \cdots & 0 \\ 0 & m_{24} & m_{34} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

次に DEM と $MEAN$ を比較し、値の小さい方を新しい標高配列 DEM_{new} とする。

$$DEM_{new} = \begin{cases} DEM & (DEM \leq MEAN) \\ MEAN & (DEM > MEAN) \end{cases}$$

この計算により、元標高が高いメッシュは周囲との平均標高で置き換えられ、元標高が低いメッシュはその標高が残る。この操作を反復計算することにより、尾根などの凸部を削った DEM (接谷面) を取得できる。カーネルのサイズと反復計算の回数によりどのくらいの大きさの凸部を削るのかを指定できる。本研究ではカーネルサイズを 11×11 メッシュ ($11m \times 11m$) とし、反復回数を 50 回とした。これにより、大きさが 10～100m 程度の凸部を削ることができる。

この方法で求めた現在の標高値と接谷面の差を取り、未侵食高とした (附図 B1-1-5)。図からは小さなスケールの凸部で未侵食高が大きくなっていることがわかる。未侵食高は 50m メッシュごとに 6 個の記述統計量を求めて集計した。

- 土砂移動指数 (Sediment Transport Index; STI)

土砂移動指数 (STI) はメッシュごとの土砂の移動ポテンシャルを表す指標とされてる (Burrough and McDonnell, 1998)。土砂移動指数 τ は以下のように定義される。

$$\tau = \left(\frac{As}{22.13} \right)^{0.6} \times \left(\frac{\sin \beta}{0.0896} \right)^{1.3}$$

ここで As は任意の点における上流域の面積であり、以下で定義される。

$$As(c_i) = As(c_i) + \sum_u^n As(c_u)$$

$As(c_u)$ は任意のメッシュ c_i よりも上流のメッシュの面積であり、 $\sum_u^n As(c_u)$ は任意のメッシュ c_i よりも上流のメッシュの合計面積となる。また、 $\sin \beta$ は求点の傾斜の正弦となる。

この定義により、STI は上流の面積が大きく、傾斜 (勾配) が急なメッシュにおいて高い値を取る。求めた STI を附図 B-1-1-6 に示す。

雄山山腹、特に北・東・南側斜面の谷部で STI が大きく、傾斜の急な雄山のカルデラ壁や南部のマール壁 (大路池周辺や新潯池跡周辺など) などでも値が大きい。一方で雄山西側斜面の平坦地 (附図 B-1-1-6 の A 近辺、旧村営牧場周辺) や海沿いの平坦地では値が小さい。STI についても 50m メッシュごとに 6 個の記述統計量を求めて集計した。

- 湿潤度指数 (Wetness Index; WI)

湿潤度指数は地形的な湿りやすさを表す指標である。あくまでも地形的な湿潤ポテンシャルを表すもので、実際の水分条件ではない注意する必要がある。湿潤度指数 wi は以下のように定義できる (Burrough and McDonnell, 1998)。

$$wi = \ln \left(\frac{As}{\tan \beta} \right)$$

ここで As は任意の点における上流域の面積であり、以下で定義される。

$$As(c_i) = As(c_i) + \sum_u^n As(c_u)$$

$As(c_u)$ は任意のメッシュ c_i よりも上流のメッシュの面積であり, $\sum_u^n As(c_u)$ は任意のメッシュ c_i よりも上流のメッシュの合計面積となる. また, $\tan \beta$ は求点の傾斜の正接となる.

求めた湿潤度指数を附図 B1-1-7 に示す. 一般的に流路上や平坦地で値が高く. 一方, 尾根部は流域面積が小さいために湿潤度指数は低く, 傾斜が急な部分でも湿潤度指数は低くなる. 湿潤度指数も 50m メッシュごとに 6 個の記述統計量を求めて集計した.

● 空中写真判読に基づく侵食・堆積域データの作成

三宅島噴火後の空中写真(2011 年 11 月撮影)に基づき, 侵食域と堆積域を判読した結果(中山・黒田 2002, 附図 B1-1-8)を用いて目的変数である侵食・堆積域をメッシュ化した. メッシュ化する際には 50m メッシュ内に少しでも侵食域もしくは堆積域がある場合, 当該メッシュは侵食もしくは堆積メッシュとした(附図 B1-1-9). その結果, 全 22, 624 メッシュ中, 侵食が認められたメッシュが 456 メッシュ(全体の約 2%), 堆積が認められたメッシュが 657 メッシュ(全体の約 3%), 侵食・堆積のいずれも認められなかったメッシュが 21,511 メッシュ(全体の約 95%)となった.

2.3 決定木による土砂災害判別モデルの作成

次に決定木を用いて侵食・堆積・どちらもなしを判別するモデルを作成する.

決定木は機械学習の一種であり, 判別結果をツリー構造として得ることができる. 図 1 に決定木の概念図を示す. 集計した地形量を説明変数, メッシュ化した侵食域・堆積域のデータを目的変数として決定木への入力データとする. 決定木は与えられた目的変数の相互情報量(ゲイン率)が最大になるように説明変数にしきい値を決めていき, 最終的にモデルを最も良く表しているツリー構造を求める(Witten and Frank, 2005). 得られたツリーの上位に出てくる説明変数ほど, 結果の判別に対する寄与が大きい.

本研究では, 決定木の作成にニュージーランドの Waikato 大学が中心になって開発した WEKA3.8 を用いた. WEKA は C4.5 アルゴリズムを実装した J4.8 アルゴリズムを決定木の作成アルゴリズムに用いている. 一般的にツリー構造が大きくなればモデルの説明率は高くなる. しかしこれは過学習と呼ばれる現象で, 現実的なモデルにとは見なされない. このため, 決定木では枝刈りと呼ばれる操作をおこなうことにより適切な大きさのツリー構造を求めることが必要となる.

また, 本研究では目的変数である侵食・堆積・どちらもなしのメッシュ数が, それぞれ 2%, 3%, 95%であった. このように目的変数の値ごとの数が偏っている場合, そのままでは現象を十分に説明するモデルを得ることができない. たとえば,

入力データ

メッシュ	標高	傾斜	STI	WI	...	侵食・堆積
1	300m	20°	10.25	4.56	...	侵食
2	600m	18°	11.30	7.32	...	侵食
3	800m	40°	4.50	9.34	...	堆積
4	400m	28°	8.59	8.01	...	なし
...	...	...	...	...	...	...

結果のツリー構造

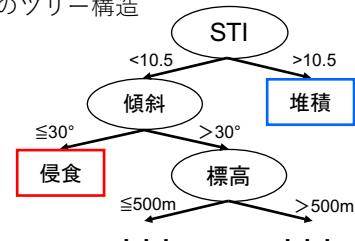


図 1: 決定木の概念

仮にすべてのメッシュを「どちらもなし」とするモデルが得られた場合でも 95%の正解率となってしまう。これを避けるために本研究では目的変数の値ごと、すなわち「侵食」・「堆積」・「どちらもなし」のそれぞれの合計ウェイトを等しくするような前処理をおこなった。

まず対象となるメッシュの総数 22,624 を目的変数の値の数である 3(「侵食」・「堆積」・「どちらもなし」の 3 種類)で割り、7541.33 を得る。これが 3 種類の目的変数の値の合計ウェイトとなる。次にそれぞれの合計ウェイトを目的変数の値の数でそれぞれ除し、値ごとのウェイトを求める。この結果、侵食メッシュ一つあたりのウェイトは 16.54 (7451.33/456 メッシュ)、堆積メッシュ一つあたりのウェイトは 11.48 (7451.33/657 メッシュ)、ともになしメッシュ一つあたりのウェイトは 0.354 (7451.33/21511 メッシュ)となった、以下ではこれらのウェイトを使って決定木の計算をおこなう。

決定木の結果は 10-fold cross validation を用いて評価し、正解率、カッパ係数、判定効率表を用いて精度評価をおこなう。

3 結果

3.1 判定効率表による評価

表 1 に決定木で得られた結果の判定効率表を示す。正解率は判読結果と推定値が一致した部分の合計ウェイトと全体の合計ウェイトの比から

求まる。

全体の正解率は 68.58%であり、これは先行研究(斎藤ほか 2007)に比べてやや低い。先行研究は目的変数が土砂災害の有無の 2 値だったのに対し、本研究では侵食・堆積・ともになしの 3 値であることから、妥当な結果と言える。また、偶然の一致を除いた一致率であるカッパ係数が 0.528 であり、中程度の一致となっている。

決定木による推定結果を地図化したものが附图 B1-1-10 になる。空中写真判読結果では一部にしかなかった侵食メッシュならびに堆積メッシュが大幅に増加している。判定効率表から、空中写真判読では侵食・堆積共に認められなかった合計 21511 メッシュのうち、決定木による推定では侵食メッシュになったものが 5552 メッシュ、堆積メッシュになったものが 6031 メッシュとなっている。表 1 ではこれらの部分を水色で示した。判定効率の評価ではこれらは過推定となるが、これらのメッシュは実際に侵食・堆積が起きているメッシュに似ている地形条件であるにもかかわらず、侵食・堆積が認められないというメッシュであるため、侵食・堆積が発生する可能性のあるメッシュを示していると考えられる。

表 1 の判定効率表を地図化したものが附图 B1-1-11 になる。濃い赤は写真判読と推定値ともに侵食・堆積があるとされたメッシュで、淡い赤はともになしとされたメッシュである。過推定(水色)のメッシュは雄山を中心とした三宅島中央部ならびに海岸沿いの平坦地と中腹の谷部に分布している。これらの過推定メッシュの解釈には注意が必要である。なぜならば、空中写真からはすべての侵食域と堆積域が判読できたわけではなく、判読の取りこぼしなどが含まれている可能性があり、空中写真判読の結果が「ともになし」のメッシュは「データなし」と言い換えることができるためである。このため、過推定メッシュは単純な間違

表 1：判定効率表

		決定木による推定値			合計
		なし	堆積	侵食	
空中写真判読結果	なし	3773.65 (9928)	2138.19 (6031)	1629.5 (5552)	7541.34 (21511)
	堆積	1492.2 (94)	5739.22 (544)	309.92 (19)	7541.34 (657)
	侵食	859.98 (23)	678.06 (31)	6003.3 (402)	7541.34 (456)
	合計	6125.83 (10045)	8555.47 (6606)	7942.72 (5973)	22624 (22624)

数値はウェイト、括弧内はメッシュ数

正解率 68.58%
カッパ係数 0.528

いとして解釈することはできず、前述のように将来的な侵食・堆積のポテンシャルがあるメッシュと解釈することが妥当である。

表 1 の黄色の部分の写真判読の結果では侵食もしくは堆積メッシュとされたが、決定木による推定では「なし」とされたメッシュであり、判定効率の評価では未推定となる。未推定は明らかな過ち（偽陰性）であるが、未推定のメッシュは全体の 0.5% (117 メッシュ) であり極めて少ない。附図 B1-1-11 から、未推定メッシュは正解メッシュ（濃い赤）の周辺にあることがわかる。これは空中写真判読結果を 50m メッシュ単位で集計した際の離散化による影響だと思われる。

次に表 1 の緑の部分についてである。この部分は決定木の推定結果が空中写真判読結果と逆になっているメッシュである。これらのメッシュも明らかな過誤となる。しかし、わずか全体の 0.2% (50 メッシュ) であり、結果にはほとんど影響していない。附図 B1-1-11 から、過誤のメッシュは侵

食・堆積メッシュの周辺にあることがわかる。これは空中写真判読の結果を 50m メッシュで集計する際に、一つのメッシュ内に侵食域と堆積域があった場合に、どちらかをメッシュの代表値としてサンプリングした影響が出ていると考えられる。

以上のことから、空中写真判読によって得られた侵食メッシュと堆積メッシュは決定木によりおよそ 95% の正解率で推定されており、これに空中写真では侵食・堆積共に認められなかった 21511 メッシュのうち、25.8% (5552 メッシュ) のメッシュで侵食の可能性が、28.0% (6031 メッシュ) のメッシュで堆積の可能性があると解釈することができる。

3.2 ツリー構造の解釈

決定木により得られたツリー構造を図 2 に示す。前述のようにツリー構造に現れる説明変数は上位のものほど重要である。本研究では最上位の説明変数として標高の最大値 (50m メッシュ内の標高値の最大値で、以下ではすべて 50m メッシュ内の統計量を表す) が現れている。しきい値は

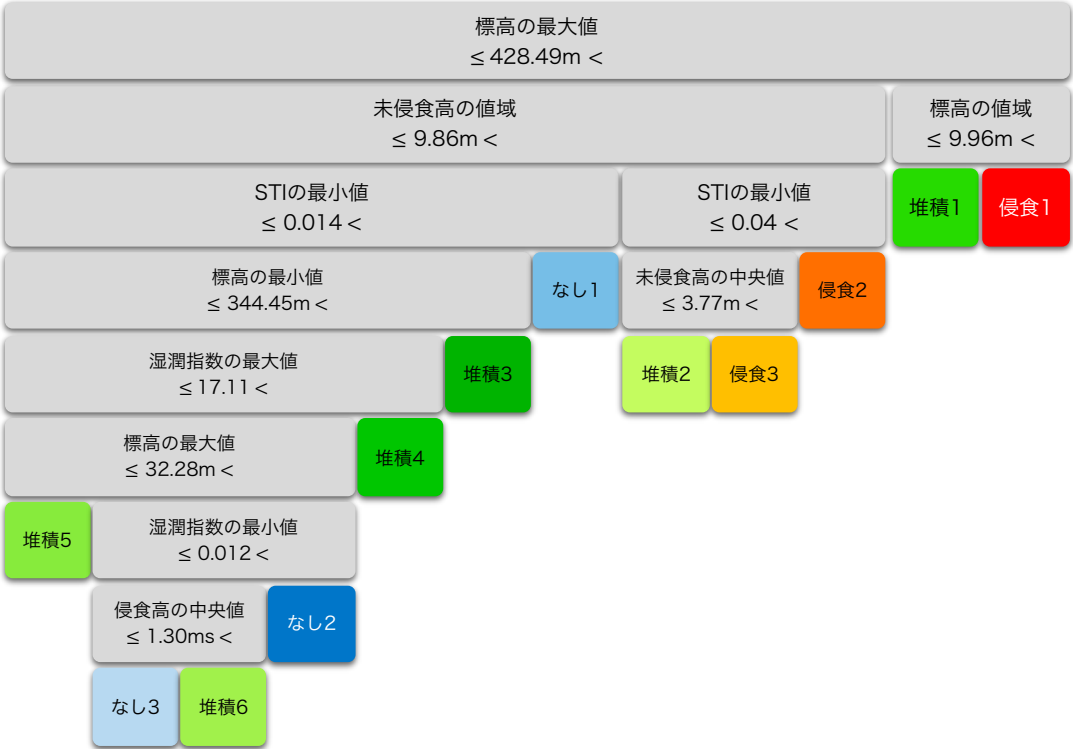


図 2：決定木により得られた侵食・堆積を判別するツリー構造

428.49m で、2 段目には標高の値域(最大値と最小値の差)が現れる。3 段目には STI(Sediment Transport Index; 土砂移動指数)、4 段目には標高の最小値と未侵食高の中央値が、5 段目には湿潤指数(Wetness Index)があり、以下は標高の最大値、湿潤指数の最小値、侵食高の中央値と続く。

ツリー構造に基づく分類・推定結果を地図化したものを附図 B1-1-12 に示す。また、ツリー構造の末端部ごとに地図化したものを附図 B1-1-13～附図 B1-1-24 に示す。

- 侵食 1 について

侵食 1 はツリー構造の最上部に来る末端である。このことから、他の末端よりも分離しやすく、明確な特徴があることを示している。侵食 1 の条件は標高の最大値が 248.49m より大きく、標高の値域が 9.96m よりも大きいメッシュである。このことから、標高が高く起伏が比較的大きいメッシュとなる。附図 B-1-1-13 より、侵食 1 は雄山山頂部を中心とした島の中央部に分布している。この地域は 2000 年噴火の際に大量の火山灰が降下・堆積した場であり、空中写真判読でも侵食が確認されている。堆積した火山灰に降雨が加わって侵食が発生し、火山泥流の源流部になっている。

- 侵食 2 について

侵食 2 は標高の最大値が 428.49m 以下、未侵食高の値域が 9.86m より大、STI の最小値が 0.04 よりも大のメッシュになる。附図 B1-1-14 より、雄山中腹の谷部に沿って分布しており、STI の最小値が高いことから土砂運搬能力が高く深い谷沿いで火山泥流もしくは土石流の流下に伴う谷壁及び谷底の洗堀が発生する部位と考えられる。このような場所では火山泥流の流下による橋の流失などが発生している。

- 侵食 3 について

侵食 3 は標高の最大値が 428.49m 以下で未侵食高の値域が 9.86m より大きく、STI の最小値が 0.04 以下で未侵食高の中央値が 3.77m より大のメッシュである。附図 B1-1-15 より、侵食 2 の分布とほぼ一致している。侵食 2 との違いは STI の最小値が小さく未侵食高の中央値が小さいことから、侵食 2 に隣接した平坦面であることが考えられる。

- 堆積 1 について

堆積 1 は標高の最大値が 428.49m よりも大きく、標高の値域が 9.96m 以下の部分である。ツリー構造および附図 B1-1-16 から、侵食 1 に隣接していることがわかる。主に雄山山頂南西部の平坦地を示しており、旧村営牧場の南側になる。

- 堆積 2 について

堆積 2 はツリー構造ならびに分布(附図 B1-1-17)から侵食 2 と侵食 3 に隣接している。このことから、侵食 2 および侵食 3 で発生した泥流が堆積 2 で土砂を堆積させながら谷沿いに流下する部分だと考えられる。

- 堆積 3 について

堆積 3 は標高の最大値が 428.49m 以下で未侵食域の値域が 9.86m 以下、STI の最小値が 0.014 以下で標高の最小値が 344.45m より大のメッシュである。附図 B1-1-18 から、雄山西側中腹の旧村営牧場を中心とする平坦地周辺に分布しており、火口西側の侵食 1 で発生した泥流が堆積する場であると考えられる。実際に旧村営牧場では 2000 年の夏に大規模な泥流の堆積が発生している。

- 堆積 4 について

堆積 4 は標高の最大値が 428.49m 以下で未侵食域の値域が 9.86m 以下、STI の最小値が 0.014 以下で標高の最小値が 344.45m 以下、湿潤度指数の最大値が 17.11 より大のメッシュである。附図 B1-1-19 とツリー構造からも、雄山中腹

から海までの谷部ないしは流路に相当する。

- 堆積 5 について

堆積 5 は標高の最大値が 428.49m 以下で未侵食域の値域が 9.86m 以下、STI の最小値が 0.014 以下で標高の最小値が 344.45m 以下、湿潤度指数の最大値が 17.11 以下、標高の最大値が 32.28m 以下のメッシュである。ツリー構造と附図 B1-1-20 からも堆積 4 に隣接している。このことから、堆積 4 のメッシュを流下してきた泥流が堆積 4 を越流し、堆積 5 で再堆積すると思われる。海沿いの平坦地で明瞭な流路のないメッシュに分布している。

- 堆積 6 について

堆積 6 は最も下位の末端であり、附図 B1-1-21 から中腹以下に分布している。湿潤指数や侵食高の中央値が小さいことから、小規模で浅い谷底や道路・堰堤などの人工的な小平坦地に相当すると考えられる。

- なし 1 について

なし 1 は標高の最大値が 428.49m 以下で未侵食域の値域が 9.86m 以下、STI の最小値が 0.014 より大のメッシュである。附図 B1-1-22 からも、雄山中腹から下流の尾根部もしくは側火山の山腹に相当するメッシュである。

- なし 2 となし 3 について

なし 2 となし 3 はツリー構造上も附図 B1-1-23, B1-1-24 上でも隣接しているため一括して説明する。共に標高の低い山麓に分布しているが、海には接しない段丘面上でやや広い平坦面に分布している。

4. 考察とまとめ

以上の結果から、三宅島における侵食・堆積を伴う火山泥流のメカニズムについて考察をおこなった。

1. 侵食 1 のエリアは雄山山頂に近く、2000 年噴火により大量の火山灰が降下・堆積し、

降水による侵食のために火山泥流の発生域となる。

2. 雄山東側では、侵食 1 で発生した泥流が侵食 2・侵食 3 で発生した泥流と合流して堆積 2・堆積 4・堆積 6 の谷に添って海岸部まで流下する。海岸部まで流下した泥流は、海岸近くの平坦部で堆積 4 の流路を越流し堆積 5 に堆積する。
3. 雄山西側では、侵食 1 で発生した火山泥流は堆積 1 および堆積 3 のメッシュ(旧村営牧場近辺)に堆積する。侵食 2 および侵食 3 からは、堆積 1 および堆積 3 への泥流堆積の二次侵食と雄山西側中腹に降下堆積した火山灰を侵食して泥流が発生する。その後は堆積 2・堆積 4・堆積 6 の谷に添って海岸部まで流下し、海岸部まで流下した泥流は海岸近くの平坦部で堆積 4 の流路を越流し堆積 5 に堆積する。

5 今後の課題

本研究では三宅島を対象とした火山泥流について、機械学習を用いて予測した。個々で得られた結果はあくまでも統計解析による推定値であり、現地調査の結果と突き合わせて結果を確認する必要がある。また、伊豆大島においても同様の分析をおこなったが、計算で求めた地形量が三宅島と異なっているため再解析をおこなう必要がある。

また、洪水氾濫モデルを中心とした物理シミュレーションによる泥流のシミュレートもおこなっているが、高解像度空間データを用いた場合に計算結果が収束せず、改善をする必要がある。

参考文献

斎藤 仁・中山大地・松山 洋 2007. Decision tree による地すべり発生流域の推定とその検証 -ASTER データを用いて-. 日本地すべり学会誌, 44. pp.1-14.

Burrough, P.A. and McDonnell, R. A. 1998.

Principle of geographical information system.

Oxford, Oxford University Press, 333p.

Witten, I.H. and Frank, E. 2005. Data Mining

Practical Machine Learning Tools and

techniques, Second ed. Oxford, Elsevier,

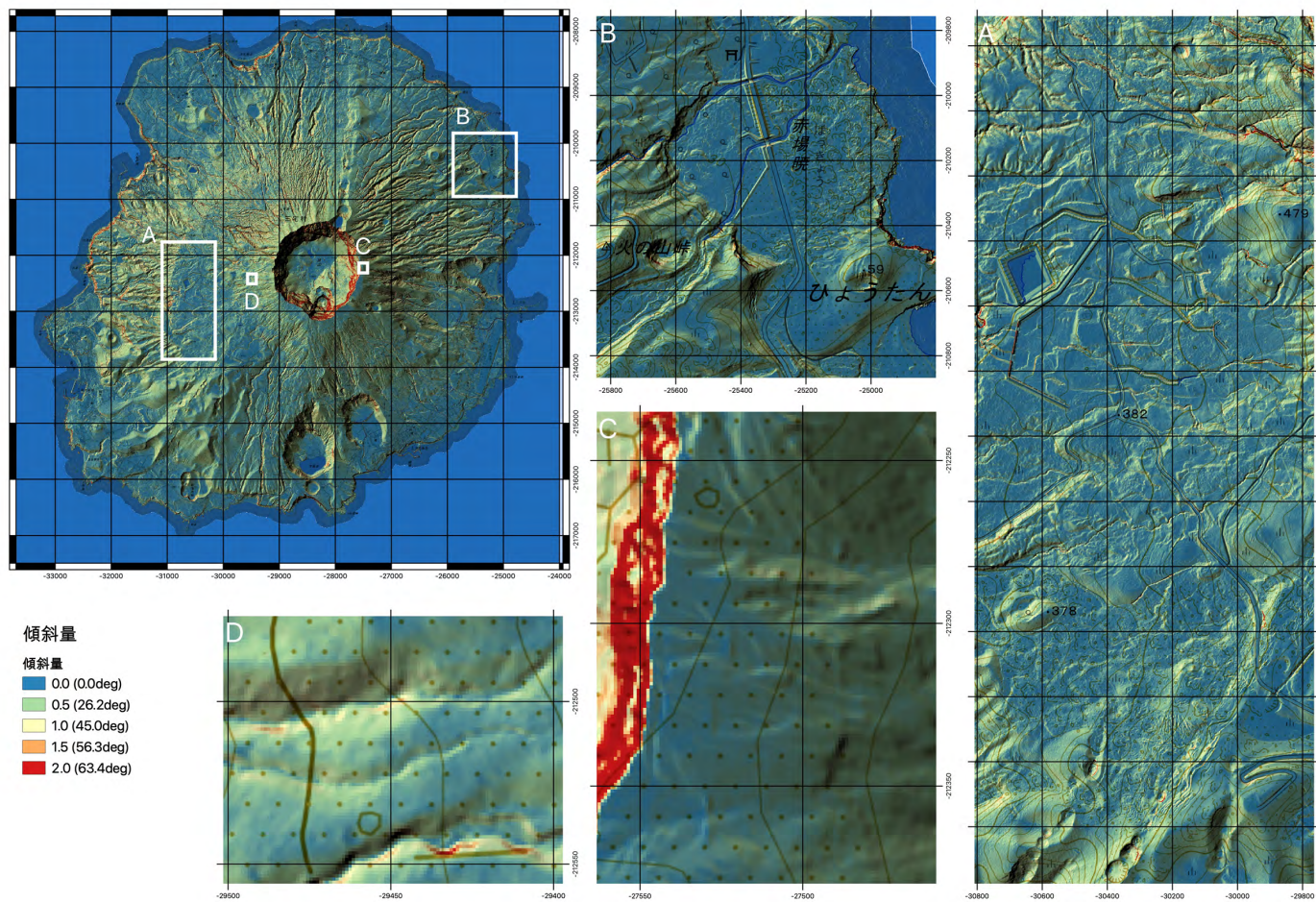
525p.

中山大地・黒田真二郎 2001. GISを用いた

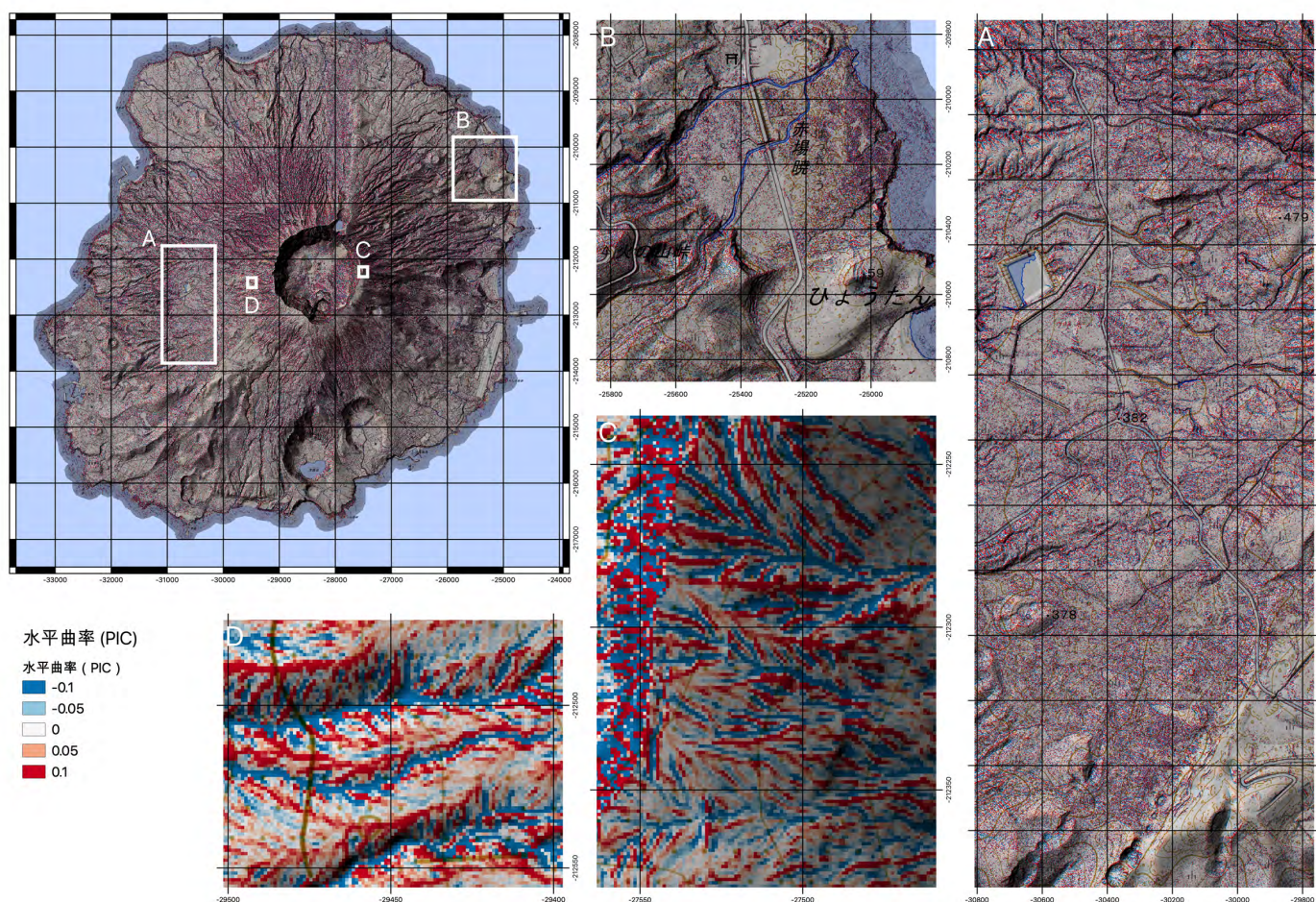
2000 年三宅島噴火に伴う泥流発生状況の予

察的研究. 日本地理学会 2001 年春季学術大

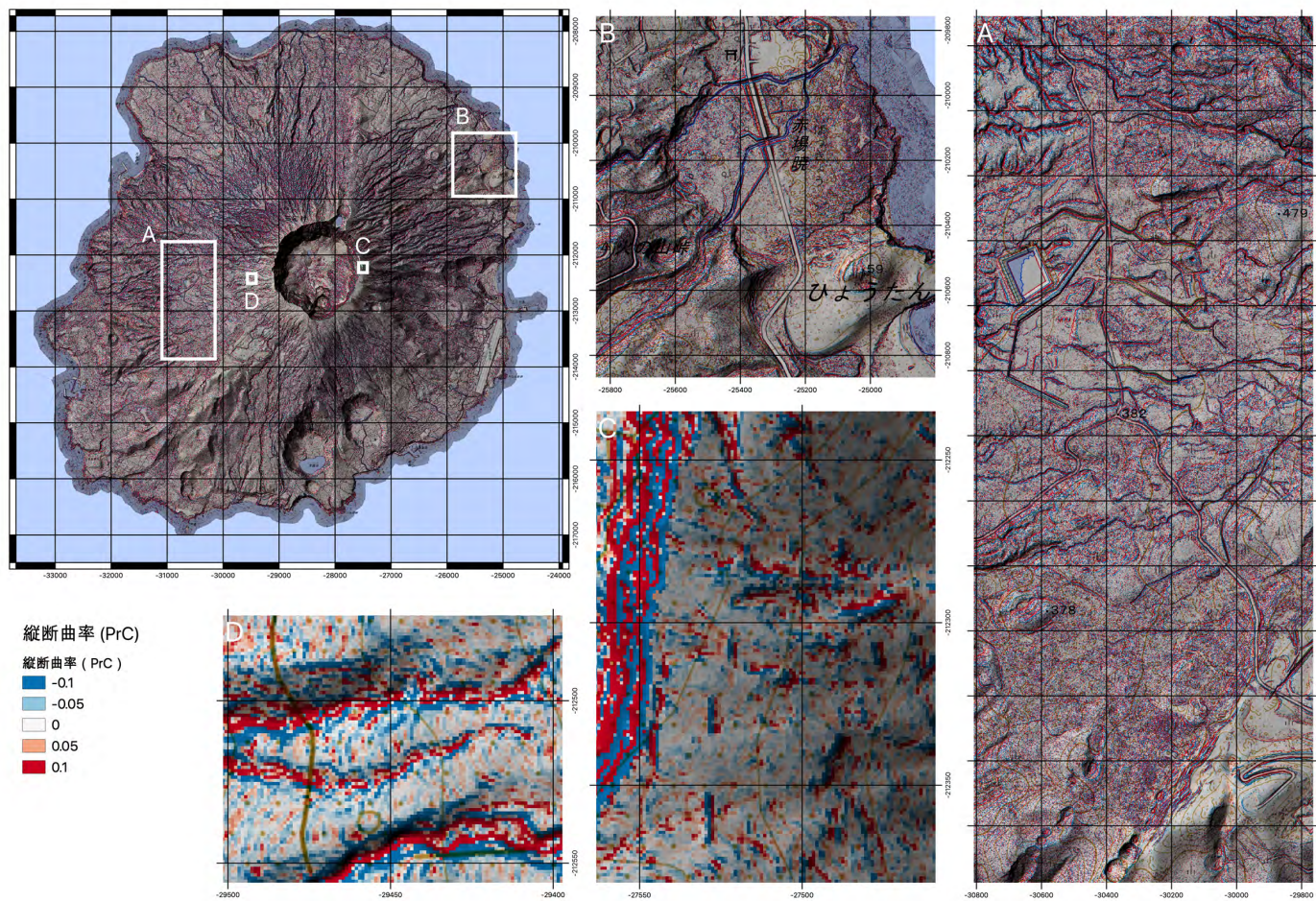
会発表要旨集, 61, p.264.



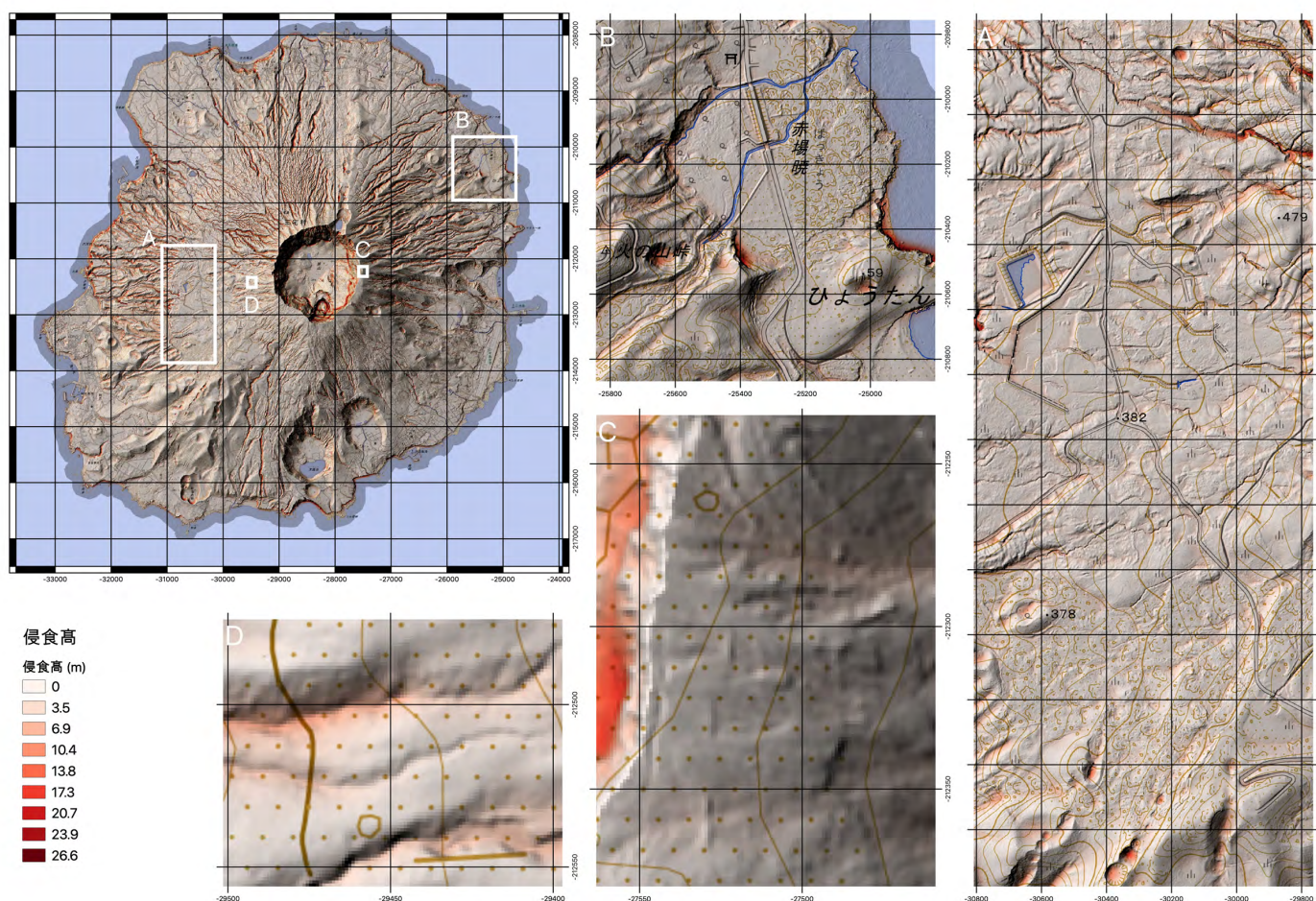
附图 B1-1-1：傾斜量



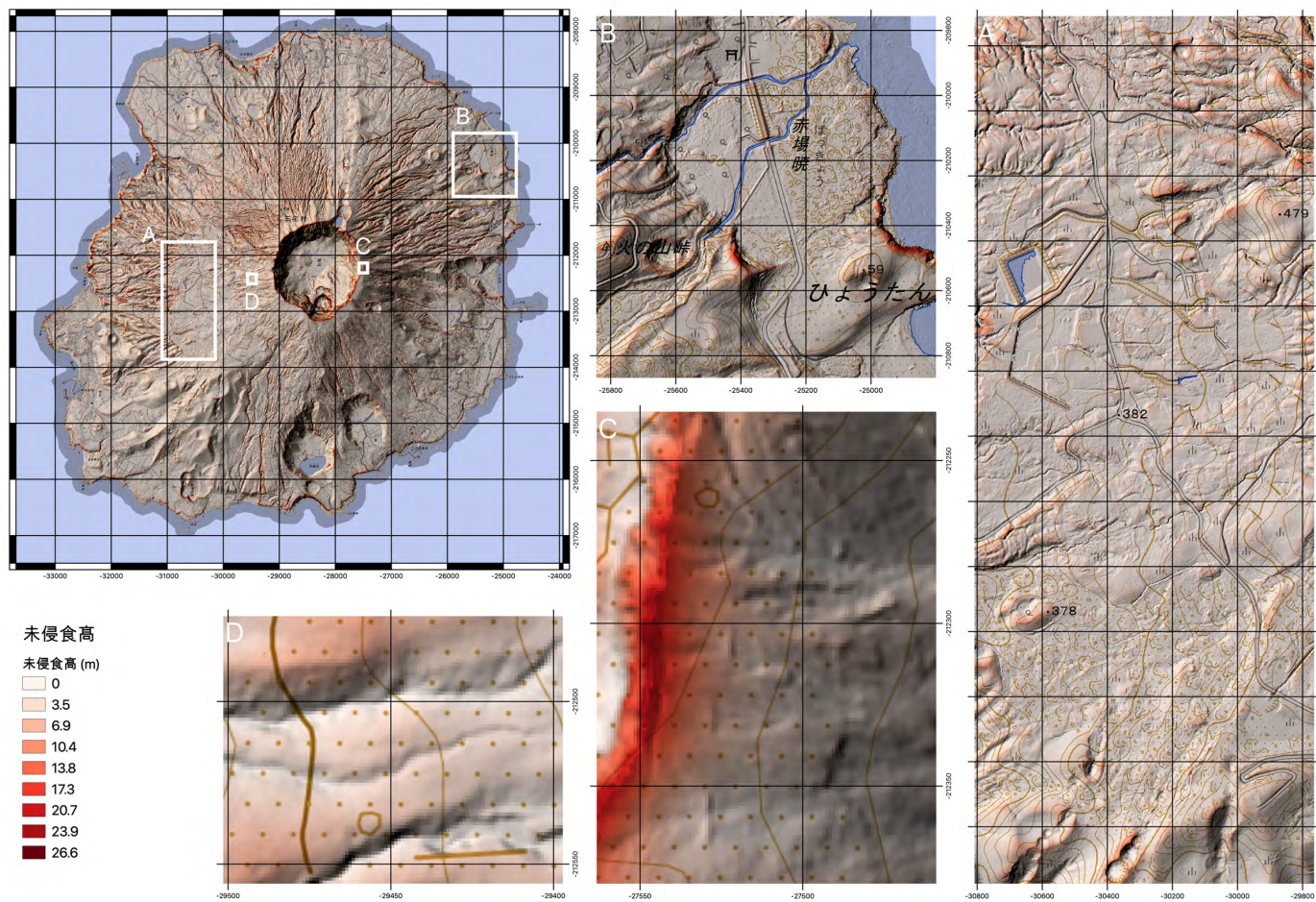
附图 B1-1-2：水平曲率 (PIC)



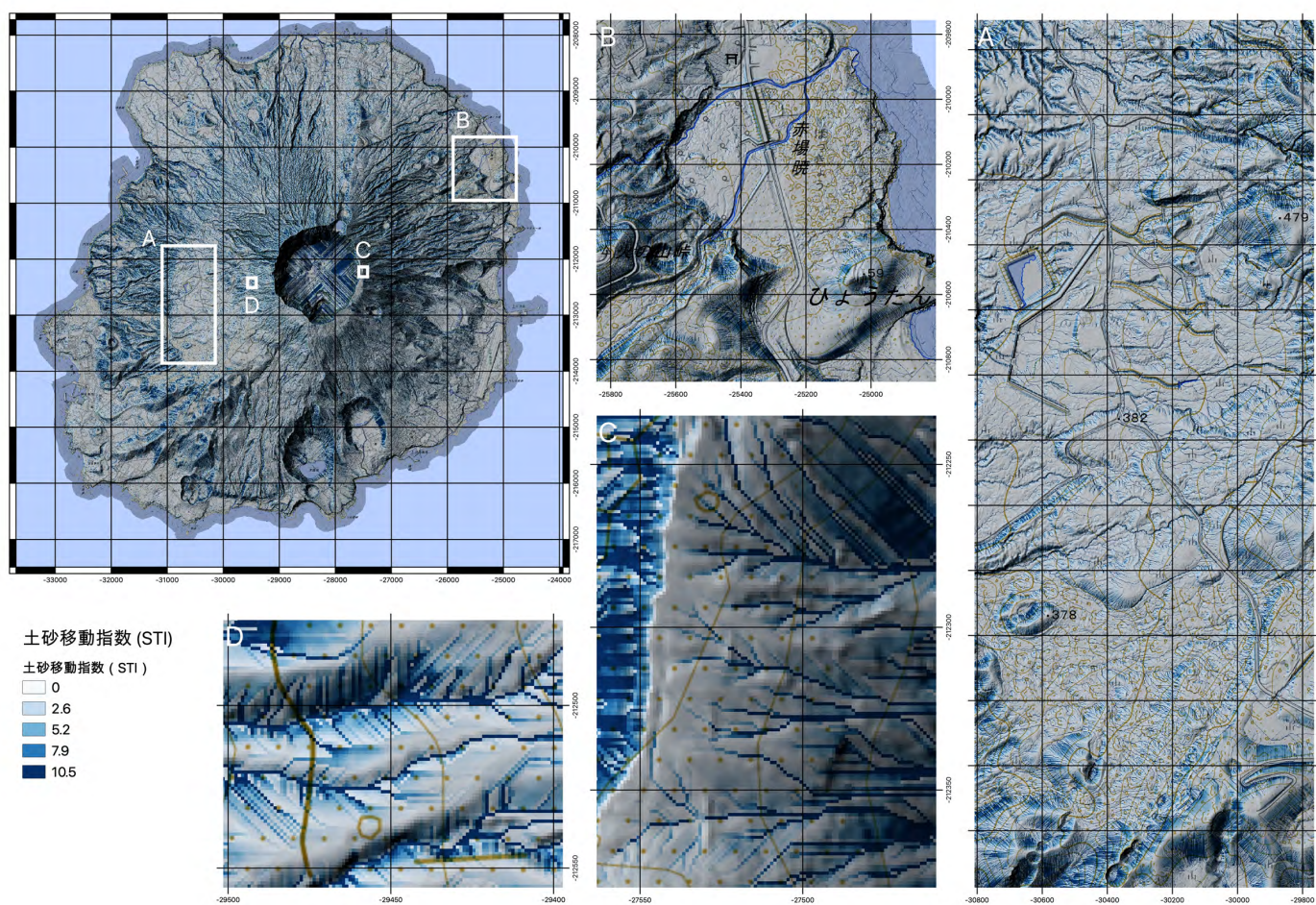
附図 B1-1-3：縦断面曲率 (PrC)



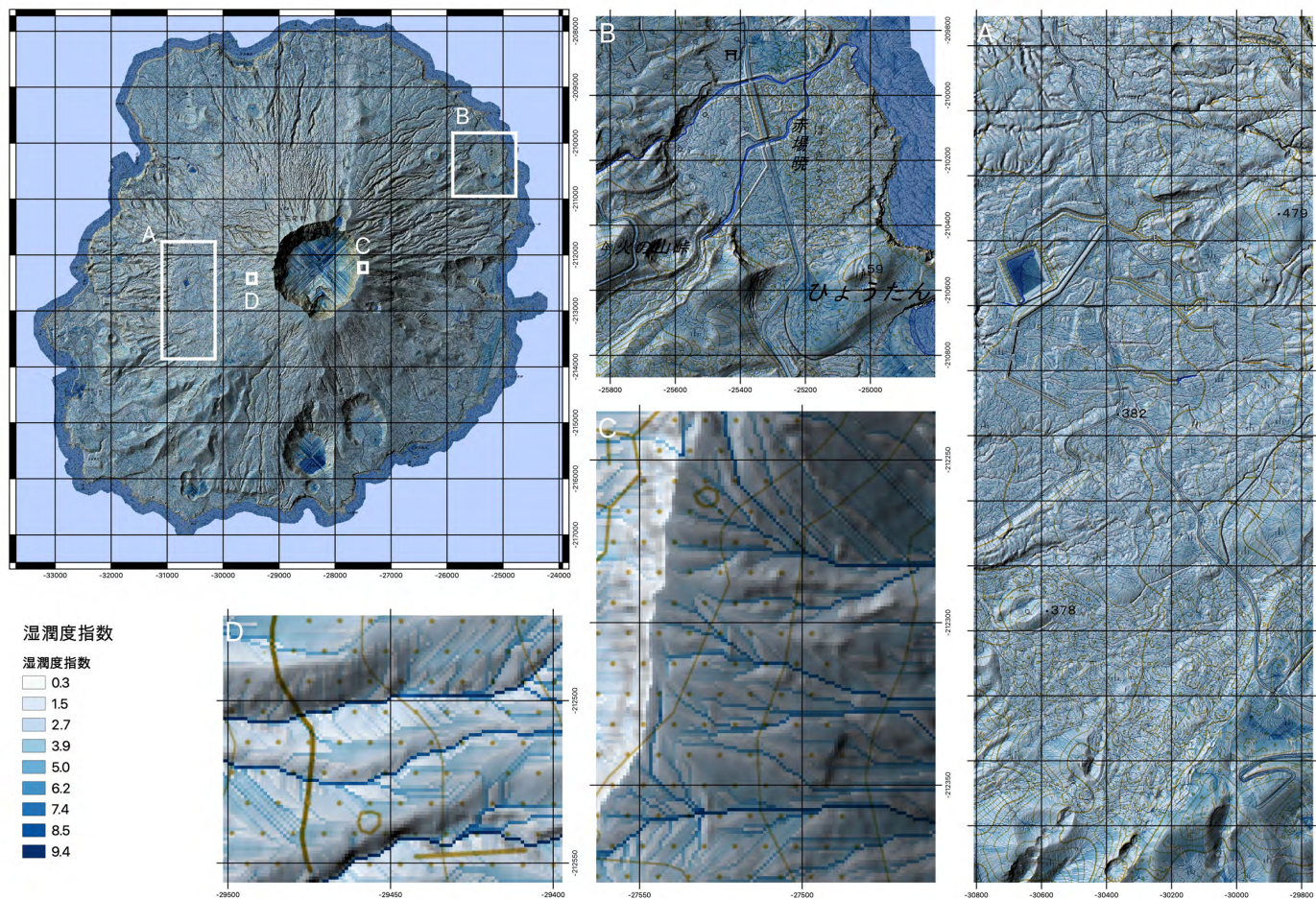
附図 B1-1-4：侵食高



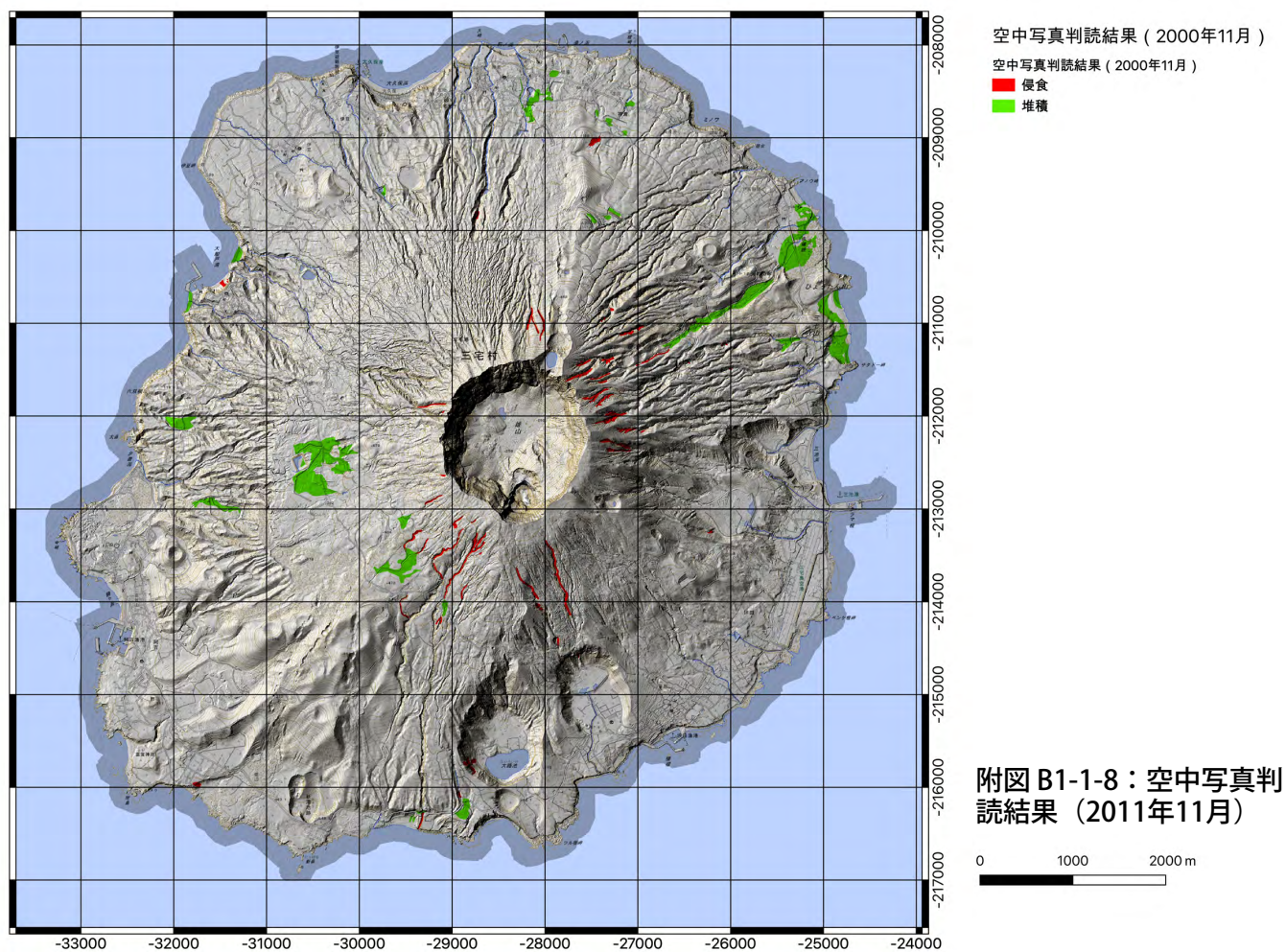
附图 B1-1-5：未侵食高



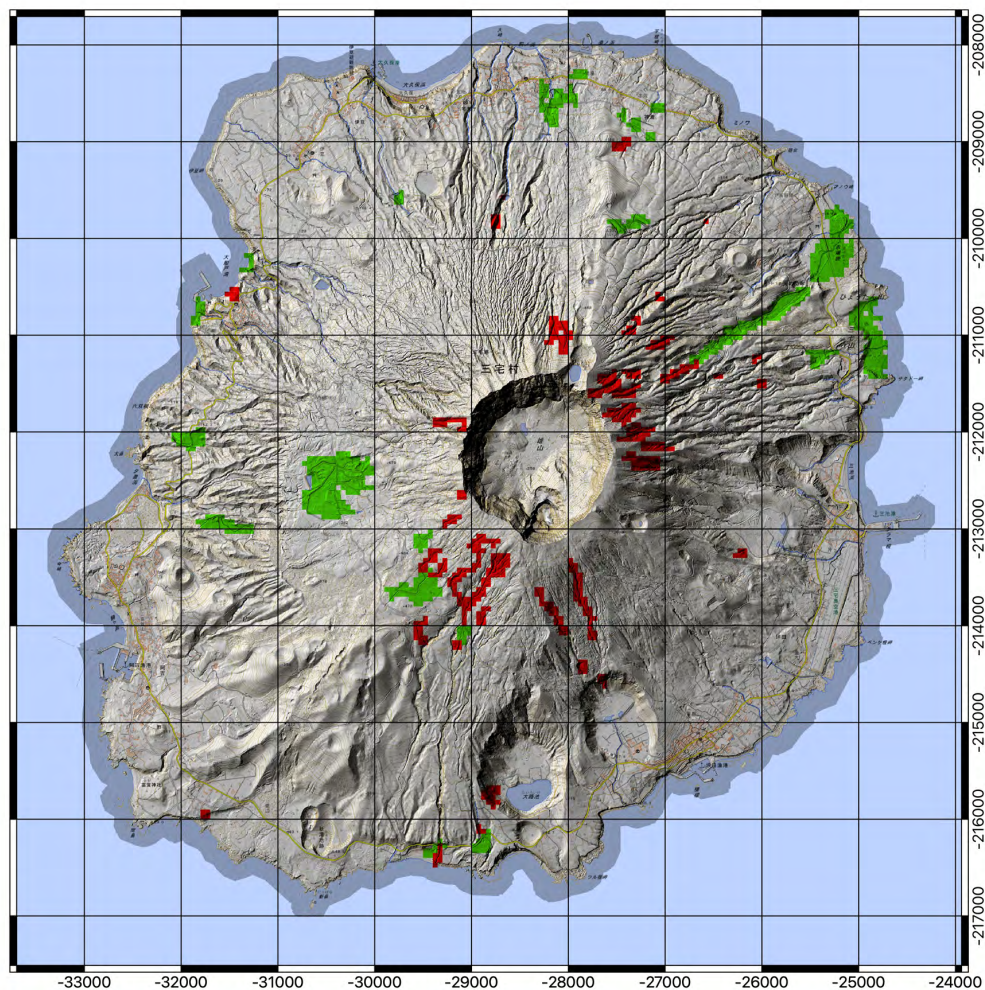
附图 B1-1-6：土砂移動指数 (STI)



附图 B1-1-7：湿潤度指数

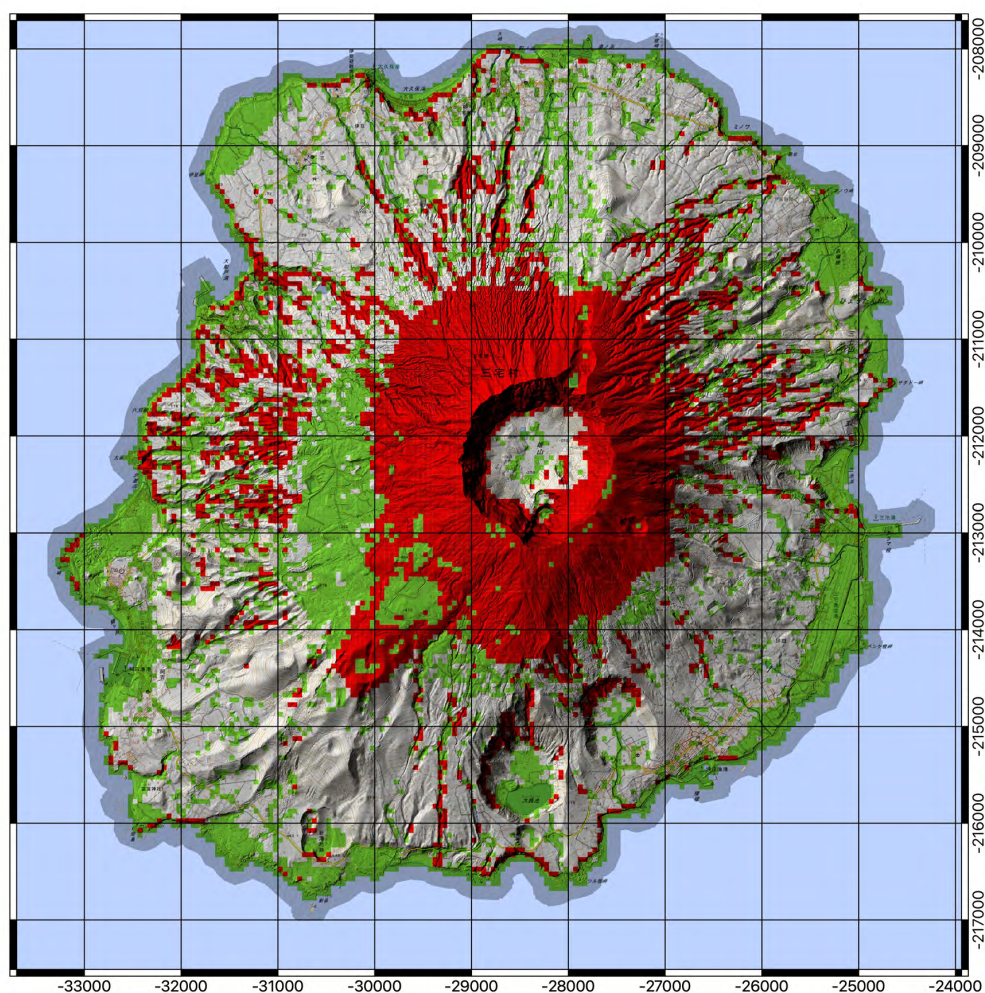


附图 B1-1-8：空中写真判読結果 (2011年11月)



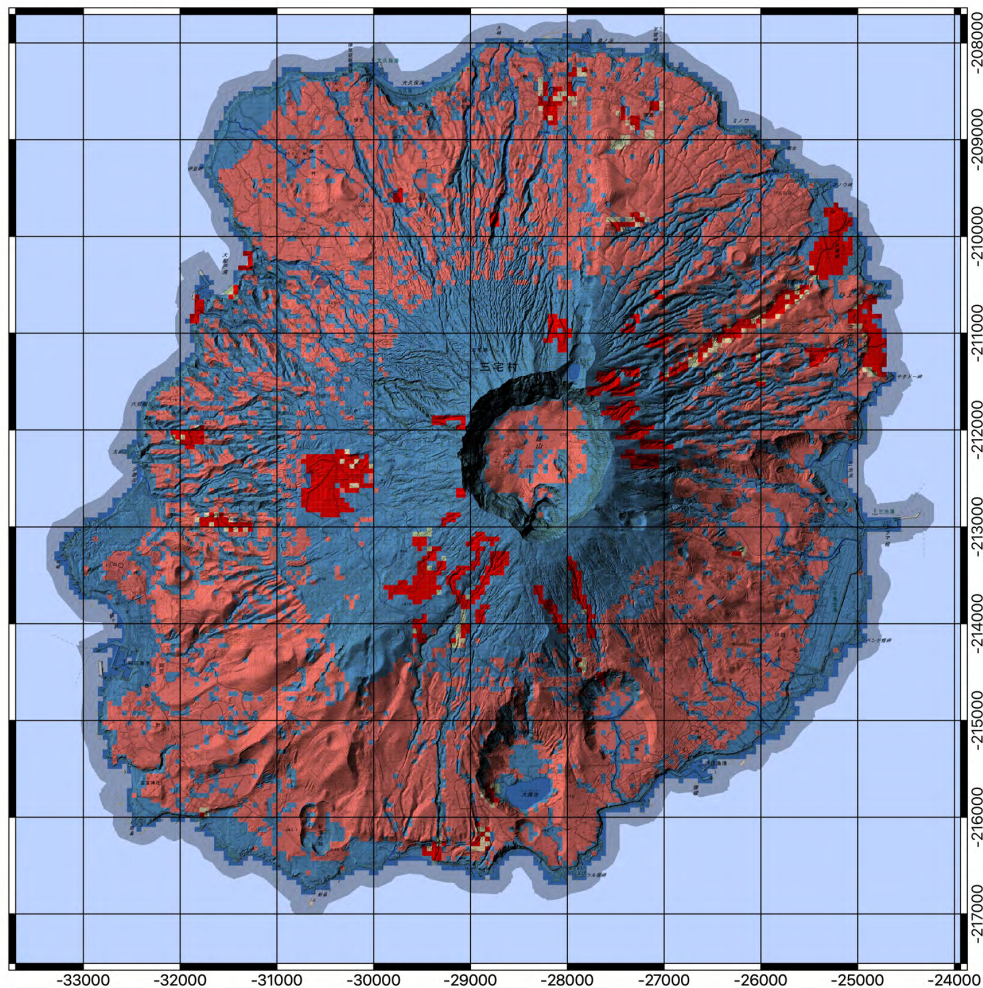
附図 B1-1-9：メッシュ化した空中写真判読結果

0 1000 2000 m



附図 B1-1-10：決定木による推定結果

0 1000 2000 m



判定効率表に基づく分類

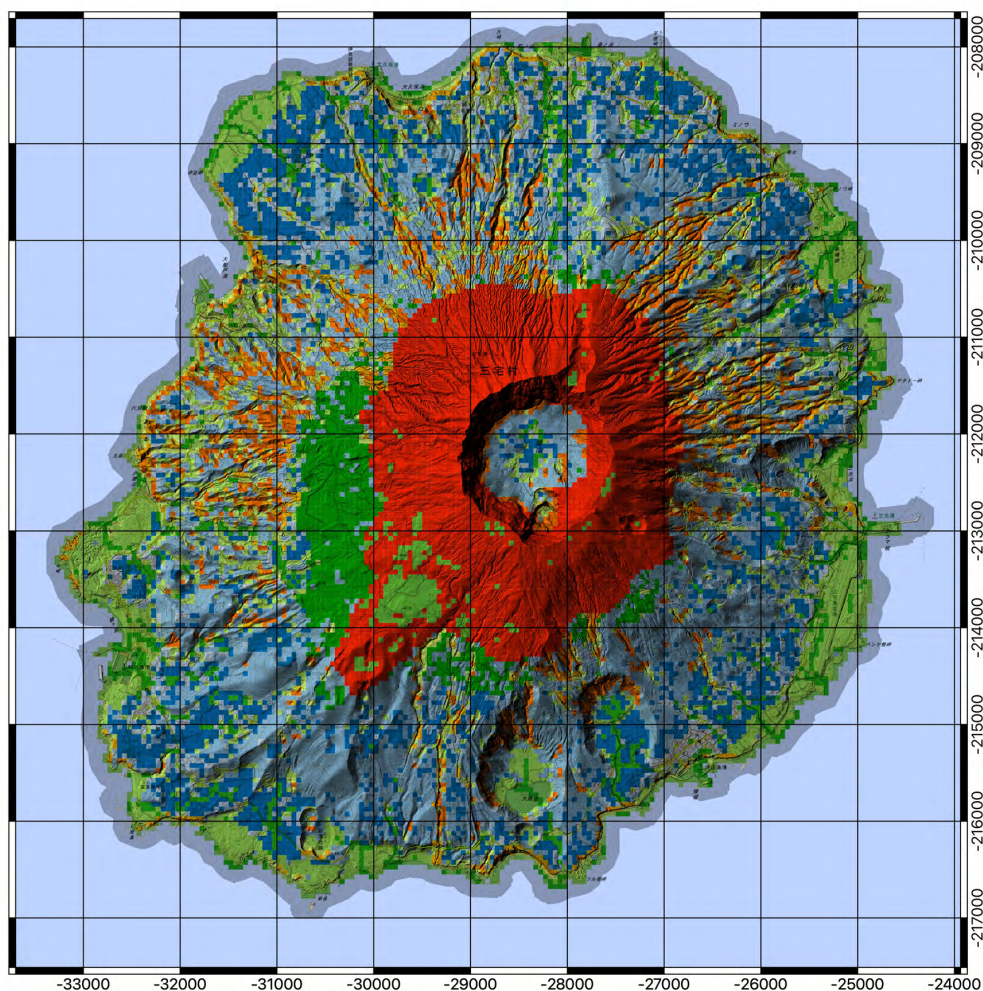
判定効率表に基づく分類

- なし→なし
- なし→堆積
- なし→侵食
- 堆積→なし
- 堆積→堆積
- 堆積→侵食
- 侵食→なし
- 侵食→堆積
- 侵食→侵食

	決定木による推定値			合計
	なし	堆積	侵食	
なし	9,928	6,031	5,552	21,511
堆積	94	544	19	657
侵食	23	31	402	456
合計	10,045	6,606	5,973	22,624

附図 B1-1-11：判定効率表に基づく分類

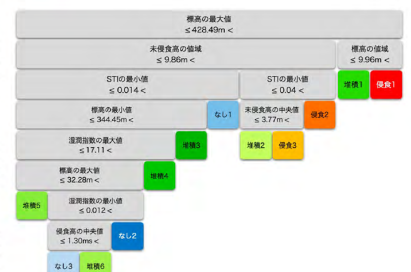
0 1000 2000 m



分類結果

ツリー構造に基づく分類

- なし3
- なし1
- なし2
- 堆積2
- 堆積6
- 堆積5
- 堆積1
- 堆積4
- 堆積3
- 侵食3
- 侵食2
- 侵食1

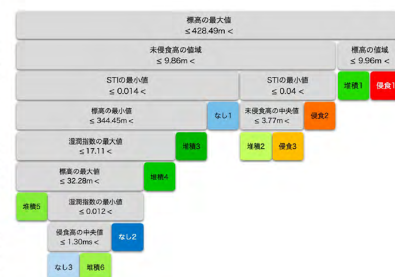


附図 B1-1-12：ツリー構造に基づく分類結果

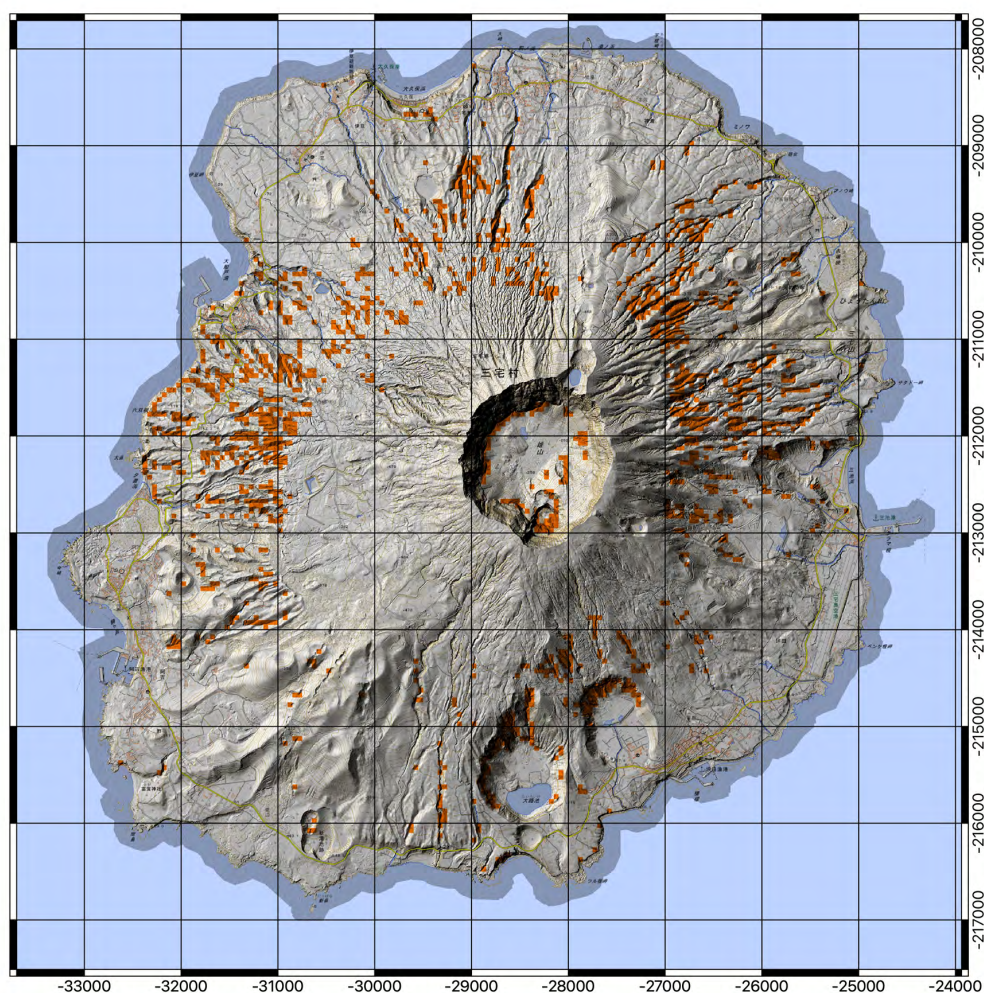
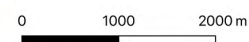
0 1000 2000 m



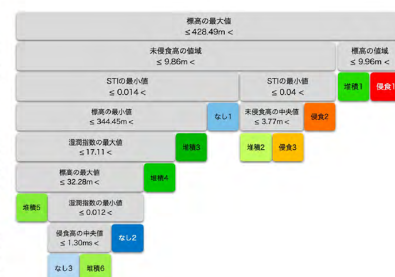
分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ 侵食1



附図 B1-1-13：ツリー構造に基づく分類（侵食1）

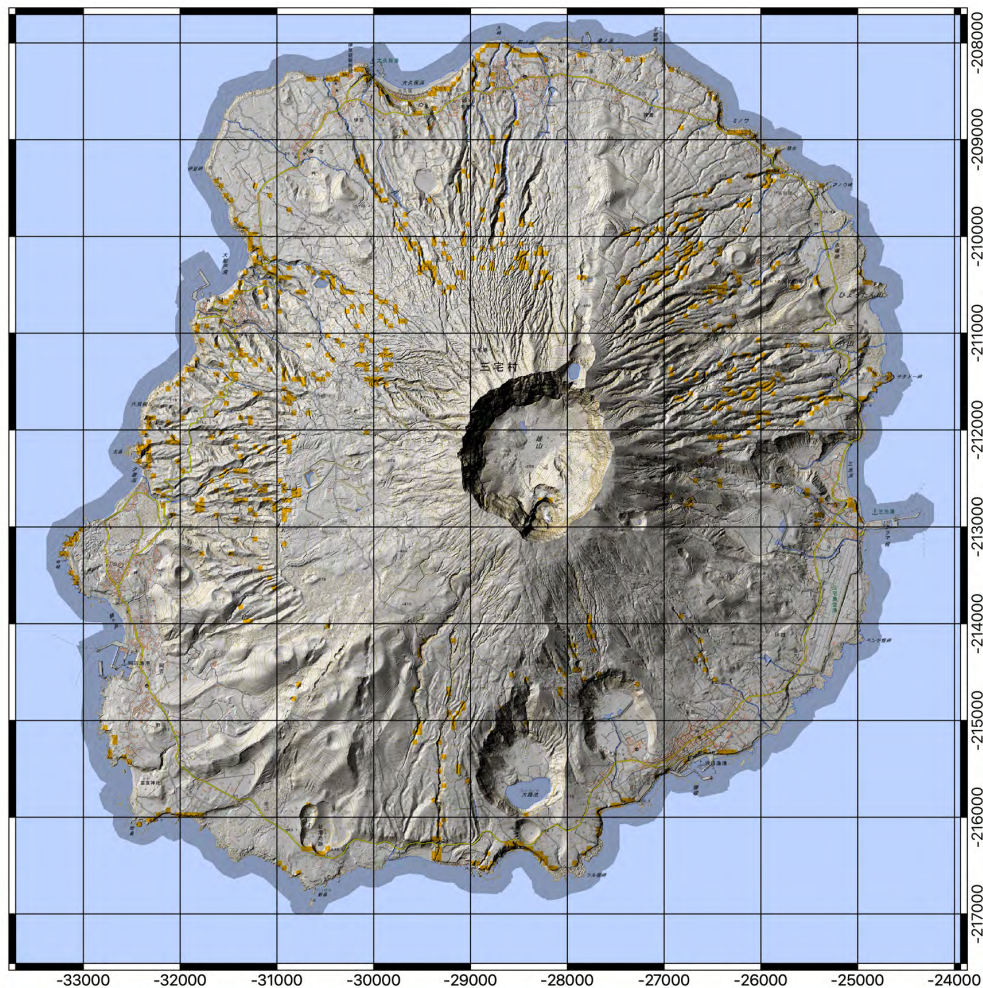


分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ 侵食2

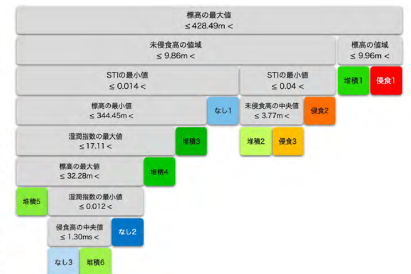


附図 B1-1-14：ツリー構造に基づく分類（侵食2）

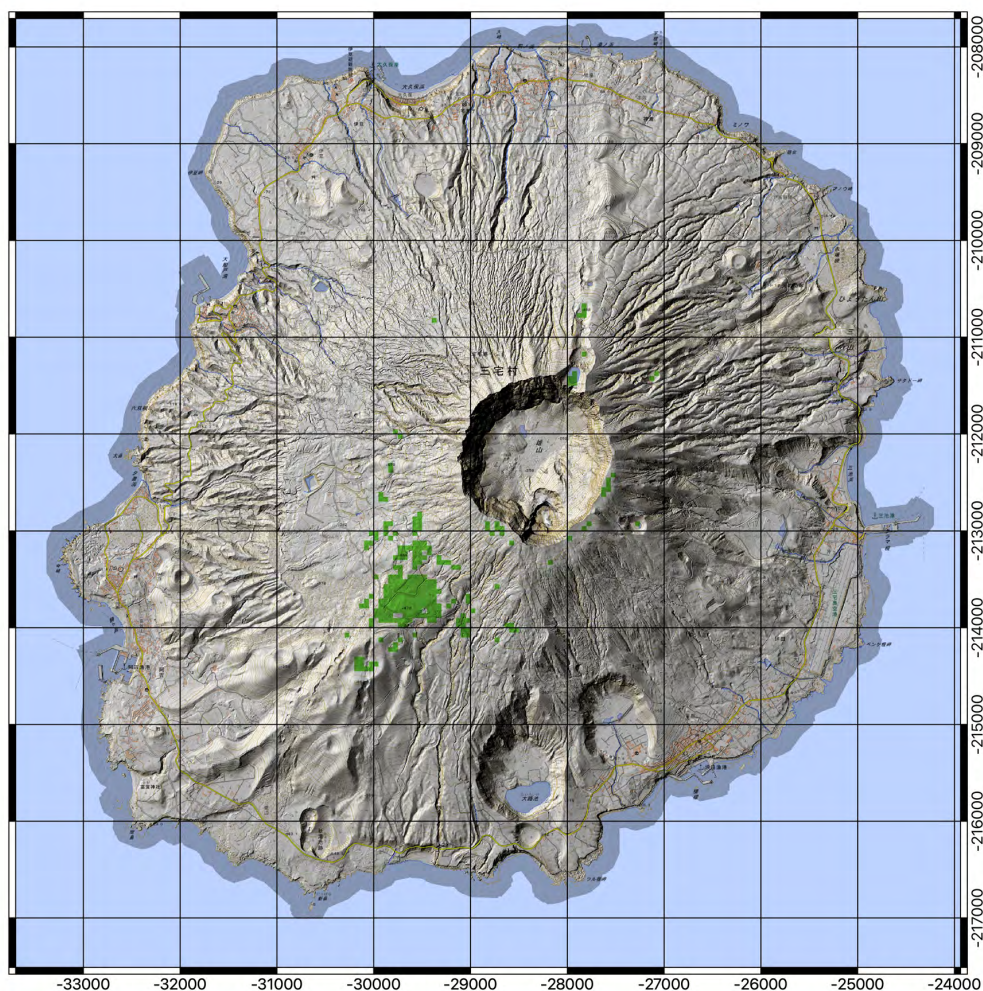




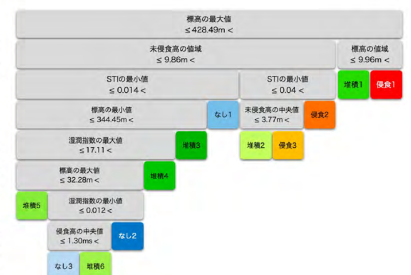
分類結果
ツリー構造に基づく分類
● 侵食3



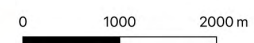
附図 B1-1-15：ツリー構造に基づく分類（侵食3）



分類結果
ツリー構造に基づく分類
● 堆積1

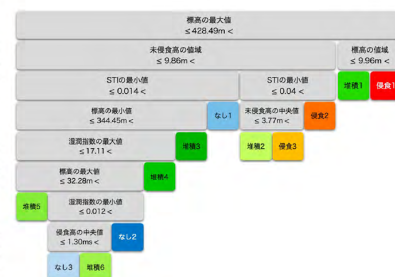


附図 B1-1-16：ツリー構造に基づく分類（堆積1）

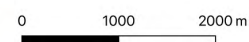




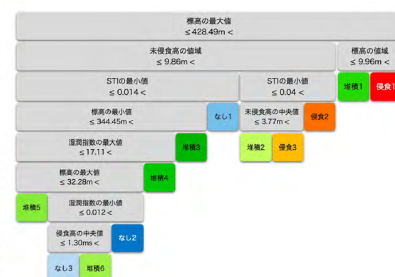
分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ 堆積2



附図 B1-1-17：ツリー構造に基づく分類（堆積2）

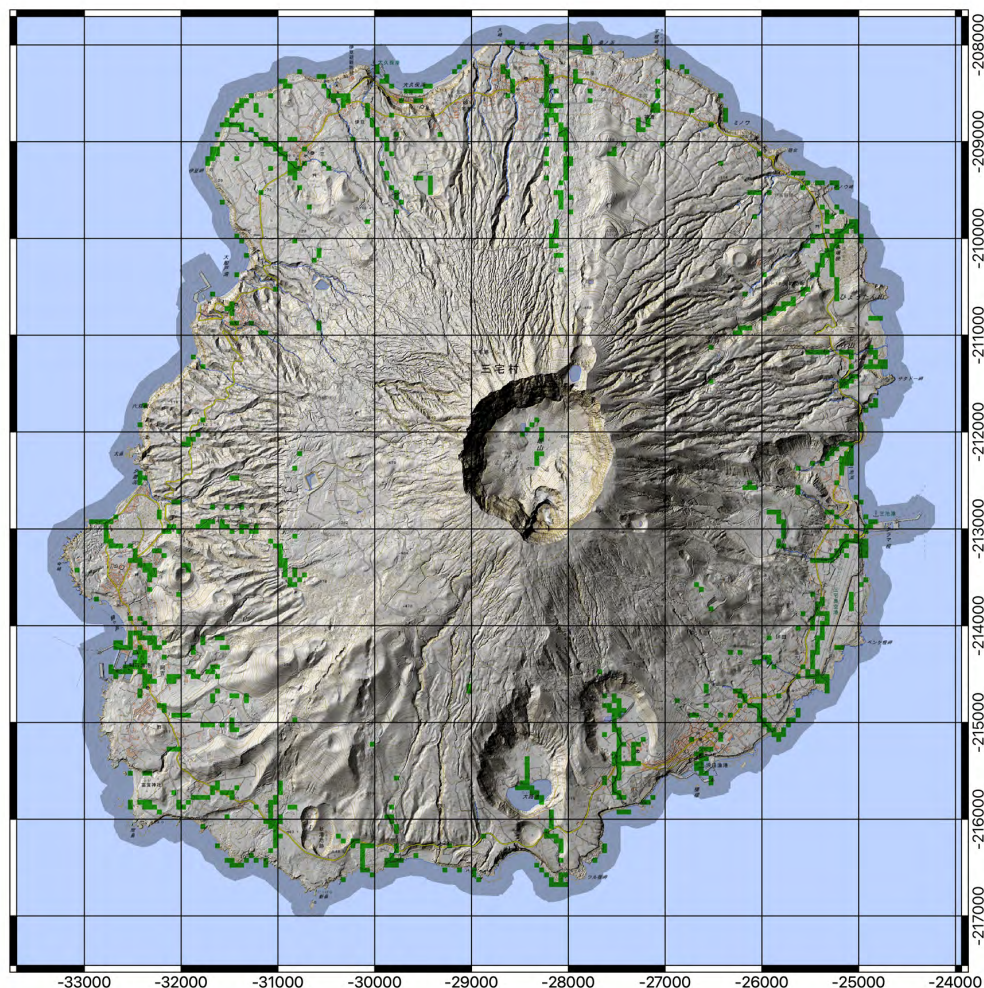


分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ 堆積3

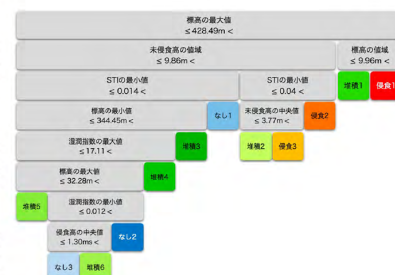


附図 B1-1-18：ツリー構造に基づく分類（堆積3）





分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ 堆積4

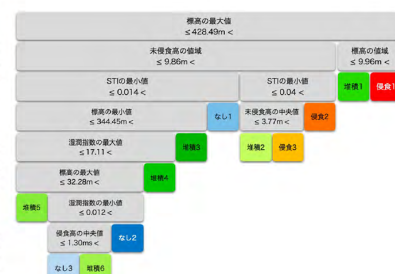


附図 B1-1-19：ツリー構造に基づく分類 (堆積4)

0 1000 2000 m



分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ 堆積5

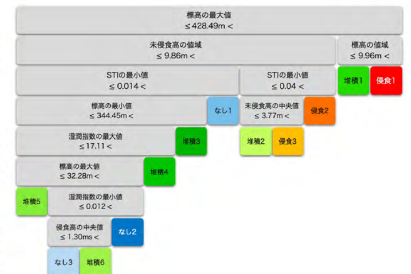


附図 B1-1-20：ツリー構造に基づく分類 (堆積5)

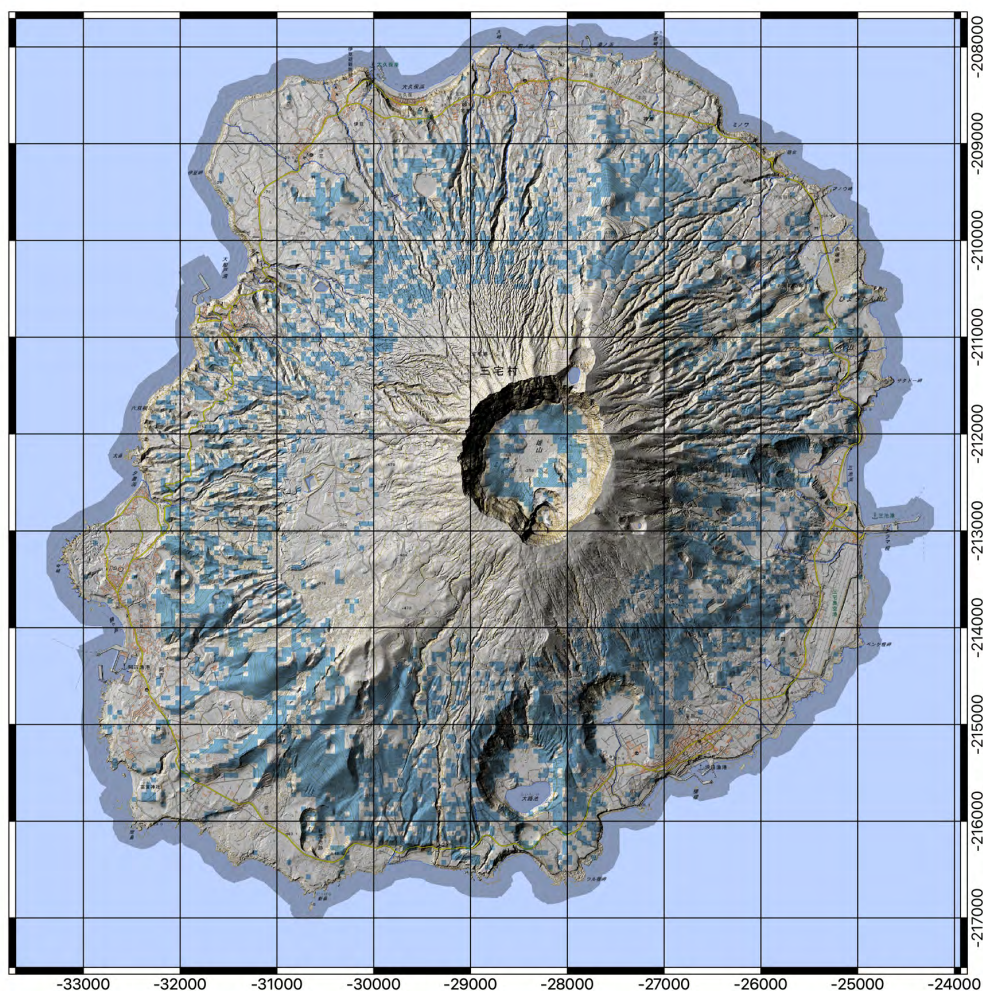
0 1000 2000 m



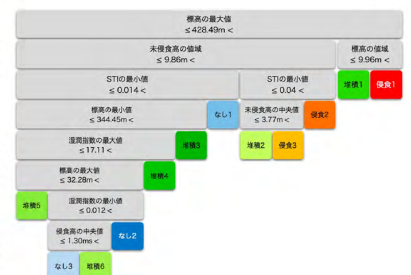
分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ 堆積6



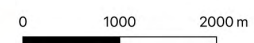
附図 B1-1-21：ツリー構造に基づく分類（堆積6）

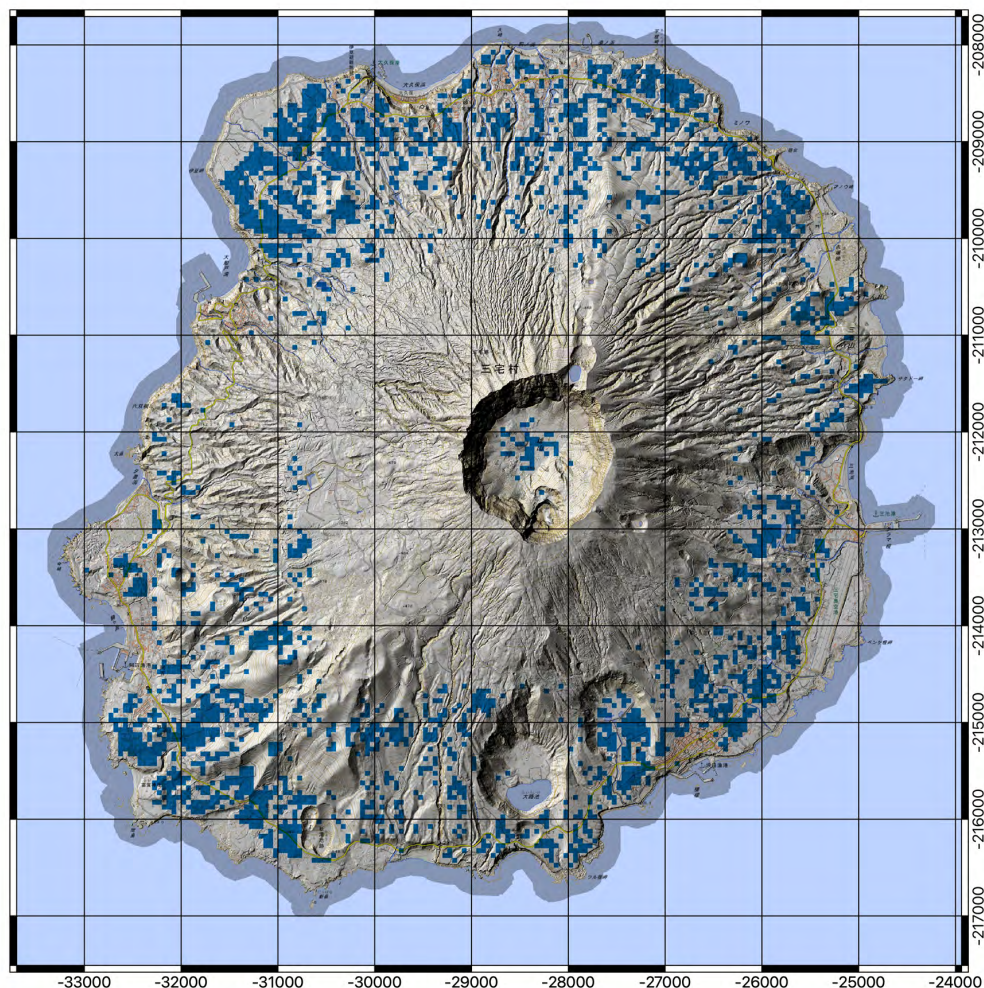


分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ なし1

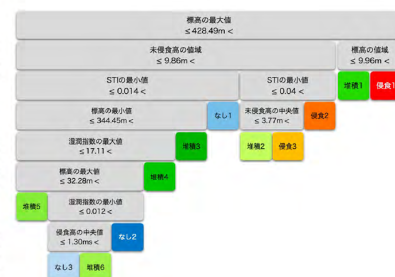


附図 B1-1-22：ツリー構造に基づく分類（なし1）

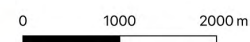




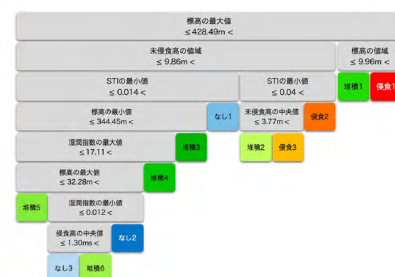
分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ なし2



附図 B1-1-23：ツリー構造に基づく分類（なし2）



分類結果
ツリー構造に基づく分類
■ なし3



附図 B1-1-24：ツリー構造に基づく分類（なし3）



火山災害研究センター中間報告 サブテーマ<B2>

代表者：岸祐介

はじめに

火山災害からの避難においては、噴火前であれば常時の観測内容に基づいた噴火の警戒レベルなどによって判断することが可能である。しかし、状況によっては噴火警戒レベルの低い状態での噴火などで、噴火開始後に避難行動に移る状況も想定され、そのような緊急時における避難状況の想定も避難計画の策定にあたっては考慮する必要があると考えられる。また火山災害にはいくつかの現象があるが、噴石、火砕流、火山泥流などは噴火から短時間で発生するため、上記のような状況における避難行動に対して、影響を及ぼす可能性は十分に考えられる。

火山災害による人的被害として、近年では2014年の御嶽山噴火で58名もの死者がでており、5名が行方不明、69名の方が負傷されている。（内閣府，2015）2018年には草津白根山の噴火で1名の死者と11名の負傷者が出ている。（内閣府，2019）東京都では火山島からなる島しょ地域を有しており、2000年6月の三宅島における噴火などは記憶に新しい。こうした火山災害が懸念される地域において、避難状況に関する想定・検討は質的変数に基づく計画理論とともに、量的変数を扱う数値計算からも行われることが望ましい。

そこで本研究では、様々な災害シナリオに対する群集避難状況を想定した数値シミュレーションを実施し、ハザード評価を試みる。また、その結果を踏まえて避難誘導方法、災害対策について検討を行い、避難対策等の有

効性を評価するとともに避難計画策定時に用いることのできる資料として取りまとめることを考えている。

これまでの研究成果

対象地域について、東京都の島しょ地域の中から対象地域の規模（モデル化領域の考慮）と東京都総合防災部の避難計画策定状況（2017年2月時点）を勘案し、新島を対象として検討することとした。東京都の人口統計データによると、新島村：2,645名（うち500名ほどが式根島地区，2017年9月時点）となっており、人口規模は三宅村：2,391名と同等である。



図1 検討対象地域（新島）

今回の検討では式根島地区は含まず、本村付近の部分的なモデル化領域における検討結

果を報告する。

数値計算方法にはマルチエージェントシミュレーション (Multi-Agent Simulation, 以降 MAS と記す) による検討を行った。MAS では個々のエージェントに独立した特性を定義し、その相互作用について検討を行うことが可能であり、災害時の外的因子による避難行動の変化を検討することを視野に、今回の検討で用いることとした。対象地域はネットワーク型の数値空間として定義し、ノードとエッジによって交差点、分岐路と道路を結合した。(図2 参照)

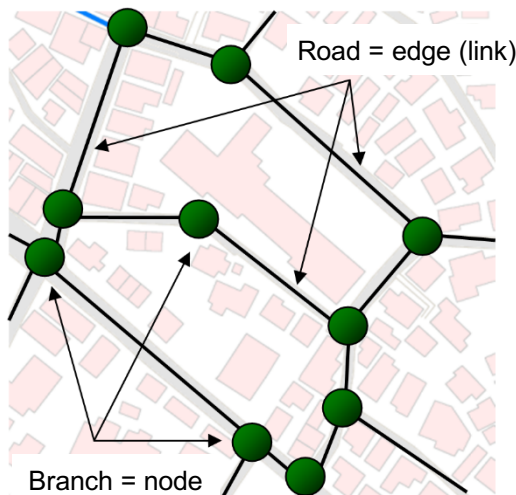


図2 ネットワーク型空間イメージ

シミュレーションではエージェント (避難者) の避難行動は外生計算に基づいて目的地まで移動させることとした。ここで、目的地までの移動経路の外生計算はグラフ理論の一つであるダイクストラ法 (Dijkstra, E. W., 1959) によって求めた。移動経路の計算においては、火山災害を想定していることから宮塚山、向山から新島港へ向かうものと考え、新島港を目的地とする経路計算を行った。

また、避難者の移動手段については基礎的な検討として徒歩に限定した。なお、三宅島

における避難計画では、島内避難において「一時集合場所または都道のバス停留所に徒歩で集合し、避難港まで村営バスで移送」されることとなっているが (三宅島火山防災協議会, 2017), 本検討では避難港まで徒歩によって移動するものとした。歩行速度に関しては、性別および年代別に関して変動するパラメータとして扱うものとし、図3に示す既往の調査結果に基づき各年代、性別の避難者に関して以下のように設定を行っている。(阿久津, 1975)

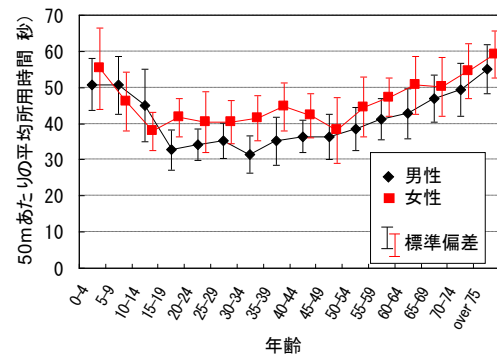


図3 年齢別の歩行速度

$$V = V_{\mu} + \sigma \quad (1)$$

ここで、 V : 避難者の歩行速度、 V_{μ} : 各年代、性別における平均歩行速度、 σ : 各年代、性別における歩行速度の標準偏差。

なお、年齢別の分布については逐次データが公開されていないため、平成27年の国勢調査の結果に基づき、年齢の分布を同割合として適用している。

避難者には回避規則を設け、避難者同士の衝突を避けるように設定している。回避規則のイメージを図4に示す。シミュレーションでは、避難者の回避行動規則に関して次のような設定を行った。まず避難者の進行方向に対し、前方180°、人体を中心に避難者のパーソナルスペース (Hall, E.T., 1990) を定義し、

その範囲内に他の避難者の存在が認められた場合は、回避行動を取るものとした。

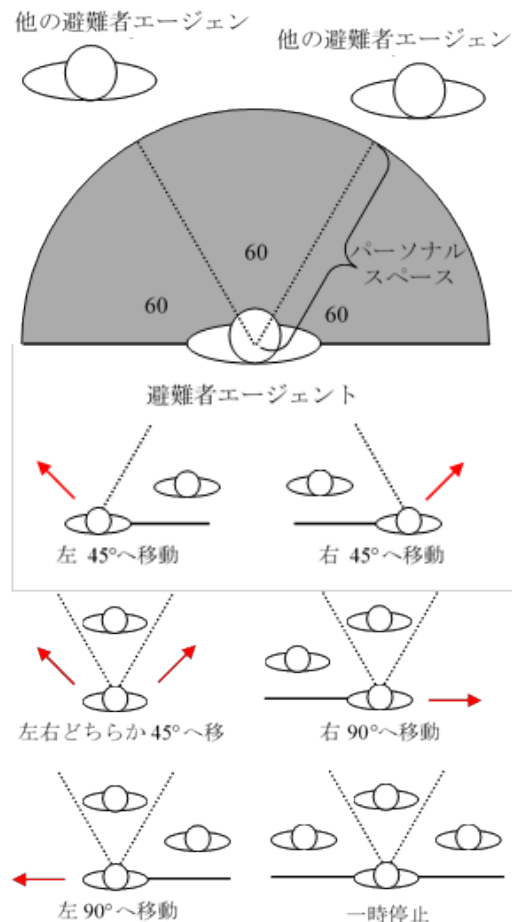


図4 回避行動規則イメージ

前方左側 60°に他者を認めた場合は右斜め 45°方向へ、前方右側 60°に他者を認めた場合は左斜め 45°方向へ回避行動を取るものとした。また、前方 60°の範囲に他者を認めた場合はランダムに左右斜め 45°方向へ回避行動を取り、前方 60°の範囲と左右いずれか 60°の範囲に他者を認めた場合には、左右のうち他者のいない方向へ 90°の回避行動を取るものとした。さらに、前方および左右の 60°のいずれにも他者を認めた場合には、一時停止するものとした。回避規則を設けた。

他者を認識するパーソナルスペースに関しては、既往の検討（北原ら，2013）において避難完了時間に大きく影響すること、パーソナルスペースが 1.0m 以下では避難完了時間への影響は小さいことを確認していることから、今回の検討においては 1.0m とした。



図5 避難状況（シミュレーション結果）

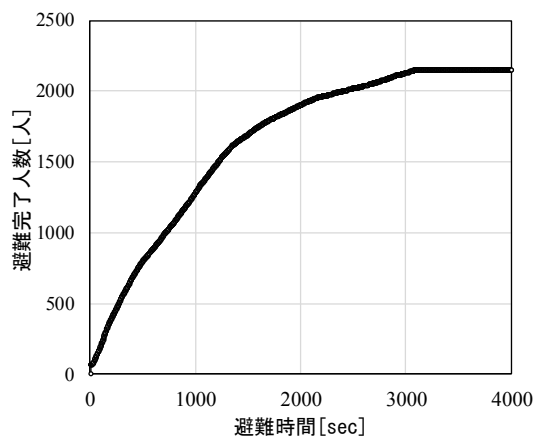


図6 避難完了人数－避難時間

図5は数値シミュレーションにおける群集避難の状況を表したものである。図中に避難者を表すエージェントを赤点で示しており、海岸へ向かう経路と、海岸沿いの道路を左下（新島港方面）へ向かって赤点が連なっており、避難群集の移動を表している。

図 6 は避難完了人数の避難時間の関係を示したものである。今回の検討では本村地域のみ避難者を分布させてシミュレーションを実施したところ、群集全体の避難完了までは 3000 秒以上の時間を要するという結果が得られた。

参考文献

- 内閣府：御嶽山の噴火状況等について，2015.8.11． URL： <http://www.bousai.go.jp/updates/h26ontakesan/pdf/h27ontakesan45.pdf>
- 内閣府：草津白根山の火山活動の状況等について，2019.1.29． URL： http://www.bousai.go.jp/updates/h30kusatsushirane/pdf/h30kusatsushirane_05.pdf
- Dijkstra, E. W., “A Note on two problems in connection with graphs”, *Numerische Mathematik*, 1, pp.269-271, 1959.
- 阿久津邦夫，“歩行の科学”，岩波新書，1975.
- 三宅島火山防災協議会：三宅島火山避難計画，2017 年 5 月． URL： https://www.bousai.metro.tokyo.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_001/003/342/miyake_hinan.pdf
- Hall, E. T. :The Hidden Dimension, Anchor Books (Reis-sue), pp.119-121, 1990.
- 北原武嗣，岸祐介，久保幸奨：高低差を考慮した津波災害時の群衆避難における経路選択に関する一検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学） Vol.69, No.4, 地震工学論文集，Vol.32, pp.I_1067-I_1075, 2013 年 6 月．

今後の研究計画

これまでの検討では、伊藤手段を徒歩に限定して検討を進めてきたが、すでに公開されている伊豆大島や三宅島の避難計画では、島内の避難でバスの利用が考えられており、状況によって

自家用車による移動も考えられることが示されている。今後の検討においては、上記のように異なる移動手段を合わせた検討が必要であると考えている。

また、現在の検討は夜間人口をベースとしているが、島しょ地域は夏季に多くの観光客が来島するため、観光客の多い時期を想定した検討も必要と考えられる。

上記のような避難群集の設定に関する検討を踏まえた上で、以下の検討を予定している。

(1) 災害シナリオの設定

検討対象とする火山災害の設定および災害状況の時系列変化の設定。避難シミュレーションの実施および結果について整理と評価を行う。

(2) 問題点の抽，出対策の検討

避難誘導方法，その他の災害対策方法についての検討を行う。また，災害時の情報網に関しても検討する。さらに，災害対策を導入したシミュレーションを作成する。

(3) シミュレーションによる検証

避難誘導方法，災害対策法の有効性に関する検討，情報伝達／拡散が機能した場合の避難状況の変化に関する検討。

火山災害研究センター中間報告
火山噴火による社会経済への間接的影響の評価<B3>
代表者：石倉智樹

はじめに

日本は 110 の活火山を持つ火山大国であり、これらは数百年の周期で大規模な噴火活動を繰り返し、広域的な被害を与えてきた。例えば、1707 年の富士山の宝永噴火は、火山噴出物により周辺の村々の農作地を農作不能の地に変え、江戸にまで数センチの火山灰を降らせた。

また浅間山の天明噴火においては、火山灰が江戸を含む関東地方の広い範囲に降り、噴出物によって発生した泥流が利根川を流下して河口の銚子や、分流して江戸にまで達したという事例がある。

火山噴火がもたらす災害のうち、火山灰の降灰は、短期間のうちに広範囲に影響を及ぼすという特徴がある。降灰は直接的には農作物等への被害をもたらすが、道路への降灰は地域間の交通を遮断し、降灰が生じていない地域へも交易の減少など間接的な社会経済的影響を及ぼす。

本研究は、火山噴火降灰によってもたらされる物流および交易費用への影響を評価するための基礎的な手法について検討し、関東地方への降灰をもたらす活火山、例えば富士山、の火山噴火による降灰がもたらす広域的な影響推定を試算する。これを受けて、災害時に社会経済活動のボトルネックとなりうる箇所を事前に把握し、強靱化、容量拡大のための整備案検討に資することが期待される。

研究の大枠は、火山噴火降灰による交通ネッ

トワーク(道路)の直接被害が、物流や産業活動(地域間交易)に及ぼす間接的影響を評価するという方針である。これまで、手法の根幹となる数理的理論構築、理論に基づく計算プログラムの中核部分の開発について概ね完了させた。テストケースとして、地域の単位を粗く産業分類も行わない簡便な評価モデルを開発し、富士山噴火と浅間山噴火の広域的な経済被害の推定を行った。

今年度は、これをより実用レベルに近づけるため、地域の単位を都道府県から市町村に細分化し、これに対応した交通ネットワークデータを構築すること、および産業部門分類を複数化した分析フレームワークを構築することを目的としている。この改良により、市町村単位での影響の差異や、地域による産業構造の違い(1 次産業や 3 次産業の比率など)などを反映した評価が可能となる。

これまでの研究成果

2018 年度までに、交通ネットワークと経済活動の相互作用を考慮した災害被害評価手法に関する文献調査、火山噴火の社会経済被害を評価するための手法開発の構成要素となる理論的枠組みの検討、交通ネットワークデータの収集整理、を実施した。また、東京都に降灰の影響が及ぶ浅間山と富士山の噴火を想定し、簡易交通ネットワークデータを用いた物流・交通への影響予測の試行(図-1)を行った。



図-1 富士山噴火による物流経路への影響予測の試行結果

2019 年度は、開発中の手法をより実用レベルに近づけるため、地域の単位を都道府県から市町村に細分化し、これに対応した交通ネットワークデータ(図-2)を構築すること、および産業部門分類を複数化した分析フレームワークを構築した。さらに、関東地域における活火山のハザードマップを活用し、火山降灰により直接影響を受ける道路交通ネットワーク箇所を評価するとともに、ネットワーク接続の脆弱性の定量評価方法を検討した。

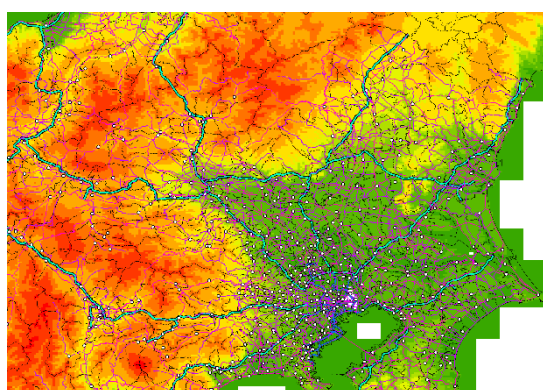


図-2 詳細な交通ネットワークのイメージ

ている。この改良により、市町村単位での影響の差異や、地域による産業構造の違い(1次産業や3次産業の比率など)などを反映した評価が

可能となる。

今後の研究計画

今後は、東京都に係る地域間交易の物流経路に対して影響が大きいと予想される富士山や浅間山などの噴火によって、噴石や降灰が及ぶ範囲、それによって交通機関が受ける障害の度合いと継続期間について、内閣府中央防災会議や火山関連の種々の研究によって提示されている情報を基に、想定される火山降灰シナリオを検討する。本研究で構築したシステムを各シナリオに対して適用し、火山噴火による経済被害を受けやすい地域、災害時に交通ボトルネックとなりやすい地域を抽出し、間接被害の軽減に資するインフラ整備等の施策案について検討する予定である。

都政へのフィードバックとしては、深刻な交通渋滞発生箇所やサプライチェーンへの影響が大きな地域についての予測結果を提供、火山噴火時において交通障害が大きな地域においてインフラ整備を行った場合に軽減される効果の評価、などの政策検討の支援情報提供を目指している。

火山災害研究センター中間報告 サブテーマ<C>

代表者：上野敦

1. はじめに

近年の建設分野では、未利用資源や副産材料をなどの環境負荷を低減し、天然資源の温存を図るタイプの材料を積極的に利用することが求められている。これは、IPCCでの気候変動の抑制のための地球温暖化ガスの排出抑制に端を発し、その後の2015年の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」で述べられている国際目標を達成するための活動の一環となっている。

伊豆諸島のような島嶼部では、都市を形成するために用いるコンクリート用材料のほぼ全てを島外から運搬している。伊豆諸島は火山島で構成されており、各島内には火山性の堆積物が岩石粒として存在している。これらの火山性堆積物は、粉体粒子の粒径であればフィラーや結合材として、骨材粒子の粒径であれば骨材としてコンクリート用に用いることも考えられるが、日本産業規格の品質規定を満足していない場合、コンクリート用材料としての利用は通常はなされない。しかし、特定の未利用の資源を使用するための地方規格を作成して、非構造部材のプレキャストコンクリート製品に用いる対応は、これまでも愛知県[1]、香川県[2]などで行われている。

本研究では、伊豆諸島を対象に、未利用の島内の資源をコンクリート用材料として使用する論理の構築を目的としている。このことは、平常時には、コンクリートの製造に伴う環境負荷物質の排出抑制やSDGs達成のための活動として位置付けられる。そして、火山災害発災時には、急速な都市機能の復旧とその後の復興期に島内の

資源を利用して都市を形成するための論理となる。したがって、平常時にこの論理構成を行なっておくことの意義は大きいと考えられる。

技術的な側面からは、火山島の地表面に存在する火山性堆積物が、急冷の火山性の岩石であることに注意すべきである。急冷の火山性堆積物は、非晶質かつ疎な構造を持つことが多い。非晶質で反応性が高い場合は、微粉碎してセメントの代替材料に用いることも可能となるが、疎な構造による影響が卓越する場合は、コンクリートの強度および構造物の耐久性を低下させる要因ともなる。すなわち、堆積年代が古い火山性堆積物を用いるためには、反応性の評価と物性による影響の両面を把握する必要がある。

上述の背景と目的に則り、神津島産の流紋岩質軽石、伊豆大島産の堆積年代の異なる2種類のスコリアを用いたモルタルの基礎特性について検討した。神津島産の軽石を用いたシリーズでは、粒子材質としての反応性の評価およびモルタルの強度について検討した[3]。また、伊豆大島産のスコリアを用いたシリーズでは、神津島産の軽石を用いたシリーズで、粒子の反応性と比較して粒子の疎密の影響が顕著となることが明らかになっていたため、強度特性および細孔径分布について検討した[4]。本報告では、これまで実施してきた検討内容の概略を示すとともに、今後の研究計画について取りまとめた。

2. これまでの研究成果

2.1 神津島産の火山礫を用いたシリーズ

2.1.1 使用材料

表-1 使用した細骨材（神津島火山礫シリーズ）

種類	記号	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)	実積率 (%)	粗粒率	API値 (%)
標準砂	SS	2.61	0.42	—	66.7	—	-4.21
神津島産火山礫	K	2.06	8.47	2.20	66.1	2.68	5.11
北見産火山礫	Y	1.87	15.7	22.9	61.8	2.08	11.65
砕砂	CS	2.59	2.59	—	—	3.04	—
再生細骨材M	RM	2.43	5.86	0.9	60.9	2.82	—

セメントには、密度 3.16g/cm³ の普通ポルトランドセメントを用いた。本シリーズで使用した細骨材は、表-1 に示す 5 種類である。主な検討対象の神津島産の火山礫に加え、同様の火山性堆積物である北海道北見市産の火山礫、八王子付近で一般的に使用される相模原産の砂岩砕砂(JIS A 5005)、疎な構造を有する細骨材として再生細骨材 M(JIS A 5022)、ベースとなる細骨材としてセメント強さ試験用標準砂(珪砂, JIS R 5201)を用いた。

2. 1. 2 モルタルの配合

モルタルの配合では、水セメント比を 0.40, 0.50 および 0.60 の 3 水準とし、砂セメント比を 3 とした。神津島産の火山礫および北見産の火山礫については、標準砂を 50%および 100%体積置換する形でモルタルを形成した。

2. 1. 3 試験項目と試験方法

モルタルの圧縮強度は、JSCE-G 505 に準拠し、φ 50mm×100mm の円柱供試体で試験した。材齢は 28 日および 91 日とし、所定材齢まで 20℃ の水中養生を行なった。

火山性堆積物の反応性の指標として、フライアッシュの促進化学試験方法(API 法)[5]により、ポゾラン反応性を評価した。ポゾラン反応とは、ガラス質のシリカと、セメントコンクリート中の水酸化カルシウムおよび水との反応で、不溶性の C-S-H ゲルを生成する反応である。

2. 1. 4 結果および考察

(1) 反応性（API 法の結果）

各火山礫の API 法の試験結果は、表-1 に示すとおりである。山本らの報告[5]では、フライアッシュの API 値がおおよそ 60%程度であることから、神津島産の火山礫と北見産の火山礫は、API 値が低く反応性が小さいことがわかる。また、標準砂は、化学組成のほとんどが結晶質の SiO₂ であるため、API 値は 0 になると考えたが、標準砂の API 値は負の値であった。これは、標準砂によってセメントの分散性が向上し、このことにより反応率が増加し、セメントからの Ca²⁺の溶出が促進されたためと考えられる。

(2) 圧縮強度

図-1 に材齢 91 日におけるモルタルの圧縮強度と使用した細骨材の吸水率の関係を示す。W/C にかかわらず、細骨材の吸水率が高くなるとモルタルの圧縮強度が直線的に低下することがわかる。モルタルの強度に対して細骨材の疎な構造が顕著に影響することがわかる。

図-2 に材齢 91 日におけるモルタルの圧縮強度と API 値の関係を示す。フライアッシュを使用した場合、API が高いとモルタルの強度が高くなるが、W/C にかかわらず、火山礫では API と圧縮強度に負の相関があるとわかる。これは、本実験で使用した火山礫の API 値が高いものほど吸水率が高かったためと考えられる。

2. 1. 5 まとめ

(1) 火山礫のポゾラン反応が圧縮強度に及ぼす影響と比較して吸水率が圧縮強度に及ぼす影響が卓越する。

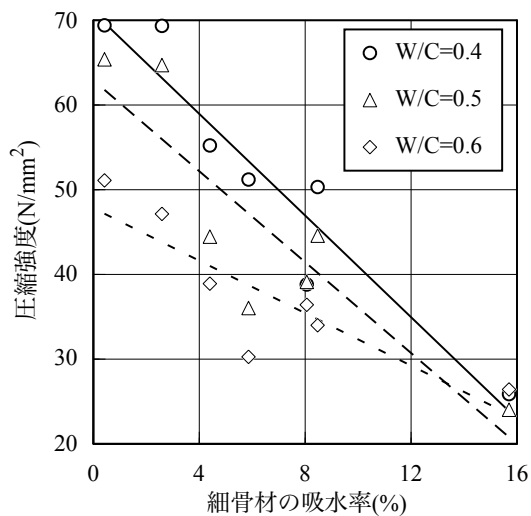


図-1 細骨材の吸水率と圧縮強度

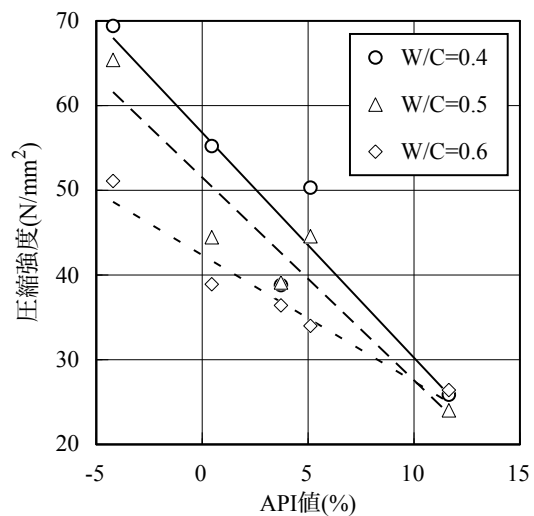


図-2 API 値と圧縮強度

表-2 使用した細骨材（伊豆大島産スコリアシリーズ）

試料	産地	密度(g/cm ³)		吸水率 (%)	実積率 (%)	粗粒率
		表乾	絶乾			
2-A	大島 (★)	2.10	1.99	5.35	48.0	3.15
裏砂漠	大島 (★)	1.89	1.65	14.6	55.0	3.41
砕砂	相模原	2.57	2.52	2.16	65.0	2.89

(2) API 値が 10%程度のポズラン反応性の低い火山礫を使用する場合は、粒子の疎密を表す吸水率を指標として圧縮強度を評価することが有効である。

2.2 伊豆大島産のスコリアを用いたシリーズ

2.2.1 使用材料

セメントは、密度 3.15g/cm³ の普通ポルトランドセメントを用いた。細骨材には、表-2に示す特性を持つ伊豆大島産の 2 種類のスコリアおよび比較用の砂岩砕砂(JIS A 5005)を用いた。2-A スコリアおよび裏砂漠スコリアは、同じ三原山の噴火により生成した火山性堆積物(火山礫)であるが、2-A スコリアは、約 1300 年前の噴火により生じたものであり、裏砂漠スコリアは 1986 年の噴火により生じたものである。両者は、図-3 に示すとおり、



図-3 スコリアの採取位置

近い場所から採取されたものであり、化学組成が極めて類似のものであると考えられる。

2.2.2 モルタルの配合

モルタルの配合は、表-3 に示すとおりである。砂岩砕砂を用いた配合(砕砂_100)を基準とし、この配合の細骨材体積を全量 2 種類のスコリア

表-3 モルタルの配合（伊豆大島産スコリアシリーズ）

記号	W/C	単位量(g/L)			
		W	C	CS	VS
砕砂_100	0.50	254	509	1527	—
2-A_50				764	614
2-A_100				—	1228
裏砂漠_50				764	553
裏砂漠_100				—	1105

*CS：砕砂，VS：火山性堆積物

で置き換えたもの(2-A_100, 裏砂漠_100)と，細骨材体積の 50%を 2 種類のスコリアで置き換えたもの(2-A_50, 裏砂漠_50)とした。

2. 2. 3 試験項目

(1) 圧縮強度

モルタルの圧縮強度は，JSCE-G 505 に従って試験した。供試体はφ50mm×100mm の円柱形とし，材齢 28 日まで 20℃の水中で養生した。

(2) 細孔径分布

モルタルの細孔径分布は，水銀圧入法により測定した。圧縮強度試験用の供試体と同一の寸法で作製し，同一の養生を行なった供試体から 2.5mm～5.0mm の試料を採取し，アセトン浸漬後に真空乾燥して試験に供した。

2. 2. 4 結果および考察

(1) 吸水率

2 種類のスコリアの吸水率は，表-2 に示したとおりである。両スコリアは，同一の火山から生成し，非常に近い場所で採取されたものであるが，吸水率は顕著に異なっている。生成年代の新しい裏砂漠スコリアの吸水率が顕著に大きく，非常に疎な粒子として地表面に存在していることがわかる。これは，マグマが地上で急冷される際に，急激な圧力の低下により蒸発成分(主に水)が急速に気化することで，生成当初は非常に疎な構造の塊状になることによると考えられる。そして，そ

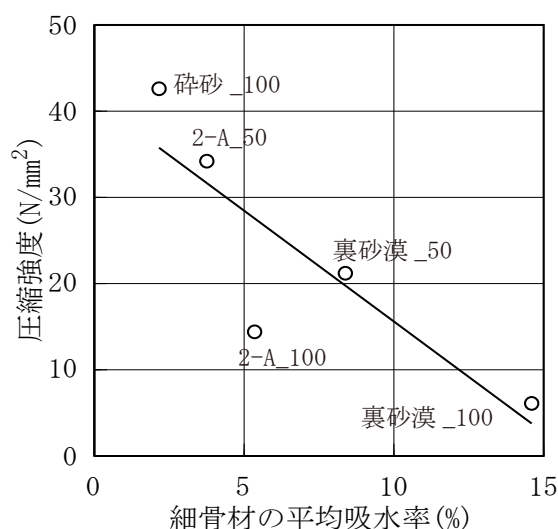


図-4 細骨材の吸水率と圧縮強度

の後に風化作用を受けることで，疎な粒子の空隙部分から崩壊して細粒化し，比較的密な小粒子となってゆくものと考えられる。

(2) 圧縮強度

使用した細骨材の吸水率とモルタルの圧縮強度の関係は，図-4 のとおりである。細骨材の平均吸水率が大きくなると，モルタルの圧縮強度が直線的に低下することがわかる。すなわち，火山性堆積物を用いたモルタルの圧縮強度は，使用する細骨材の吸水率に顕著に影響されることがわかる。

(3) 細孔径分布

各モルタルの細孔径分布は，図-5 に示すとおり

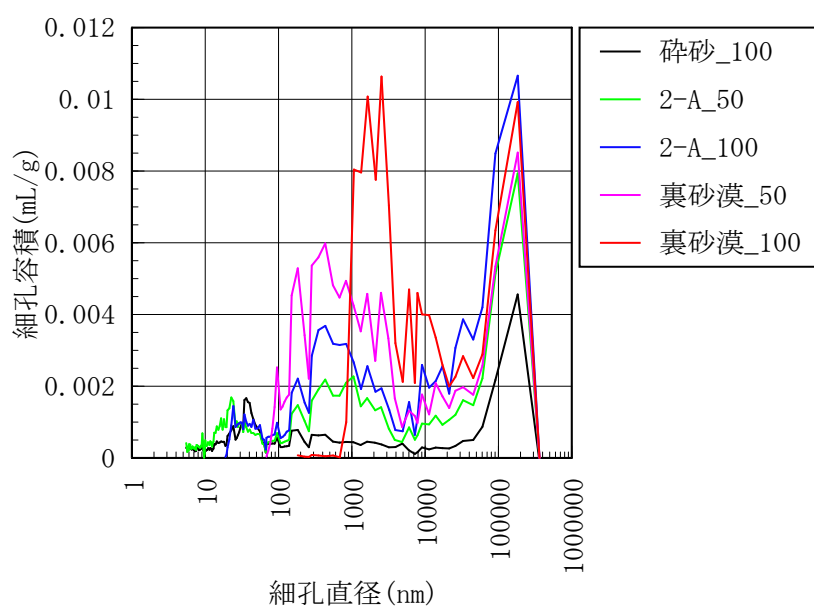


図-5 モルタルの細孔径分布

りである。裏砂漠_100 では、 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 程度の非常に大きな径の細孔量容積が顕著に多くなっている。2-A_100 でも、100nm 以上の径の細孔容積が多くなっている。裏砂漠_50 および 2-A_50 は、密実な砂岩砕砂との混合により、粗大な径の細孔容積が減少している。そして、裏砂漠_50 では、細孔形分布における最頻径も裏砂漠_100 と比較して顕著に小径側へ移動していることがわかる。

2.2.5 まとめ

- (1) 生成年代が新しいと、火山性堆積物は、吸水率が大きな疎な粒子として地表面に存在する。
- (2) 火山性堆積物を用いたモルタルの圧縮強度は、用いた細骨材の吸水率に顕著に影響される。
- (3) 吸水率の大きな火山性堆積物を用いた場合、モルタルの細孔径分布は顕著に疎なものとなる。

3. 今後の研究計画

- (1) 火山性堆積物の基礎情報として、化学組成およびガラス含有量を把握する。
- (2) 伊豆諸島の未入手の火山性堆積物について、継続して検討する。

- (3) 非構造用途のプレキャスト製品への利用の道筋を検討する。このためには、現地にて曝露試験を行うことが望ましい。曝露試験の可能性と、可能な場合のプレキャスト製品の種類について検討する。

参考文献

- [1] 愛知県, あいくる, 愛知県リサイクル資材評価制度 HP : <https://www.pref.aichi.jp/site/aicle/aicle-gaiyou.html>, (2020.1 参照)
- [2] 香川県, 環境森林部, 廃棄物対策課, 資源化・処理事業推進室 HP : <https://www.pref.kagawa.lg.jp/haitai/teshima/index.htm>, (2020.1 参照)
- [3] 五十嵐匠、上野敦、大野健太郎、宇治公隆：火山性堆積物細骨材の反応性と吸水率がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響, 木学会第 73 回年次学術講演会講演概要集, pp.299-300, 2018.8
- [4] 上野敦, 水谷巧, 大野健太郎, 宇治公隆：火山性堆積物細骨材の吸水率がモルタルの圧

縮強度と細孔構造に及ぼす影響, 土木学会第
74 回年次学術講演会講演概要集, V-05,
2019.9

[5]山本武志, 金津努: フライアッシュのボゾ
ラン反応性を評価するための促進化学試験法
(API法)の提案, 土木学会論文集, E, vol.62,
No.2, pp.320-329, 2006.5