

噴石位置測定ツールの開発

Development of a Tool for Measuring the Positions of Volcanic Bombs

宇都宮真吾¹

Shingo UTSUNOMIYA¹

(Received May 29, 2013; Accepted September 27, 2013)

ABSTRACT: Observation of volcanic bombs is an important task for the Japan Meteorological Agency. We have developed a tool for measuring the positions of volcanic bombs using numerical maps to improve measurement accuracy and to enable instant measurement. Processing using the tool consists of the following steps: (1) Convert the world coordinate system to a local coordinate system. (2) Convert the three-dimensional local coordinate system to a two-dimensional projected coordinate system. (3) Correct image distortions caused by lenses. (4) Convert the position of each pixel in the camera image in the projected coordinate system to the world coordinate system. Positions of sample points in Sakurajima and Kirishimayama are measured almost precisely with the tool. The precision of the positions measured with the tool needs to be investigated in advance, because the installation environments for cameras differ at each volcano.

1 はじめに

気象庁が全国 4 箇所（札幌，仙台，東京，福岡）に設置している火山監視・情報センターでは，気象庁や他機関が火山近傍に設置した遠望カメラの映像をリアルタイムで伝送することで，24 時間連続的に火山活動を監視している．遠望カメラで観測できる現象の中でも，弾道を描いて飛散する大きな噴石（以下，噴石）の観測は，防災情報に直結する重要な監視項目である．

噴石が飛散した場合は，噴石が落下した場所の周囲の地形と地形図を照らし合わせるなどして，噴石の落下地点を推定することができる．しかし，ほとんどの遠望カメラは，山体を見上げる位置に設置されており，さらに山体は複雑な形状をしているので，監視を行っている職員が目で見えて落下位置を読み取ると読み取り誤差が大きくなる．

読み取り誤差を少なくするには，カメラ画像上の点を座標変換し，対応する数値地図の位置を求める方法がある．井口ら（1983）はこの方法を使用し，噴石の放出速度と爆発圧力に関する詳細な解析を行

っている．この井口ら（1983）では，爆発地震をトリガー信号にして，フィルムカメラのシャッターを自動的に押す装置を使用して写真を撮影していたため，その使用目的は事後の調査研究に限られていた．しかし，現在では，画像データをデジタル化し，伝送する技術が発達したため，噴火の画像をリアルタイムで送信し，コンピュータを使用して解析することが可能になった．そこで，噴火発生後，噴石の落下位置を速やかに測定できるように，監視カメラの画像上の噴石に対応する数値地図の位置を計算する GUI 形式のツールを開発した．

なお，類似のツールとして，アジア航測株式会社作成の噴石位置計測システム（佐々木・他，2012）が福岡管区気象台火山監視・情報センターと鹿児島地方気象台には導入されているが，システムが桜島と霧島山のみにしか対応しておらず，他の火山では利用できない．しかし，噴火が発生した場合には，どの火山でも迅速に噴石の落下位置を測定する必要がある．そのため，本ツールでは，測定を行いたい火山周辺の数値地図を用意すれば，どの火山でも噴

¹ 地震火山部地震予知情報課，Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department

石の落下位置を測定できる仕様になっている。

2 噴石位置測定ツールの仕組みの概要

噴石位置測定ツールは、Microsoft 社の Visual C# 2010 を使用して GUI 形式で作成した。このツールの仕組みの概要は以下の通りである。

2.1 数値地図のフォーマット

数値地図は、国土地理院発行の基盤地図情報数値標高モデル 10m メッシュ JPGIS (GML) 形式を使用した。この数値地図は、アカウントを登録すれば、国土地理院のホームページから取得することができる。

数値地図は XML 形式で記述されており、テキストファイルとして開くことができる。ファイルの中で、メッシュの北東の位置 (upperCorner) と南西の位置 (lowerCorner) の座標が世界測地系の緯度経度で指定されている (Fig. 1)。一つのメッシュはさらに複数のセルに等間隔で分割されており、セルは一番北西の点を (0,0) とすると、その行の東側に行くに

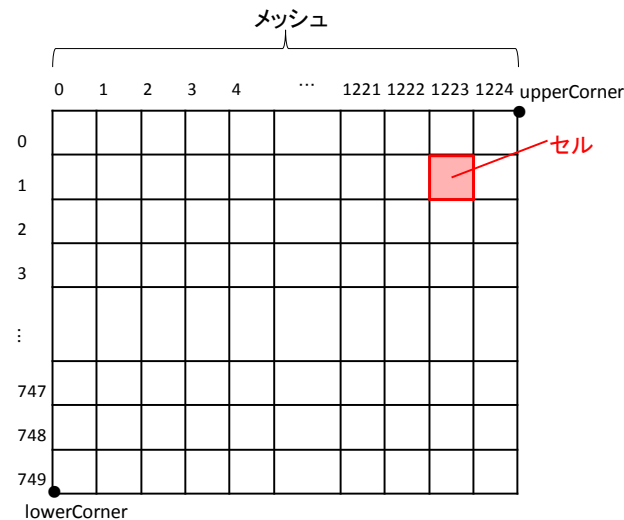


Fig. 1 Schematic image of the format of numerical maps issued by the Geographical Survey Institute.

つれて、(0,1), (0,2), ..., (0,1224)となり、東西方向には 1225 個のセルが並んでいる。また、一番北西の点から南側に行くにつれて(1,0), (2,0), ..., (749,0)となり、南北方向には 750 個のセルが並んでいる。各セルの縦、横の長さは約 10m である。各セルには標高値が割り当てられており、本ツールでは、各セルの中心がその標高値の格子点とみなして計算を行っている。

2.2 数値地図の座標変換

① ローカル座標系からワールド座標系への変換

元の数値地図は、セルが東西南北に並んでいるので、北向きが y 軸で、東向きが x 軸、鉛直上向きが z 軸である座標系 (ワールド座標系) とみなすことができる。まず、これをカメラの向いている方向を基準とする座標系 (ローカル座標系) に座標変換する。このローカル座標系では、カメラの向いている方向を y' 軸、 y' 軸に垂直で水平面に平行な方向を x' 軸、 x' 軸と y' 軸を含む平面に垂直な方向を z' 軸とする。

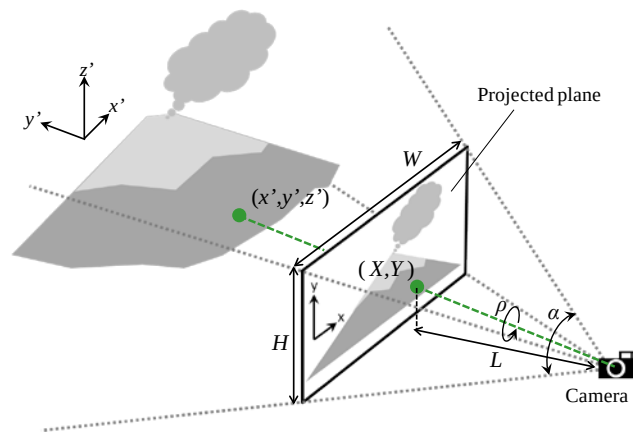


Fig. 2 Schematic of a conversion of a three-dimensional local coordinate system to a two-dimensional projected coordinate system. x', y', z' : Three-dimensional local coordinate system, X, Y : Two-dimensional coordinate system of the camera, L : Horizontal distance from the camera to the projected plane, W : Width of the projected plane, H : Height of the projected plane, α : Angle of view, ρ : Rotation angle of the camera. Green points indicate where the volcanic bombs fell.

θ をカメラの北向きからの方位角、 ϕ をカメラの水平方向からの仰角とすると、以下のような行列式(1)で格子点の座標変換を行うことができる。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_a$
 $\underbrace{\hspace{10em}}_b$

x, y, z は変換前のワールド座標系の数値地図の格子点を表しており、 x', y', z' は変換後のローカル座標系の格子点を表している。(1)式の右辺の b 部分で、 z 軸を中心に反時計周りに θ 回転させる変換を行い、 a 部分で x 軸を中心に時計周りに ϕ 度回転させる変換を行っている。

②3次元のローカル座標系を2次元のカメラ画面の座標系に変換

次に、先ほど変換したローカル座標系の格子点を2次元のカメラ画面の座標系へ変換する。3次元のローカル座標系の格子点を x', y', z' 、変換後の2次元のカメラ平面の座標系の格子点を X, Y とする。また、Fig. 2 のように観測者の視点からカメラの投影面までの距離 L をする。すると、この座標変換は、長さの比を取ることで、以下の式(2)のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L \frac{x'}{y'} \\ L \frac{z'}{y'} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、カメラが映すことのできる範囲の角度を示す画角を α とすると、以下のような関係式(3)が成り立つ。

$$\begin{aligned} \tan \frac{\alpha}{2} &= \frac{(\text{カメラ平面の対角線})/2}{(\text{カメラ平面までの距離})} \\ &= \frac{(\sqrt{W^2 + H^2})/2}{L} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 W はカメラ画面の横のピクセル数、 H は

カメラ画面の縦のピクセル数を表す。式(3)を変形して、

$$L = \frac{\sqrt{W^2 + H^2}}{2 \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (4)$$

よって、画角 α を設定すれば、式(2)に含まれるカメラ平面までの距離 L を計算することができる。

③カメラの回転の補正

カメラがカメラの向いている方向に対して反時計まわりに ρ 度だけ傾いている場合、この傾きが水平になるように補正する必要がある (Fig. 2)。カメラ平面上の座標系の格子点を X, Y とすると、補正後の格子点は以下のような X', Y' で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \rho & -\sin \rho \\ \sin \rho & \cos \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad (5)$$

2.3 レンズの歪の補正

カメラのレンズで撮影された画像は、実際の撮影対象物よりわずかに歪んでいる。レンズの歪にはさまざまな種類があるが、本ツールでは、その中でも、アスペクト比と歪曲収差についての補正を行っている。

①アスペクト比の補正

カメラの画像は、実際の撮影対象に比べてアスペクト比（縦横の比率）が変化している場合がある。これを補正するために、係数 a を用いて、以下のような変換を行っている。

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} aX' \\ Y' \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 X', Y' は補正を行う前のカメラ平面上の座標系の格子点の座標、 X'', Y'' は補正後の格子点の座標を表している。係数 a は、カメラの画像と数値地図によって描かれた地形を比較することで、調節しながら決定する。

②歪曲収差の補正

カメラで撮影された画像には、像の形が実際の物体とは相似形にならない歪曲収差が発生することがある。歪曲収差には、中心部が膨らんで見える樽型の歪と、中心部が収縮してみえる糸巻き型の歪の 2 種類があり (Fig. 3), カメラのレンズによってはその両方が複合して発生することもある。

一般的に、歪曲収差の歪曲量 D は以下のような式で表される。

$$D = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (7)$$

ここで、 l_0 は物高 (歪曲収差がない場合の画像の中心から像までの距離) で、 l_1 は像高 (歪曲収差がある場合の画像の中心から像までの距離) である。

歪曲収差の補正を行う場合には、生じている歪曲収差とは逆向きの変化を加えればよい。このとき、 l_0 , l_1 は以下のように表すことができる。

$$\begin{cases} l_0 = \sqrt{X'^2 + Y'^2} \\ l_1 = \sqrt{X''^2 + Y''^2} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 X' , Y' は補正を行う前のカメラ平面上の座標系の格子点の座標、 X'' , Y'' は補正後の格子点の座標を表している。

歪曲量 D は、レンズの画角が大きくない場合、物高の 2 乗に比例するので (岸川, 1990), 以下の式 (9) のようにレンズ固有の係数 b を用いて表すことができる。

$$D = bl_0^2 \quad (9)$$

式 (7)~(9) から、歪曲収差の補正式は以下のように表せる。

$$\begin{pmatrix} X'' \\ Y'' \end{pmatrix} = \left\{ 1 + b (X'^2 + Y'^2) \right\} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} \quad (10)$$

係数 b は、カメラの画像と数値地図によって描か

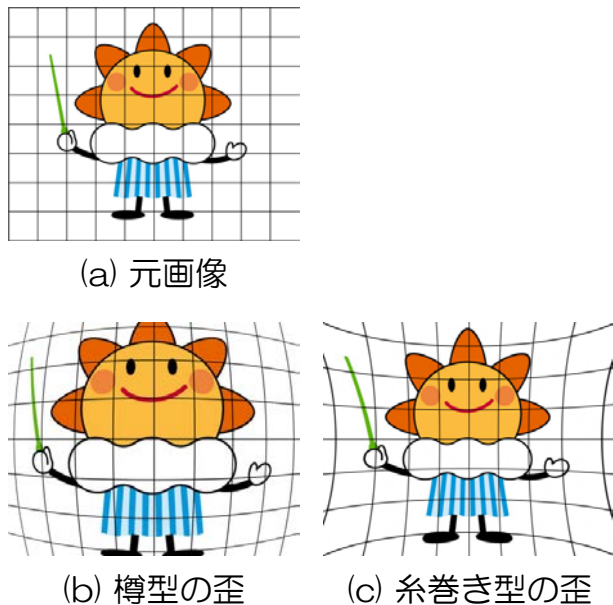


Fig. 3 Schematic of distortions caused by a lens. (a) : Original picture, (b) : Barrel distortion, (c) : Pincushion distortion.

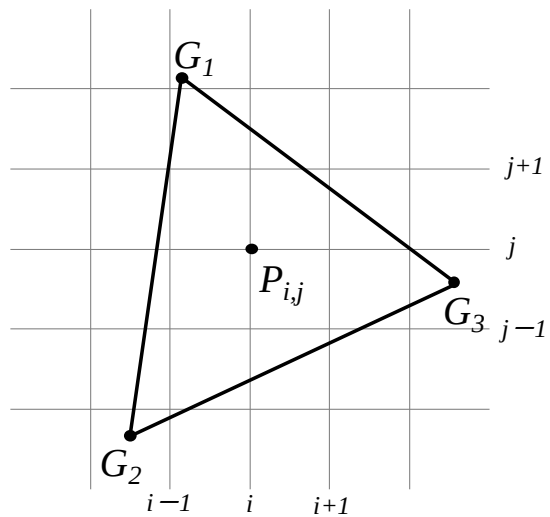


Fig. 4 Calculation of positions of each pixel of the camera image in the projected coordinate system to the world coordinate system. i : Index number of horizontal pixel, j : Index number of vertical pixel, $P_{i,j}$: Center point of pixel (i, j) , G_1, G_2, G_3 : Nodes of the numerical map converted to the camera projected plane.

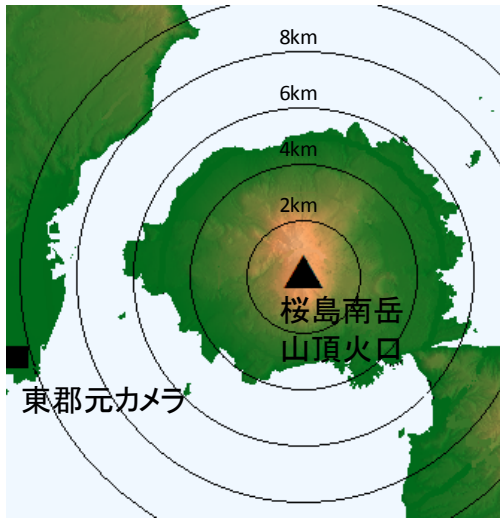


Fig. 5* Distribution map of Sakurajima and Higashikorimoto camera.



Fig. 6 (a) The summit of Kitadake and (b) the Yunohira observation platform on Sakurajima on the camera image taken with the Higashikorimoto camera.

れた地形を比較することで、調節しながら決定する。

2.4 ピクセルに対応する座標の計算

数値地図の格子点をカメラ平面の2次元の座標系に変換したら、次に、画面の各ピクセルの座標を変換された数値地図の格子点の座標から補完して求める必要がある。この補完は、以下のような手順で行っている。

まず、Fig. 4のように、変換された数値地図の格子点 G_1 , G_2 , G_3 とカメラ画像のピクセル点 $P_{i,j}$ があるとする。この G_1 , G_2 , G_3 からなる三角形に、 $P_{i,j}$ が含まれるかどうか判定するために、外積を用いた三角形の包含判定条件を使用している。この判定条件では、以下に示す3個のベクトルが全て同じ方向を向いていれば、三角形 $G_1G_2G_3$ の中に点 $P_{i,j}$ が含まれることになる。

$$\overrightarrow{G_1G_2} \times \overrightarrow{G_1P_{i,j}}, \overrightarrow{G_2G_3} \times \overrightarrow{G_2P_{i,j}}, \overrightarrow{G_3G_1} \times \overrightarrow{G_3P_{i,j}} \quad (11)$$

この判定条件を、カメラ画像の全てのピクセルの点について適用し、三角形 $G_1G_2G_3$ の中に含まれるピクセルを選出する。

次に、選出されたピクセル点 $P_{i,j}$ の地図上の緯度、経度を求める。これには、格子点 G_1 , G_2 , G_3 のワールド座標系での緯度、経度を元に、三角形 $G_1G_2G_3$ の内のピクセル点 $P_{i,j}$ の緯度、経度を補完して算出すればよい。本ツールでは、格子点 G_1 , G_2 , G_3 を通る平面上にピクセル点 $P_{i,j}$ があるとして、三次元線形補完を使用して、点 $P_{i,j}$ の地図上の緯度、経度を求めている。

このようにして求められたピクセル毎の緯度、経度の情報はコンピュータのメモリ上に確保しておき、そのピクセルに噴石が落下したと判断すれば、メモリ上からそのピクセルの緯度、経度の情報を読み込み、噴石の落下位置や火口からの距離を算出に使用する。

3 噴石位置測定ツールで測定した噴石位置の検証

本ツールを開発するに当たって、測定された位置が

* Table 1, Table 2, Table 3, Fig. 5, Fig. 7, Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 に示される表や図は、国土地理院が発行する基盤地図情報数値標高モデル 10m メッシュ JPGIS (GML) 形式を使用して作成した。

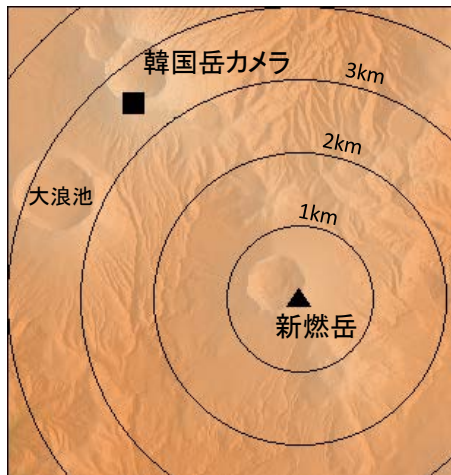


Fig. 7* Distribution map of Shinmoedake and Karakunidake summit camera on Kirishimayama.



Fig. 8 Sampling points on the Shinmoedake crater on the camera image taken with the Karakunidake summit camera on Kirishimayama. Red points indicate the measured sampling points.



Fig. 9 Volcanic bombs from the Showa-crater on Sakurajima during an explosive eruption at 15:07 on March 12, 2012 taken with the Hayasaki camera installed by the Ministry of Land, Infrastructure, Transportation and Tourism. White arrows denote where the volcanic bombs fell.



Fig. 10 Volcanic bomb from the Showa-crater on Sakurajima during an explosive eruption at 15:07 on March 12, 2012 taken with the Kaigata camera installed by the Ministry of Land, Infrastructure, Transportation and Tourism. The white arrow denotes where the volcanic bomb fell.

正しいかどうかの検証を行う必要がある。しかし、桜島などの活発な火山では、噴石が飛散する地域は規制範囲内になっており、直接噴石の落下位置を測定しに行くことはできない。そこで、実際に座標の判っている場所を測定する方法と、アジア航測作成

のツールと比較する方法から、測定された位置の検証を試みた。

3.1 実際に座標が判っている場所の測定

実際に緯度・経度・標高が分かっている場所につ

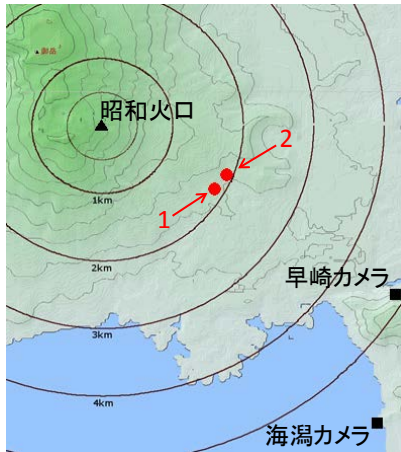


Fig. 11* Distribution map of volcanic bombs during an explosive eruption at 15:07 on March 12, 2012. Red points show where the volcanic bombs fell. Numbers on the map correspond with Fig. 9 and Fig. 10. This map was drawn with Kashmir 3D.

いて本ツールを用いて測定を行い、正しく緯度・経度・標高が計算できるかどうか検証した。カメラの画像は鹿児島地方気象台に設置してある東郡元（気象台）カメラ（Fig. 5）で撮影されたものを使用し、測定の対象物は、桜島北岳山頂と、桜島の中腹に位置する湯之平展望台位置を選んだ（Fig. 6）。測定結果は以下の Table 1 のようになった。

Table 1* Positions of the sample points on Sakurajima measured by the tool.

		測定値	実際の値	差[m] ^{※2}
北岳山頂 ^{※1}	緯度[°]	31.58820	31.58850	37
	経度[°]	130.65456	130.65438	
	標高[m]	1100	1117	
湯之平展望台 ^{※1}	緯度[°]	31.59161	31.59135	30
	経度[°]	130.62977	130.62978	
	標高[m]	368	363	

※1 北岳山頂については、気象庁 HP に記載されている北岳山頂の緯度・経度・標高の情報を使用した。湯之平展望台位置については、Google マップより緯度・経度の情報を読み取った後に、国土地理院 50m メッシュ数値地図を使用して標高を算出した。

※2 測定値と実際の値の水平距離の差

北岳山頂と湯之平展望台は、東郡元カメラから 10km 程度離れているが、この測定の結果では、水平距離で概ね数十 m の精度で測定できた。

3.2 アジア航測作成のツールとの比較

次に、アジア航測株式会社作成の噴石位置計測システムで測定された位置と、本ツールで測定された位置の比較を行った。アジア航測のツールは、本ツールと同様に、数値地図を使用してカメラの画像から噴石の落下位置を測定するツールである。カメラ画像は、霧島山韓国岳山頂に設置してある韓国岳カメラ（Fig. 7）で撮影されたものを使用し、新燃岳の火口縁周辺でカメラの画像に映っている目印になる場所 5 箇所（Fig. 8）について、アジア航測のツールと本ツールで測定を行い、その結果を比較した。測定結果は以下の Table 2 のようになった。

Table 2* Horizontal difference of positions of the sample points on Shinmoedake measured by our tool and Asia Air Survey's application.

	水平距離の差
兎の耳(奥)	2m
兎の耳(手前)	17m
割れ目火口(上)	12m
割れ目火口(下)	8m
北縁	4m

新燃岳火口と韓国岳カメラは 3km 程度離れているが、この測定の結果では、水平距離で概ね十数 m の違いで測定できた。これは、10m メッシュの数値地図を使用していることを考えると、両ツールで概ね同じ場所が測定できていると考えられる。

4 桜島での噴石位置の測定事例

本ツールを使用して、2012 年 3 月 12 日 15 時 07 分の桜島昭和火口の爆発的噴火での噴石位置の測定を行った。桜島では、昭和火口から最も近い居住地域が昭和火口から約 2.5km の場所に位置しており、噴石の飛散距離によって噴火警戒レベルを速やかに切り替える必要がある。

測定には、早崎可視（Fig. 9）・海潟^{かいがた}（Fig. 10）（いずれも国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所）の 2 つのカメラの画像を用いた。測定結果は以下の Table 3、及び、Fig. 11 の通りである。昭和火口からの距離は、測定に用いたカメラによってばらつきはあるものの、噴石 1 は、概ね 1900m、噴石 2 は概ね 2000m であった。噴石 1 については、早崎可視カメラと海潟カメラで昭和火口からの水平距離が

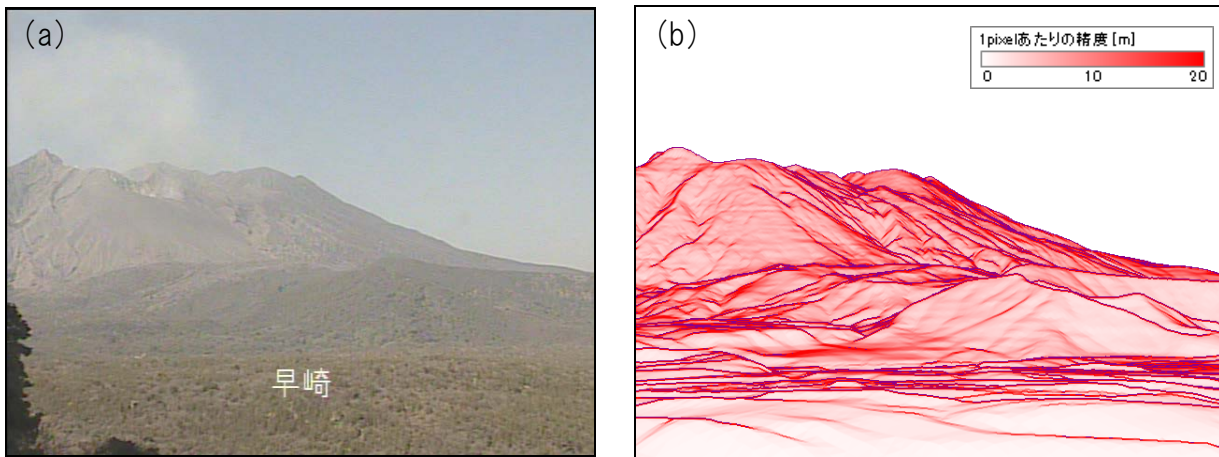


Fig. 12* (a) Picture taken from the Hayasaki camera installed around 5 km from the Showa crater on Sakurajima, and (b) image of the precision of the measured positions per pixel. Change in the precision is represented by color graduation.

40m 程度違うが、早崎可視カメラの方が、海淵カメラに比べて、火口までの距離が近く、標高も高い位置に設置されていることから、より信頼性が高いと考えられる。

Table 3* Positions measured by the tool of the volcanic bombs ejected from the Showa crater.

	噴石 1		噴石 2
	早崎可視	海淵	早崎可視
緯度[°]	31.56978	31.57038	31.57152
経度[°]	130.68143	130.68135	130.68349
標高[m]	223	234	201
昭和火口からの 水平距離[m]	1890	1850	1974

5 測定精度に関する留意点

これまで、本ツールで測定された噴石の落下位置の精度について検証を続けてきた。しかし、火山によって遠望カメラの設置環境が違うので、精度について定量的な指標を示すのは難しい。そこで、測定精度についての一般的な留意点を、以下のようにまとめた。

- ① 噴石の落下位置の測定に使用するカメラは、火口に近く、かつ、山体を見下ろす位置に設置されているものを使用した方が、測定精度が良い。

- ② カメラの方向と山体斜面のなす角が小さい場合は、測定精度が低下する。
- ③ カメラの画角や方向が、風等によって変化していないか、常に注意する。カメラの画角や方向を正しくパラメータとしてツール上で設定しなければ、測定精度は大きく低下する。
- ④ 精度は数値地図のメッシュ以上のものは得られない。また、数値地図のメッシュを細かくしても、カメラの解像度を同時に良くしなければ、精度は向上しない。
- ⑤ カメラが複数設置されている場合は、それぞれのカメラで噴石の落下位置を測定し、その位置を比較することで、より正確な位置を測定することができる。
- ⑥ 数値地図が古い場合は、実際の地形と数値地図が合っていない場合がある。特に、火山活動の活発な火山は、短期間で地形が変化する可能性があるため、注意する必要がある。

測定精度を視覚化するために、本ツールでは画面上で測定した位置から上下左右に 1pixel ずらした場合に、水平距離でどの程度距離が変化するかについて示した「1pixel あたりの精度」を表示させることができる (Fig. 12)。測定を行う場合には、測定精度が悪い部分 (図中で赤色が濃い部分) では、慎重に

測定を行う必要がある。

以上のことを踏まえ、測定精度を上げるには、噴石位置測定ツールを火山が静穏な時期から使用してみて、どの程度の精度が得られるかを火山ごとに事前に把握しておくことが重要である。

6 噴石位置測定ツールの使用方法と活用例

以下では、噴石位置測定ツールの使用方法と活用例についての説明を簡単に行う。なお、詳しい使用方法については、鹿児島地方気象台作成の「噴石位置測定ツールマニュアル」をご覧ください。

6.1 導入に必要な環境

噴石位置測定ツールを使用するには、Microsoft .NET Framework 4 がインストールされた

端末が必要である。Microsoft .NET Framework 4 は、Microsoft 社のホームページからダウンロードすることができる。また、ネットワークから監視カメラの画像を取得する場合には、端末が東京もしくは福岡の映像系ネットワークに接続されている必要がある。測定に必要な数値地図は、アカウントを取得すれば、国土地理院のホームページからダウンロードすることができる。

本ツールはセットアップファイルを実行することで端末にインストールされる。インストール後、ツールの設定画面から、数値地図の情報や、火口と監視カメラの緯度経度などを設定することで、ツールを使用できるようになる。

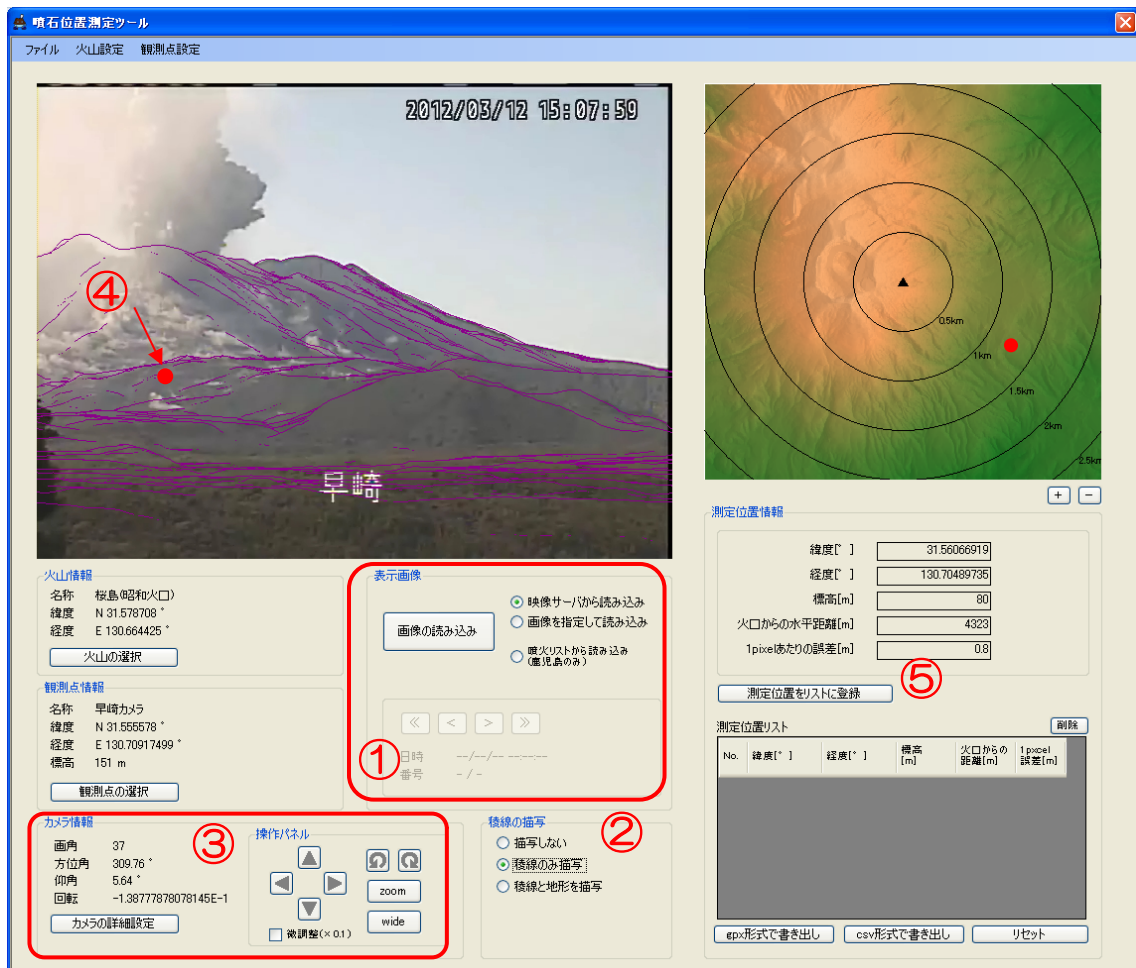


Fig. 13* Screen shot of the tool for measuring positions of volcanic bombs. ①: Read pictures during eruption from the network server. ②: Show ridgelines on the picture. ③: Adjust the parameters of the camera. ④: Select the positions on the picture where volcanic bombs fell. ⑤: Register the selected positions on the volcanic bomb list.

6.2 測定手順

Fig. 13 は噴石位置測定ツールの操作画面である。以下の①～⑤の手順で噴石の落下位置を測定することができる。

- ① 「画像の読み込み」ボタンを押して、映像系ネットワークから、測定したい噴石が観測された時間帯の監視カメラの画像を取得する。
- ② 「稜線の描写」を行い、カメラ画像に映っている山体の形状と、数値地図をもとに描かれた稜線（図中紫線）が一致しているかどうか確認する。
- ③ 手順②で、山体の形状と稜線が一致していない場

合は、「操作パネル」でカメラの方向や画角を調整し、山の形状と稜線を一致させる。

- ④ 左上のカメラ画面上の噴石の落下位置をクリックする。すると、右上の地図上で噴石の落下位置が赤点で表示される。
- ⑤ 噴石を測定したら、「測定位置をリストに登録」のボタンを押すことで、複数の測定位置をリストに登録することができる。リストに出力した測定位置は、テキストファイル形式で出力したりすることができる。

噴火が発生してから測定までに要する時間は、監

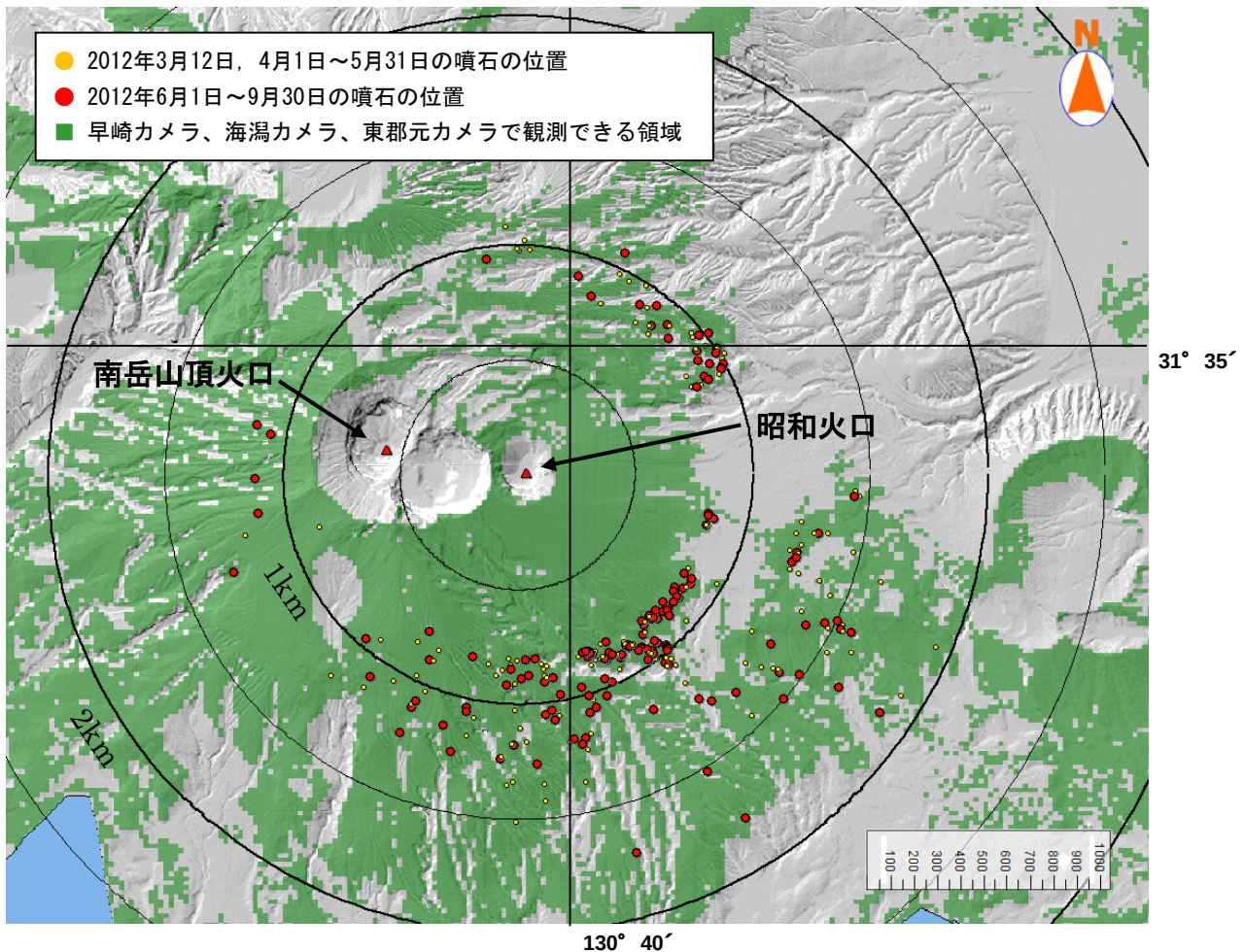


Fig. 14* Positions of fallen volcanic bombs that were ejected over 800 m from the Showa crater observed by the cameras from June 1, 2012 to September 30, 2012 (Kagoshima Local Meteorological Observatory and Fukuoka District Meteorological Observatory, 2012). Yellow circles: Positions of fallen bombs observed on March 12, 2012 and from April 1 to May 31, 2012; Red circles: Positions of fallen bombs observed from June 1 to September 30, 2012; Green segment: Area that is visible through the Hayasaki camera, Kaigata camera, and Higashikorimoto camera. This map was drawn with Kashmir 3D. The numeric elevation map data with 5 m resolution was provided by the Osumi Office for Rivers and National Highways.

視カメラの画像をネットワークから取得する回線の速度や測定を行っている端末の処理能力にもよるが、鹿児島地方気象台では、噴火発生後概ね 20～30 分以内に噴石の落下位置を測定している。

6.3 測定された噴石の落下位置の活用方法

測定された噴石の落下位置は、噴火警戒レベル切替の判断材料や、資料や情報の作成、調査研究に利用できる。

資料作成での活用例としては、鹿児島地方気象台では、桜島昭和火口で発生した爆発的噴火に伴い飛散した噴石の測定を行い、火山噴火予知連絡会資料として噴石の分布図（鹿児島地方気象台・福岡管区気象台火山監視情報センター，2012）を作成している（Fig. 14）。Fig. 14 では、昭和火口から概ね 800m 以上飛散した噴石の落下位置を赤色と黄色の点で示しており、緑色の領域は早崎カメラと海潟カメラ、東郡元カメラのいずれかで観測可能な範囲を表している。

また、調査研究での活用例としては、中橋（2012）は、桜島の爆発的噴火により飛散した噴石の落下位置を、本ツールを使用して測定することにより、噴石の初速度と射出角度を計算し、噴石がどの範囲まで飛散しうるかについての検証を行っている。

7 噴石位置測定ツールの特徴

噴石位置の測定は、監視を行っている職員が簡単かつ速やかに精度よく行える必要がある。また、気象庁で監視を行っている火山について、活動が静穏な時期からツールを導入し、噴火が発生した場合に備えておくことが大切である。そこで、噴石位置測定ツールは、アジア航測株式会社の噴石位置計測システムと比較して、以下のような特徴を持たせている。

- ・ 操作が容易で、測定に関する専門的な知識がなくても使用できる。
- ・ 国土地理院の基盤地図情報サイトから数値地図を取得すれば、全国どの火山でも簡単に導入できる。
- ・ 1pixel あたりの精度が表示されるので、測定精度の評価がしやすい。
- ・ 測定画面に稜線が表示されるので、カメラ画像上

の地形と数値地図から計算した地形が一致しているかどうかの判断がしやすい。

- ・ 防災上重要な情報である噴石位置の火口からの距離が測定画面に表示される。
- ・ 噴石の位置情報を汎用性の高い GPX 形式ファイルに書き出すことができる。
- ・ 桜島の噴火観測表を元に、噴火前後の時間帯の映像を映像系ネットワークから取得し、噴石位置の測定ができるので、事後の事例解析が容易である（鹿児島地方気象台のみの機能）。

また、噴石位置測定ツールは、アジア航測株式会社の噴石位置計測システムと比べて、動作が遅く、カメラ歪補正のパラメータが少ないなどの劣っている点があるが、監視を行う上では支障の無い程度である。

8 まとめ

弾道を描いて飛散する大きな噴石は、気象庁の重要な観測項目であるため、リアルタイムで伝送される監視カメラの画像から、速やかに噴石の落下位置を測定できるように、数値地図を使用して、噴石位置を測定できるツールの開発を行った。このツールでは、数値地図をワールド座標系からカメラの向いている方向を基準としたローカル座標系への変換を行い、変換されたローカル座標系をカメラ平面へ投影し、レンズにより生じる歪を補正した後に、カメラ画面の各ピクセルに対応する数値地図上の座標を計算するという手順で噴石の測定を行っている。また、測定された位置が正しいかどうかを、実際に位置が判っている場所や他のツールと比較することで検証し、概ね良い測定結果が得られることが分かった。さらに、桜島昭和火口で 2 合目まで飛散した噴石について、事例解析を行った。本ツールを使用するには、常に測定精度に注意をしながら測定を行う必要がある。

謝辞

噴石位置測定ツールの開発を進めるに当たって、国土地理院が発行する基盤地図情報 10m メッシュを使用させて頂いた。また、国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所が整備している監視カメラの画像を使用させて頂いた。

本稿は、筆者が鹿児島地方気象台観測予報課火山班在任中に行った研究をまとめたものである。気象研究所地震火山研究部第 3 研究室の高木朗充主任研究官、鹿児島地方気象台観測予報課の中橋正樹技術主任を始め、鹿児島地方気象台火山班の皆さまには、本ツールの開発段階から多くの有益な意見を頂いた。また、鹿児島地方気象台の横山博文台長、上野康弘次長、福岡管区気象台技術部観測課の緒方恵之課長には、本ツールを開発するにあたって様々な支援をして頂いた。査読者である地震火山部火山課の山里平課長と験震時報編集委員の坂井孝行調査官には丁寧なご指導と貴重なご意見を頂いた。記して感謝する。

文献

- 井口正人・石原和弘・加茂幸介 (1983): 火山弾の飛散の解析－放出速度と爆発圧力について－, 京都大学防災研究所年報, 26B-1, 9-21.
- 鹿児島地方気象台・福岡管区気象台火山監視情報センター (2012): 桜島, 第 124 回火山噴火予知連絡会資料.
- 岸川利郎 (1990): ユーザーエンジニアリングのための光学入門, オプトロニクス社, 330pp.
- 佐々木寿・荒井健一・藤巻重則 (2012): 単写真計測システムを用いた火山活動モニタリング, 日本火山学会講演予稿集 2012 年度秋季大会, 85pp.
- 中橋正樹 (2012): 桜島昭和火口の噴石到達範囲予測について, 平成 24 年度鹿児島県気象研究会予稿.

(編集担当 坂井孝行・福満修一郎)