

ライブカメラ画像および風予報に基づく 桜島の降灰予測システムの開発

赤木 康宏^{†1,a)} 森永 寛紀^{†1,b)} 福元 伸也^{†1,c)} 川崎 洋^{†1,d)}

概要：鹿児島県にある活火山である桜島の噴火活動は 2009 年以来活発化しており、降灰が市民生活に与える影響は大きい。本稿では、降灰の予想される地域に対して早期に警告を発するための、降灰予測システムを提案する。本手法の特徴は、桜島の噴火口を捉えたライブカメラ映像から噴火の規模を推定し、その推定値および風向、風速等の気象データに基づき降灰範囲を大まかに予測することで、噴火から 5 分以内で降灰に関する情報を提示する点にある。降灰状況の予測には、灰と気流との相互作用を扱いやすく、かつ可視化に適した、粒子に基づく流体シミュレーション手法の 1 つである SPH 法を用いる。降灰予測の精度を高めるためには、シミュレーションに用いる噴火規模および降灰量に関連する物理パラメータをどのように定めるかが重要である。そこで、過去の噴火および降灰に関する観測データから統計的にこれらの値を推定する手法を新たに提案する。また、降灰の予測結果をわかりやすく提示するために、SPH 法により得られた噴煙粒子の配置情報から噴煙の形状を可視化を行う。一連の手法により、噴火から 5 分以内に降灰状況を予測し、噴煙の形状を可視化することで、桜島の近隣住民に対して早期に降灰予測をわかりやすく提示するためのシステムを実装する。

1. はじめに

桜島は鹿児島県に存在する活火山であり、2009 年に噴火活動を再開して以来、年間 1000 回を超える噴火が観測されている (表 1)。噴火活動に伴い周辺地域には多量の降灰があり、農作物に対する被害の他にも、商業活用や日常生活に多大な影響を与えている。降灰対策として、農作物に覆いをかぶせたり、店頭の商品をしまったりする等の日常的に行うことのできる対策を施すには、噴火から灰の到達を短時間で知る必要がある。気象庁は噴火の発生から降灰地点を予測する、「降灰予報」を行ってはいるものの、その実施は一部の大規模な噴火に限られており、現在は噴火から約 30 分後に予報が発表されている。また、噴火の発生自体も気象庁から速報値が公表されるまでに約 5 分の時間を要する [2]。

その他の噴火に関する情報としては、NHK 鹿児島放送局からは、前述の気象庁からの噴火速報と風予報を組み合わせることで、噴煙の流速および流向に関する情報を発表している [8]。この時発表される流向は 8 方位に限られて

表 1 桜島の噴火状況

Table 1 Activity condition of Sakurajima volcano.

Year	Eruption count[7]	Amount of fallen ash[6] (g/m^2)
2009	755	126,107
2010	1,026	245,172
2011	1,355	234,320
2012	1,107	329,557

いるが、噴煙の拡散はより狭い範囲に限定されているので (図 1)、さらに詳細な予報が必要とされている。しかし現在は、噴火の発生から降灰地点の詳細な予報をを 5 分以内を知る方法はない。

情報の速報性という観点では、桜島の防災対策を行っている大隅河川国道事務所が噴火を監視するためのライブカメラ映像 [9] を一般に公開しており、噴火の発生と規模、噴煙の流向を大まかに知る手掛かりとして利用できる。しかし、限られた方向からのカメラ映像のみでは、自身の住む地域に噴煙が到達するかどうかを判断することは難しい。本稿では、桜島を監視するライブカメラ画像から噴火の発生を自動的に検出し、噴煙の規模、流向および到達範囲を可視化するための一連のフレームワークを提案する。本手法の特徴は、一般的な人々が入手可能な情報のみに基づき、噴火から 5 分以内に、予測される降灰範囲を 3 次元 CG として速報的に提示する点にある。これにより、一般的な

^{†1} 現在、鹿児島大学
Presently with Kagoshima University
a) akagi@ibe.kagoshima-u.ac.jp
b) fukumoto@ibe.kagoshima-u.ac.jp
c) fukumoto@ibe.kagoshima-u.ac.jp
d) kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

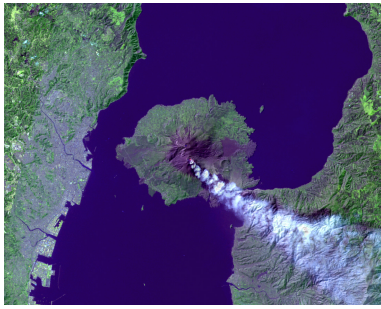


図 1 噴煙の到達範囲

Fig. 1 Extent of a volcanic ash cloud.

PC とネットワーク環境さえあれば、降灰に関する速報を誰もが入手することのできるシステムを構築できる。

本システムを実現するために、次に示す 2 種の予測手法を提案する。

(1) ライブカメラ画像からの噴火規模予測

過去の噴火映像とその時の噴火規模を統計的に分析することで、初期の噴火映像から噴火規模を予測する。

(2) 風予報と物理シミュレーションに基づく降灰範囲の予測

(1) の噴火規模予測に基づき、噴煙の物理シミュレーションを行うことで、降灰範囲を予測する。シミュレーションに用いる噴煙の質量パラメータは、過去の降灰状況を統計的に分析することで決定する。

各予測手法の詳細については、第 3 章および第 4 章で述べる。

2. 関連研究

火山現象に伴う噴煙および降灰のシミュレーションに関する研究では、大規模計算機を用いることで、精度よく降灰状況を再現することに成功している。新堀 [10] らの研究では、新燃岳の降灰予測を行うために、気象庁のレーダーによる噴煙高度の計測および、風の数値予報情報等に基づき、降灰予測を実現している。この研究では、噴煙の拡散に関するパラメータを調整することで、降灰の生じる地域を正確に予測することに成功している。寺田らの研究 [3] では、噴煙の総量を推定するために、噴火画像を解析し、シミュレーションにとって重要である噴煙の初速および粒子密度を推定している。小屋口らの研究 [5] では、実験的に得た噴煙の乱流強度を用いることで、降灰の予測精度を高めている。以上のように、噴煙のシミュレーションを行う従来研究では、噴火現象に関わる様々なパラメータを推定する必要があり、特に噴煙を構成する灰粒子の密度に関する情報は、降灰予測にとって重要である。その一方で、従来の降灰予測に関する研究では、特殊な観測装置や高性能な大規模計算機を必要としており、簡便なシミュレーションモデルを用いて速報的に降灰を予測する手法は実用化されていない。

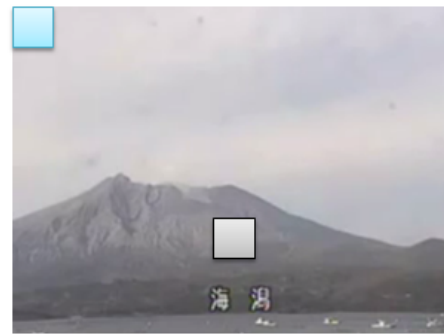


図 2 ライブカメラ画像の例と輝度検出位置

Fig. 2 Example image of a live-cam and detection area of a brightness level.

一方で、噴煙を CG アニメーションにより可視化するための研究も行われている。水野 [11] らの研究では噴火初期に生じる墳柱形状再現するために、空間を格子状に区切り、物理シミュレーションを行っている。可視化の際には、シミュレーションに用いた空間格子をボクセルデータとして扱い、噴煙形状を表現している。この研究では、降灰現象および実際の火山を想定したパラメータ推定等が行われていない。

3. 画像処理による噴火規模の推定

本章では、桜島を常時監視するライブカメラ画像 [9] を対象とした、噴火規模の自動推定手法について述べる。桜島の降灰範囲は、その噴煙の最高到達高度に影響を受けるので、これを早期に知ることが降灰予測の速報性において重要となる。しかし、気象庁から噴煙の高度情報が発表される時刻は、噴火から 5 分後以降であることがほとんどであり、速報性の観点からはより短時間で噴煙の最高到達高度を特定できるほうがよい [2]。

そこで、噴火初期のカメラ画像から噴煙の最高到達高度を推定する手法を提案する。我々は、噴煙の最高到達高度は火口から上昇する噴煙の速度と強い関連性があると仮定し、カメラ画像の火口付近に着目することで、噴煙の上昇速度を推定する。そして、上昇速度から噴煙の最高到達高度を推定するための近似式を構築するために、過去の噴火を記録した動画像を用いた、統計的推定を行う。以下にその詳細を述べる。

3.1 噴火時刻の検出手法

まず、カメラ画像から噴火の発生を検出するための手法について述べる。

3.1.1 カメラ画像の正規化

桜島の火口を監視するカメラ画像図 2[9] は、視認性を高めるために自動的に撮影感度を変動している。このような変化は、画像解析により噴火を発見するためには不向きであるので、前処理として画像の正規化を行う。正規化処理

はまず、画像全体をグレースケール画像に変換した後に、

- 画面右上の空の領域 (20 * 20pixel) で最も明るい点を最大輝度点
- 画面中央下部の桜島山体領域 (20 * 20pixel) で最も暗い点を最小輝度点

として、輝度値が 0 - 255 の範囲に収まるように変換する。

3.1.2 噴火時刻の特定

次に、正規化画像間の差分により噴火の発生時刻を決定するための手法について述べる。以下に、その処理手順を示す。

- (1) ライブカメラ画像のうち、火口の周囲 230 * 168pixel の領域を判定対象として切り出す。
- (2) 現在注目しているフレーム以前の、過去 10 フレーム分の単純平均画像を生成する。
- (3) 平均画像と現在の画像との差分を求め、差が 40 を超えた画素を、噴火領域とする。
- (3) で用いる、噴火検出のための閾値は、雲の動きや日照条件の変化等を誤検出しないような値を経験的に定めた。以上の方法により、1pixel でも噴火領域が検出された時刻を噴火開始時刻とした。

3.2 噴煙の速度推定

次に、噴煙の初速度推定について述べる。噴煙の上昇速度に関する調査研究 [3], [4] にあるように、噴煙の上昇速度は数十～数 m/s 程度であるので、3000m を超えるような噴火の場合、最高到達高度が決定されるまでは数分の時間を要する。そこで、より速報的な情報を提示するために、噴火を検出した時刻から 30 秒後までの噴煙の変化から上昇速度を決定する。速度の決定のために、噴火の検出から 30 秒後までの間で、全てのフレームにおいて 3.1.2 節で述べた手法に基づき噴煙領域の変化を追跡する。その結果から得られる、噴煙の最高位置 (画像の Y 軸値) と最高位置に達するまでの時間から、見かけ上の噴煙の速度 v_{img} (pixel/sec) を求める。また、カメラに映る桜島の高さから、実スケールへの変換を行うことで、噴煙の上昇速度 v_{sim} を決定する。なお、ここまで述べてきた処理はリアルタイムで行うことが可能であり、噴火発生から 30 秒後には初速度の推定が可能である。

3.3 噴煙の上昇速度と最高到達高度

本節では、次節で述べる降灰シミュレーションのための予備実験として行う、噴煙の上昇速度 v_{img} と、最高到達高度 h_{ash} の関係式の算出について述べる。両者の関係式を求めるために、過去の噴火を記録した動画像 11 本に対して、3.2 節で述べた手法を適用して得られた噴煙の上昇速度と、気象庁の観測した噴煙の到達高度の関連性を図 3 に示す。図 3 中の曲線は、2 次の近似曲線に当てはめて両者の関連性を推定したものである。

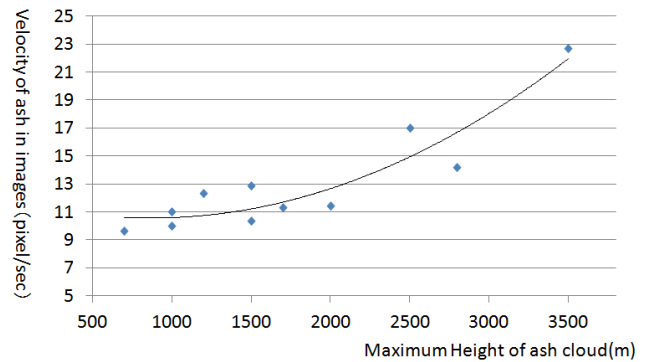


図 3 画像処理による噴煙速度の推定結果と到達高度

Fig. 3 Relationship between initial eruption speeds and heights of the ash cloud.

$$h_{ash} = 1.645 * 10^{-6} * v_{img}^2 + 2.866 * 10^{-3} * v_{img} + 11.808(1)$$

本曲線により予測された噴煙の到達高度と実測値の相関係数は 0.93 であり、提案手法により得られた噴煙の上昇速度と到達高度の間には強い相関があることが示された。

4. 降灰シミュレーション

4.1 SPH 法による降灰のシミュレーション

降灰のシミュレーションをしようとする際には、気流と灰粒子の双方を同時に扱うことのできるシミュレーション手法が必要となる。本研究では、速報性の観点から、シミュレーションの正確さよりも高速性を重視し、かつ結果の可視化が容易な方法として、SPH 法によるシミュレーションを用いる。SPH 法は粒子ベースの流体シミュレーション手法であり、異なる性質の粒子を同時に扱うことが容易である。また、計算が高速であるという利点もある。その一方で、格子を用いた手法に比べて気体のような非圧縮性流体には適していない (誤差が大きい) という問題があるが、本研究では、正確さよりも速報性を重視するという考え方から、SPH 法であつても十分に降灰が予測できると考える。

シミュレーションの諸条件としては、対象空間は桜島の昭和火口を中心に風下方向に 18.5km、風下側に 1.5km、左右に 4km、上空 6km までの直方体領域を対象とする。図 1 からわかるように、噴煙は直線的に移動するので、風向に応じて直方体領域を回転させることで、シミュレーション空間を狭め、計算量を削減した。この時の粒子の配置密度は、約 300m 間隔で配置し、シミュレーションに用いた粒子の総数は約 16,000 個である。その他のパラメータについては、以下で詳しく述べる。

4.1.1 降灰の判定と降灰量の算出

シミュレーション中の各粒子の降灰判定は、粒子がシミュレーション領域の下端に接触した際に行う。各地域の降灰量を計測するために、地表に約 450m 間隔のサンプリング点を配置し、降灰判定時には各粒子のもつ灰の質量配

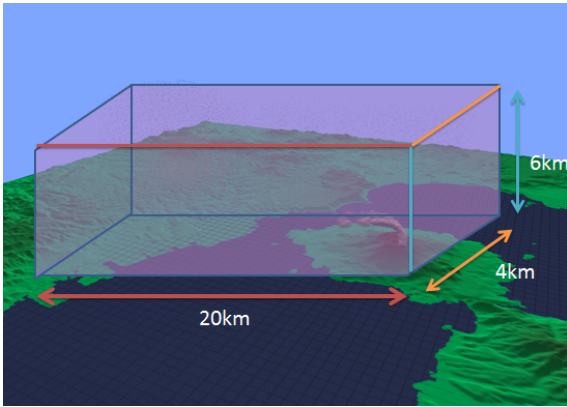


図 4 SPH によるシミュレーション範囲
Fig. 4 Simulation Area for SPH.

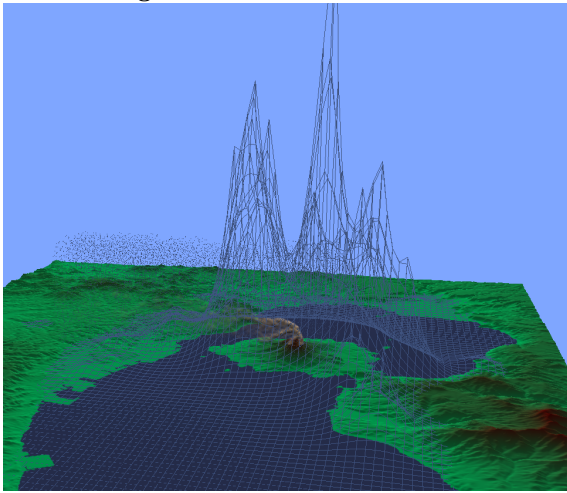


図 5 降灰シミュレーションと降灰量のサンプリング
Fig. 5 Fallen ash simulator and sampling grid.

分を行う。質量の配分量 m_f は、粒子の落下地点を中心とする各サンプリング点までの距離 d_i を用いて、式 2 に示す正規分布により行う。($\sigma = 300m$, m_{ash} : 灰粒子の質量)

$$m_f = m_{ash} \frac{1}{\sqrt{(2\pi)\sigma}} e^{-\frac{d_i^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

4.2 灰の質量パラメータの推定

SPH 法をはじめとする、流体シミュレーションにおいては対象物の密度や粘性といった様々なパラメータをどのように設定するかが重要となる。一般の大気に関する物理量は様々な研究において明らかになっているが、灰を構成する物質の性質は一樣ではないために、正確な値を知ることが難しい。特に噴煙と気流とのインタラクションを考えた場合、灰を構成する粒子の密度(単位体積辺りの質量)は粒子間の相互作用に大きな影響を及ぼし、降灰量を決定する際にも必要となる。

そこで、過去の降灰状況と気象状況に関する統計情報に基づき質量パラメータを推定する。鹿児島県地方気象台では、桜島の周辺 33 地点に降灰量を計測するための装置を設置し、毎月の降灰量を公開している [6]。この情報と、気象

庁の公開する噴火記録および風向・風速記録を組み合わせることでシミュレーションから得られる降灰量と実測値を比較することができる。本研究では、2012 年 1 月から 11 月の噴火および降灰データを用いて、粒子の質量パラメータを変えながらシミュレーションを行い、実測値と予測された降灰量との差が最小となるような、質量の値を求める。

噴煙を構成する灰粒子の質量にはばらつきがあり、確率分布に基づき粒子を生成することが妥当である。本研究では、新堀らの研究と同様に各灰粒子の質量 m_{ash} を対数正規分布 ($\mu = 0.0, \sigma = 0.5$) に質量係数 m_{avr} を乗じたものとした。

$$m_{ash} = m_{avr} \frac{1}{\sqrt{(2\pi)\sigma}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

このとき、質量係数 m_{avr} は明らかではないので、その値を変えながらシミュレーションを行うことで、実測値と最も誤差の少ない値を探索する。探索範囲は、過去の観測データに示されている灰粒子の密度に関する記述に基づき [1], [3], $1.0g/cm^3$ から $10.0g/cm^3$ の範囲において値を変動させた結果、 $3.5g/cm^3$ が誤差の最小となる値であった。予測値と実測値の誤差の詳細については、第 6 章で論じる。

5. 噴煙と降灰の可視化

5.1 噴煙形状のレンダリング

本節では、SPH 法によるシミュレーションにより得られる灰粒子の配置から、噴煙形状を描画するための手法について述べる。本研究では、噴煙の流向や降灰位置を提示することが主題であるので、表示の高速性を重視し、簡便な手法により噴煙の可視化を行う。その手順を以下に示す。

- (1) シミュレーションに用いる灰粒子の位置 P_i を中心とする半径 r_i ($= 150m$, 初期値) の球を生成する。
- (2) 火口と灰粒子との距離 lm_i に応じて、式 4 により球の半径を拡大する。

$$r'_i = r_i * (1.0 + l_i/8000) \quad (4)$$

係数はシミュレーションの下流端において、灰粒子の描画半径が約 2.5 倍になるように調整した。

- (3) 球の中心からの距離 lp_i を用いて、球の透明度 α_i を式 5 により求める。

$$\alpha_i = r_i * \frac{(1.0 - (lp_i/r_i)^2)}{200 * (0.2 + r'_i/2.5)^2} \quad (5)$$

本研究では、数千を超える灰粒子をシミュレーションに用いているので、個々の粒子の透明度を低く設定し、これらを重ね合わせることで噴煙らしい表現を実現する。本処理の実装には、OpenGL Shading Language を用いる。

5.2 降灰量の可視化

各地域にどの程度の降灰が予測されるのかを視覚的に提

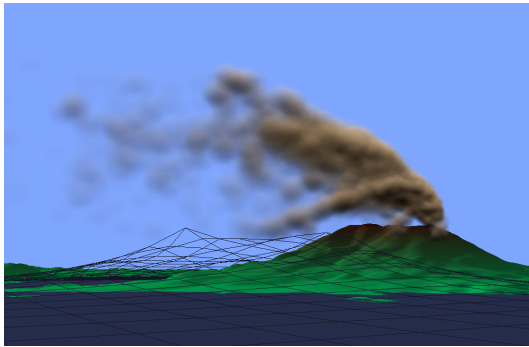


図 6 噴煙と降灰量の可視化例

Fig. 6 Fallen ash simulator and sampling grid.

示する方法について述べる. 各地の降灰量は, 4.1.1 節で述べた降灰を観測するためのグリッドから取得することができるので, このグリッドを格子状の形状として, 地形データに重ね合わせ表示する. この時, 各地の降灰量に応じて高さ方向の値を変化させることで, 降灰の予測量を提示する. 降灰量の予測値と高さの関係式は, 2012 年の最大の降灰があった観測点である「有村」[6] の 1 月から 11 月までの降灰量を, 噴火回数で割った値 ($= 35.984g/m^2$) が, 桜島と同じ標高 (1,117m) となるように調整する. また, 国土地理院の発行する 50m 間隔の標高データから桜島周辺の地形も併せて表示する.

6. 実験と考察

6.1 ライブカメラ画像からの噴火検出

ライブカメラ画像からの噴火の検出率を評価するために, 噴煙の到達高度の異なる 18 件の噴火を記録した動画画像に対して, 噴火の検出処理を行った. 評価に用いた噴火現象および結果を表 2 に示す. この結果から, 早朝から昼間にかけて撮影された画像では, 正しく検出を行うことができたが (図 7), 夜間に撮影された 6 件の噴火現象に関しては検出に失敗した. このような時間帯に発生した噴火は 8 に示すように, 噴出すつマグマ等の影響により画面の明るさが急激に変化するので, 画像の正規化処理が十分に機能しなかったことが原因と考えられる.

6.2 降灰予測量と実測量との比較

次に, 提案手法により予測した降灰量と, 実測値の比較を行う. 鹿児島県では, 桜島周辺の 33 地点の降灰量について 1 カ月毎の総量を公表している. そこで, 特に大規模な噴火のあった 2012 年 5 月を対象として, 噴火発生から 1 時間後までの降灰シミュレーションを行い, この月に発生した 64 回分の噴火による降灰の総量を算出した. これを実測値と比較した結果を図 9 に示す.

この結果から, 提案手法による予測と, 実測値の分布は同様の傾向を示し, 降灰の予測シミュレーションとして一定の精度に達していることが確認できた. 両者の相関係数

表 2 噴火の検出率評価に利用した噴火事例と結果

Table 2 Information of eruptions using to evaluate the proposed detection method and results.

Year	Day	Hour	Height	Result
2012	31/Mar	11	700	Succeed
2011	11/Mar	21	800	Failed
2012	8/Jan	17	1000	Failed
2012	14/Jan	18	1000	Failed
2012	20/Feb	7	1000	Succeed
2012	6/Apr	6	1000	Succeed
2012	27/Jan	13	1200	Succeed
2012	18/May	7	1400	Succeed
2011	27/Dec	11	1500	Succeed
2011	31/Dec	12	1500	Succeed
2012	27/Feb	9	1700	Succeed
2012	29/Nov	3	1900	Failed
2012	29/Jan	11	2000	Succeed
2012	30/Oct	3	2200	Failed
2012	17/Apr	19	2500	Failed
2012	24/Sep	12	2500	Succeed
2012	6/Sep	3	2800	Succeed
2012	24/May	4	3500	Succeed

は 0.66 であった. 誤差の大きい観測地点としては, 降灰量の多い桜島に周辺の地域が挙げられる. このような地点では, 地形等による乱流の影響をうけやすく, 単純なシミュレーション手法では降灰を正確にとらえることができなかったことが考えられる.

6.3 シミュレーションの処理速度

降灰量の予測を行う際に, 予測に要した時間を計測した. その結果, いずれの噴火に対しても 4 分以内で処理が完了しており, 噴火を発見するための画像処理に要する 30 秒とあわせて, 5 分以内で降灰予測が可能であることを確認した.

6.4 実写画像との比較

最後に, 一連の手法を用いて可視化した噴煙の方向, 高度の正しさを検証するために, 実写画像との比較を行う. その結果を図 10 に示す. この結果から, 噴煙の流向および噴煙の到達高度は正しく表現されていることがわかる. また, (a) からは推測が難しい奥行き方向の変化も, 噴煙を 3 次元 CG により表現することで, (c) のような俯瞰視点から噴煙の様子を観察することが可能となった.

7. おわりに

本稿では, 桜島の噴火に伴う降灰を 5 分以内に予測することのできる一連の手法を提案した. ライブカメラ画像を用いた噴火の検出手法では, 画像間の差分情報を用いることで, 噴煙の初速度を推定することに成功した. SPH 法に基づく降灰シミュレーションにおいては, 未知の値である

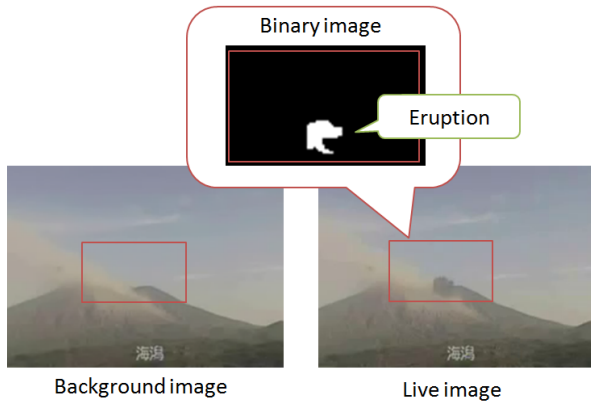


図 7 2012 年 5 月 18 日午前 7 時 00 分に発生した噴火の検出例
Fig. 7 Detection of a eruption from live-cam images.



図 8 2012 年 9 月 6 日午前 3 時 09 分に発生した噴火の画像例
Fig. 8 Eruption image at night time.

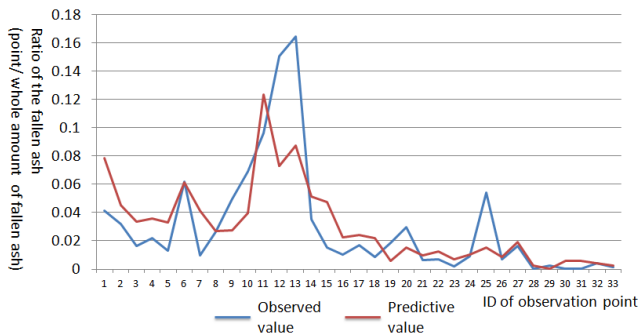


図 9 降灰予測値と実測値
Fig. 9 Predictive and observed values of fallen ash.

噴煙の平均密度を推定するための手法を提案し、過去の降灰量情報に基づきシミュレーションパラメータの最適化を行った。最後に、シミュレーションにより得られた灰粒子の位置を可視化することで、噴煙の流向および降灰地域等をわかりやすく提示することができた。今後は、夜間撮影時の噴火の検出精度を高めると共に、地形等の影響を考慮した気流のシミュレーションを行うことで、予測精度を高める予定である。

謝辞 本研究の一部は、内閣府 NEXT プログラム (LR030)、および JSPS 科研費 (24500120) の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

[1] 嶋野岳人, 花田泰裕, 井口正人: 火山灰による桜島火山の噴火活動評価手法の検討, 桜島火山の集中総合観測報告書, Vol. 10 (2008).

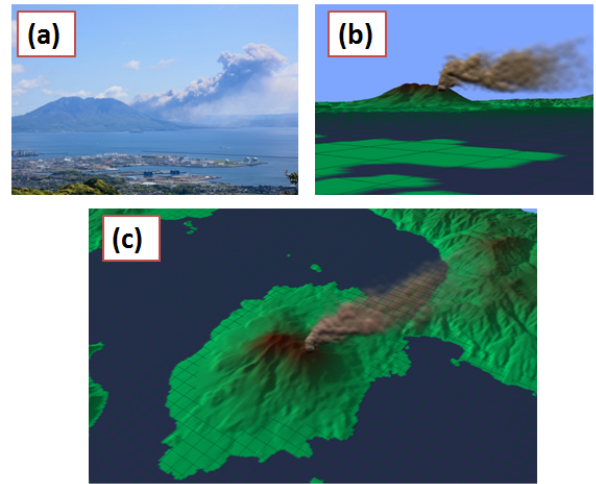


図 10 2012 年 5 月 3 日午前 9 時 54 分に発生した噴火での実例
(a) 実写画像 (b) 同視点からの可視化画像 (c) 俯瞰画像

Fig. 10 Detection of a eruption from live-cam images.

[2] 気象庁: 気象庁 — 噴火に関する火山観測報, 気象庁 (オンライン), 入手先 (<http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/volinfo/gensho.html>) (参照 2013-01-03).

[3] 寺田暁彦, 嶋野岳人, 及川 純, 飯島 聖: 噴煙映像を用いた火山灰質量の推定: 浅間火山 2003 年 2 月 6 日噴火への適用, 地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会, Vol. 52 (2004).

[4] 石峯康浩, 瀧本浩史, 神田 学, 木下紀正, 横尾亮彦, 井口正人: 桜島火山・昭和火口で発生した噴煙の PIV 解析, Vol. 52, pp. 319-322 (2009).

[5] 小屋口剛博: 乱流状態の噴煙中の固体粒子の懸濁モデルに関する観測からの制約条件, 地球シミュレータ利用プロジェクト「火山ダイナミクスの数値シミュレーション」研究集会 (2007).

[6] 鹿児島県: 鹿児島県 / 桜島降灰量観測結果, 鹿児島県 (オンライン), 入手先 (<http://www.pref.kagoshima.jp/aj01/bosai/sonae/sakurajima/sakurajimakouhairyou2.html>) (参照 2013-01-03).

[7] 鹿児島地方気象台: 鹿児島地方気象台”桜島の月別噴火回数”, 鹿児島地方気象台 (オンライン), 入手先 (<http://www.jma-net.go.jp/kagoshima/vol/data/skrerpnum.html>) (参照 2013-01-03).

[8] NHK鹿児島放送局: NHK 鹿児島放送局 | 桜島噴火情報, NHK鹿児島放送局 (オンライン), 入手先 (<http://www.nhk.or.jp/kagoshima3/sakurajima/index.html>) (参照 2013-01-03).

[9] 国土交通省 九州地方整備局大隅河川国道事務所: ライブ映像 (砂防), 国土交通省 九州地方整備局 大隅河川国道事務所 (オンライン), 入手先 (http://www.qsr.mlit.go.jp/osumi/camera_sabo.htm) (参照 2013-01-03).

[10] 新堀敏基, 橋本明弘, 鬼澤真也, 高木朗充, 福井敬一, 相川百合, 甲斐玲子, 白土正明, 平 祐太: 2011 年霧島山 (新燃岳) 噴火に伴う量的降灰予測—気象レーダーにより観測された噴煙エコー頂高度の利用—, 日本気象学会 2013 年度春季大会, p. 226 (2012).

[11] 水野良一, 土橋宜典, 西田友是: 2 流体モデルを用いた火山噴煙のシミュレーションと可視化, 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol. 65, No. 4, pp. 4.111-4.112 (2003).