

噴火微動を用いた火山灰放出量のモニタリング手法

A Method for Monitoring of Discharge Volume of Volcanic Ash by Using Volcanic Tremor

井口 正人

Masato IGUCHI

Synopsis

A method for estimation of amount of volcanic ash ejected by explosive eruption at Showa crater of Sakurajima volcano is proposed. Volcanic tremor is observed associated with continuous ejection of volcanic ash. Monthly sum of seismic energy released by volcanic tremor is correlated with monthly amount of volcanic ash ejected from the crater. Maximum power with better correlation is found in the frequency range of 2-3 Hz of the volcanic tremor. Considering monthly number of explosive eruptions which eject volcanic ash instantaneously, the monthly weight of volcanic ash can be estimated from seismic energy of volcanic tremor.

キーワード: 桜島火山, 火山灰, 爆発的噴火, 連続噴火, 火山性微動

Keywords: Sakurajima volcano, volcanic ash, explosive eruption, continuous eruption, volcanic tremor

1. はじめに

火山灰の拡散は航空機の運航に重大な支障を及ぼす。大気中を拡散する火山灰の分布範囲については、気象観測データや大気の数値モデルに基づいてその移流と拡散が計算されている (Tanaka and Yamamoto, 2002)。火山灰の拡散範囲については、気象要素の影響が極めて大きい。一方、大気中を浮遊する火山灰の粒子密度や火山灰雲から離脱し、地上に降下して堆積する火山灰量については、火口からの放出量に直接的に依存する。

火山灰による災害の大きさはその放出量に依存するので、放出量を見積もることが災害を軽減するためには最も重要である。通常、火山灰の放出量は、多点における単位面積当たりの降灰重量分布から見積もられる (例えば, Tajima et al., 2013)。VEI (Volcanic Explosivity Index; Newhall and Self, 1982) が火山噴火強度指標としてしばしば用いられるが、これは、火山灰・軽石などのテフラの放出量を基準とするものである。

堆積した火山灰量の調査は、広範囲に及ぶことも

あり、多大な時間を要し、迅速性に欠ける。桜島の昭和火口において発生する爆発的噴火に伴い観測される地盤変動を励起する地盤変動源の体積変量と火山灰放出量の間に正の相関がある (井口, 2012) ことから、地盤変動源の体積収縮量から火山灰噴出量を見積もることが可能である。一方、火山噴火は様々な形態をとり、桜島においてもブルカノ式のように短時間に多量の火山灰を放出する噴火様式以外に、火山性微動を伴いながら連続的に火山灰を放出する場合がある。地盤変動は貫入するマグマの供給率と噴出されるマグマの放出率の差に依存する量として観測されるので、このような場合は、顕著な地盤変動が観測されない (立尾・井口, 2009)。

本研究では、2009年以降、爆発的噴火が頻繁に発生する桜島の昭和火口の活動を対象に、噴火に伴う火山性微動と火山灰放出量の関係を調べ、火山性微動データから火山灰放出量を見積もることを試みた。

2. 昭和火口の噴火活動

2006年6月4日に昭和火口において58年ぶりに噴火

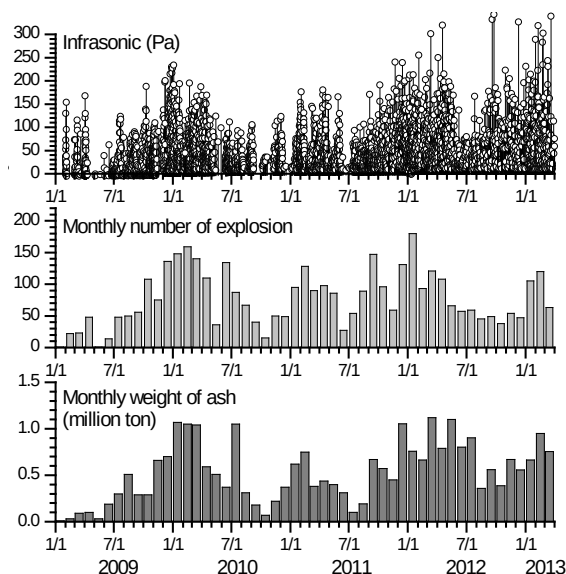


Fig.1 Temporal change of eruptive activity at the Showa crater after 2009. Top: amplitude of infrasonic wave generated by explosive eruption. Middle: monthly number of explosive eruption. Bottom: monthly weight of volcanic ash ejected from the crater.

活動が再開した。2006年6月の噴火活動は約2週間で終息し、その後約11カ月の休止期を経て2007年5月から約3週間噴火活動が続いた。2006年と2007年の噴火は顕著な噴火地震や火山性微動を伴わず空気振動の振幅は3Pa以下（有村，昭和火口から2.4km）と小さかった（井口・他，2008）。昭和火口における噴火活動が爆発的になったのは，2008年2月3日10時17分の噴火以降である。この爆発に引き続き，同日の16時54分，2月6日の11時25分にも爆発的噴火が発生し，5月から7月にかけても爆発的噴火が繰り返された。2008年には合計18回の爆発が発生した（Fig. 1）。ここでは井口・他（2010）の定義にしたがい，空気振動振幅が有村において10Pa以上の噴火を爆発的噴火，10Pa未満の噴火を非爆発的噴火と呼ぶことにする。

2008年7月29日以降，噴火は発生しなかったが，2009年2月1日から爆発的噴火が再び発生するようになった。その後，爆発的噴火の発生頻度は7月から増加し始め，特に10月以降が活動的となった。爆発回数が多い時期と少ない時期がおおよそ1年の周期で繰り返されているが，最も活動的であったのは，2009年12月～2010年3月であり，12月に131回，1月には148回，2月には159回，3月には140回の爆発が発生した。また，2011年12月～2012年1月も爆発回数が多く，12月に136回，1月には180回の爆発が発生した。2013年1月と2月にもそれぞれ，105回と120回まで増加した。

火山灰放出量も爆発回数と概ね同期して推移した。

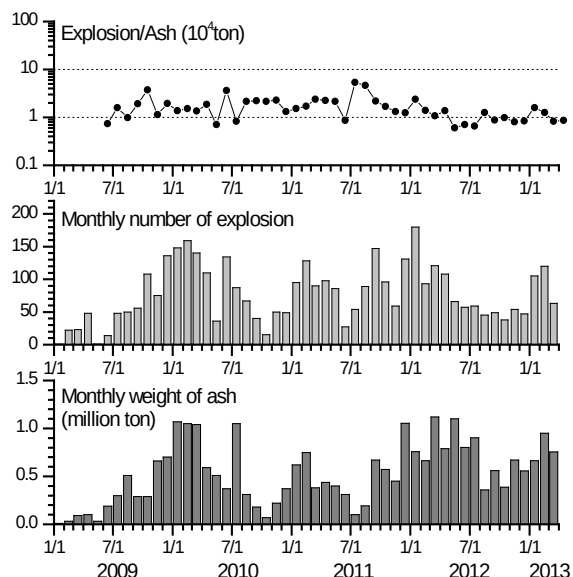


Fig.2 Temporal change of monthly ratio of number of explosive eruption to weight of volcanic ash with the unit of 10^4 ton (top). Middle is monthly number of explosive eruption and the bottom is monthly weight of volcanic ash ejected from the crater.

火山灰放出量は，鹿児島県が1978年に鹿児島県内53ヵ所に設置した降灰観測点の月別の火山灰量から石川・他（1981）の手法にもとづいて見積もられたものである。桜島の南岳を中心とする8つの象限に分けて地点毎の降灰量を火口からの距離の冪関数で近似し，8象限の冪関数積分値の総和としたものである。爆発回数の多かった2010年1月～2010年3月の火山灰放出量は104万～107万トンに達した。また，2011年12月，2012年1月，2013年1月，2013年2月には，それぞれ，105万トン，75万トン，66万トン，95万トンの火山灰が放出された。

Fig. 2に月別の爆発回数と万トンを単位とする火山灰放出量の比を示した。火山灰放出量の多い2009年6月以降について示す。長期的に爆発回数と火山灰放出量の比は減少傾向にあり，2012年5月以降，比が1を下回ることが多い。2009年10月や2011年8月のように，爆発活動の活発化する前に爆発回数と火山灰放出量の比が一時的に増加する。10Pa以上の空振を伴う爆発的噴火以外にも火山灰が連続的に放出されることがある。火山灰の連続的な放出は火山性微動を伴い，数時間以上に及ぶこともある。爆発的噴火が卓越する時期と火山灰の連続的放出を伴う非爆発的噴火活動が卓越する時期が繰り返され，2012年5月以降は，火山灰の連続的な放出が卓越している。

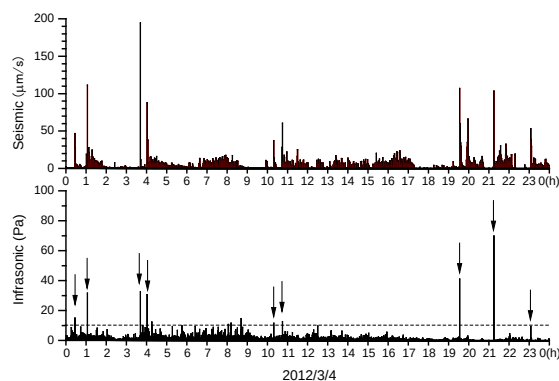


Fig. 3 Temporal change of amplitude of seismic wave and infrasonic wave. Maximum values in minute are plotted. Arrows indicate occurrence of explosive eruptions.

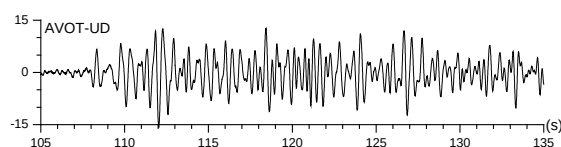


Fig. 4 Waveform of volcanic tremor associated with continuous ejection of volcanic ash

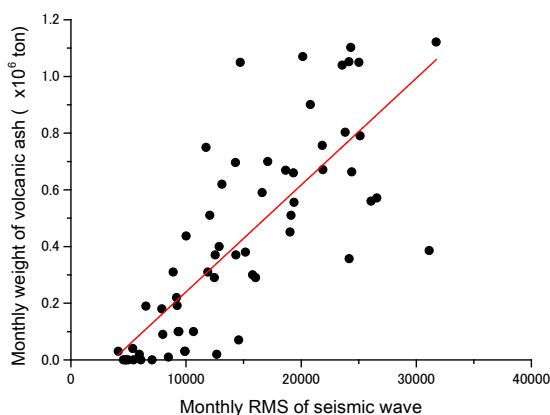


Fig. 5 Relation of monthly RMS of seismic wave and monthly weight

3. 火山性微動の振動エネルギーと火山灰放出量の関係

Fig.3に有村観測坑道（昭和火口から2.1km）における地震動の振幅について1分間の最大値の変化を示す。また、Fig.3には、空気振動の振幅も合わせて示した。2012年3月4日には9回の爆発的噴火が発生した（0:27, 1:04, 3:42, 4:02, 10:19, 10:44, 19:33, 21:15, 23:05）。爆発的噴火の発生に伴い、爆発地震と空気振動が発生するので、地震動と空気振動の振幅はパルス的に増加する。爆発的噴火の発生直後、あるいは、爆発的噴火が発生していない時間帯でも地震動が観測される。1:04と4:02の爆発の直後からそれぞれ

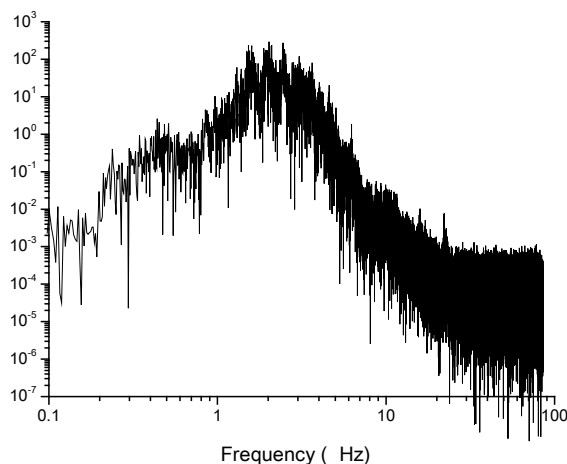


Fig. 6 Power spectrum of volcanic tremor

約1時間、また、6:50～8:20, 15:15～17:05には10～20μm/s程度の微小な震動が発生した。この地震動は火山性微動である。Fig.4に火山性微動の波形を示した。2Hz程度の周波数が卓越する低周波の震動が継続していることが分かる。

1か月間の地震動の振幅の二乗積算値と火山灰放出量の関係を2008年～2012年についてFig.5に示した。両者の間には正の相関が認められる。両者の関係を一次式で近似したものから1/2～2倍程度のばらつきが認められる。

そこで、地震動の周波数帯域毎に火山灰放出量との関係を検討した。Fig.6に火山性微動のパワースペクトルを示す。スペクトルのパワーが大きいのは1.3Hzから3Hzの周波数帯域である。この周波数帯域には1.5Hz, 2.0Hz, 2.5Hzの3つのピークが認められる。0.4～0.5Hzにあるピークは脈動と考えられる。1Hzの幅で周波数帯域ごとのパワースペクトルの1月毎の積算値と火山灰放出量の相関をFig.7に示す。最も相関が良いのは1-2Hzの周波数帯域であり、次いで2-3Hzの周波数帯域であった。1Hz以下と3-4Hzの周波数帯域でも相関が認められるが、4Hzよりも高周波側では相関が悪い。1Hz以下の周波数帯域では両者の関係を一時近似した直線が原点を通過せず、火山灰放出量が0に近い状態でも振動が認められる。これは、常時観測される脈動によるものであり、低気圧の通過など波浪が高いときに大きくなる傾向がある。最もパワースペクトルが大きいのは2-3Hzの周波数帯域であり、この周波数帯域では、切片がほぼ0であり、脈動の影響も小さい。2-3Hzの周波数帯域は相関もよく、火山灰放出量との関係を検討するのに最も適切な周波数帯域と判断される。

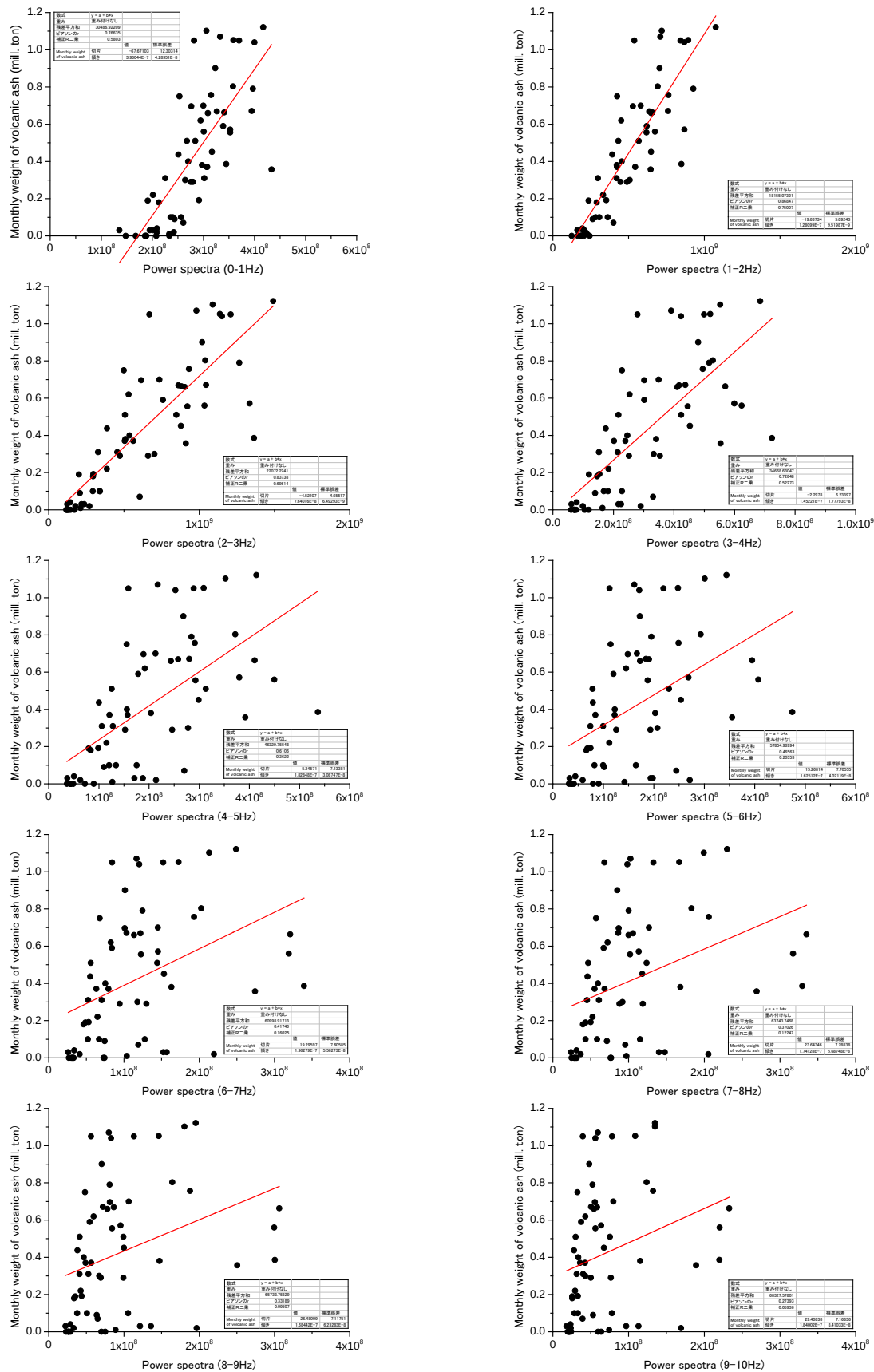


Fig. 7 Relation of monthly sum of power spectra of seismic wave and monthly weight of volcanic ash

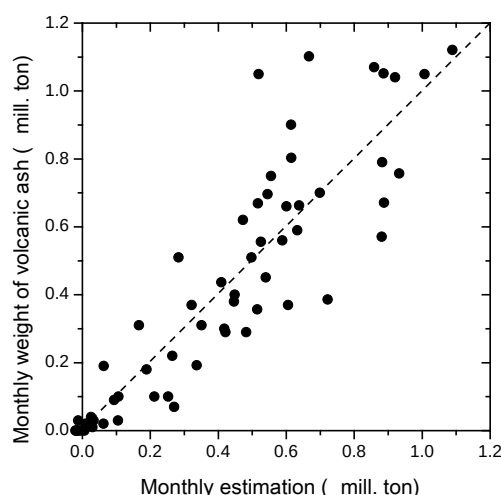


Fig. 8 Fitness of monthly weights of volcanic ash estimated from the equation (1) to monthly weights of volcanic ash ejected from the Sakurajima volcano during the period from 2008 to 2012

4. 火山灰放出量の評価

月毎の火山灰量は、爆発的噴火と非爆発的噴火によって放出されたものの和であり、両者を足し合わせる必要がある。Fig.3に示すように爆発的噴火に伴う爆発地震の振幅の大きい時間は極めて短く、爆発地震から見積もられる火山灰放出量の寄与は小さくなることが予想される。そこで、1か月間の火山灰放出量 W は非爆発的噴火に伴う火山性微動の2-3Hzのパワースペクトル A に比例する量と爆発的噴火回数 n に比例する量の和で表わされると考え、以下の線形関係を仮定した。

$$W = \alpha A + \beta n + \gamma \quad (1)$$

ここで γ は火山活動に起因しない常時微動の影響を考慮したものである。2008年1月から2012年12月までの降灰量から見積もられた月毎の火山灰放出量と(1)式により計算される火山灰放出量の差の最小二乗和が最小となるように、係数 α 、 β および γ を求めた。その結果、 $\alpha = 5 \times 10^{-4}$ 、 $\beta = 3.3 \times 10^3$ 、 $\gamma = -11.3 \times 10^4$ となった。降灰量から見積もられる月毎の火山灰放出量と(1)式により計算される火山灰放出量の関係をFig.8に示した。Fig.5に示した地震動の振幅の二乗積算値と火山灰放出量の関係よりも相関が改善されていることが分かる。係数 β が 3.3×10^3 であることは1回の爆発の平均火山灰放出量が約3000トンであることを意味する。

5. おわりに

火山性微動のエネルギーと火山灰放出量の間に相関関係がみられる。パワーが大きく、相関がよいの

は2-3Hzの周波数帯域であった。火山性微動のエネルギーと爆発回数の両方を考慮することで、月毎の火山灰放出量を見積もることが可能であることが示された。

謝 辞

降灰量データは鹿児島県よりいただいた。本研究は大隅河川国道事務所からの受託研究「桜島火山の火山性微動等を用いた噴火及び噴出火山灰量予測精度の向上に関する委託」、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の研究課題「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究（課題番号1809）」、防災研究所一般共同研究「火山灰噴出量・拡散予測と国際人流・物流分析手法の統合による火山リスク評価モデルの構築（H23G-02）」の経費を用いた。

参考文献

- 井口正人・為栗健・横尾亮彦（2008）：火山活動の経過—1997～2007年—，第10回桜島火山の集中総合観測，pp.1-18.
- 井口正人・横尾亮彦・為栗健（2010）：桜島昭和火口噴火の規模について，京都大学防災研究所年報，第53号B，pp.233-240.
- 井口正人（2012）：桜島における火山灰放出量予測に関する研究，京都大学防災研究所年報，第55号B，pp. 169-175.
- 石川秀雄・江頭庸夫・田中良和・植木貞人（1981）：桜島火山の噴火活動史，自然災害特別研究 研究成果No.A-56-1，pp.153-179.
- 立尾有騎・井口正人（2009）：桜島におけるBL型地震群発活動に伴う地盤変動，火山，第53巻，pp.175-186.
- Newhall, C. C. and Self, S. (1982): Volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism, J. Geophys. Res., Vol. 87, C2, pp.1231-1238.
- Tajima, Y., Tamura K., Yamakoshi, T., Tsune A. and Tsurumoto, S. (2013): Ellipse-approximated isopach maps for estimating ashfall volume at Sakurajima volcano, Bull. Volcano. Soc. Japan, Vol.58, pp.291-306.
- Tanaka, H. L. and Yamamoto, K. (2002): Numerical simulation of volcanic plume dispersal from Usu volcano in Japan on 31 March 2000 using PUFF model, Earth Planets Space, Vol. 54, pp.743-752.

（論文受理日：2013年6月11日）