

(1) 実施機関名：

東京大学地震研究所

(2) 研究課題（または観測項目）名：

爆発的噴火におけるマグマと波動の放出素過程に関する研究

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(4) 地震発生・火山噴火素過程

エ．マグマの分化・発泡・脱ガス過程

(4) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

(3-3) 火山噴火過程

ア．噴火機構の解明とモデル化

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

5 か年の到達目標は、物質科学や流体力学に基づく火道内プロセスのモデルと、地震や空振など地球物理学的観測を結び付け、観測データの理解と火道内プロセスのモデル開発が相補的に発展する素地をすることである。そのために、火道中のマグマの上昇や発泡・脱ガス過程に伴う振動発生メカニズムを体系だてて整理する。特に、パルス的な圧力波と連続的振動について、励起メカニズムの違いや、共通の素過程について整理する。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21 年度においては、パルス的な圧力波形の発生過程として、マグマ表面の気泡の破裂を想定し、流体膜の物性と気泡内圧力の影響を、実験的に調べる。また、実験データの解析を補佐するため、市販のマルチフィジックスによる音響シミュレーションソフトを使う準備をする。

平成 22 年度においては、連続的振動の発生過程として、空気の流れによって励起される圧力波を想定し、これまでのモデルと問題点を整理する。また、実験室で簡単なモデルを作り、その機構を分析する。

平成 23 年度においては、前年度までの素過程の研究と、実際の火山で観測されたデータを比較し、注目すべきメカニズムを絞っていく作業を行う。

平成 24 年度には、火山現象の具体的なプロセスを想定した実験のデザインと実施を行う。

平成 25 年などにはそれまでの研究成果を踏まえ、火山振動の観測データと噴火モデルを有機的に結びつける道筋を模索する。

(7) 計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

火山噴火に伴うマグマと波動の放出素過程として、爆発的噴火におけるマグマ破碎機構の研究、気泡ダイナミクスの研究、火山の空振観測と発生・伝播に関する研究などを、理論、実験、観測を組み合わせ

わせて進めてきた。これらの知見を合わせて、マグマ破碎の発生やそれに伴う波動放出に関する新しい描像を提案し(図1)、空振と地震の統合解析が有用であることを示した。

(1) 爆発的噴火におけるマグマ破碎機構の研究

流体マグマが脆性破碎を起こす条件を定式化する際の問題は、火道流モデルの土台となる流体力学と、破壊現象を取り扱う固体力学の間の障壁である。これは、固体力学が「ひずみ」を主要な物理量として組み立てられているのに対し、流体では初期状態の定義に依存する「ひずみ」が意味を持たないことに起因している。これを克服するため、Ichihara and Rubin (2010) は、仕事率と散逸レートの観点から、ある瞬間ある場所の物質の変形の弾性度を定量化する新しいパラメータを定義し、これによって流体破壊の脆性度を定量化することを提案した。このパラメータによって「減圧時間」で整理されている衝撃波管実験の結果 (Kameda et al., 2008; 2013) を、プリニー式のような「減圧時間」の定義が難しい連続的な噴火におけるマグマ破碎のモデル化に結びつけることが可能となった。

マグマ破碎に関する実験的研究は、東京農工大学工学部が中心になって行っている。これまで考えられていた「脆性破碎」と「粘性膨張」の間に「遅延破碎」という新たな現象が発見された。遅延破碎は、減圧にだいぶ遅れて単発、あるいは、連鎖的爆発として発生する。実際の噴火では、マグマが固結している場合を除いて脆性破碎を起こすような急激な減圧は難しく、この遅延破碎に相当する現象が起こっている可能性がある。そして、遅延破碎の特性が、火道内の破碎伝播速度や、波動放出過程を支配しているという考えを提案し、新燃岳 2011 年噴火の準プリニー式噴火の開始過程に適用した (Kameda et al., 2013)。また、これまでに行われた様々な破碎実験で見られた現象を、物性、減圧時間、応力の観点から整理し、系統樹にまとめた (図 2, Ichihara, 2012)。

(3) 火山の空振発生メカニズムを理解するための実験研究

気泡が連続的に上昇し表面で破裂するときの音の変化を調べた実験では、気泡破裂の時間間隔、様式、前兆信号、そしてそれらを支配する記憶効果や前のイベントから次のイベントへのフィードバック現象など、火山現象の予測の科学において重要な要素を内包する現象を見出した。それは、非ニュートン性流体中の連続的な気泡の上昇・破裂現象において、気泡の破裂に伴う圧力波の波形と破裂前に発生する前駆的音波に明瞭な相関関係があり、両者の特徴が準周期的に変動する、というものである。その相関関係と変動を支配する物理メカニズムとして、気泡の通過に伴う流体の変形と破壊の記憶が蓄積し、あるとき通路が更新されることによって、気泡の破裂の仕方が準周期的に変化しているというモデルを提案した (Vidal et al., 2009)。また、この実験で観察したジェル状流体中の気泡の挙動に発想を得て、新燃岳 2011 年噴火で観測された地震—空振調和型微動の特徴を再現する実験を行った (Ichihara et al., 2013; Lyons et al., 2013)。

その他にも、流体・気泡・共鳴等は、火山特有の振動現象の発生メカニズムを考える上で重要な要素を取り入れた室内実験を行い、市販の数値計算ソフトによる解析と合わせて、理解を進めた (図 3)。これらの実験から得られた知見は、空振観測データの解釈に、新たな視点を与えるものである。

(4) 火山の空振観測

研究期間中に、浅間 2009 年噴火と新燃岳 2011 年噴火の二つの噴火の空振データを解析した。いずれの噴火においても、火口近くに空振観測点の一つ作っただけで初期の主な活動を迎えてしまった。空振観測の最大の問題は風によるノイズである。特に、連続噴出に伴う空振は風のノイズとの区別が難しい。そこで、一観測点のデータで空振と風ノイズを区別する、地震 - 空振相関法という新しい解析手法を提案した (Ichihara et al., 2012)。これは、空振と空振によって生じる地震上下動とが特有の位相ズレを持つという性質を利用し、両者の相互相関関数を調べることによって空振信号を抽出するものである。上記二つの噴火に対してこの方法を用いることにより、一観測点のデータから噴出活動の推移を捉えることができた。この方法は、電源確保や装置の維持の難しい環境での空振観測に役立つ、簡単かつ画期的な方法である。

新燃岳噴火の開始に伴い、常設空振観測点を増設した。その観測点配置は、霧島火山のみではなく、桜島の観測も視野に入れている。現在の火山空振研究は、火山のごく近傍と、数百 km を超える遠方観測に偏っており、桜島 - 霧島間の距離である数十 km スケールの研究が欠けている。しかし、大噴火

の場合には、数十 km 程度離れた観測点のデータから噴火活動を把握する必要性の生じる場合もある。約 2 年間の 1700 回近くの爆発空振を解析し、空振伝播の時空間変動を明らかにするとともに、フィレンツェ大学や日本気象協会とも協力して、空振伝播に対する地形や大気構造の影響を評価する手法を提案した (Lacanna et al., 2014, H25 の成果)。

(5) 空振 - 地震統合解析 (H25 の成果)

桜島の爆発による空振を利用し、新燃岳周辺の観測点の、空振に対する地面の応答関数を計算した。その応答関数を用いて、新燃岳 2011 年噴火における連続噴出に伴う空振と地震を解析した。その結果、ブルカノ式の後の弱い噴出に伴う地震動においては、空振による揺れの寄与が大きいこと、準プリニー式噴火においては、空振の寄与を有意に超える連続振動が発生していることを確認した (Ichihara et al., 2013)。この期間において、地震と空振のエネルギー比や地震の振幅比分布が大きく変化しないことから、火道流システムや波動放出機構はほぼ一定であったと考えている。そして、地震、空振のエネルギーはともに、マグマだまりの体積収縮率 (Ueda et al., 2013) とほぼ比例関係にあることが分かった (図 4)。マグマだまりの体積収縮率は、マグマの質量流量、すなわち、噴火のエネルギーを担う熱エネルギー放出率と揮発成分放出率に換算できると考えると、振動エネルギーとの比例関係は重要である。

波動場からマグマ噴出率を推定する要請は大きく、いくつかの提案がなされている。Prejean and Brodsky (2011) は、噴火微動の震源として噴出の反作用であるシングルフォースを考え、変位振幅が噴出速度と噴出率 (DRE) の積であると提案した。一方、McNutt and Nishimura (2008) は、噴火微動が火道内の圧力変動によって生じると考え、圧力変動の振幅に比例すると考えた。空振振幅については、自由噴流場における乱流ノイズとの類推から、噴出速度の n 乗 ($n=2-4$) に比例するモデルが提案されている (Woulff and McGetchin, 1976)。Ripepe et al. (2013) は、空振振幅と噴出速度の実測から、 $n=3$ が最もよく一致すると結論した。本研究の結果は、様々な波動放出メカニズムの存在すること、一定の噴出率でも、メカニズムが変化すれば振動の振幅が大きく変化することを示している。実際、3 回の準プリニー式噴火において、地震、空振の振幅 (振動エネルギーの $1/2$ 乗) とマグマだまり収縮率の相互関係は異なっている。しかし、2 回目の準プリニー式噴火成長期においては、一定のメカニズムが働いていたと考えられ、空振、地震ともに振幅の 2 乗平均がマグマだまりの体積収縮率に比例している。このことから、空振と地震の震源は、火道内の圧力変動であると考えられる。そのエネルギーが、噴出エネルギーに比例するメカニズムについては、今後の検討課題である。

(8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

- Lacanna, G., M. Ichihara, M. Iwakuni, M. Takeo, M. Iguchi, and M. Ripepe (2014) Influence of atmospheric structure and topography on infrasonic wave propagation, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Ichihara, M., J.J. Lyons, and A. Yokoo (2013) Switching from seismic to seismo-acoustic harmonic tremor at a transition of eruptive activity during the Shinmoe-dake 2011 eruption, *Earth Planet Space*, 65, 633-643.
- Kameda, M., M. Ichihara, S. Shimanuki, W. Okabe, T. Shida (2013) Delayed brittle-like fragmentation of vesicular magma analogue by decompression, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 258, 113-125.
- Takeo, M., Y. Maehara, M. Ichihara, T. Ohminato, R. Kamata, and J. Oikawa (2013) Ground deformation cycles in a magma-effusive stage, sub-Plinian and vulcanian eruptions at Kirishima volcanoes, Japan, 118, 1-16, doi:10.1002/jgrb.50278.
- Ichihara, M., M. Takeo, Y. Maehara, J. Oikawa, and T. Ohminato, Shallow and deep triggering of Plinian-type eruptions inferred from acoustic and seismic eruption tremors, IAVCEI, 2A-O8, (2012-7-23, Kagoshima, Invited)

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名 :

東京大学地震研究所・市原美恵

他機関との共同研究の有無：無

(10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：東京大学地震研究所

電話：03-5841-5666

e-mail：

URL：<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp>

(11) この研究課題（または観測項目）の連絡担当者

氏名：市原美恵

所属：東京大学地震研究所

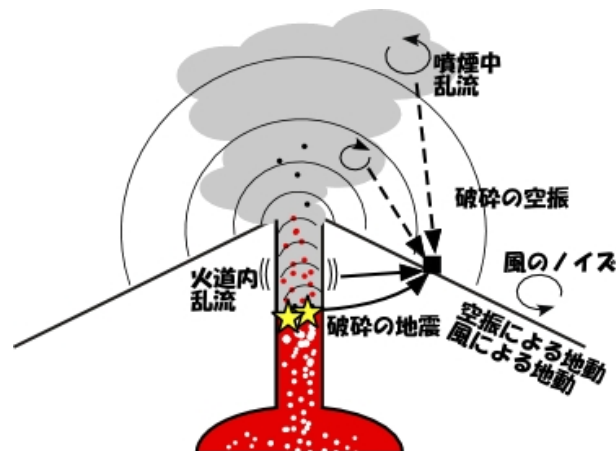


図1：爆発的な連続噴火における波動場の概念図

火道内の破碎面で発生した小爆発により地震波・空振波が放出される。一方、連続噴流は、乱流によるノイズを発生させる。火道の乱流ノイズは、地震波・空振波の両方を発生するが、噴煙中の乱流は空振のみを発生する。また、空振がその場の地面をたたくことによる地面の振動も無視できない。風のノイズは地震・空振双方に影響するが、両者の間の関係は、空振と空振による地面の揺れの間の相関関係とは異なるため、識別できる。

A tree diagram of fragmentation

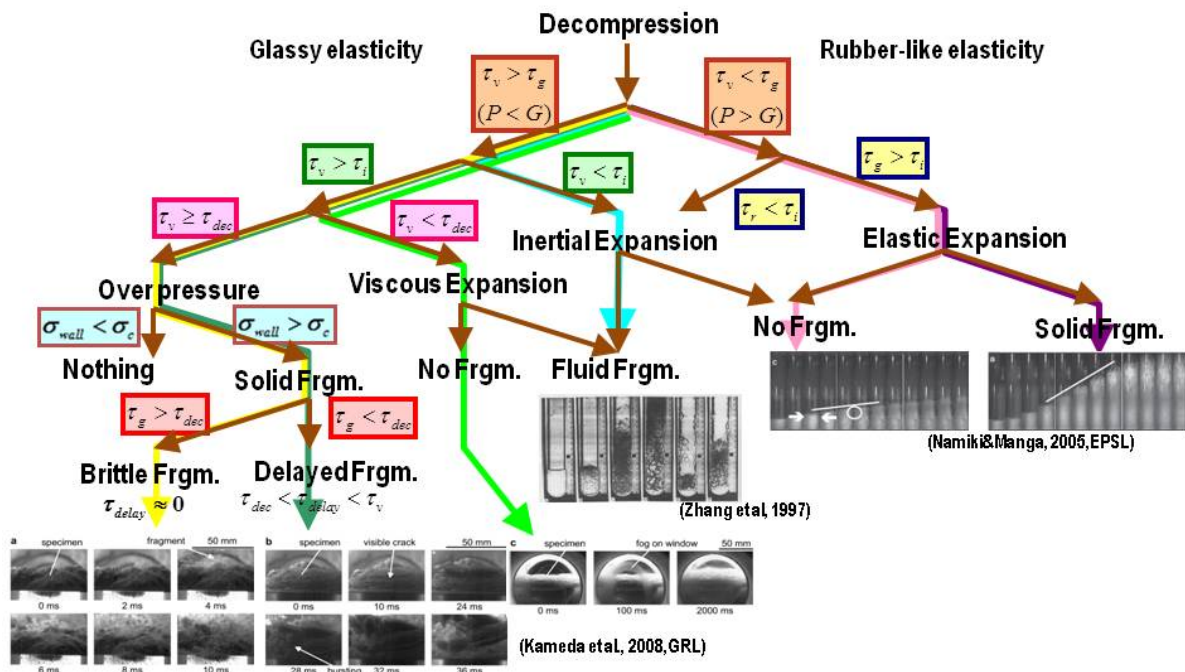
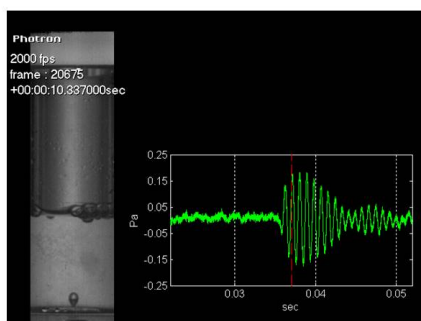
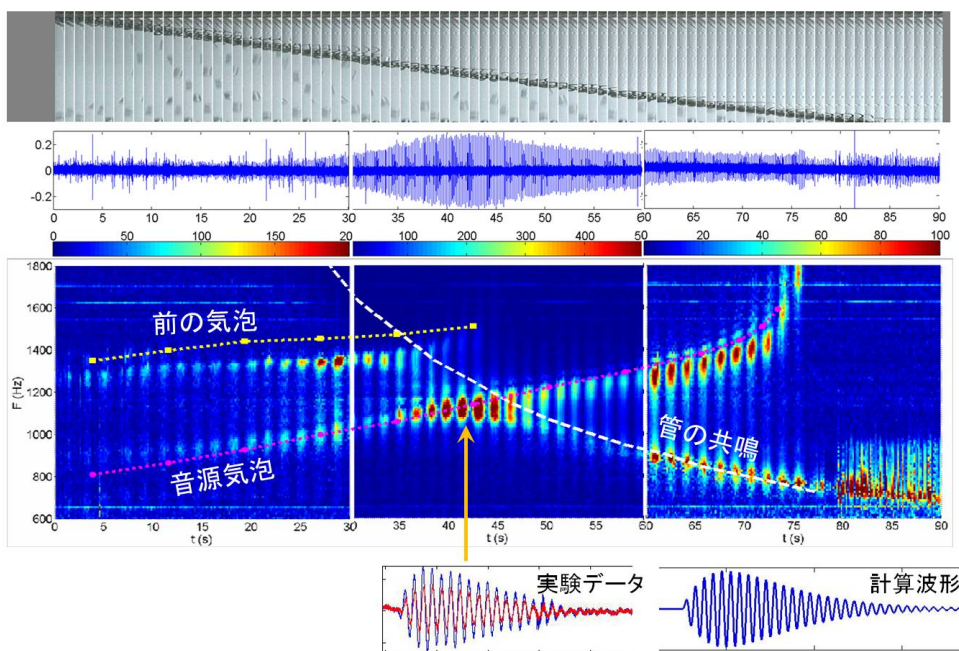


図 2：模擬物質を用いた破碎実験の事象系統樹

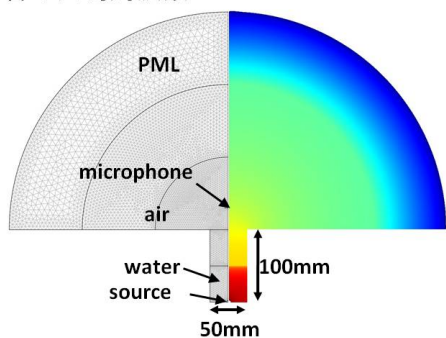
特性時間 (τ_g : 粘弾性緩和時間; τ_v : 粘性膨張時間; τ_{dec} : 減圧時間; τ_i : 慣性膨張時間) と応力物性 (P : 圧力; G : 剛性率; σ_{wall} : 気泡壁面応力; σ_c : 強度) からみた, 急減圧による破碎・膨張現象の分岐.



水の入った管の底から気泡を連続的に注入し、管の上方で音を計測した。気泡が底から離れた瞬間に音が発生するが、水の量を連続的に減していくと、音の波形(スペクトル)が変化し、面白いパターンを形成した。数値計算の結果、管の共鳴周波数、気泡の固有振動数、水中に存在する気泡の位置と数が水の量とともに変化して、このパターンを作り出していることが分かった。



管の共鳴周波数



$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_o^2 x = f(t)$$

共鳴体の応答 励起(気泡振動)

気泡の固有周波数

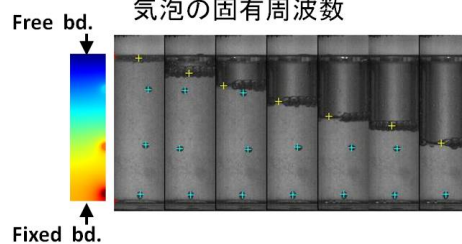


図 3 : 気泡振動と流路の共鳴の相互作用

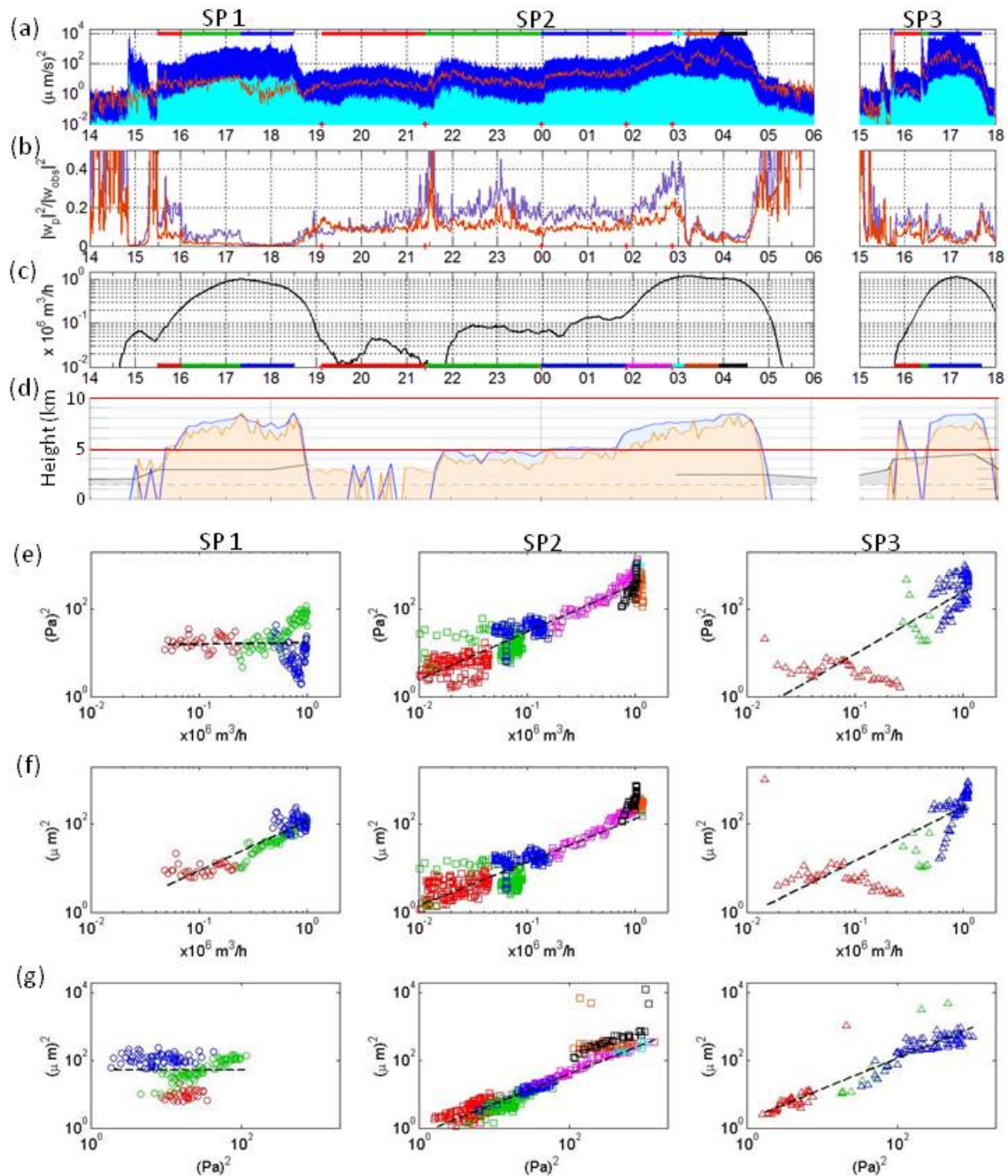


図4：空振—地震の変化と噴出率

2011年1月26日から27日にかけての3回の準プリニー式噴火における空振・地震の振幅二乗平均の推移と噴出率の比較。(a) 火口から700mのSMN観測点における上下動の二乗平均(青)と、同設の空振データから推定した空振による地面の揺れ(オレンジ)、火口から3kmのボアホール型地震計(気象庁)の振幅二乗平均(水色)。(b) SMNにおける、空振による地面の揺れと計測された地震の振幅二乗比(オレンジ)が0.1程度であることは、計測されている地震動が地震波によることを示す。薄紫は、計測された空振と地震の振幅二乗比。(c) マグマだまりの体積収縮率の推定値(Ueda et al., 2013)。(d) 気象レーダーによる噴煙高度(新堀・他, 2013)。(e-g) 3回の準プリニー式噴火の各ステージ(a, cに色分けして表示)における、噴出率、地震平均二乗振幅、空振平均二乗振幅の関係。プロットの色は、(a)(c)のカラーバーの期間の値。2回目の準プリニー式噴火(SP2)の火口拡大の発生する3:08以前においては、三者すべての間で比例関係が成り立っている。