

(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量を結び付け、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作ることである。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 2 1 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 2 2 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 2 3 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 2 4 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 2 5 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) 平成 24 年度成果の概要：

当初の計画では、平成 2 4 年度予定されていたモデル実験であるが、平成 2 3 年度に前倒しで実施し、良い結果が得られた。そこで、本年度はその結果を論文にまとめることと、実際の火山振動の観測データと噴火モデルを結びつけることに着手した。具体的には、以下の成果が得られた。

○新燃岳 2011 年噴火における調和振動型地震・空振の発生に関するモデル実験と現象の比較

新燃岳 2011 年噴火においては、3 回の準プリニー式噴火の後、火口内に溶岩が流出し、間欠的な爆発をするブルカノ式噴火に移行した。この移行時期に、調和振動型の特徴を持つ微動が観測された。その微動が、まず、地震調和型微動 (SHT) として現れ、次に、地震と空振の両方に現れる地震 - 空振調和型微動 (SAHT)、という特徴に着目し、それを再現するモデル実験を行った。その実験は、調和型の振動を発生する圧力弁を通して、粘弾性流体に気体を送り込むものである。Lyons et al. (2013, JGR) は、その実験で、粘弾性流体中の気体輸送モード（気泡、又は、開口管）と圧力弁の振動の相互作用や、気泡の振動や破裂など、波動の特徴を決めるメカニズムを詳細に観察した。その結果、粘弾性対中の気体輸送モードが気泡流から開口管に切り替わることで、SHT から SAHT に切り替わる可能性を指摘した。また、Ichihara et al. (EPS に投稿中) では、新燃岳 2011 年噴火における SHT から SAHT への切り替わりと、溶岩ケーキの成長から収縮にきりかわる時期が一致していること、SHT の発生時期は、表面で小爆発が頻繁に起こっているストロンボリ式の活動期であり、SAHT はブルカノ式の活動期に発生していることを示した。また、他の火山における発生事例との比較も行った。SHT、SAHT それぞれについては、数多く報告されているが、SHT と SAHT の切り替わりに関しては 3 つの事例に限られる (Lees et al., 2008, Reventador 火山・Hagerty et al., 2000, Arenal 火山・Lyons et al., 20012, Fuego 火山)。新燃岳の発生状況も含めて、この現象には以下の共通点のあることが分かった。1) 爆発的噴火と溶岩流出の両方を伴う噴火活動において発生。2) SHT は、ストロンボリ式噴火時期に観測され、SAHT は、ブルカノ式噴火時期に観測される。3) 比較的低粘性の玄武岩安山岩または、苦鉄質の安山岩の噴火で発生する。これらの共通点は、モデル実験から提案する発生機構を支持しており、次第に固まりつつあるマグマをガスが通り抜けるときに発生する振動であると考えられる。

○火山振動の観測データの解析と噴火モデルへの示唆

これまで、気泡の破裂や爆発などのパルス的な圧力波発生メカニズムと、連続的な噴出に伴う波動の発生メカニズムを別々に考えてきた。しかし、プリニー式噴火などの爆発的な連続噴火では、両方のメカニズムが重なって現れると考えられる。そこで、図 1 のような波動発生場の描像を提案した。火道内の破砕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。メカニズムにより、地震と空振への波のエネルギー分配は大きく変わると予想される。この描像に基づいて、新燃岳 2011 年噴火の地震と空振のデータを解析した。

連続噴火に伴う地震は噴火微動と呼ばれるが、爆発に伴う爆発地震に比べて非常に弱い。昨年度までに行った、地震—空振相関解析 (Ichihara et al., 2012) の結果は、噴火微動に対し、空振がその場の地面をたたいて揺らす効果が少なからず寄与していることを示している。これは、これまでの噴火微動の研究では考えられていない効果である。この効果を評価するためには、個々の地震観測点の空振に対する応答関数を知る必要がある。新燃岳の観測点の場合には、約 40km 離れた桜島からの空振を用いて、応答関数が計算できる。計算された応答関数は、観測点ごとに異なり、周波数依存性も大きい。地面の振動が長く残る観測点や、空振が近くの山などをたたいたらしい地震波が無視できない振幅をもって先に到達する観測点もあった。このことは、一般的には応答関数の評価が難しいことを意味し、新燃岳での観測データの重要性は大きい。

得られた応答関数を用いて、連続噴火における地震と空振のエネルギーを比較してみた。複数の観測点が稼働していたブルカノ式噴火期 (2011 年 2 月 1 日から 2 月 7 日) の噴火イベントについて調べた結果、顕著な地震波を伴う噴火 (図 2 A) と、空振による地面の振動以外の振動がほとんどない噴火 (図 2 B) のあることが分かった。後者の場合には、空振による地面の振動の計算値と観測された地震データの相関は高く、振幅変化もよく一致していた。

同じ解析を、2011 年 1 月 26 日から 27 日の準プリニー式噴火期のデータに適用した (図 3)。この時には、火口から 700m の観測点と、約 3 km のボアホール地震観測点 (気象庁) のみが空振計を備えていた。これら二つの観測点のデータはいずれも、準プリニー式噴火の期間に、空振による地面の振動を超える地震波が発生していたことを示している。また、1 回目と 3 回目の準プリニー式噴火の

ときには、噴出量の増加の前に、火道浅部の増圧と急減圧が観測されており (Takeo et al., 2013, JGR に投稿中)、急減圧に伴う顕著な地震波が発生している。噴火中にも、地震と空振が異なる振幅変化を示し、両者の相関も高くなかった。しかし、1 回目の準プリニー式噴火がおさまってから 2 回目の準プリニー式噴火の最盛期にかけての連続噴火期には、図 3 B とよく似た振る舞いが見られた。すなわち、空振による地面の振動の計算値と観測された地震データの相関は高く、振幅変化もよく一致していた。しかし、地震のエネルギーは顕著に高い、という点で異なっている。そして、その特性が変わらないまま、振動エネルギーは二桁増大し、噴煙も大きく成長した。そして、最盛期を迎えてから、空振と相関のない大きな地震が発生するようになった。この時、噴出口が火口いっぱいに拡大しているのが映像から確認できる (Ichihara et al., 2011)。

以上の解析結果は、準プリニー式噴火のトリガー機構について、重要な示唆を与える。1 回目と 3 回目については、衝撃波管を用いたマグマ破碎のモデル実験 (Kameda et al., 2008, GRL; Kameda et al., 2013, EPSL に投稿中) で見られている、遅延破碎に相当する現象として見る事ができる。遅延破碎は、粘弾性緩和時間よりゆっくりと減圧を加えたとき、時間遅れをもって破碎が始まる現象で、気泡の粘性膨張の時間スケールが最大時間遅れとなる。1 回目と 3 回目の準プリニー式噴火は、直前の急減圧の時間スケールが、それぞれ約 10 分と 3 分、減圧から噴煙放出までの時間遅れが、10 分程度である。燃性率が 10^8 Pas 程度以上のマグマで、遅延破碎が可能な状況である。一方、2 回目の準プリニー式噴火については、その最盛期に至る過程で、トリガーとなる増圧や減圧、破壊現象が見られない。連続噴流は一定のエネルギー比で地震と空振を発生しながら発達している。さらに、そのときの地震エネルギーは、ブルカノ式噴火の継続部分で発生するエネルギーよりも有意に大きい。これらのことは、噴火が成長する要因が、マグマの流れ自体にあったことを示しているのではないだろうか。

これまでの噴火モデルにおいて、衝撃波管などのモデル実験は、膜の破碎による急減圧、というマグマ上部にトリガー機構を仮定し、火道流の数値モデルは、マグマの流量や物性など、マグマの流れの中に噴火の成長の要因を仮定していた。本研究の観測・解析結果は、その両方が存在することと、それを見分ける可能性を示すものである。今後の噴火モデルに役立てたいと考えている。

(8) 平成 24 年度の成果に関連の深いもので、平成 24 年度に公表された主な成果物 (論文・報告書等) :

- Ichihara, M. (2012) A tree diagram for responses of bubbly magma on rapid decompression based on bubble dynamics: an implication to the onset of explosive eruptions, *Soft matter physics & solid earth science: unifying concepts*, (2012-6-5, ERI).
- Ichihara, M., M. Takeo, and A. Yokoo (2012) Monitoring volcanic activities using correlation patterns between infrasound and ground motion, EGU2012-6856, 2012 (2012-4-22-27, Vienna).
- Ichihara, M., Lyons, J., Oikawa, J., and Takeo, M. (2012) Acoustic waves in the atmosphere and ground generated by volcanic activity, in: Kamakura, T., and Sugimoto, N. eds, *Nonlinear Acoustics, State-of-the-Art and Perspectives*, 327-330, Am. Inst. Phys., Melville, US. (ISNA 19).
- Lyons, J.J., G.P. Waite, M. Ichihara, and J. M. Lees (2012) Tilt prior to explosions and the effect of topography on ultra-long-period seismic records at Fuego volcano, Guatemala, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1029/2012GL051184.
- Lyons, J.J., M. Ichihara, A. Kurokawa, and J.M. Lees (2013) Switching between seismic and seismo-acoustic harmonic tremor simulated in the laboratory: Insights into the role of open degassing channels and magma viscosity, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/jgrb.50067

(9) 平成 25 年度実施計画の概要 :

平成 25 年度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道筋をつける、というのが目標である。今年度の成果に述べたように、爆発と連続噴流という視点で、地震と空振を組み合わせることで、噴火の推移把握とその機構の理解に迫る可能性が見えてきた。平成 25 年度には、波動場の解析方法を更に高度化させるとともに、リアルタイムで解析

を行うソフトウェアを作成する．

(10) 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

(11) 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>

(12) 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

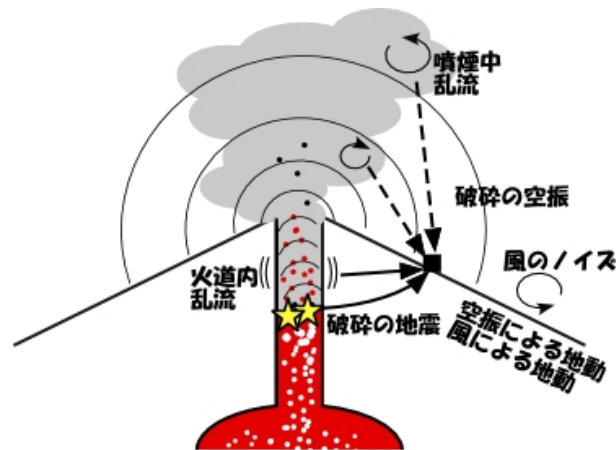


図 1：爆発的な連続噴火における波動場の概念図

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．

2011/02/07

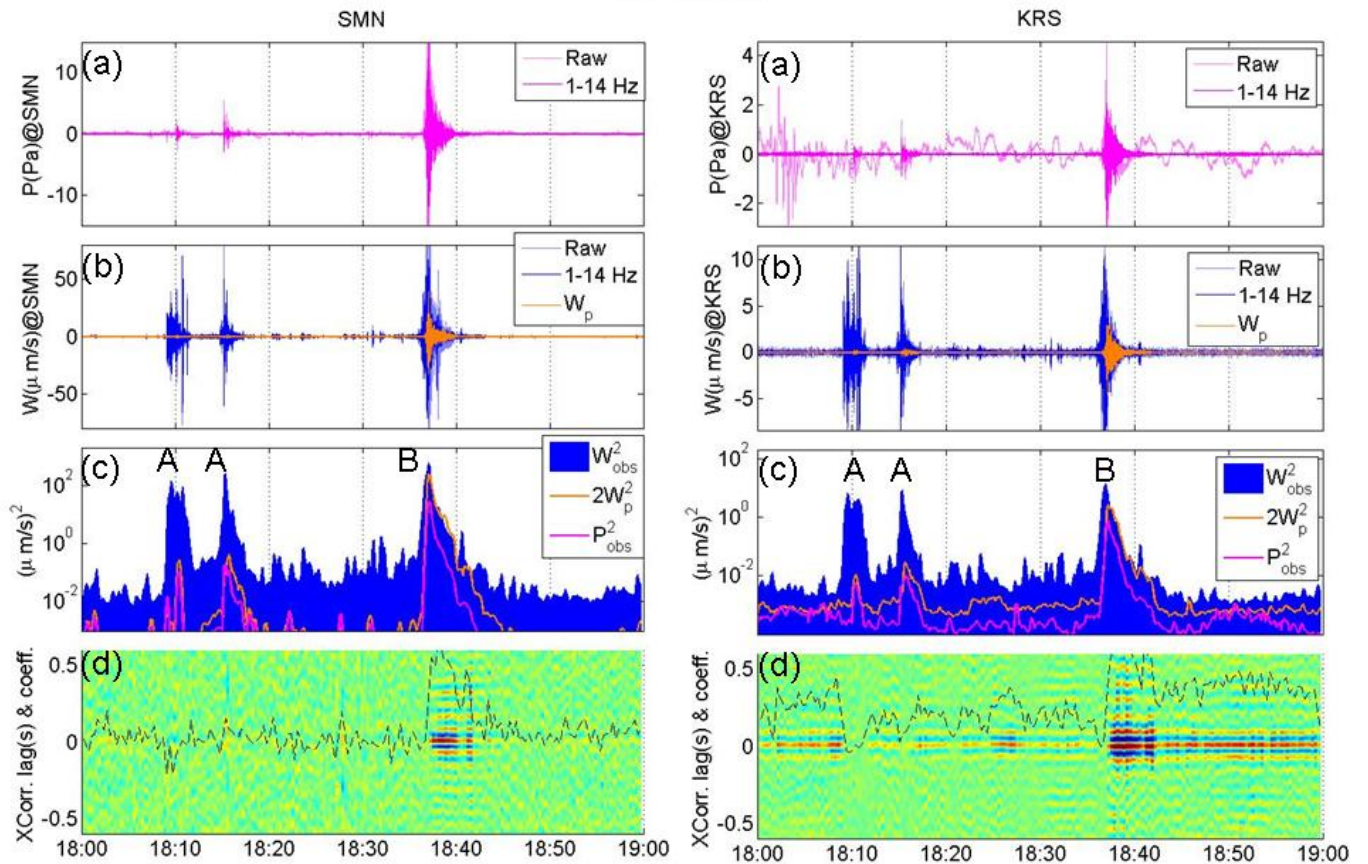


図 2：2011 年 2 月 7 日のブルカノ式噴火の波動場

火口から 700m の SMN 観測点と、2900m の KRS 観測点のデータを比較．それぞれの観測点について，上のパネルから順に，(a) 空振（ピンク），(b) 地震（青）と観測点の応答関数を考慮した空振による地面の揺れの計算値（オレンジ），(c) 上記それぞれの振幅二乗平均，(d) 地震と空振による地面の揺れの相関関数の時間変化．(c) では，地震の振幅（青）に合わせて空振による地面の揺れの振幅二乗平均（オレンジ）を 2 倍にしているが，これは，地面の応答関数の誤差範囲内である．A タイプのイベントでは空振の影響よりもはるかに大きい地震波が発生しているが，B タイプのイベントでは空振による地面の揺れの寄与が大きい．

2011/01/26-27

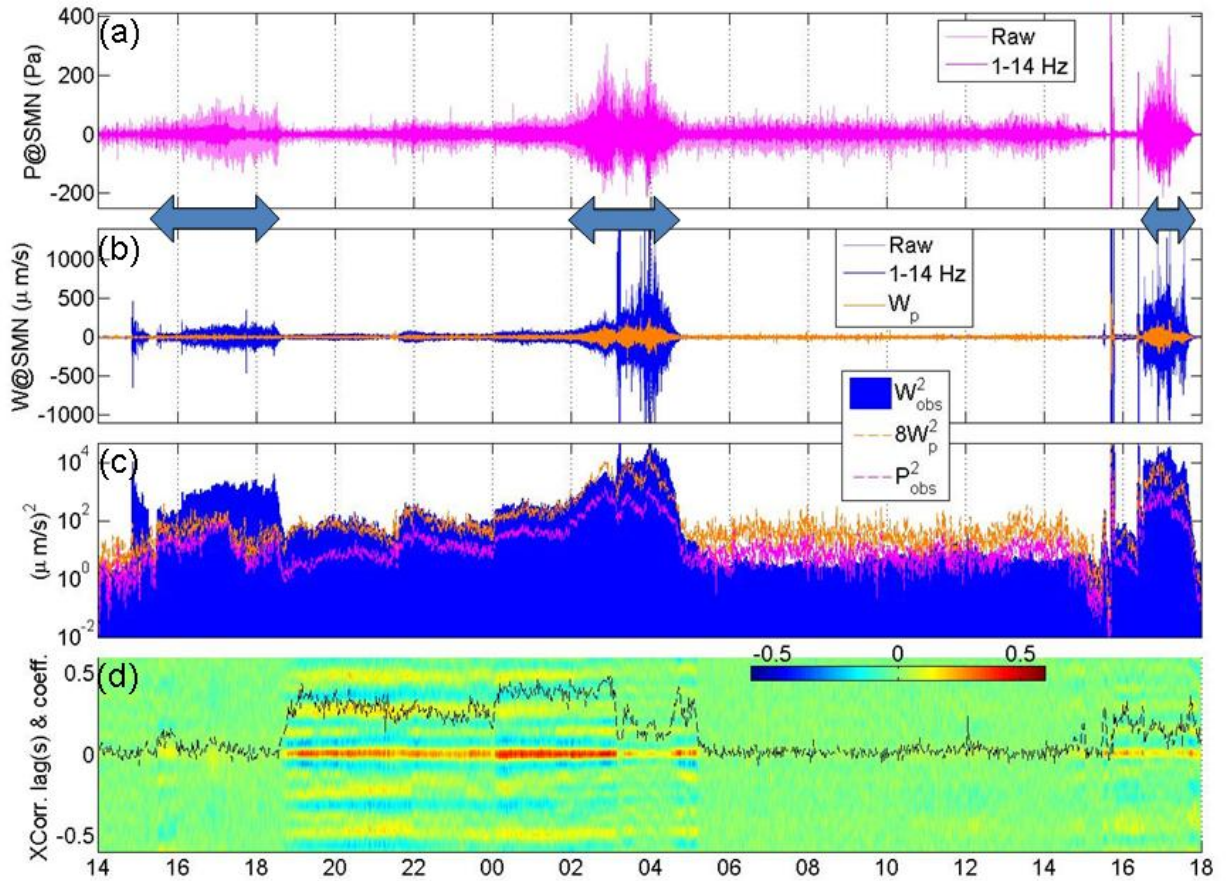


図 3：2011 年 1 月 26 日から 27 日の準プリニー式噴火の波動場

火口から 700m の SMN 観測点のデータについて図 2 と同じ解析を行う．矢印は 3 回の準プリニー式噴火の噴煙高度の高い期間を示す．1 回目と 3 回目については，噴煙高度の成長前に爆発に伴う地震活動が見られ，噴火中も地震と空振の相関がよくない．一方，2 回目の準プリニー式噴火については，直前の爆発活動は見られず，一定のエネルギー比で地震と空振を発生しながら発達している．また，(c) では，空振による地面の揺れの振幅二乗平均を 8 倍にして示している（図 2c では 2 倍）．つまり，そのときの地震エネルギーは，ブルカノ式噴火の継続部分で発生するエネルギーよりも有意に大きい．