

平成30年 5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K13561

研究課題名（和文）全包括的な火山噴火現象解明を目指した模擬火山実験

研究課題名（英文）Analogue experiments for comprehensive grasp of volcanic eruption phenomena

研究代表者

市原 美恵 (Ichihara, Mie)

東京大学・地震研究所・准教授

研究者番号：00376625

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：火山噴火を模擬する室内実験を行い、圧力変化や空中音波を計測した。模擬火山噴火実験で見られた間欠的な噴出を伴うノコギリ波状圧力変動に注目し、その発生機構を調べる実験とモデル構築を行った。その結果、この実験系が実際の火山振動に対して提案されているモデルと物理的・数学的に相似なシステムであることが示された。また、気泡振動による圧力波発生機構を調べた実験では、3種類のメカニズムが存在すること、空中や水中の音波という観測可能量から音源の情報を引き出すためには、メカニズムの特定が重要であることが示された。様々な現象を包括する模擬実験を詳細に観察し、複雑な火山現象に対する新たな示唆が得られた。

研究成果の概要（英文）：We conducted laboratory experiments simulating volcanic eruptions and measured pressure changes in the system and acoustic waves. We particularly focused on the sawtooth-wave like pressure changes accompanied by intermittent gas emission observed in an analogue eruption experiments. We conducted a controlled experiment to investigate its generation mechanism and model construction. As a result, it was proved that this experimental system is analogous to the models proposed for actual volcanic oscillation from the both physical and mathematical points of view. In another experiment investigating pressure wave generation mechanism by bubble vibration, we showed three mechanisms of wave generation, and importance of identifying the individual mechanisms to extract sound source information from the observable waves. We have observed phenomena in these laboratory experiments including various factors and obtained new insights for complicated volcanic phenomena.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山 アナログ実験 振動 圧力波 音波 気液二相流

1. 研究開始当初の背景

火山噴火の様式や規模の多様性を決める仕組みを理解し予測することは、火山学の大きな目標の一つである。火山の素過程研究では、現象を支配していると考えられる要素（たとえば、気泡の核形成、成長、合体やマグマの破碎、脱ガスなど）を抽出し、単純化・理想化された系を組み立て、そのメカニズムを理解することが試みられている。近年、理論やフィールドデータと、実際のマグマやアナログ物質を用いた実験を組み合わせた実証的素過程研究により、理解が大きく進められた。一方で、素過程の理解と実際の火山現象の理解の間には、まだ大きな距離が残されている。実際の火山現象には多数の素過程が含まれており、しかも、線形結合的に組み合わせられているとは限らない。素過程の理解を集積し、システム全体の挙動につなげることは、火道流数值計算等では行われているが、実際には思いもよらない相互作用が働いているかもしれない。

本研究の着想を得た直接の動機は、大学院生による一般向けの噴火模擬実験にある。栓をした容器の中でクエン酸と重層を水あめの中で混合して発泡させ、増圧によって栓を飛ばして噴出させるもので、竹内(2006, 地質ニュース)によって考案された。我々の実験では、噴出現象の模擬だけでなく、火道に相当する部分の圧力変化と噴出に伴う空気振動(空振)を計測し、火山の地殻変動や空振などの観測の模擬データも取得した。この簡単な実験で見られた噴出挙動の推移や、それに伴う計測データの特徴は、驚くほど現実の火山現象に類似していたが、メカニズムはよく理解できなかった。例えば、火道部分を取り出して同じような流れや圧力変化を再現しようとしても、うまくできないのである。実験室で見られた現象について、その一部を取り出して再現することの困難さには、これまでの研究でも度々遭遇してきた。このことは、逆に、素過程の研究で得られた結果を集積し、元のシステムの理解につなげることが簡単ではないことを示唆するものである。

2. 研究の目的

模擬火山噴火実験で見られる変動現象について、素過程と集積過程の両側面から理解し、実際の火山現象への示唆を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ノコギリ波状圧力変動の解明

噴火模擬実験において、容器内の圧力変動にノコギリ波状の振動が見られた。このメカニズムを明らかにすることを目指した。本研究の申請当初は再現することが出来なかったが、その後、図1の装置を製作し、圧力変動波形の再現に成功した。本装置は、ガスチャンバーとパイプからなり、パイプには少量の水あめが入っている。チャンバーに流量一定で空気を送り込むと、空気はパイプ内の水

あめの中を上昇する。チャンバー内の圧力変化を圧力センサーで記録し、パイプ内の気液二相流れを高速ビデオで撮影する。また、パイプの出口にはマイクロフォンを取り付け、音波を計測する。ノコギリ波状圧力変動が生じるメカニズムと条件を明らかにする。

本装置で見られる現象を、簡単な力学に基づく常微分方程式で表現する。そして、各項や無次元化パラメータの物理的意味について、既存の火山振動モデルと比較し、その相似性を確認する。

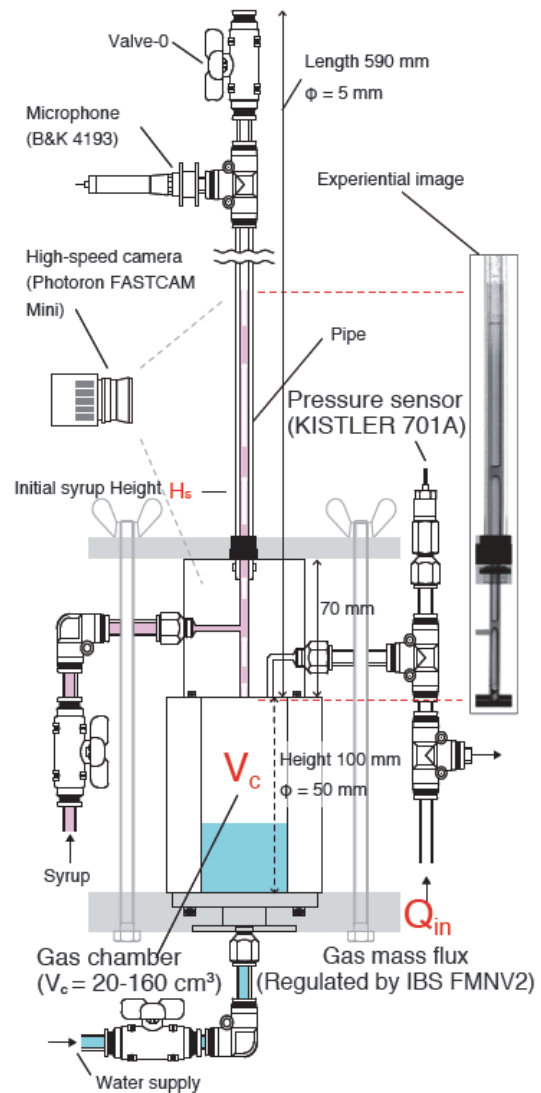


図1. ノコギリ波状圧力変動発生装置 (Kanno and Ichihara, 2018).

(2) 気泡の関与する圧力波発生過程

火山の振動発生素過程として気泡振動が考えられている。(1)の実験装置では表現のできない、気泡振動による圧力変動を明らかにするために、図2の装置を用いる。ここでも、流量一定で液体槽の底から空気を送り込み、液体中と液面上圧力変動を計測する。また、気泡の挙動を、高速ビデオカメラで記録する。

記録された圧力振動の発生メカニズムを

特定し、空気の流量との関係について調べる。

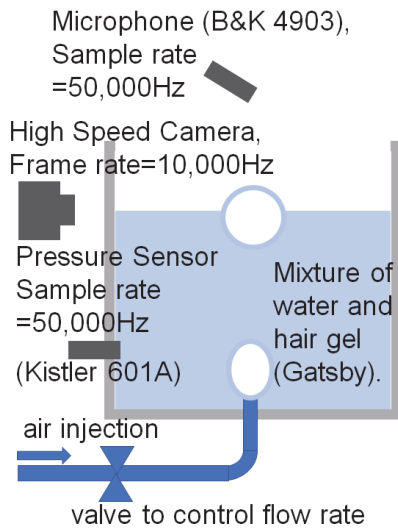


図 2. 気泡による圧力振動を調べる実験装置 (Yamakawa and Ichihara, 2017).

(3) 模擬火山噴火実験の活用

本研究の発端となった、水あめ噴火模擬実験の装置を改良し、教育・アウトリーチ活動に利用する。本研究によって得られた理解に基づき、模擬実験から得られる実際の噴火現象への示唆について明確にする。

4. 研究成果

(1) ノコギリ波状圧力変動の解明

空気の流量と、ガスチャンバーの体積をパラメータとして、実験を行い、両者がある程度大きい場合に、ノコギリ波状圧力変動が発生することが分かった (図 3)。そして、その発生要因は、パイプの中の気液二相流の流動様式が、液体とともに大気泡が上昇するスラグ流から、流下する環状液膜流と中心部分を流れる気流からなる環状流に遷移することによる急激な減圧と、その遷移に至るまでスラグ流の上昇を駆動し続けるのに十分な圧力容量をガスチャンバーが持っていることであることが明らかになった。

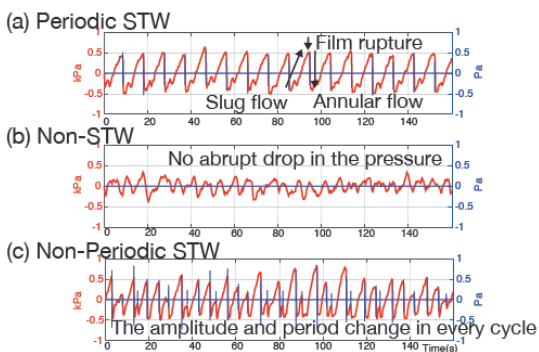


図 3. 計測された圧力変動 (Kanno and Ichihara, 2018).

これらの要因は、数理モデルの中では、流

量や圧力によって実効粘性値の変化するパイプ内流れに対応する粘性要素と、チャンバー内のガスの圧縮性に対応する弾性要素として表現される。これら二つの要素を含む力学系として、実験系を表現し、実験で見られたノコギリ波状圧力変動の形を再現することが出来た (図 4)。

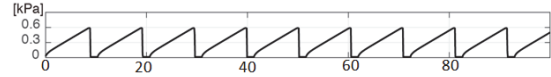


図 4. 数理モデルによるノコギリ波状圧力変動の再現 (Kanno and Ichihara, 2018).

本実験系の数理モデルと、実際の火山に対して提案されている既存の数理モデルを比較した結果、本質的には同じ数理構造をしていることが明らかになった。系を特徴づける重要な無次元パラメータとして、(a)粘性要素によるパイプ内流れの圧力損失と流出による弾性要素 (チャンバー) の圧力低下の比、(b)流れの構造による粘性変化の割合、(c)パイプ内の流れの時間スケールと粘性変化の時間スケールの比、(d)流れを変動させる効果として、粘性要素と重力の影響の比が挙げられる。これらの無次元数において、本研究の実験系は、現実の火山において取りえる値の範囲内にある。以上のことから、本実験が実際の火山のよい模擬システムであるということが確認された。

実験では、流量をさらに大きくすると、振動の周期性が破れることを見出した。チャンバー内の圧力波形とパイプ内の気液二相流との関係を精査した結果、スラグ流から環状流に遷移したときに残された液膜流の厚みの不均質が大きい時に、不規則なスラグ流形成となり、ノコギリ波状圧力変動の周期不規則性へと至ることが明らかになった。このことは、火山振動現象の多様性の要因として、マグマだまりから火道を通して地表へ流れる順方向の流れだけでなく、逆方向の流れとの相互作用が重要である可能性、一サイクルの変化の終わり方 (例えば 1 つの噴火の終了条件) が、次のサイクルに影響を与える可能性を示唆する。これらは、地質学的には指摘されていたものの、火山振動の数理モデルには含まれていなかった効果であり、集積過程としての本実験によって得られた重要な知見であると考えている。

(2) 気泡の関与する圧力波発生過程。

図 2 の実験装置を用いて、液面上のマイクロフォンで計測された空中音波と、液体中の圧力センサーで計測された液中音波について調べた。その結果、以下の 3 種類の圧力波発生機構が共存していることが分かった (図 5)。 (A) 気泡の生成や合体によって励起される液体中気泡振動、 (B) 液面上での気泡振動、および、 (C) 液面上の気泡に穴が開いた時の振動である。それぞれのメカニズムは、火山

の振動発生源として考えられ、観測データの解釈にも使用されている。

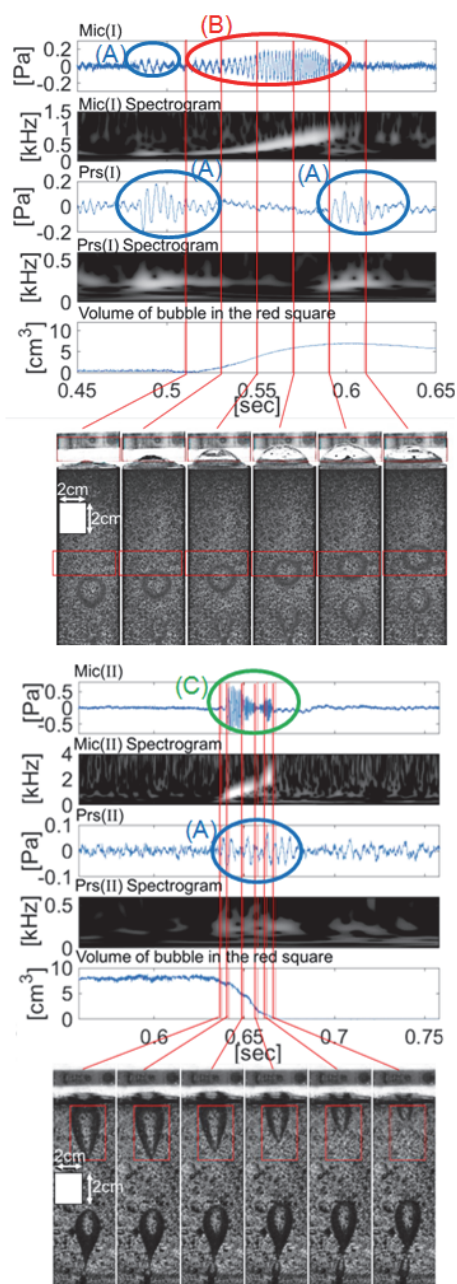


図5. 空中と液中で計測された気泡の関与する圧力波と気泡挙動(Yamakawa and Ichihara, 2017). (A)-(C)は、本文中記載のメカニズムを指す。

本研究では、異なるメカニズムが複合して発生する集積システムの中で、いかに、それぞれのメカニズムを識別し、火山活動の把握や予測の上で重要なガス流量という情報を得ることができるか、という点に焦点を当てて考察を行った。

メカニズムの識別のために、水中音波と空中音波のパワースペクトル密度の最大値を比較したところ、液体中で発生する(A)のメカニズムでは、両者の間に比例関係があるが、液面上で発生する(B)および(C)のメカニズ

ムでは、相対的に空中音波が大きく、異なる傾向を持つことが分かった(図6)。また、(B)(C)で発生する空中音波は、共に、一つの気泡の振動中にだんだんと周波数が高くなる特徴があった(図5)。これらの原因として、(B)については、気泡の形状変化、(C)については、開口径の増加で一部説明できたものの、波形全体を説明するモデルを構築するには至らなかった。

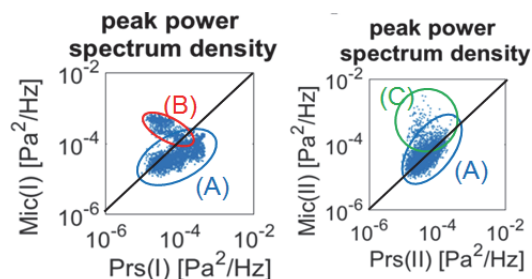


図6. メカニズム(A)~(C)による空中音波(縦軸)と液中音波(横軸)のパワースペクトル密度の最大値の比較(Yamakawa and Ichihara, 2017).

ガス流量の推定に必要なとなる、関与した気泡の体積と音波の関係について、(A)~(C)それぞれに対応するモデルを用いて考察した。(A)は、よく知られた液体中の気泡の体積振動モデルによって、振動周期と気泡体積を関係づけることができる。(B)は液面の気泡振動のモデルで、(C)は小さな穴のあいた容器で発生するHelmholtz共鳴で説明できる。しかし、(B)および(C)については、気泡液膜の厚みや気泡形状、開口径の大きさという、実際の火山では計測できない要素に周期と体積の関係が依存し、不確定性の大きいことが分かった。

実際の火山では、さらに多くの振動発生メカニズムが考えられ、また、観測データは、室内実験以上に音源から観測点までの伝播過程の影響を受けている。これらを踏まえたうえで、観測データから音源パラメータ推定までに必要なロードマップを明確にし、次の研究へつなげたいと考えている。

(3) 模擬火山噴火実験の活用

模擬火山噴火実験を、学内外の教育・アウトリーチ活動に使用した(図7)。マグマの中での気泡発生による圧力の上昇や、溶岩流から間欠的な爆発に遷移する噴火挙動の推移などを見せるだけでなく、圧力計やマイクロフォン、ビデオカメラのデータをリアルタイムで見せることにより、火山活動の多項目観測やリアルタイムモニタリングの意義を説明することができた。また、本研究により、表示されている圧力や音の波形がどのようなメカニズムによって決まっているか、どのような情報を持っているかなどについて、物理的な理解に基づいて説明したり、未解決の問題を紹介したり、より知的好奇心を刺激す

る説明ができるようになった。この実験は、汎用性を高め、教育現場で広く活用できるように改良を続ける予定である。

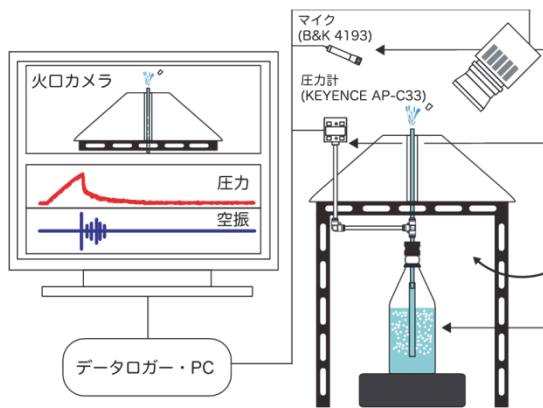


図7. 模擬火山噴火実験の教育・アウトリーチへの活用。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Kanno, Y., and M. Ichihara, Sawtooth wave-like pressure changes in a syrup eruption experiment: implications for periodic and nonperiodic volcanic oscillations, *Bull. Volcanology* (in press), doi:10.1007/s00445-018-1227-z, 2018 (査読有) .
- ② Ichihara, M., Seismic and infrasonic eruption tremors and their relation to magma discharge rate: A case study for sub-Plinian events in the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Japan, *J. Geophys. Res.*, 121, 10, doi:10.1002/2016JB013246, 2016 (査読有) .
- ③ Ichihara, M., T. Kusakabe, N. Kame, and H. Kumagai, On volume-source representations based on the representation theorem, *Earth, Planets and Space*, 68 (査読有) , doi:10.1186/s40623-016-0387-3. 2016.
- ④ 市原美恵・武尾実, 楽器に学ぶ火山の音の発生機構, *パリティ*, 31, 64-65, 2016 (査読無) .

[学会発表] (計14件)

- ① 菅野洋・市原美恵, 噴火の周期性解明に向けたアナログ実験の数理構造検討, 日本火山学秋季大会, 2017/9/21-9/23, 熊本大学 (熊本県熊本市) .
- ② Kanno, Y. and M. Ichihara, Chamber-pipe flow experiment as a mathematical analogue for flow-induced volcanic oscillation systems, IAVCEI2017, 2017/8/14-8/18, Portland, Oregon (USA).
- ③ Yamakawa, K., and M. Ichihara, Characterization and modeling of sound generated by a bubble vibrating on liquid surface, IAVCEI2017, 2017/8/14-8/18, Portland, Oregon (USA).
- ④ 菅野洋・市原美恵, アウトリーチ活動のための水あめ噴火実験, 日本地球惑星科学連合大会, 2017/5/20-2017/5/25, 幕張メッセ (千葉県千葉市) .
- ⑤ 山河和也・市原美恵, 泡の膜の振動の音の解析, 日本地球惑星科学連合大会, 2017/5/20-2017/5/25, 幕張メッセ (千葉県千葉市) .
- ⑥ Ichihara, M., Infrasonic and seismic eruption tremors and their relation to magma discharge rate: A case study for the 2011 eruption of Shinmoe-dake, Japan, the 5th Joint Meeting of ASA and ASJ, 2016/11/28-12/02, Honolulu (USA) (invited).
- ⑦ 菅野洋・市原美恵, 連続スラグ流実験で計測される特徴的空気振動波形～非周期性の解明に向けて, 日本火山学会秋季大会, 2016/10/12-10/16, 富士吉田市民会館 (山梨県富士吉田市) .
- ⑧ Ohashi, M., M. Ichihara, A. Toramaru, and O. Kuwano, Experiments with polyurethane foam toward simulating tube pumice, *Goldschmidt*, 2016/6/26-2016/7/1, Yokohama (Japan).
- ⑨ Kanno, Y., and M. Ichihara, Sawtooth wave-like pressure changes appeared in a slug flow experiment: Toward understanding of volcanic oscillation systems, 31st IUGG Conference on Mathematical Geophysics, 2016/6/6-6/10, Paris (France).
- ⑩ 大橋正俊・市原美恵・寅丸敦志・桑野修, 模擬 Tube pumice の生成を目指したポリウレタンフォームの粘弾性実験, 日本地球惑星科学連合大会, 2016/5/22-5/26, 幕張メッセ (千葉県千葉市) .
- ⑪ 菅野洋・市原美恵, スラグ流れ実験にみられるノコギリ波状圧力変動(STW): 火山振動系の理解に向けて, 日本地球惑星科学連合大会, 2016/5/22-5/26, 幕張メッセ (千葉県千葉市) .
- ⑫ 山河和也・市原美恵, 液体表面で振動す

る大気泡が発生する音波, 日本火山学会
秋季大会, 2015/09/28-09/30, 富山大学
(富山県富山市) .

- ⑬ 菅野洋・市原美恵, 液体-空気五層スラ
グ流に見られるノコギリ波状圧力変
動: 装置改良, 日本火山学会秋季大会,
2015/09/28-09/30, 富山大学 (富山県富
山市) 2015.
- ⑭ 菅野洋・市原美恵, 噴火アナログ実験に
おける周期的噴出とノコギリ波状圧力
変動, 日本地球惑星科学連合大
会, 2015/05/24-05/28, 幕張メッセ (千葉
県千葉市) .

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市原 美恵 (ICHIHARA, Mie)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 00376625

(2) 研究分担者

桑野 修 (KUWANO, Osamu)
国立研究開発法人海洋研究開発機構・数理
科学・先端技術研究分野・研究員
研究者番号: 30511969

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

菅野 洋 (KANNO, Yo)
東京大学・理学系研究科・大学院学生
山河 和也 (YAMAKAWA, Kazuya)
東京大学・理学系研究科・大学院学生