

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20540403

研究課題名（和文） 今まで見落とされがちだった圧力解放過程に着目した，火山爆発室内模擬実験

研究課題名（英文） Analogue experiments of volcanic explosion focusing on pressure release processes

研究代表者

後藤 章夫（GOTO AKIO）

東北大学・東北アジア研究センター・助教

研究者番号：80312685

研究成果の概要（和文）：

火山爆発を考察する際，これまではエネルギーが一瞬で放出されると仮定し，さらに爆発の気体の種類を無視して扱うことが多かった．しかし室内実験により，同じエネルギー量であっても，その放出レートにより現象が大きく様変わりすることや，火山ガスの特性を考慮しなければいけないことがわかった．

またチリのピラリカ火山の観測では爆発に伴う明瞭な空振は捉えられなかったものの，定常的な空振が観測された．その周波数とビデオ映像から，火口内に存在する空洞の形状の推定がなされた．

研究成果の概要（英文）：

When analyzing volcanic explosion we often suppose the instantaneous release of pressurized gas and ignore gas species. Our laboratory experiments have revealed that even if total released energy is the same the resultant phenomena differs depending on gas release rate and thermodynamic properties of volcanic gas.

We also observed the activity of Villarrica volcano, Chile. We did not catch air wave accompanying explosions but detected stable monochromatic infrasound. Using this we determined the shape of the cavity in the vent.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：火山，噴火，空振

## 1. 研究開始当初の背景

火山に対しては「噴火」と「爆発」がしばしば同義に使われ，その使い分けは火山学者

の間ですら厳密ではなく，時に誤用や誤解も見受けられる．爆発は「圧力の急激な発生または解放の結果，容器が破裂したり，または

気体が急激に膨張して爆発音や破裂作用を伴う現象（理化学辞典）」なのに対し、火山では破碎したマグマ片の放出を「爆発的噴火」と呼ぶ。そのため、火山灰や軽石を噴出し、ポンペイの埋没でも知られるプリニー式噴火も、爆発的噴火に含まれている。しかしこの噴火は継続的で、圧力の急激な発生や解放に対応する爆発地震や爆発音はない。このような噴火はいわゆる爆発現象には当たらないが、単に呼び方の問題だけでなく、これを一発の巨大爆発が時間をかけて圧力を解放する過程だと主張する研究者もいる現状がある。

## 2. 研究の目的

上記のような混乱の理由は、火山爆発の環境と生じる表面現象の関係が未解明であることにほかならない。例えば、ガス溜まりから一気に圧力が解放されるタイプの噴火で圧力を見積もるのでも、噴出物速度と空振圧力のどちらを使うかで、前者からは数十～数百気圧、後者からは数気圧と、得られる値に大きな開きがある。

このような状況を踏まえ本研究では、これまであまり重要視されていなかった圧力解放過程に着目し、それが火山噴火の様式にどう影響するかを、おもにアナログ実験に基づき明らかにする。また、火山噴火の映像と空振の観測を行い、実験結果の妥当性検証と火山現象解釈への利用を図る。

## 3. 研究の方法

本研究では、ガスを貯留／解放するチャンバーに砂をかぶせ、高圧ガスを一気に解放して砂を飛ばす実験と、加圧容器にマグマ模擬物質として水飴を入れ、その中を上昇する気泡に急減圧を与えて様子を観察する実験を行った。

砂を飛ばす実験では、チャンバー内のガスは、上部のセロファンダイヤフラムによって外気と隔てられ、容器内からダイヤフラムを針で突いて破膜することで放出される。チャンバーは縦置きのコラム状で、その深さは50mm、直径は10～50mmまで10mm刻みで変えられる。

水飴を用いた実験では、横倒しにした内径260mm、長さ310mmの亚克力パイプ両端を亚克力板でふさいだ密閉容器に半分ほど水飴を入れ、容器に高圧ガスを注入することで水飴を加圧し、その状態で下部から単一の気泡を上昇させる。容器の上部には砂を飛ばす実験と同様にダイヤフラムが張られ、それを外から針で突いて破膜することで、気泡に急減圧を与える。

いずれの実験でも初期圧力のほか、ダイヤフラムを押さえるリングの口径を10～50mmまで10mm刻みで変えることで、減圧速度が変えられる。

実験結果と実際の火山噴火の比較のため、2010年1月にチリのピラリカ火山、2010年7月にハワイのキラウエア火山、2011年2月に九州の新燃岳で、映像と空振の同時観測を行った。但しキラウエア火山では火山ガスが強く火口に近付けず、また新燃岳では観測中に爆発的噴火が起こらず、いずれも解析可能なデータは得られなかった。

## 4. 研究成果

### (1) 砂を使った実験

得られた波形の例を図1に示す。波は最初の鋭い立ち上がりで、それに続く長周期の波からなる。前者は破膜により高圧ガスと大気が接触して生じた衝撃波で、後者は噴出するガスが大気を押しよけることで生じた波と考えられる。振動はしばらく続くが、これは砂の飛散を防ぐために設置された1m四方の壁や天井による反射波と見られ、実際、噴出口からの距離が異なる3つのセンサーで捉えられる波は、2周期目辺りから対応が付かなくなる。

二つの波はいずれも、ガスの圧力、チャンバー内径、噴出口径に対して正の、砂の深さに対して負の相関を持つ。但しチャンバー内径、すなわちガスの体積による変化はほかと比べて小さく、特に衝撃波圧に対してはほとんど差が見られない。むしろ衝撃波圧はいかに短時間で破膜が行われるかに強く依存することがわかった。すなわち、同じ口径であればダイヤフラムの枚数が少ないほど強い衝撃波が発生した。またダイヤフラムとそれを抑えるリングの接触部にかかる力は直径に比例するため、口径が大きいほどダイヤフラムの枚数を増やさねばならないが、そのため多くのダイヤフラムを使う口径50mmでの衝撃波が、40mmの場合より小さくなることも

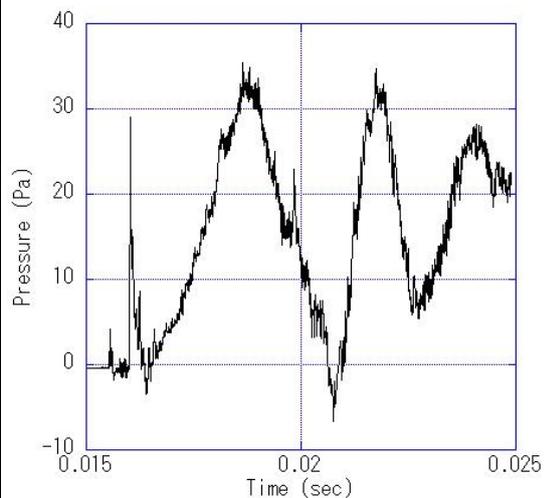


図1 得られた波形の例。砂の深さ36mm、チャンバー内径50mm、噴出口径30mm、2.5気圧の乾燥大気を使用。

しばしば見られた。

これらを火山爆発に当てはめて考えると、火口が溶岩ドームなどで閉塞されている場合、その下にたまっているガスの圧力と体積が同じなら、それがいかに短時間かつ大きな面積に開放されるかが、空振（特に衝撃波）の強度を決めると言える。逆に言えば、蓄積されたガスの総エネルギー量が小さい噴火でも、それが大きい噴火より強い空振を出すことがあり得る。

## (2) ヘリウムを使った実験

砂を使った実験の多くは高压ガスとして乾燥大気を用いたが、ヘリウムガスを用いた実験もいくつか行った。その結果、上記と同様の傾向が見られる一方で、乾燥大気を使ったときと比べると、空振は強く、砂の飛散は弱くなった。

衝撃波の強さは音速、比熱比、圧力差から計算される衝撃波マッハ数が大きいほど強い。本実験で行った、過剰圧が 2.5 気圧と 5 気圧の場合で比較すると、大気-高压乾燥大気の組み合わせと、大気-高压ヘリウムの組み合わせでは、その値は後者のほうがそれぞれ 9%、17%大きくなる。今回の実験結果はそれと調和的であり、同じことは火山爆発についても考慮しなければならない。例えば後述のピラリカ火山の火山ガス (95 mol%  $H_2O$ , 2.0 mol%  $CO_2$ , 2.1 mol%  $SO_2$  と 1 mol% 以下のほかの成分からなる) で計算すると、200°C の場合で大気-高压乾燥大気の組み合わせより 10%大きくなる。実験結果を考えると、この違いは現象に有意な違いを生じさせると考えられ、シミュレーションや、観測データ解析の際に考慮されなければならない。この温度はハワイ・キラウエア火山の火口に開いた空洞での測定値に基づいており、溶岩ドームなどで閉塞された火口に蓄積されるガスの場合はさらに高い温度が予測される。その場合、音速が大きくなることで衝撃波マッハ数はさらに大きくなり、高压気体として火山ガスを考えることはますます重要となる。

破膜により放出される総エネルギー量は、断熱過程として計算するとヘリウムの方が 2 割ほど小さい。にもかかわらず強い空振が発生するので、エネルギー保存を考えれば砂の飛散が弱いのは当然のことと言える。しかし砂へのエネルギー伝達がどのように行われるかはまだ明らかでなく、今後考えていく必要がある。

## (3) 水飴を使った実験

より火山に近い状態を再現するため、マグマに見立てた水飴中の高压気泡が破裂する様子を観察する実験装置を開発した。これまでの研究で、水飴のようなニュートン流体では気泡がはじけても空振が発生しないこと

が報告されている。気泡は深いところでは高い圧力を有するが、上昇し減圧されるとそれに釣り合うように膨張し、高い圧力を保持できないためと考えられる。しかしストロンボリ火山のように粘性の低いマグマでも現に空振を伴う噴火は発生しており、その駆動力は気泡内と大気との圧力差と考えられる。そこで強制的に圧力差を作るため、加圧した水飴（深部のマグマに対応）に単一の気泡を放ち、それが水飴の表面近くに達したところで減圧し、内外の圧力差で気泡を破裂させることを試みた。

急減圧の際、断熱膨張による温度低下で容器内の水蒸気が凝結し、気泡の観察が難しいなどの問題があり、解析に耐えるデータはまだ得られていない。しかし 10 Pa s 程度の比較的 low 粘性の水飴を使った予察的実験では、2 気圧から大気圧までを 0.2 秒で減圧する場合でも、気泡は速やかに膨張し、水飴が飛び散るような強い破裂はなかった。水飴の粘性を高めたり、より大きな減圧を与えることなどで強い破裂を起こせる可能性もあるが、火道のように気泡の成長方向を制限するものの存在が、圧力保持に重要なものかもしれない。実際、次に述べるチリのピラリカ火山では、溶岩湖表面で時折溶岩が飛散する様子が見られるにも関わらず、それに対応する空振は捉えられなかった。

## (4) チリ・ピラリカ火山の観測

本研究期間中に、3 つの火山で映像と空振の同時観測を行ったが、そのうち解析に耐えるデータが得られたのはチリのピラリカ火山だけだった。この観測では活発に対流する溶岩湖で時折マグマが飛び散る様子が見られるにもかかわらず、それに対応する空振は発生していなかった。一方で、一定の周期で安定した連続的な空振が観測された。ここでは、空振発生機構を明らかにするとともに、それをもとに火口形状を推定した結果を報告する。

ピラリカ火山は山頂火口に溶岩湖を有する成層火山で、活動は継続的な火山ガス放出と溶岩湖での気泡破裂で特徴づけられる (図 2)。ピラリカ火山の溶岩湖は特徴的に、中央に穴（天窓）の開いたスパッタールーフに覆われており、その天窓を通して溶岩湖が覗いている。2010 年 1 月、我々はピラリカ火山の空振源を明らかにするため、空振とビデオ撮影の同時観測を行った。しかし溶岩湖表面での気泡破裂と空振の間に対応は見られず、一方で、周期 0.77Hz の極めて安定した連続的な空振が観測された。我々はこれが溶岩湖とスパッタールーフに挟まれた空間で起こるヘルムホルツ共鳴で発生していると考えた。以下にその妥当性を示す。

瓶のような容器の口に気圧の変動が与え

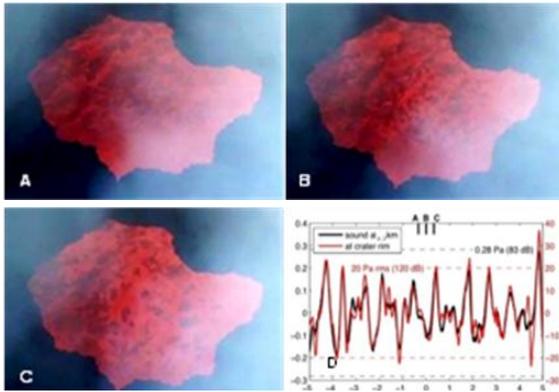


図2 (A-C)溶岩湖表面の対流と、(D)火口から100 mの山頂部と3.7 kmの山腹で観測された10秒間の空振波形. Dの上部に示されたA-Cとの対応から、空振が溶岩湖表面での爆発と無関係であることがわかる

られると、口の部分にある空気の栓が、容器内外の圧力差により振動を始める。これがヘルムホルツ共鳴で、空気の栓の長さが容器の首の長さと同じとした場合の周波数は次式で与えられる。

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL}} \quad (1)$$

(c: 容器内の音速, S: 口の断面積, V: 容器の体積, L: 容器の首の長さ)

実際は栓の両端より外側の空気も一緒に振動し、その長さは口の直径に比例する。口の横方向に平面がある場合は口径の0.85倍、パイプ状の場合は0.61倍が容器の首の長さに加えられる(例えば Fletcher and Rossing [1998])。スパッタールーフに開いた天窓の場合、厚さが十分に薄く、その半径を  $r$  とすることで、ヘルムホルツ共鳴の周波数は次式で与えられる。

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi^2}{1.7Vr}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{1.7V}} \quad (2)$$

(1), (2)式の音速  $c$  は、温度とガス組成で決まり、次式で求められる。

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (3)$$

( $\gamma$ : 比熱比,  $R$ : 気体定数 (J/kg/K),  $T$ : 絶対温度)

ビラリカ火山のガスは 95 mol%  $H_2O$ , 2.0 mol%  $CO_2$ , 2.1 mol%  $SO_2$  と 1 mol% 以下のほかの成分からなる ([Shinohara and Witter, 2005])。これらから  $\gamma$  と  $R$  を求めると ([Morrissey and Chouet, 2001]) それぞれ 1.31 and 426.36 J/kg/K となる。これから求められる音速と、 $f = 0.77\text{Hz}$ ,  $r = 5\text{m}$  として(2)式から求めた、溶岩湖とスパッタールーフに挟まれた空洞の体積、さらに空洞の直

表1 ビラリカ火山のガスと大気に対して見積もられた音速と、空洞の体積及び高さ

温度 (°C)	火山ガス			大気		
	音速 (m/s)	体積 ( $10^4 \text{ m}^3$ )	高さ (m)	音速 (m/s)	体積 ( $10^4 \text{ m}^3$ )	高さ (m)
100	456.4	8.22	24.8	387.2	5.92	17.8
200	514.0	10.4	31.4	436.1	7.51	22.6
300	565.7	12.6	38.1	480.0	9.09	27.4

径を 65m として求めた高さを表 1 に示す。同様に、大気 ( $\gamma = 1.40$ ,  $R = 287.16 \text{ J/kg/K}$ ) を仮定した場合の値も示した。空洞内の温度をキラウエア山ハレマウマウ火口の空洞で測定されたのと同じ 200°C (Fee et al. [2010]) とすると、空洞の高さは火山ガスと大気を仮定した場合でそれぞれ 31m, 23m と求まる。空洞内では火山ガスと大気が混合していると考えられるため、高さはこれらの値の間に入ると考えられる。

ビデオ画像には、天窓の縁から溶岩片が溶岩湖に落下する様子がしばしば捉えられていた。測定した 44 例で落下に要した時間は 1.3 秒から 2.2 秒で平均 1.76 秒、ここから、落下距離は 8m から 24m (平均 15.5m) と求められた。計測値に幅があるのは、気泡の到達や破裂による溶岩湖表面の変動に加え、火山ガスによる視界不良で、落下の開始と終了が正確に同定できなかったことにある。これらは落下時間を短く見積もらせることから、空洞の深さは 24m かそれ以上と見るのが妥当である。この値はヘルムホルツ共鳴から見積もられた 23~31m と調和的である。

Shinohara and Witter [2005]によると、2004年11月に、天窓の直径は 20 m であった。この時期には Ripepe et al. [2010]が 1 Hz の空振を観測しており、(2)式から求められる周波数と調和的である。このこともまた、ヘルムホルツ共鳴がビラリカ火山の空振源であることを支持する。

## 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 2 件)

1. A. Goto and J. Johnson, Monotonic infrasound and Helmholtz resonance at Volcan Villarrica (Chile), Geophysical Research Letters, 査読有, 38 (2011), L06301, doi:10.1029/2011GL046858.
2. M. Ichihara, M. Ripepe, A. Goto, H. Oshima, H. Aoyama, M. Iguchi, K. Tanaka and H. Taniguchi, Airwaves generated by an underwater explosion:

Implications for volcanic infrasound, Journal of Geophysical Research, 査読有, 114 (2009), doi:10.1029/2008JB005792, 26 March 2009.

[学会発表] (計3件)

1. A. Goto, J. Johnson, R. Sanderson, J. Anderson and N. Varley, Vent geometry detected from infrasound observation on Villarrica volcano, Chile, American Geophysical Union Fall Meeting 2010, 2010年12月13日, San Francisco, USA.
2. 後藤章夫, M. Ripepe, G. Lacanna, ストロンボリ火山の噴火映像と高速度収録された空振波形の解析, 2008年10月11日, 盛岡.
3. A. Goto, M. Ripepe and G. Lacanna, Synchronized analysis of high-rate-sampled acoustic waves and video images on Stromboli volcano, IAVCEI 2008 General Assembly, 2008年8月19日, Reykjavík, Iceland.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

後藤 章夫 (GOTO AKIO)  
東北大学・東北アジア研究センター・助教  
研究者番号: 80312685

### (2) 研究分担者

大林 茂 (OBAYASHI SHIGERU)  
東北大学・流体科学研究所・教授  
研究者番号: 80183028  
(H22: 連携研究者)  
古川 剛 (FURUKAWA TAKESHI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・航空  
プログラムグループ・宇宙航空プロジェクト  
ト研究員  
研究者番号: 00375148  
(H21→H22: 連携研究者)

### (3) 連携研究者

小川 俊広 (OGAWA TOSHIHIRO)  
東北大学・流体科学研究所・技術職員  
研究者番号: 30375133