

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月14日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540436

研究課題名（和文） 間欠泉噴火の微動方程式

研究課題名（英文） Tremor equations for geyser eruptions

研究代表者

寅丸敦志（TORAMARU ATSUSHI）

九州大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：50202205

研究成果の概要（和文）：

本研究で提案している微動方程式の意義を、間欠泉実験を用いて検討した。実験の結果、噴出の終わりから次の噴出に向けて、「噴出期」、「活発期」、「静穏期」と振動の特性が変化し、静穏期を経て噴出が起こることがわかった。活発期では、二つの振動タイプ（流体系振動と気泡の周期的発生）が確認され、微動方程式は、流体系の振動を記述することがわかった。この方程式を用いると、方程式の振動項と減衰項の兼ね合いにより、沸騰量の増加と共に、活発期から静穏期へ移行することや気泡の成長特性によって流体振動が励起される効率に差があることなど、実験結果がうまく説明できることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

We examined the significance of proposed equation "tremor equation" using laboratory geyser experiments. The experiments shows that the pressure oscillation shifts from eruption stage, through active stage, to inactive stage, thereafter an eruption onsets. In the active stage, two types of oscillation can be recognized, that is, fluid system oscillation and cyclic formation of bubbles. It is found that the proposed equation can explain the fluid system oscillation. The equation accounts for the experimental facts: (1) pressure oscillation shifts from active to inactive stages as boiling becomes active, (2) efficiency of fluid oscillation depends on rates of bubble growth.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：火山現象、火山性微動、間欠泉、マグマの発泡、沸騰現象

## 1. 研究開始当初の背景

流体の運動を伴う振動現象は、間欠泉において観測され、間欠泉は、火山の火道+マグ

マだまり系のアナログ系として、しばしば研究対象となってきた(Kieffer 1979)。申請者は、間欠泉と火山のアナロジーに注目し、いずれ

の系でも適応可能な簡単な物理モデルを提案した。それは液柱の運動方程式と、マグマだまりの弾性応答からなり、それらを連立させると、以下のような大変見慣れた励起項を含む振動子系に集約される：

$$\frac{d^2 J}{dt^2} + 2\gamma t_0 \frac{dJ}{dt} + t_0^2 \omega J = b \frac{dV_g}{dt} \quad (1)$$

ここで、 $J$ はマグマの流量、 $V_g$ は気体の体積、 $t$ は時間、 $t_0$ は特徴的時間、 $\gamma$ は、減衰の強さ、 $\omega$ は周波数、 $b$ はマグマの粘性や壁の弾性、火道マグマだまり系の形状で決まる定数である。この式は、一見、非常に簡単に見えるが、右辺励起項がマグマの気体の生成率（**発泡関数**と呼ぶことにする）を表し、マグマだまり内の揮発性成分濃度や圧力、さらにマグマの流出量に関係し、本研究で中心的な役割を果たす。この発泡関数は、マグマだまりや火道内の空間的・時間的揺らぎが本質的な役割を果たす可能性があり非常に複雑になることが予想される。

## 2. 研究の目的

上の微分方程式が間欠泉実験の振動特性を適切に説明するかどうか、加熱速度など実験系パラメータと観測される振動特性の関係をよりどころとして検討する。さらに、観測される振動特性を励起項としての発泡関数の詳細と関連付けることで、地表での地球物理観測量と地下深部マグマだまり内の発泡過程の関係を明確にする。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験的方法

温度・圧力・フラスコへの流量、同期させた家庭用ビデオ映像、さらに高速カメラによる詳細な観察により、特徴的周波数特性を持った微動の発生時に、系になにが起こっているか、まず現象を特定する。さらに系の流体振動が、気泡の生成や消滅とどのように関係しているかを解明する。また、実験で観察・観測されるさまざまな振動現象から、微動方程式によって記述される振動現象を抽出する。

### (2) 解析的方法

励起項が単一気泡が過飽和液体中で成長する場合の方程式系の振舞を調べて、成長特性（成長指数）と励起効率の関係を理解する。

簡単かつ典型的な例として、微動方程式の励起項である気相体積変化が気泡そのものの膨張収縮振動によって与えられる場合の微動方程式の振舞について理解する。そのために、右辺の励起項の気体体積変化を気泡径変化に対応付け、気泡径変化  $Rei\ ghl\ ay$  -

**Hesset (RP)** 方程式によって記述し、気泡振動と微動方程式のカップリングの強さを数値的に調べる。

## 4. 研究成果

### (1) 実験的方法による成果

系の形状、過熱温度、水の性質を変えて実験を行った。その結果、一般に、噴出の終息から、次の噴出に至る時間の経過と共に、振動の「活発期」、「静穏期」、「噴出期」に分けられることがわかった（図1）。

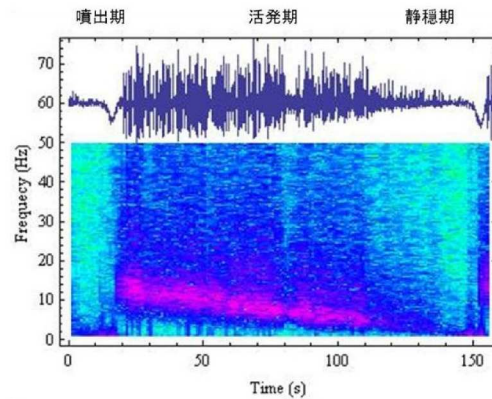


図1：噴出の終わりから次の噴出に至る圧力変動。噴出期と静穏期の間が活発期。

活発期における実験振動現象には、周波数特性によって、二つのタイプがあることがわかった。一つは、**20Hz**以下の単一の周波数によって特徴づけられる場合、もう一つは、**20Hz**以上の調和振動的周波数特性（複数の倍周波数の卓越周波数を持つ）を示す場合である。以下それぞれについて説明する。

#### ① **20Hz**以下の単一周波数特性を持つ場合

この振動は、液柱振動に対応していることが、本研究で提案している微動方程式から予想される周波数との数値的比較と、液面の観察からわかった。液柱振動の特徴的周波数  $\omega$  は、

$$\omega = (\omega_K^2 + \omega_g^2)^{1/2} \quad (2)$$

と与えられる。ここで、

$$\omega_K = \left( \frac{AK^*}{\rho L V_0} \right)^{1/2}, \quad \omega_g = \left( \frac{g}{L} \right)^{1/2} \quad (3)$$

であり、 $A$ は、管の断面積、 $K^*$ は液の実効弾性率、 $L$ は液柱の長さ、 $V_0$ はフラスコ内液体の体積、 $g$ は重力加速度である。この式で示されるように、ヘルムホルツ振動数  $\omega_K$  と重力振動  $\omega_g$  の二乗和の平方根によって与えられ、ガスの体積分率や液柱の長さの増加と共にその周波数は小さくなる。この周波数は、

今の実験条件では  $20\text{Hz}$  以下で、気体の存在割合と共に単調に小さくなる。このことは、一回の噴出の終了から次の噴出に至る時間経過の中で、フラスコ内平均温度の単調増加と共に周波数が短くなる実験結果をうまく説明できる。図1に典型的なこのタイプの振動の圧力変化と、噴出—サイクル中のスペクトル変化を示す。

さらに、この流体振動は、単発的に発生する圧力パルスによって励起され、圧力パルスは単一気泡の核沸騰による気体体積の急激な増加によって発生することを突き止めた。さらに、圧力変化と同期した高速カメラの観察結果から、圧力パルスの振幅と継続時間は、核沸騰によって生成した気泡のサイズと生存時間に、それぞれ対応していることがわかった。図2にこの典型的な例を示す。

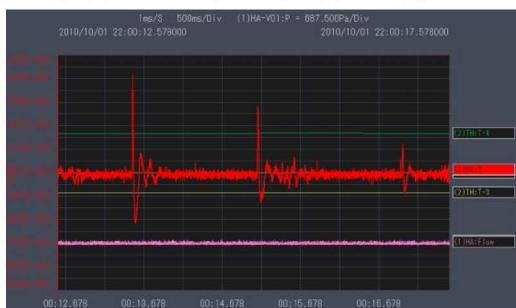


図2：圧力パルスとそれに続く減衰振動。

## ② $20\text{Hz}$ 以上の周波数を持つ調和振動

気泡の周期的発生が、ある特徴的周期を持って起こり、その特徴的周期は、水の温度と共に長くなることがわかった。この気泡の発生周期は、系の流体振動よりも短い周期で起こり、それらが分離していることがわかった。また、過熱度が大きくなり噴出のトリガーに近付くと、系の流体振動が卓越して励起されるようになることがわかった。気泡の周期的発生の周波数は、気泡の不均質核形成を起こす過熱度と気体/液体/壁の材質の間の界面張力の関係で決まっているように思えるが、詳しい理解は今後の課題である。図3に、典型的なこのタイプの振動の圧力変化とスペクトルを示す。

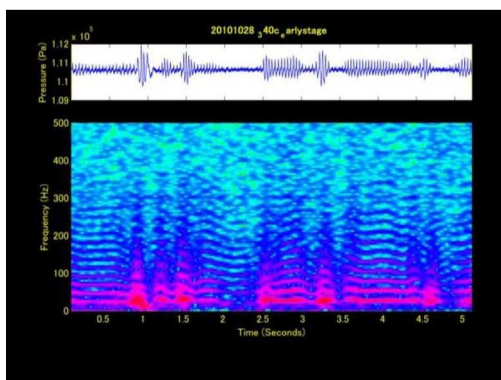


図3：気泡の周期的発生に伴う圧力振動。

## (2) 解析的方法による成果

励起項としての単一気泡の成長速度の時間依存性を調べることによって、系の流体振動が励起される場合とされない場合があることがわかった。気泡の成長指数が  $2/3$  以上の場合は、気泡が成長し続ける限り、流体振動を励起し、それ以下の場合は、流体振動は励起されないか減衰が激しく実効的に励起されないということがわかった。

RP 方程式とのカップリングを計算した結果、圧力源としての過剰圧気泡が流体系振動を励起する効率は、一つの無次元数（カップリングファクター）に左右されることがわかった。カップリングファクターは、流体中での気相（水蒸気）の体積分率が大きくなるほど大きくなる。

以上の事柄を総合すると、気泡の核沸騰がおこる場合には、過熱度が小さい初期段階で、気泡の周期的発生による  $20\text{Hz}$  以上の特徴的周期を持つ調和振動が卓越する。過熱度が増加してくると、大きな気泡の核沸騰が発生し、それによって、系の流体振動が励起されるようになる。このことは、過熱が進むにつれて、気泡の周期的発生モードから、系の流体振動モードに移行した実験結果をうまく説明すると考えられる。

## (3) 微動方程式の実験結果及び火山噴火への応用

微動方程式の振動特性は、式(1)における減衰項振動の強さ  $\gamma$  と周波数の大きさ  $\omega$  によって大きく依存する。 $\gamma < \omega$  の場合は、入力パルスの大きさが十分であれば減衰振動が励起され、 $\gamma > \omega$  の場合は過減衰となり、減衰振動が励起されない。実験では、沸騰が進むにつれて、振動の「活発期」から「静穏期」に移行していった。このことは、沸騰の進行とともに気体の割合が増加し特徴的周波数  $\omega$  が小さくなり、かつ減衰特性が増加し、減衰振動の領域から過減衰の領域に系が移行したと考えるとうまく説明がつく。

気泡の周期的発生に伴う圧力変動は、倍モードの振動数を持ったハーモニック微動の  $s$  様な三角波を励起する。これは、ある種の火山性微動の特徴とよく似ており、天然においても、同様のメカニズムが働いていることを示唆する。

## 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 Toranaru, M Mitsunoto,  
Numerical experiment of cyclic layering in  
a solidified binary eutectic melt, J.  
Geophys. Res. 117, 2012, DOI  
10.1029/2011JB008204 (査読有)

(2) Ichi hara, M, Takeo, M, Yokoo, A,  
Gkawa, J., and Chin ato, T. (2012),  
Monitoring volcanic activity using  
correlation patterns between infrasound  
and ground motion, Geophys. Res. Lett.,  
2011GL050542, in press. (査読有)

[学会発表] (計 8 件)

(1) 寅丸敦志, 市原美恵, Rayleigh Plesset  
方程式と流体系振動方程式のカップリング,  
日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年  
5 月 24 日, 幕張メッセ, 千葉市.

(2) 北島光朗, 星出隆志, 寅丸敦志, 桜島火  
山大正噴火における、噴火様式の変遷とマグ  
マ結晶化過程, 日本地球惑星科学連合 2011  
年大会, 2011 年 5 月 24 日, 幕張メッセ, 千  
葉市.

(3) 星出隆志, 寅丸敦志, 池端 慶, 入山  
宙, 新燃岳 2011 年噴火噴出物の斑晶・マイ  
クロライト・発泡組織から見た、マグマ混合  
および上昇プロセス, 日本地球惑星科学連合  
2011 年大会, 2011 年 5 月 23 日, 幕張メッ  
セ, 千葉市.

(4) 寅丸敦志, 前田一樹, 実験間欠泉におけ  
る噴出様式と噴出量の数理モデル, 日本火山  
学会 2011 年秋季大会, 2011 年 10 月 4 日,  
旭川クリスタルホール, 旭川市.

(5) A Toranaru, K Meda, STATISTICAL  
CHARACTERISTICS OF EXPERIMENTAL  
GEYSERS: FACTORS CONTROLLING MASS AND  
STYLE OF ERUPTION, AGU fall meeting,  
December 9, 2011, San Francisco, アメリカ  
合衆国.

(6) Ichi hara, M, and Lyons, J. (2011)  
Laboratory modeling for generation of  
harmonic tremor in the ground and  
in the air, IPGP/ERI Workshop, 18-19  
October 2011, Auditorium I. P. G Paris ,  
フランス.

(7) 市原美恵, ライオンス・ジョン (2011)  
地震と空振に見られる調和型微動の発生に  
関するモデル実験, 日本火山学会秋季大会,  
2011 年 10 月 4 日, 旭川クリスタルホール,  
旭川市.

(8) 市原美恵, 及川純, 大湊隆雄, 武尾実  
(2011) 空振と地震の相関解析から見た霧島  
新燃岳 2011 年噴火の推移, 地球惑星科学関  
連学会合同大会, 2011 年 5 月 23 日, 幕張メ  
ッセ, 千葉市.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寅丸 敦志 (TORAMARU AITSUSHI)  
九州大学・大学院理学研究院・教授  
研究者番号: 50202205

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

市原 美恵 (ICHIHARA ME)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号: 00376625