

# 火山長周期地震の発生過程に関する一考察

西村太志

東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

## A Study of Source Process of Volcanic Long Period Seismic Events

Takeshi Nishimura

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,

Graduate School of Science, Tohoku University

**Abstract.** I numerically calculate seismic wave propagation excited by magmatic fluid motion in a cylindrical volcanic conduit. Magmatic fluid is assumed to be compressible fluid including volatile components, and the fluid motion is dynamically coupled with the elastic motion of the conduit. The simulation results show a formation of significant high-pressure source at the top of the conduit, which is caused by a stopping effect of upward fluid migration. Such pressure wave propagates upward and downward several times to cause a resonance of the volcanic conduit. These oscillating characteristics are detected as seismic signals at the ground surface. The magmatic fluid finally reaches a equivalence condition to complete the upward migration, and the re-distribution of pressure in the conduit can be detected as static deformation of the crust.

### 1. はじめに

火山では、地下マグマ活動や噴火活動に伴い、多種の地震が発生することが知られている。Volcano Tectonic Earthquakes や A 型地震、高周波地震などと分類される断層運動による地震の他に、規模の割には低周波（長周期成分）が卓越する、長周期地震、低周波地震、B 型地震などと分類される地震がある。これらの地震をここでは長周期地震と呼ぶ。この長周期地震は、複数あるいは単一のピークで特徴づけられるスペクトル構造を示すことが古くから知られ、それらはマグマ溜まりや火道などの共鳴振動が発生源となっていると考えられてきた。また、これらのイベントは、噴火前の増圧過程や噴火後の減圧過程と対応して発生していたり、火山性圧力源の時空間分布と強い相関があることから、マグマ性流体の移動現象が長周期地震の発生に強く関わっているという考えも提案されている。いずれにしても、マグマ性流体、つまり熱水やマグマが長周期地震の発生過程に直接的あるいは間接的に重要な役割を果たしていると考えられている。

本研究では、これらの考えに基づき、マグマの特性を加味した長周期地震のシンプルな発生モデルを提案する。そして、差分法を用いて、地震波動とマグマ性流体の振る舞いを調べた。

### 2. 長周期地震の数値シミュレーション

これまでの長周期地震の発生モデルは、解析解が得られ易いこと、モデルを単純化しやすいことから、マグマ性流体の音速を一定とすることが多かった。しかしながら、マグマ内には揮発性物質が存在し、その効果により、音速が圧力に依存して変化することが知られている。例えば、地表から鉛直に約 2km 伸びる火道内では、玄武岩質マグマを仮定し、揮発性成分の発泡開始深度を 4km 程度にすると 150m/s から 200m/s まで変化する。また、これまでのモデルでは、マグマ性流体の運動を微小振幅運動と近似し移流項を取り入れないなどの簡

素化が図られてきた。しかし、特に、マグマ性流体の移動現象として長周期地震の発現を取り扱う場合には、移流項を無視することは適切ではない。そこで、今回は、マグマ中に揮発性物質が含まれていることを考慮し、流体の基礎方程式を微小振幅波などの近似はしないで解く。そして、地殻を伝播する地震波を同時に数値計算する。

マグマ内揮発性物質の効果に着目するため、マグマ溜まりの形状を簡素化する。本研究では、鉛直方向に伸びる円筒状の火道を考える。火道内のマグマ性流体は揮発性物質を含むので、圧縮性流体と仮定し、質量保存則および運動方程式に従うと仮定する。また、物性の圧力依存性は、井田 (1990) による密度と圧力の関係式で表す。火道は、均質一様な弾性定数を持つ弾性体に囲まれている。地表面は簡単化のためフラットとし、地殻の変位、応力は弾性体の運動方程式により表す。流体と弾性体は、火道壁面状で、常に、応力と変位 (速度) は一定という境界条件で結合される。

弾性体と流体の各方程式は軸対称の円筒座標系で表し、差分法で数値的に解く。

火道内のマグマ性流体は、重力の効果により深くなるほど高密度になる。また、地殻内応力と釣り合う。火道を下部に新たに深部からマグマの供給されたことを考え、火道下部の圧力を 10MPa 増圧させる。上部と下部の境目は、火道が何らかの原因で閉じており、上部と下部の間では圧力が 10MPa 急増している。この初期状態は、数値的に差分法を用いて求める。長周期地震は、この境目が瞬時に取り除かれることによって、励起される。

図 1 に、境目を瞬時に取り去った後のマグマ性流体の圧力の時空間変化を示す。火道下部から、圧力波がマグマ性流体の音波速度で上方へ伝播していく。そして、この圧縮波が火道上端に達した約 1 秒後に、上端がさらに増圧される。このような急激な圧力上昇は、火道上端が閉じているため、火道下方から上昇を続けていた流体が急速に止まったために生成されたと考えることができる。この急激な圧力は初期圧縮波の振幅の 10 倍以上ある。その後、この大振幅の圧力は下方へゆっくりと伝播し、次第に減圧していく。この一連のプロセスは、火道の上端および下端で繰り返し発生し、火道内の共鳴現象を引き起こす。最終的には、この反射波は減衰し、平衡状態に達する。その結果、火道上部では初期圧力よりも高い圧力になり、また、下部では低い圧力になる。つまり、下部のマグマが上昇し、圧力再配分が行われる。

図 2 にこのマグマ性流体の運動と同時に計算された地震波を示す。火道内の鉛直方向に繰り返される圧力伝播は、周期的な振動として地震波に観測されている。また、急激な圧力上昇後のゆっくりとした火道上部の減圧過程は、比較的長周期の地震波として記録されている。最終的なマグマの再配分の様子は、地動の Static な変位として記録されている。

### 3. まとめ

本研究では、マグマの下方から上方への貫入に伴う、マグマ性流体の運動を地殻運動とカップリングさせた長周期地震の発生のシンプルなモデルを提案した。このモデルは、揮発性物質の振る舞いを考慮したマグマ性流体を加味しているところに特徴がある。計算結果は、マグマ性流体の共鳴現象ばかりでなく、流体の移流項に起因すると考えられる急激な増圧現象やそれに引き続く比較的緩和時間の長い減圧現象を示した。そして、最終的には、火道上部が増圧し、下部が減圧するというマグマ性流体の上方への貫入現象を示した。これらのマグマ性流体の移動現象は、震源近くに展開した地震観測点で検知できることが明らかとなった。

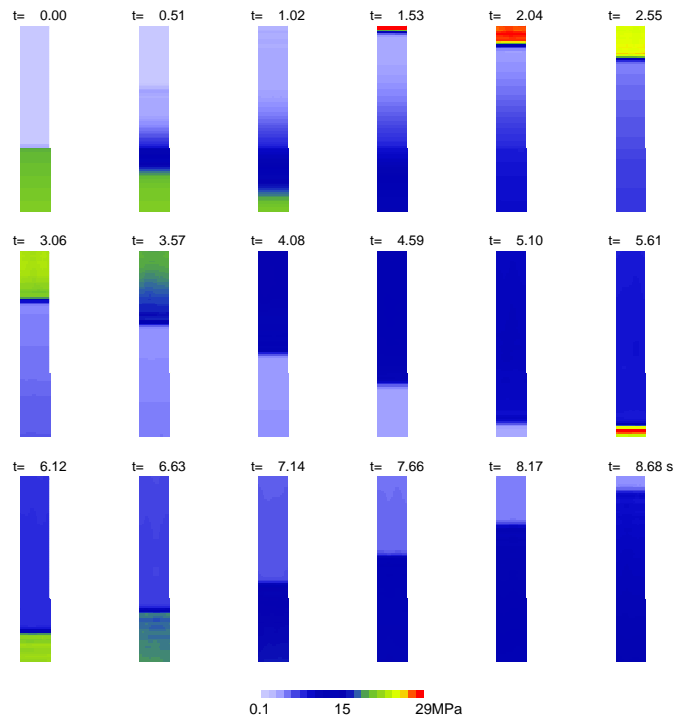


図1．火道内マグマ性流体の圧力分布の時空間変化．火道の半径は 50m，高さは 600m．火道下部（ $t=0.00\text{s}$  時の黄色の部分）は，はじめ，上部に比べて 10MPa 圧力が高い．火道上部と下部の境をなくし，地震を発生させると，下部から上部へ圧力が増大する（濃い青色： $t=1.02$  まで）．その直後，最上部で急増圧している（ $t=1.53\text{-}2.04$  秒の赤色の部分）．急増圧部分はゆっくりと下方へ伝播すると共に，圧力が次第に減っていく． $t=5.61\text{s}$  では最下端部で圧力の急増圧がある．このような反射を繰り返しながら，マグマ性流体は次第に平衡状態に達していく（全体的に青色になっていく）．

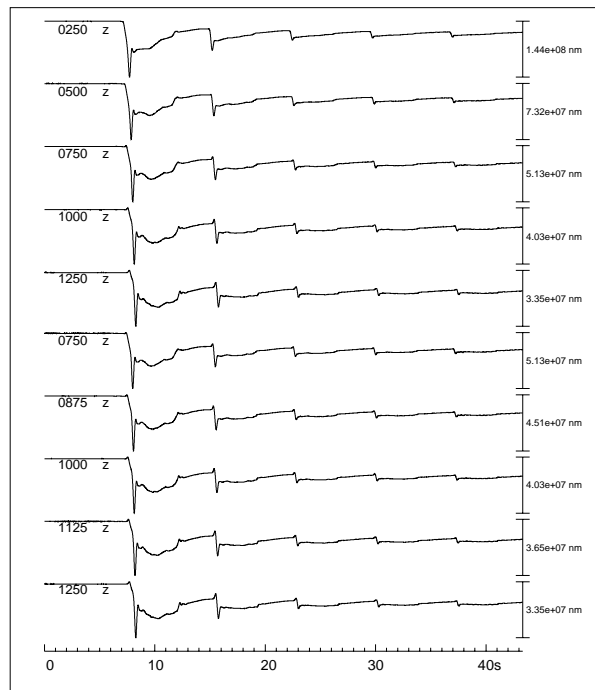


図2．火道から震央距離 250-1250m で記録される上下動変位記録．各トレースの左の数字が震央距離を表す．上向きが地動の Down を示す．パルス状の波が約 7 秒おきに現れている．また，パルスの間にはゆっくりとした変動が記録されている．