

令和元年6月5日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13870

研究課題名(和文)火山観測のための小型歪み計の開発

研究課題名(英文)Development of small strain meter for volcano observation

研究代表者

西村 太志(Nishimura, Takeshi)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：40222187

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)：火山の火口近傍に設置可能な歪み計の開発を行った。歪みゲージとステンレス棒を利用した小型の歪み計を設計し、孔内に埋設された状態での歪み計の感度等を有限要素法による見積もった。火山爆発に伴う数時間程度の山体変形が報告されている桜島に、深さ20m深の孔井底に設置した。出力信号を100Hzサンプリングで連続収録した。数時間程度の時定数の山体変形はノイズに埋もれて記録できなかった一方、近地地震による周期1秒、振幅0.5 micro strain程度の信号は十分記録することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微小な山体変形を生む火山性圧力源の時空間変化を正確に測定するには、傾斜計よりも歪み計の方が適している。火口近傍に設置可能な小型歪み計が開発されれば、プルカノ式噴火のように頻繁に発生し、かつ、マグマダイナミクスを観測研究で明らかにすることが可能となる。孔井での歪み計と岩盤とのカップリングなどの不明な点もあるが、現時点では、微小な山体膨張や収縮を捉えるに至っていない。

研究成果の概要(英文)：We developed a strain meter that can be installed close to a crater of active volcano. The strain meter consists of strain gages and stainless bar, and it is designed by using FEM numerical code to examine the sensitivity. We installed the strain meter at a depth of 20 m of the volcano flank of Sakurajima where volcanic explosions introducing volcano deformation are often observed. The strain signals are continuously recorded with a sampling frequency of 100 Hz at the site. The volcano deformations with a time scale of a few hours were not well observed with a good signal to noise ratio, but short-period seismic waves with amplitudes of about 0.5 micro strain are well recorded.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山体 山体変形 歪み計

1 . 研究開始当初の背景

火道浅部のマグマ挙動は、火山噴火の爆発性・非爆発性や、火山灰生成のメカニズムなどの火山噴火現象の理解に不可欠な情報である。1990年代から始まる1次元火道流モデルは、マグマ内の気泡成長や系外への脱ガス、メルト中の斑晶の形成といったマイクロスケールのプロセスを取り入れ、その理論的な考察により、飛躍的に噴火過程の理解を深めた。一方、傾斜計や歪み計（伸縮計）による地盤変動観測は、火山噴火に先行して山体が膨張することを捉えるなど、やや深部（深さ数キロメートル）のマグマ溜まり等の火山性圧力源の時空間変化を明らかにしてきた。しかし、機器が大きく設置場所が山麓に限られることから、より浅部の火道内マグマの挙動を捉えることは難しかった。最近、申請者らをはじめとしたいくつかのグループにより、火口から1 km以内でも傾斜観測が行われるようになった。その結果、ブルカノ式噴火やガス噴出といった小規模な噴火直前にも、様式や規模によって異なる時間変化・振幅を示す山体膨張が起きることや（Nishimura et al., 2013）、2点以上の傾斜データを用いて圧力源の深さ方向の推定も行われるようになった（Takeo et al., 2013）。しかし、弾性論によると、点圧力源の深さ変化に対して、地表における傾斜は空間的になだらかに変わるため、火山噴火やマグマ上昇過程の解明に必要な、圧力源の深さ方向の空間分解能は高くない。

2 . 研究の目的

本研究では、深さとほぼ同程度の水平距離の位置で極性（膨張か収縮）が変化し、深さ方向の変化に敏感な「歪み」を観測する重要性に着目し、火口近傍に設置可能な小型の歪み計の開発を行う。人力での運搬が可能な小型歪み計の設計を行い、試作版による装置の検定、活動的火山における観測を実施する。歪み計の感度検定、消費電力等の仕様を決定する。また、実際の火山で運用し、降水や温度等のノイズによる影響を評価する。

3 . 研究の方法

歪み計の開発は以下の手順で実施する。歪み計の設計と製作、室内における感度検定、活動的火山における観測、観測データの分析である。歪み計は、桜島の火山活動に伴う山体変形などが記録されることが期待される、桜島有村坑道（国土交通省国土交通省九州地方整備局大隅河川国道事務所および鹿児島県が管理）に設置する。現地で歪み計の信号を連続記録し、火山爆発に伴う山体変形を記録している有村坑道の伸縮計と比較する。

4 . 研究成果

Soufriere Hills 火山（Linde et al., 2010, GRL）や伊豆大島（Fujita et al., 2000, JGR）で観測された火山噴火に伴う地殻ひずみの大きさは0.001~0.1ppmなので、使用するロガーの入力レジ（ $\pm 5V$ ）を考慮し、本研究で開発したひずみ計では、1ppm/Vを感度の目安とした。この感度は、室内岩石実験で固着すべりの破壊核形成過程を観察する際に用いるひずみ計測系と同程度である。そこで、室内実験で用いるひずみ計測系の構成をベースに、ひずみ計の開発を行った。

ひずみ計は、掘削孔に埋設されて地殻とともに変形するひずみ検出部と、孔口付近に設置して、ひずみ検出部の出力を増幅するアンプからなる。ひずみ検出部は、以下の工夫により感度の向上を図った；(1)ひずみゲージを貼付する中央部に比べて端部を太くして機械的な増幅を行う、(2)ゲージ率の大きな半導体ゲージを使用する、(3)ステンレス棒の長さ方向と円周方向のそれぞれに2枚のひずみゲージを向かい合わせに貼り、これらで4枚のゲージでブリッジを組む、(4)ブリッジ電圧を大きくできるよう、抵抗の大きな(350 Ω)ゲージを使用する。

ひずみ検出部は端部とゲージ貼付部で直径が異なるため、ステンレス棒にテーパ加工を施す必要があるが、テーパの立ち上がり部分では応力集中が生じ、ひずみを正確に測定できない。そこで、テーパの角度を25度と35度とした場合で応力集中域の広がりやどのように変わるかを有限要素法（FEM）により計算したところ、いずれの場合も、テーパの付け根から約10mm以上離れれば問題がないことが分かった。そこで、掘削孔の直径が130mmであること、ひずみゲージを局面に貼付するとブリッジの初期不平衡が大きくなり調整ができなくなること

も考慮して、ひずみ検出部の端部は直径 40mm、中心部は直径 10mm とし、テーパ部の長さを 20mm とした。この時、テーパの角度は約 37 度で、ひずみゲージ貼付部とテーパの付け根の間に約 18mm の距離を確保できる。

上記の直径比から期待される、定荷重下での機械的増幅率は 16 倍であるが、埋設状態では定荷重の条件が必ずしも満たされない。そこで、有限要素法 (FEM) により埋設状態を再現したシミュレーションを行い、機械的増幅率を評価した。計算に用いたモデルを図 1 に示す。モデル領域の水平方向の広がり、孔井の直径の 10 倍 (1.3m 四方) である。周辺岩盤は、試験観測を桜島で行うことを考慮し、斑レイ岩を仮定する。計算に用いた物性値は表 1 の通りである。

ひずみ検出部の軸方向にあるモデルの遠方境界に 0.65 μ m の短縮変位 (1 ppm のひずみに相当) を与えたとき、ひずみ検出部中心の表面 (ひずみゲージを貼る場所) では、軸方向に 2.45 ppm の短縮、接線方向には 0.81 ppm の伸長が生じた。すなわち、埋設状態では、ひずみ計の機械的増幅率は 2.45 倍であり、定荷重下で期待されるものに比べると 1/6 以下であった。一方、直交 2 方向のひずみゲージを向かい合わせに貼ると、検出されるひずみは、(2.45 ppm + 0.81 ppm) \times 2 = 6.62 ppm となり、全体としては、ひずみ検出部自体の増幅率は 6.6 倍程度となる。

岩盤のヤング率が 10 GPa と小さい場合 (ポアソン比は 0.25 のまま) は、岩盤のひずみが 1 ppm の短縮のとき、ひずみ検出部中心の表面では、長さ方向に 1.35 ppm の短縮、接線方向に 0.44 ppm の伸長が生じる。このことから、岩盤のヤング率が小さいとひずみ計の機械的増幅率が低下するが、岩盤のヤング率の低下 (1/3) に比べると、機械的増幅率の低下 (約 1/2) は小さいことがわかる。

平面内の主ひずみを計測できるように、ひずみ検出部 3 台を、120 度ずつ向きを変えてさや管 (ひずみ計ゾンデ) に収めた。埋設時の方位を決めるため、直交 2 成分の磁気センサーも搭載している。また、ゲージ率の温度変化補正のため、白金測温抵抗もひずみ計ゾンデに収めてある。

ひずみ検出部の信号を増幅するアンプは、差動入力で、 $f_c=1.4$ Hz のローパス特性を持つように設計した。当初、アンプゲインは 74dB で出力は ± 15 V としたが、使用したデータロガーの入力レンジが ± 5 V であり、過大電圧を入力すると、チャンネル間のクロストークが生じることが分かったため、出力を 1/3 に分圧するようアンプの改造を行った (65dB で ± 5 V 出力)。

電源は 12V 単電源の自動車用バッテリーを想定した。アンプからはひずみ検出部には、5 V のブリッジ電圧が供給される。ひずみ検出部とアンプが 20m 程度離れているため、リード線の抵抗によるブリッジ電圧の降下を補正するため、ひずみの計測は 3 線式とした。

ひずみ検出部のひずみ (e) とアンプの出力電圧 (V) の関係は以下の式で表せる

$$V = -\frac{1}{2} G(1 + \nu) K e E_0$$

ここで、 G はアンプゲイン、 e はステン

表 1. 部材の弾性定数

部材	ヤング率	ポアソン比
ステンレス	197 GPa	0.33
エポキシ	2.4 GPa	0.34
セメント	20 GPa	0.20
斑レイ岩	30 GPa	0.25

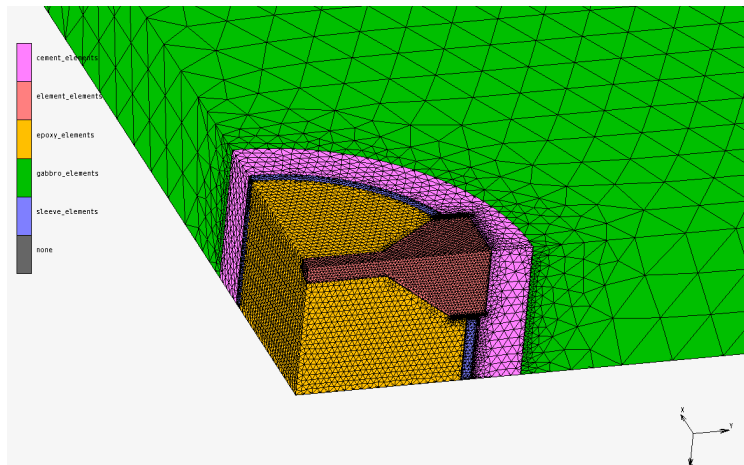


図 1. 使用した FEM モデル。掘削孔部を拡大。緑が斑レイ岩、紫がセメント、青がさや管、黄色がエポキシ、茶色がひずみ検出部。対称性を考慮して、1/8 領域のみをモデル化。

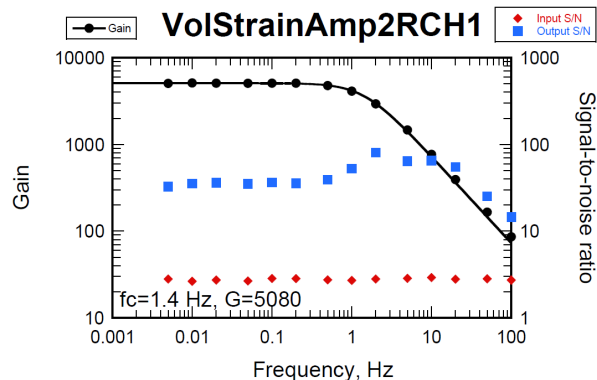


図 2. アンプの周波数特性の一例。

レスのポアソン比, K はゲージ率, E_0 はブリッジ電圧であり, $G=1780$ (65dB), $\nu=0.3$, $K=-104$, $E_0=5V$ とすると, ひずみ計の感度は, $0.6V/ppm$ すなわち $1.7ppm/V$ である.

平成 30 年 3 月上旬に有村観測所施設の西側に 6.2m 離れた地点に, ローターパーカッション型のボーリングマシンを用いて深さ 20m, 孔径(直径)約 14cm の孔井を掘削した. 歪み計が火山活動による歪みを記録できるよう, 掘削する岩質を確認しながら掘削した. 上部は風化安山岩であったが, 深度 18m から下部は亀裂の少ない硬質安山岩であった. 歪み計を設置するのに適していることから, 深度 20m 付近の堅固な岩盤に孔井を設置することとした. 孔井の孔壁が崩れないよう深さ 19m までをケーシングパイプで保護したのち, 孔底に歪み計を挿入し, 歪み計を固定するために孔底から 1.0m までをセメントミルクで充填した.

その後, 京都大学有村観測所に隣接して掘削した深さ 20m の孔井にひずみ検出部を埋設した.

ひずみ検出部の定方位は以下の手順で行った.

(1) 埋設前に, ひずみ計ゾンデを垂直に保った状態で, 任意の方向を基準として 90 度ごとに磁気センサーの出力を計測する.

(2) ひずみ計ゾンデを孔内に下ろした後, セメント投入前後に磁気センサーの出力を計測する.

(3) 埋設前の磁気センサー出力の方位依存性と埋設後の出力を比較してひずみ計ゾンデの方位を決める(図 3). 埋設前は, 2 回の測定値がほぼ一致するが, 埋設後は, セメント投入前後の値の乖離が大きかった.

これは, 埋設地点の岩盤が帯磁しているためであると考えられる. そのため, 磁気センサーによる定方位の信頼度はあまり高くない. 埋設作業の前後及び翌日にひずみ計検出部 3 台それぞれのひずみゲージの抵抗を測定し, 異常がないことを確認した. 4 月に観測機器を設置した. 孔井から信号線を伸ばし, 歪み計 3

成分の信号を, データロガー(HKS-9550, 計測技研)で 24bit, 100Hz で A/D 変換し, 連続収録した. 同時に, 歪みセンサーに与える電圧, 磁気センサー 2 成分の収録をおこなった. 商用電源が利用できないことから, 太陽電池と鉛蓄電池で電源を構成した. 二月に 1 回程度の頻度でデータ回収を行った.

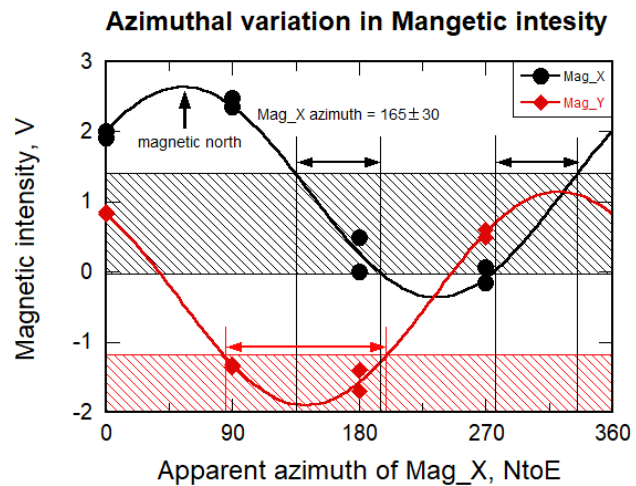


図 3. 埋設したひずみ検出部の定方位. 黒丸と赤四角はそれぞれ, 埋設前に測定した, ひずみ検出部の X 方向と Y 方向の磁気センサーの出力. 実線は, 埋設前の測定値に当てはめた正弦関数. 矢印で示したのは, コンクリートの注入前後に孔内で測定した磁気センサーの出力から推定されるひずみ検出部の方位.

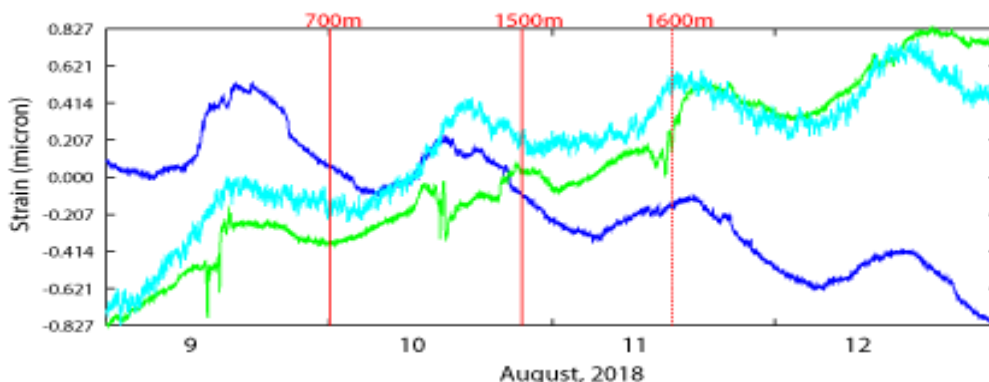


図 4. 4 日間の歪み 3 成分の記録例. 縦の赤線は爆発発生時刻を示す. 上の数字は噴煙高度.

設置後のドリフトの影響もあったため、当初、歪み計の出力が短期間で飽和した。増幅回路の見直し、調整を行い、8月頃より連続収録を開始した。100Hz サンプリングのデータを1Hzにまでダウンサンプリングした。日変化として0.5-1 micro strain がノイズとして混入している。また、鹿児島地方気象台が発表している桜島の爆発・噴火リストと歪み記録を比べた。その結果、爆発や噴火直前に先行して発現する山体膨張は、数時間程度の継続時間であるが、ノイズに埋もれて認められなかった(図4)。一方、比較的振幅の大きな地震動が歪み計の信号に現れていたことから、100Hz サンプリングのデータを有村観測坑道にある伸縮計の記録と比較した。その結果、周期約0.1-1秒で、歪み記録と伸縮計の記録はほぼ一致した。振幅レベルは約0.5 micro strainの信号は検知できることが分かった。

今回は、1点のみの設置であるので、設置場所による違いがあるかはわからない。今後、長周期表面波等を解析することにより周波数毎のノイズレベルを明らかにすることで、今後、本歪み計が利用できる対象を絞ることができる。

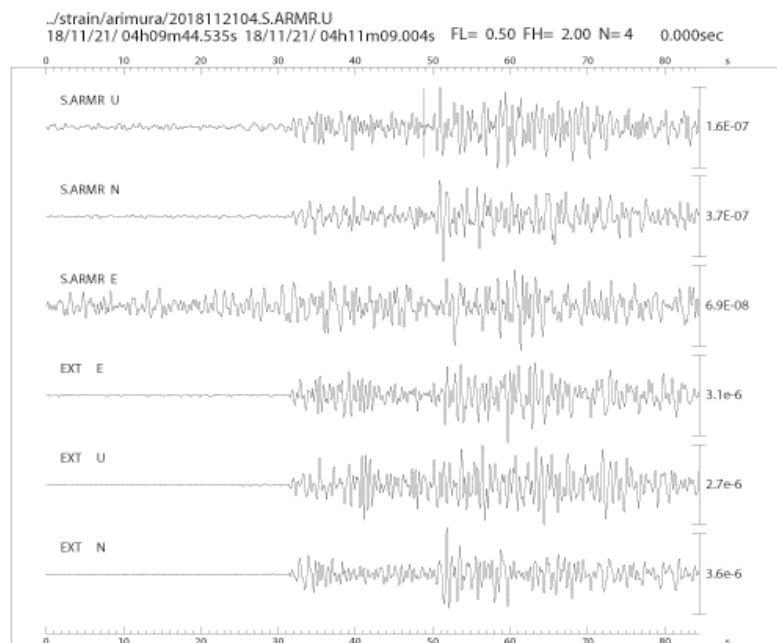


図5.近地の地震を捉えた例。上段の3つのトレースが小型歪み計の3成分記録。後段3つは、有村坑道に設置されている伸縮計の記録。0.5-2 Hzのバンドパスフィルターを施してある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：矢部 康男

ローマ字氏名： YABE Yasuo

所属研究機関名：東北 大学

部局名：理学研究科
職名：准教授
研究者番号（8桁）：30292197

研究分担者氏名：井口 正人
ローマ字氏名： IGUCHI Masato
所属研究機関名：京都大学
部局名：防災研究所
職名：教授
研究者番号（8桁）：60144391

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。