

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24651198

研究課題名(和文)重力勾配観測による火山流体の移動検知実験

研究課題名(英文)Experiment for detection of volcanic fluid movements by gravity gradiometer

研究代表者

鍵山 恒臣(Kagiyama, Tsuneomi)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50126025

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：火山活動を予測する上で、重力観測は、物質の移動に関する情報を提供するのので有用である。しかし、測定点の高度も同時に測定する必要がある。重力勾配測定は、測定点の高度変化による重力変化はキャンセルされるので、測定が簡便になる。阿蘇火山において精密重力測定を繰り返したところ、中岳火口の水位上昇と周辺への地下水・熱水の流出に対応した数10  $\mu$ Gal程度の変動が繰り返し発生していることが明らかとなり、重力勾配観測でも検知可能と判断された。重力勾配計を火山地域で使用する実験をおこなったところ、多くの課題が明らかとなった。いくつかは改良されたが、装置の安定性や保守の簡便性にまだ課題が残っている。

研究成果の概要(英文)：Gravity observation is useful for monitoring volcanic activity, because it gives information on material movement. But it also needs the height of the measuring points. The gravity gradiometer measures differential accelerations between two test masses that are in free fall at different heights, and measured values are insensitive to the change of the observation height. Therefore, the gravity gradiometer could be useful for monitoring of volcanic activity. According to the gravity measurements in Aso volcano, the change in gravity exceeds 60  $\mu$ Gal around the crater, and this change indicates hydrothermal mass movement. The prototype gravity gradiometer was applied Aso and Sakurajima volcanoes. Unexplained disturbances were observed in longer term measurements, and after understanding the sources of the disturbances, vertical gravity gradients was succeeded to observe within a few  $\mu$ Gal/m error. However, this gradiometer has many difficulties to apply volcanic fields.

研究分野：火山物理学

キーワード：火山 重力勾配 自然災害 火山噴火 測地 地下水

### 1. 研究開始当初の背景

火山噴火の推移を予測する上で、重力観測は流体の移動などに関する情報を提供することから、重要な観測項目の1つと考えられている。しかしながら、鉛直方向の地殻変動を伴う火山活動が進行している場合には、その変位を水準測量などによって測定する必要がある。また、高さが明らかになっている点における測定値だけが有用であるために限られた点だけのデータとなることが大きな制約となっていた。

一方物理学の研究領域では、当該領域における必要から、重力勾配計の開発が進められていた。東京大学宇宙線研究所の黒田教授のグループは、実験室レベルではあるが、重力勾配の測定をおこなえる段階に達していた。重力勾配計は高さの異なる(ここでは70cm程度)2点で同時に投下された物体の高度差を精密に測定して重力差を測定するため、原理的には繰り返し観測を行う基準点の微小な鉛直方向の変動はキャンセルされる。この特性は、上記の重力観測の制約を大きく改善する可能性があると考えられていた。

### 2. 研究の目的

こうした背景から、本研究は、黒田教授が開発した重力勾配計を火山地域に持ち込み、実験室レベルの測定が可能であるか、可能であればどのような測定値が得られるのか、測定をおこなう上でどのような改良点があるのかを明らかにする。また、この検討と並行して、火山地域においてどの程度の重力変化および重力勾配変化が期待されるかも合わせて検討する。

### 3. 研究の方法

(1) 火山地域においてどの程度の重力変化および重力勾配変化が期待できるかを検討するため、阿蘇火山において精密重力測定を繰り返しおこない、火口周辺においてどのような重力変化が生じているか、特に地下水・熱水の移動に関連する変化を検討する。また、検討する対象期間をより長くとるために、過去に測定されていた重力観測データについても、地下水変化の検出という観点から再解析を行った。

(2) 重力勾配計の火山地域への適用に関しては、東京大学宇宙線研究所黒田研究室で制作された重力勾配計を阿蘇(京都大学理学研究科火山研究センター)に分解・移送した後、再組立てを行い、所定の測定精度が出るように調整を行う。その後、重力勾配測定を阿蘇および桜島において行い、火山地域における観測に必要な改良点を抽出する。この検討は、黒田研究室において研究員を勤めていた潮見博士が火山研究センター研究員として担当した。

### 4. 研究成果

(1) 阿蘇火山では火山研究センターにおいて

絶対重力測定を繰り返し行うとともに、阿蘇火山周辺において精密重力測定を繰り返している。精密重力測定の結果を検討した結果、下記のようなことが明らかとなった(論文2, 3)。図1の左図は、2011年4月から8月までの重力変化である。変化は図の南東部で起きており、特に中岳火口近傍では60 $\mu$ Gal程度の増加が見られる。中間の図は、2011年8月から11月までの重力変化である。この期間は、中岳火口近傍では減少しているが、図の南半分の領域では増加している。重力の増加は80 $\mu$ Gal程度である。右図は、2011年11月から2012年4月までの重力変化である。この期間は、火口近傍でわずかな増加、火口の西側および南西側で80 $\mu$ Galの減少となっている。

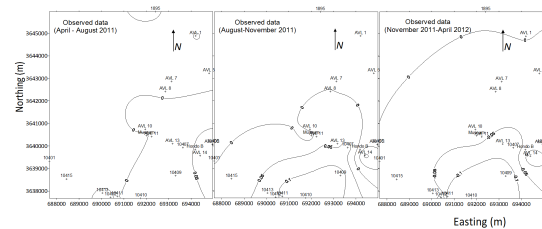


図1 阿蘇中岳周辺の重力変化。左図：2011年4月-8月、中央図：2011年8月-11月、右図：2011年11月-2012年4月。中岳火口は各図の右中央に位置する。

この結果は、以下のように考えられる。第1の期間は、中岳の湯だまりがほぼ消滅していた時期から豪雨によって水位が高くなっていった時期に対応する。湯だまりの水位は10m以上上昇した。第2の期間は、火口近傍でやや減少し、火口よりも南西側の領域で正の変化が起きている。この期間中も湯だまりの水位はわずかに上昇しており(3m程度)、重力の減少は、湯だまりの水の減少ではなく火口近傍の地下からより多くの熱水が周辺部へ移動したためと考えられる。火口の南西側から北側にかけて密度が増加していることから、火口直下からこれらの領域へ熱水が移動したことを示していると思われる。第3の期間は、火口近傍ではわずかな増加、火口の南西側および北側で減少となっている。この期間、湯だまりの水位はわずかに低下し(3m程度)、水温は上昇している。この事実は、火口近傍の地下では熱水の供給が増大して正の密度変化が起きたが、火口の周辺では熱水がより遠方へ流出したために負の密度変化がおきたと解釈される。中岳火口近傍の表層電気伝導度分布調査によれば、中岳火口の南西側および北側において電気伝導度の高い領域が見出されており、熱水の流下が考えられるので、本研究の結果と整合的である。

以上の結果から推測される降雨や火山活動による中岳火口の水位変化に端を発した地下水・熱水の周辺部への流動は、1998年2月から2001年1月までの3年間に観測された重力データの再解析からも支持されるこ

とが明らかになった(学会発表2). 解析によれば, 雨水の降下浸透と地下約 100m に位置する透水層から周辺部への地下水流出によって  $10\mu\text{Gal}$  程度の重力変化が説明できる. これらの結果から, 火口近傍における地下水・熱水の流動は, 重力勾配計が  $10\mu\text{Gal/m}$  程度の精度があれば検知可能と考えられる.

(2) 黒田研究室の重力勾配計を分解した後, 阿蘇に移送し, 組み立てを行った. 黒田研究室の実験室は天井が高く, 作業用のクレーンが使用可能であったが, 阿蘇の火山研究センターの部屋は, 通常の規格の部屋であるため高さが十分ではなく, 作業は困難を極めた. 組立が完了した後, 試験運転を断続的に行い, 動作チェックを行った. その結果, 予期しない障害がいくつか発生した. その1つは, 落下体の摩擦と帯電することによって自由落下が阻害されることによる測定誤差の増大である. この障害は, アルミナに金メッキを施す素材で克服された. 2つ目の障害は, 落下体の重心とレーザーを反射する鏡による光学中心とがずれることによって, 落下体に回転が生じて重力加速度の測定が精密に行えないことによるものであった. この障害は, 落下体の重心を精密に測定する手法を開発することで改善された(論文1).

その後の実験は, 桜島に勾配計を移設して実施した. 重力勾配計の下 36cm に 192kg の

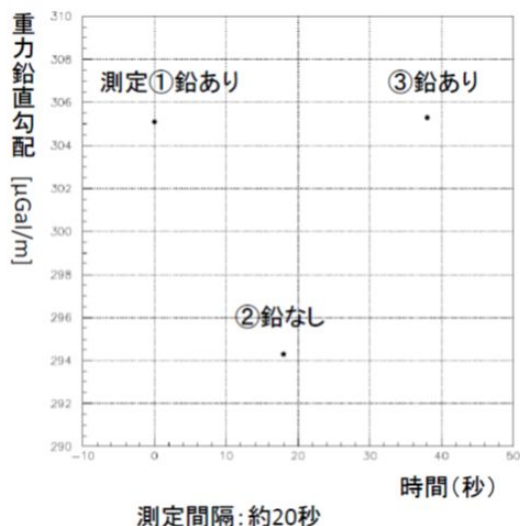


図2 重力勾配計下部 36cm に 192kg の鉛を出し入れしたときの重力勾配の変化

鉛を出し入れした時に重力勾配の変化を測定した結果,  $10.9 \pm 1.7\mu\text{Gal/m}$  が得られた(図2). 理論的には,  $10.2 \pm 1.2\mu\text{Gal/m}$  と計算されるので一致する結果が得られたと考えられる.

この結果を受けて, 連続的な測定を試みたが, 連続的な測定を行うと, 落下体を投げ上げるための電磁アクチュエータが発熱を起こし, 不具合が生じた. そのため, 10分に1度の頻度で 12時間の測定を行ったところ,

図3に示す結果を得た. 海洋潮汐とそれに連動する地下水位の変化の影響が見えているが, その値は, 必ずしも妥当ではなく, 検討を要する.

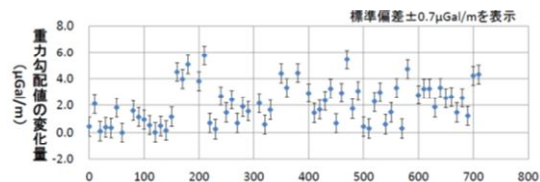


図3 10分間隔で測定した重力勾配値の変化

### 総括

重力勾配観測を火山地域で行うことによるメリットは, 計り知れないものがある. 重力勾配計を火山地域で動かし測定を試みることにについて, 本研究者らは, 大きな期待を持って研究を開始した. しかし, 実際の設置・調整を共同で行った結果, 現場観測に適用する前に実験室段階で解決しておくべき課題が数多く存在することが明らかとなった. 本研究は, これらの問題点を個々に抽出し, 個別に対処してきた段階であり, 落下体の帯電による影響の克服や, 投げあげ部の耐久性向上などによって従来の勾配計よりもノイズレベルを100分の1にまで軽減することができるようになっている. しかし, 勾配計の保守のためにクレーン操作が必要であることや装置の高さが通常の建物の部屋で操作することが困難であること, 投げあげのための電磁アクチュエータが真空領域内にあることによる冷却の不足など, 装置の基本設計を変更する必要があることが明らかとなった. これらの改良点は, 分担者である潮見博士によって克服されると期待している.

一方, 地下水の変動に伴う重力の変化を検出する作業については, 重力変化が過去においても季節的に起きていたことが明らかとなり, 地下水の変動と重力変化との関係を精度よく議論することが可能になりつつある.

### 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 3件)

1. Shiomi, S., Kagiyama, T., Sofyan, Y. and Yoshikawa, S., Development of laser-interferometric gravity-gradiometer at the Aso Volcanological Laboratory, Annual Rep. Inst. Geotherm. Sci. Kyoto Univ., FY2012, 23-24, 2013.
2. Sofyan, Y, Yoshikawa, S., Fukuda, Y., Kagiyama, T., Ohkura, T., Nishijima, J. and Fujimitsu, Y., Mass variation beneath Aso Volcano, southwest Japan, Annual Rep. Inst. Geotherm. Sci. Kyoto Univ., FY2012, 25-27, 2013.
3. ヤヤン ソフヤン・吉川 慎・鍵山恒

臣・大倉敬宏, 阿蘇火山における繰り返し重力測定による熱水流動のモニタリング, 月刊地球, 34, 691-699, 2012.

〔学会発表〕(計 12 件)

1. 潮見幸江・鍵山恒臣, レーザー干渉計型重力勾配計の開発と桜島火山における試運転, 地球惑星科学連合 2014 年大会 SGD22-07, パシフィコ横浜(横浜市) 2014 年 4 月 28 日~5 月 2 日)
2. 早河秀章・鍵山恒臣・大倉敬宏・吉川 慎, 阿蘇火山火口近傍の重力変動と降水の重力寄与, 地球惑星科学連合 2014 年大会 SVC55-P16, パシフィコ横浜(横浜市) 2014 年 4 月 28 日~5 月 2 日)
3. Sofyan, Y., Nishijima, J., Fujimitsu, Y., Yoshikawa, S., Kagiyama, T. and Ohkura, T., Mass variation of hydrothermal dynamics beneath Aso Volcano, southwest Japan, 日本地熱学会学術講演会, 幕張メッセ(千葉市), 2013 年 11 月 7 日~9 日
4. 早河秀章・鍵山恒臣・大倉敬宏・吉川 慎, 静穏期における阿蘇火山火口近傍の重力変動, 国立極地研究所(東京都立川市), 2013 年 10 月 29 日~10 月 31 日
5. Shiomi, S., Kagiyama, T. and Yoshikawa, S., Measuring vertical gravity gradients in volcanic areas using an interferometric gravity gradiometer, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, 2D-O16, 鹿児島県民交流センター(鹿児島市), 2013 年 7 月 20 日~24 日
6. Yayan, S., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., Yoshikawa, S. and Kagiyama, T., Repeated gravity measurement for hydrothermal monitoring beneath Aso volcano, 地球惑星科学連合 2013 年大会 SVC52-05, 幕張メッセ(千葉市), 2013 年 05 月 19 日~05 月 24 日
7. 潮見幸江・鍵山恒臣・吉川慎, 阿蘇火山に於ける自由落下干渉計型重力勾配計の開発, 地球惑星科学連合 2013 年大会 SGD22-03, 幕張メッセ(千葉市), 2013 年 05 月 19 日~05 月 24 日
8. 潮見幸江・鍵山恒臣・Yayan Sofyan・吉川慎・山本圭吾, レーザー干渉計型重力勾配計を用いた重力鉛直勾配測定(阿蘇及び桜島火山), 平成 24 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, きはだホール(京都市), 2013 年 2 月.
9. Yayan, S., Yoshikawa, S., Kagiyama, T. and Ohkura, T., Hydrothermal dynamics beneath Aso volcano, southwest Japan: View from 3D inversion model of 4-D gravity data, American Geophysical Union Fall Meeting 2012, サンフランシスコ(米国), 2012 年 12 月 03 日~2012 年 12 月 08 日
10. 潮見幸江・鍵山恒臣・Yayan Sofyan・吉川慎, 阿蘇火山実地測定に向けた重力

勾配計の開発, 日本測地学会第 118 回講演会, 仙台市福祉プラザ(仙台市), 2012 年 10 月 31 日

11. 潮見幸江・黒田和明・鍵山恒臣・Yayan Sofyan・吉川慎, 火山計測のための重力鉛直勾配計の開発, 日本火山学会秋季大会 B3-03, エコールみよた(長野県御代田町), 2012 年 10 月 14 日~10 月 16 日
12. 潮見幸江・黒田和明・鍵山恒臣・Yayan Sofyan・吉川慎, レーザー干渉計型重力勾配計の阿蘇火山における適用試験, 地球惑星科学連合 2012 年大会 SVC49-04, 幕張メッセ(千葉市), 2012 年 05 月 20 日~2012 年 05 月 25 日

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鍵山 恒臣 (KAGIYAMA TSUNEOMI)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 50126025

### (2) 研究分担者

潮見 幸江 (SHIOMI SACHIE)  
京都大学・生存圏研究所・研究員  
研究者番号: 60584266

### (3) 連携研究者

黒田 和明 (KURODA KAZUAKI)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号: 00242165