

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18H01305

研究課題名(和文) 重力/歪・傾斜の連続観測と宇宙線透視の連携で拓く、火山体内部診断学

研究課題名(英文) Deciphering continuous gravity, strain and tilt data with cosmic-ray radiography for mass transport under volcanoes

研究代表者

大久保 修平 (Okubo, Shuhei)

東京大学・地震研究所・名誉教授

研究者番号：30152078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：重力変動から火山活動起源のシグナルを抽出するために、地下水変動がもたらす重力擾乱を適切に補正する手法を開発した。こうして得られた重力変動データと地殻変動の連続観測データにもとづいて、火山活動にともなうマグマの移動を追跡する手法を開発した。  
これを用いて、2018年3月の霧島新燃岳噴火のデータを解析したところ、溶岩が火口から流出を開始する6～12時間前に、新燃岳西方約5km、深さ7km付近の領域に深部からマグマと考えられる物質が注入されたことがわかった。

桜島火山の重力シグナルから火道内マグマ頭位の標高を推定し、2016年に定常的な噴火活動から、非定常活動に移行したと符合する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

火山活動を解明するうえで、地震活動や地殻変動にもとづく研究は重要であることは確かであるが、その一方で、それらはいくまでも力学モデルに基づくものであって、マグマの移動そのものを直接的に検知するものではないという弱点があった。本研究では、物質移動そのものに感度を有する物理量である重力を用いて、時間的に連続かつ1時間程度という高い分解能で、マグマの移動を追跡したという学術的な意義がある。

社会的には、火山噴火のメカニズムの解明を通じて災害軽減につながることを期待される。

研究成果の概要(英文)：We develop a method for eliminating the effect of groundwater disturbance on gravity change. It enables us to extract signal of volcanic origin from the gravity change record. The method was applied to the data of the 2018 eruption of Mt. Shinmoe. We found significant mass transfer to an area at 7km below the sealevel prior to the onset of lava extrusion. The gravity signal at Sakurajima volcano strongly suggested drastic change of volcanic activity around 2016, which is consistent with the surface phenomena.

研究分野：測地学

キーワード：重力 地殻変動 宇宙線透視 火山 マグマ移動 地下水 潮汐

## 1. 研究開始当初の背景

マグマが実際に火山体をどのように移動するのかを知ることは、火山噴火発生のみならず、その終息までの推移予測にとって、きわめて重要な意味をもつ。そのため、地震活動や地殻変動にもとづいた力学的な研究や、噴出物や火山ガス等にもとづく岩石学的・地球化学的な研究が数多くなされてきた。しかし、前者は物質の移動そのものを検知しているわけではなく、あくまでもマグマの膨張・収縮などの力源の変化をとらえているに過ぎない。後者は物質移動そのものをとらえているものの、空間的な解像度が粗く、また時間的にも連続的なデータを得ることは困難である。既存の観測手法では、数日ないし数か月間にわたって継続する火山活動において、マグマなどの火山性流体の物質移動そのものを、1～数時間程度のタイムスケールで連続的に推定することは原理的に困難といわざるを得ない。

物質移動そのものに関する情報を与えてくれる情報としては、古くから重力変動が知られているけれども、重力の絶対値を長期にわたって、連続的かつ安定的に取得するには様々な困難があった。それらは2010年ごろから少しずつ克服され、火山近傍での絶対重力連続観測が安定的に行えるようになってきた。実際、2010年代には活発な噴火を続ける桜島火山において重力連続観測が行われてきたし、また2018年に噴火した霧島新燃岳においても噴火の4か月前から重力観測が継続されていた。そのようなデータが得られ始めた後に問題となったのが、重力データから、火山活動起源のシグナルを抽出することである。重力変動の観測データには、火山活動にともなう物質移動がもたらすニュートン引力変化だけではなく、(1)降雨等による地下水変動の効果、(2)固体地球潮汐・海洋潮汐による地下水位変動の効果、及び(3)観測点の隆起・沈降による間接的な影響も含まれている。したがって(1)～(3)の影響を適切に補正することが、重力データから火山活動の研究を進める上で肝要となる。(1)の降雨等による効果の見積は、地下水力学にもとづく物理シミュレーションである程度、可能になってきた(Kazama and Okubo 2009)。しかしながら、(2)の固体地球潮汐・海洋潮汐による地下水位変動は十分なモデル化がなされておらず、重力変動から火山活動起源のシグナルを抽出するためには、その解明が待たれていた。また、(3)の隆起・沈降についてはGNSSの連続観測が一応のデータを与えてくれるものの、数時間程度の時間分解能を求めると、数センチメートルの精度しかないため、重力補正を行うときに数マイクロガルという無視できない補正誤差をもたらす。

以上を要約すると、地下水潮汐と隆起・沈降効果の両方を、1時間程度の分解能で、1マイクロガル程度の精度をもった補正手法の開発が強く期待される状況であった。

## 2. 研究の目的

火山活動の推移にともない、マグマが火山体をどのように移動するのかを知ることが最終目的である。この目的を達成するために、非火山起源の重力ノイズを除去し、重力データの高品位化をめざす。具体的には

- (1) 地下水潮汐が重力変動に与える効果を、1時間程度の分解能で、1マイクロガル程度の精度で推定する手法を開発すること、
  - (2) 地盤の隆起・沈降が重力変動に与える効果を、地殻変動連続観測データを用いて、(1)と同等の分解能と精度で推定する手法を開発すること、及び
  - (3) 実際に活動している火山について得られる重力連続観測データに、(1)と(2)の補正を適用し、マグマの移動を定量的に追跡すること
- の3点を目的とする。

## 3. 研究の方法

活動している火山の近傍でのデータ取得に始まり、各種補正のための物理モデリングの開発をすすめ、それを用いたマグマ移動にともなうニュートン引力変動を抽出した。具体的には次の手順で研究を進めた。

### (1) データ取得

絶対重力計を活動中の火山である桜島及び霧島新燃岳で稼働させ、長期にわたる重力変動データを取得する。同時にこれらの火山周辺で関係機関が実施している、地殻歪および地盤傾斜の連続観測データを収集する。地下水等が及ぼす重力擾乱を補正するため、時間降雨、地下水位および沿岸潮位の連続観測データを収集する。

### (2) データ1次処理

取得したデータの前処理として、潮汐解析ソフトウェア Baytap G を用いて、歪、傾斜、地下水位、潮位について、潮汐成分と非潮汐成分とを分離する。

### (3) 地下水位変動の物理モデリング

桜島火山について、Kazama and Okubo (2009)の地下水力学シミュレーションに、(1)で取得した降雨データを入力することによって、長期的な地下水変動が重力変動に与える効果を定量的に見積もる。また、1日より短いタイムスケールの地下水潮汐の物理モデルを構築する。

### (4) 重力変動から火山活動起源のシグナル抽出

桜島火山については、(3)で推定した地下水位変動が及ぼす重力擾乱を観測値から除去して、マグマが及ぼすニュートン引力を算出し、火道内のマグマ頭位を計算する。火道径は、宇宙線ミュオン透視観測から得られる密度イメージから推定する。

霧島新燃岳については、日本有数の豪雨地域にあるため、地下水擾乱の補正が十分にできないことが想定される。そのため、降雨が無視でき、かつ顕著な火山活動が認められる期間に限定して解析を進める。

#### 4. 研究成果

##### (1) 海洋島の地下水潮汐の解明

海洋にほぼ取り囲まれた桜島では、潮位変動によって島内には海から水平方向の地下水の流出入が規則的に繰り返される。この水平流は島内の地下水位に潮汐振動をもたらすが、その効果だけでは、どのような地下水層を与えても、観測される地下水位の振幅と位相を「同時に」説明することができないことがわかった。そこで、地下水層を多孔質弾性体と考え、広域的な固体潮汐で生じる体積歪が、多孔質媒質内に駆動する鉛直流をも考慮したハイブリッドモデルを構築した。図1がその結果であり、従来の単純水平流モデルでは、位相の不一致が90°ほどに達し、予測ができていないことがわかる。一方、ハイブリッドモデルでは、予測値(実線)が観測値(破線)を良く再現できていることがわかる。これらのことから、地下水潮汐のモデリングは十分に成功したといえる。

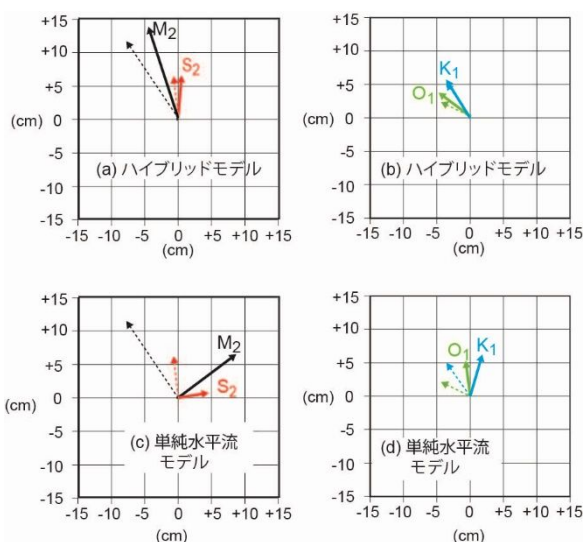


図1. 桜島有村観測井における地下水潮汐の振幅と位相を表すフェーザー・ダイアグラム。半日周期成分(M2, S2)と1日周期成分(O1, K1)。振幅は原点からの矢印の長さで、位相は原点から延びる水平軸からの角度で表す。実線の矢印がモデルによる予測値で、破線は実測値を示す。

##### (2) 桜島における火山活動起源の重力シグナルの抽出

手法(4)により、桜島における火山活動起源の重力シグナルを得ることができた(図2)。2016年を境にして、重力変動パターンが動的平衡状態から、非平衡状態へと大きく変化していることを見出した。実際に火山活動様式と重力シグナルが良く対応していることも判明した。実際、2016年までは定期的に噴火が頻発していたが、それ以降は噴火回数が激減している。重力シグナルから火道内にあるマグマの上端の標高(マグマ頭位)を推定した図2右上の結果からも、マグマ頭位が高い時期に火山活動が激しく、低くなると静穏化することが見て取れる。これらの事実は、重力シグナルから火山活動の現状を把握することが可能であることを示している。

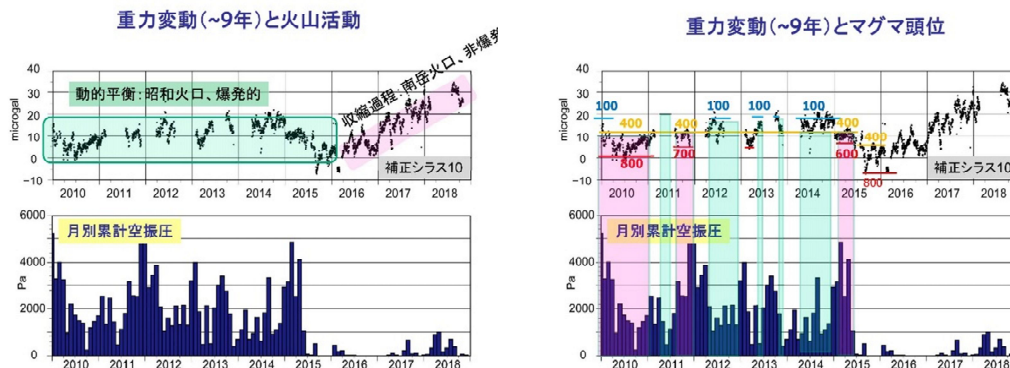


図2. 火山活動起源の重力シグナル(左上、右上)と火山活動の指標としての月別累計空振圧(左下、右下)、右上グラフ内の数字は、マグマ頭位の標高(メートル)。

### (3) 霧島新燃岳 2018年3月噴火の解析

新燃岳の2018年3月噴火について得られた重力変化と、新燃岳周辺の歪・傾斜の連続観測から推定されるフリーエア効果を図3(右上)が得られた。両者の差は、マグマの及ぼすニュートン引力が、その移動にともなうどのように変化したかを表す。火口から溶岩が流出を開始する12時間ほど前から、ニュートン引力が増加しており、これから地下深部から深さ7kmあたりのマグマだまりへの質量供給が起こったことがわかる。また、溶岩流出がほぼ停止した3月8日ごろには12時間ほどかけてニュートン引力の減少が起きている。定量的な考察は現在進行中であるが、これらの重力シグナルは図3(左)のようなマグマ供給系の存在を示唆する。

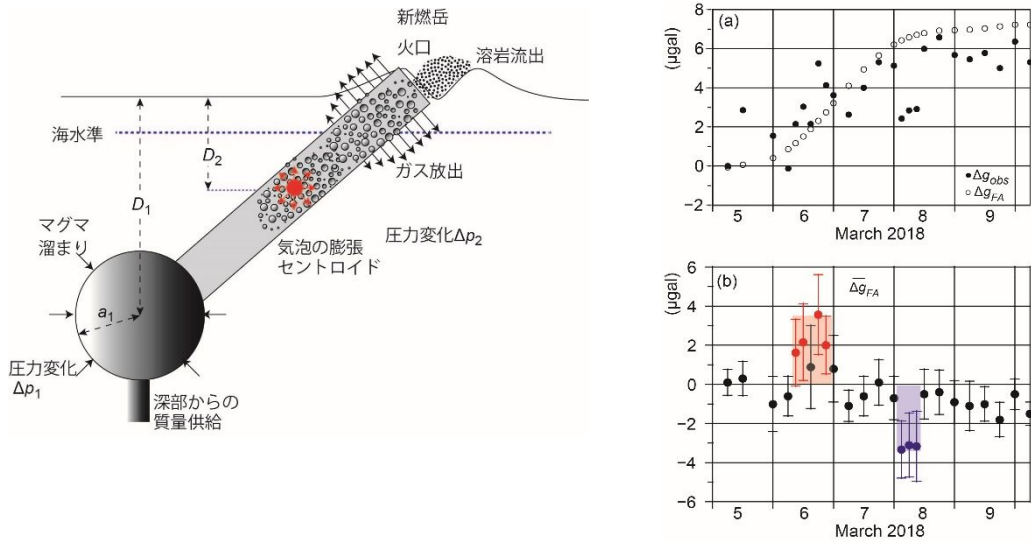


図3.2018年3月の霧島新燃岳噴火メカニズム(左)と、その際の物質移動にともなう重力の時間変化(右)。右上のは実測重力、 $\Delta g_{obs}$  は地殻変動連続観測データを用いて求めたフリーエア効果。右下は、フリーエア効果を補正した重力シグナル = 物質移動に伴うニュートン引力の時間変化。

### 引用文献

Kazama, T., & Okubo, S. (2009). Hydrological modeling of groundwater disturbances to observed gravity: Theory and application to Asama Volcano, Central Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B8).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 OKUBO Shuhei	4. 巻 96
2. 論文標題 Advances in gravity analyses for studying volcanoes and earthquakes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the Japan Academy, Series B	6. 最初と最後の頁 50～69
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2183/pjab.96.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Olah L., Tanaka H. K.M., Ohminato T. Hamar G., Varga D.	4. 巻 46
2. 論文標題 Plug Formation Imaged Beneath the Active Craters of Sakurajima Volcano With Muography	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 10417～10424
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL084784	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Olah L., Tanaka H.K. M., Hamar G, Varga Dezs	4. 巻 14
2. 論文標題 Muographic Observation of Density Variations in the Vicinity of Minami-Dake Crater of Sakurajima Volcano	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Disaster Research	6. 最初と最後の頁 701～712
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jdr.2019.p0701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 大久保修平	4. 巻 -
2. 論文標題 富士山頂における絶対重力観測 - その学術的・技術的意義と地震・火山観測への展開	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 山梨県富士山科学研究所国際シンポジウム2018 - 火山モニタリング観測と火山活動予測 - 報告書	6. 最初と最後の頁 72-103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishiyama Ryuichi	4. 巻 232
2. 論文標題 Deformation of an infinite elastic cone due to a point pressure source buried on the axis: implications to volcanic deformation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	6. 最初と最後の頁 1129 ~ 1139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/gji/ggac379	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Hiroyuki K. M.	4. 巻 12
2. 論文標題 Muography for a dense tide monitoring network	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-10373-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iguchi Masato, Yamada Taishi, Tameguri Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Sequence of Volcanic Activity of Sakurajima Volcano, Japan, as Revealed by Non-Eruptive Deflation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Earth Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/feart.2022.727909	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 Okubo, S., K. Yamamoto, M. Iguchi, H. Tanaka.
2. 発表標題 Diagnosis of Conduit State of Sakurajima Volcano Using Continuous Records on Gravity and Crustal Movements and Muon Radiography
3. 学会等名 General Assembly of IUGG 2019, Montreal (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Iguchi, M., T. Tameguri, J.Hirabayashi, H. Nakamichi
2. 発表標題 Forecasting Volcanic Eruption of Sakurajima Volcano Based on Magma Intrusion Rate in Recent 100 Years
3. 学会等名 General Assembly of IUGG 2019, Montreal (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保 修平, 山本 圭吾, 井口 正人, 田中 愛幸, 今西 祐一, 西山 竜一, 安藤 美和子, 渡邊 篤志
2. 発表標題 絶対重力の長期変動から読み解く桜島の火山活動 (2009年~2018年)
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合同大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井口正人
2. 発表標題 地盤変動に続く地震活動に関する考察
3. 学会等名 日本火山学会 2019 年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大久保修平
2. 発表標題 Absolute gravity on the top of Mt. Fuji - its scientific and technical implications to the studies on earthquake and active volcanoes
3. 学会等名 MFRl International Symposium 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大久保修平, 安藤美和子
2. 発表標題 霧島新燃岳2017年噴火後の重力変化
3. 学会等名 地球惑星科学連合2018年合同大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大久保修平, 山本圭吾, 井口正人
2. 発表標題 海洋島の地下水潮汐のハイブリッドモデリング 桜島島内の観測を用いた検証
3. 学会等名 日本測地学会第138回講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	西山 竜一  (Nishiyama Ryuichi)  (10835101)	東京大学・地震研究所・助教   (12601)	
研究分担者	田中 宏幸  (Tanaka Hiroyuki)  (20503858)	東京大学・地震研究所・教授   (12601)	
研究分担者	山本 圭吾  (Yamamoto Keigo)  (40283676)	京都大学・防災研究所・助教   (14301)	



6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	井口 正人  (Iguchi Masato)  (60144391)	京都大学・防災研究所・教授    (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関