

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14810

研究課題名（和文）連続重力観測・宇宙線土壌水分計によるマグマ移動の検出

研究課題名（英文）Soil water measurements with cosmic-ray showers for better correction of gravity data at active volcanoes

研究代表者

西山 竜一（Nishiyama, Ryuichi）

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：10835101

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、火山活動に伴う重力変動をとらえる上でのノイズとなる降雨にともなう土壌水分量の変化を、宇宙線電磁成分の測定によって推定し、効果的に補正することを目指した。具体的には、桜島の有村観測坑道および鹿児島市街の横穴坑道において実証観測を行い、降雨にともない宇宙線電磁成分の強度が有意に減少することを確認した。また、火山直下のマグマだまりに新たなマグマが蓄積した場合に生じる変形場・重力変化場を計算するためのモデルの構築に成功した。このように本研究は、火山活動にともなう重力変化のモデル化や、その重力変化をとらえるための降水起源ノイズ低減に向けた基礎的な研究成果をもたらした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、火山活動に伴う重力変動の正確なモニタリングにおける課題を克服することである。本研究は、宇宙線電磁成分を利用することで、降雨によるノイズを補正し、火山活動に伴う重力変動をより正確に捉える手法を提案した。提案手法は、既往のセンサを埋め込む方法・宇宙線中性子を用いる方法に対して、非侵襲性や広範囲の観測が可能であり、これらの手法が抱える限界を克服する可能性がある。社会的には、災害管理や防災政策の向上に貢献し、火山活動による被害を最小限に抑えることが期待される。特に、降雨による土壌水分の増加は、土砂崩れ発生の重要な要因であるため、その方向に応用が広がれば社会的意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to estimate and effectively correct changes in soil moisture associated with rainfall, which act as noise in capturing gravity variations accompanying volcanic activity, through measurements of cosmic ray electromagnetic components. Specifically, we conducted empirical observations in the Arimura observation tunnel at Sakurajima and a horizontal tunnel in Kagoshima City, confirming a significant decrease in the intensity of cosmic ray electromagnetic components during rainfall. Additionally, we successfully constructed a model to calculate deformation fields and gravity changes resulting from the accumulation of new magma in magma reservoirs directly beneath volcanoes. Thus, this study contributed fundamental research results towards modeling gravity changes associated with volcanic activity and reducing rainfall-induced noise for capturing these gravity changes.

研究分野：測地学

キーワード：宇宙線 電子・陽電子・ガンマ線 土壌水分 地下水 火山 重力

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

火山活動に伴うマグマの質量移動を捉えるためには、重力観測を行うことが望ましい。例えば、図1のような円錐形状の火山の直下に新しいマグマが流入した場合を考えると、マグマだまりでの質量増加および地殻変動に伴う質量変動が重畳する形で重力変動として捉えられるはずである。しかし、実際の重力の時系列データを調べると、降雨に追従する形で、火山活動とは関係が無い重力変動が見られることがある。これは、雨水の質量による万有引力の効果を重力計が受けるためであり、このような地下水擾乱の効果を正しく補正しなければ、マグマの質量移動を理解することはできない。

土壌中の水分量を測定する方法には、直接センサーを差し込む方法(土壌水分計)があるが、これはある一点における水分量を与えるのみで、重力変化に影響を与える広域的な水分量の変化を測定できる非破壊検査手法の登場が望まれていた。

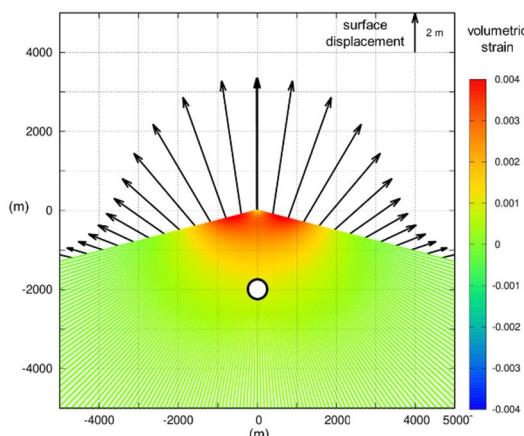


図1 点圧力源による円錐地形火山の変形 (成果論文 Nishiyama, GJI 2024 より抜粋)

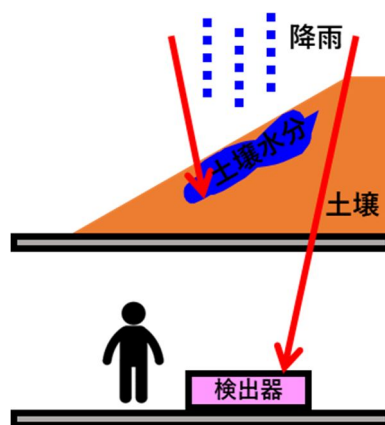


図2 宇宙線電磁成分による土壌水分量測定 の模式図

2. 研究の目的

上記の土壌水分量の不定性問題に対して、本研究は、地下坑道の中から宇宙線電磁成分の強度を測定することによって、その減衰率から坑道直上の土壌水分量を測定することを提案した(図2)。通常、宇宙線を用いた構造探査にはミュー粒子が用いられるが、本研究では、微弱な土壌水分量の変動に感度を持たせることを目指し、電磁成分(電子・陽電子・ガンマ線からなる空気シャワー)に着目した。このアイデアの実証のために、宇宙線電磁成分のみを選択的にとらえる検出システムの構築、水タンクを用いた室内較正試験、粒子伝播のモンテカルロ・シミュレーションによる感度検定、実際の横穴坑道における実証観測研究に取り組んだ。

3. 研究の方法

本研究のために構築した検出システムの模式図を図3に示す。検出システムは、8枚のプラスチックシンチレーター、8本の光電子増倍管および読取装置から構成される。宇宙線がシンチレーターに到来すると微弱な発光が起こるので、この発光を光電子増倍管により電気信号に換えて読み込むことで宇宙線を検出する。電磁成分を取り出すために、上層の4枚のうちの2枚以上、下層の4枚のうちの2枚以上で同時(500 nsec以内)に発光するイベントを選び出す体制をとった。

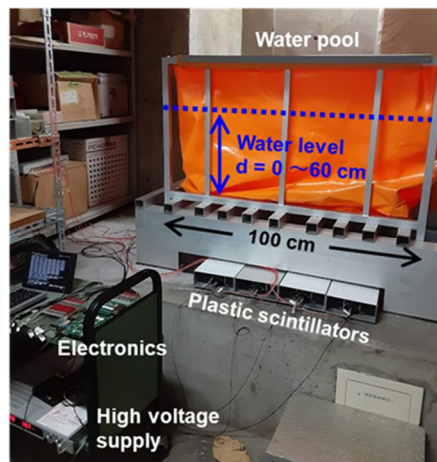
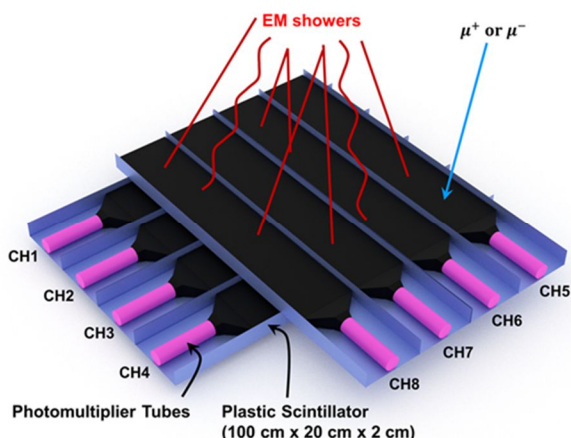


図3 宇宙線電磁成分検出システムの模式図および水タンク試験の実施風景

土壌水分量の変化に伴う電磁成分イベント数の変動を定量的に理解するために、較正試験を行った。具体的には、検出器直上に水タンクを設置し水タンクの水深を変化させた(図3)。その結果、タンク水量を増加させると、図4のように電磁成分イベント数が減衰することが確認された。タンク水深1 cmの変動に対するイベントの減少率は、0.6-0.7 (%/cm)と決定された。粒子伝播のモンテカルロ・シミュレーションも同様の減衰傾向を再現した。具体的には、COSMOSシミュレーターを用いて2次宇宙線の生成・伝播を計算し、Geant4シミュレーターを用いて検出器近辺での応答を計算する並列計算の仕組みを構築した。このシミュレーションからは、電磁成分イベント数は大気圧や水蒸気圧(大気中の水分量)に応じて減衰することが予想された。そのため、次節に述べる横穴での実証観測では、これらの気象要因に伴う誤差要因を補正する必要があることが確認された。

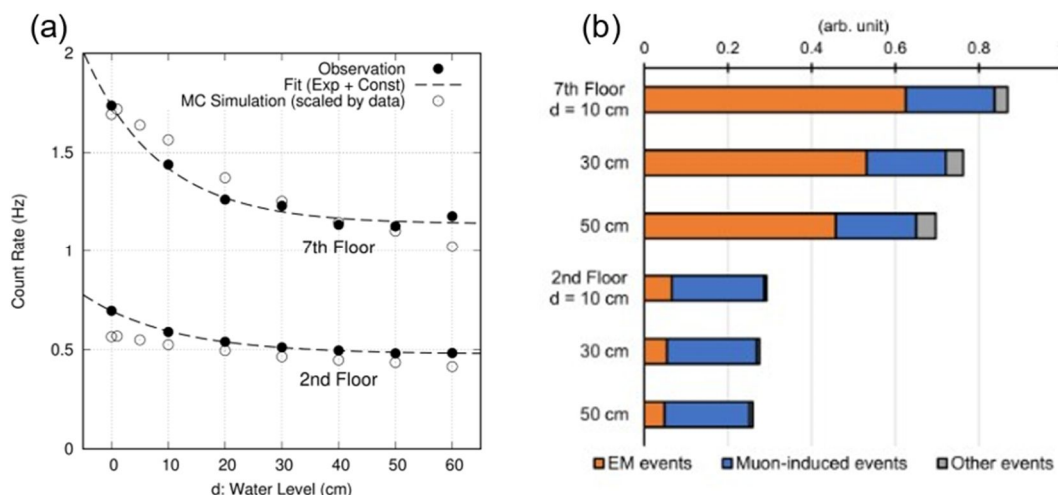


図4 (a) 水タンク試験の結果: タンク水量に応じて宇宙線カウント数の減少が見られる
(b) モンテカルロ・シミュレーションの結果: カウント数の減少には電磁成分の減衰が最も効いていることが分かる

4. 研究成果

前節で構成した検出システムの実証観測試験を、桜島・有村観測坑道(国土交通省) 鹿児島市内の横穴坑道(京都大学防災研究所)の2点で行った。本報告書では、有村観測坑道での観測結果について述べる。観測された電磁成分イベント数の時系列データから、大気圧変動・水蒸気圧変動の効果を回帰分析によって取り除くと、イベント数が48時間雨量の増減に応じて減少していることが分かった(図5)。雨量1 cmの変動に対するイベント数の減少率は、 $0.035 \pm 0.006 \pm 0.004$ (%/cm)と決定された。この結果は、宇宙線空気シャワーの水文学への応用に道筋を拓く重要な成果であると位置づけられる。

一方、実際に検出された雨水によるカウント数の減少量は非常に小さく、リアルタイムに土壌水分量を測定するという当初の目的は達成できなかった。この原因としては、電磁成分イベントの到来頻度の低さ($< 1 \text{ Hz/m}^2$)が挙げられる。そこで今後、統計精度を高めるためには、(1)検出器の大面積化、(2)ミュオン粒子の併用、(3)大気圧変動等の気象要因のモデル化、などの技術的課題の克服が必要であることが分かった。

以上のように、本研究は、火山活動にともなう重力変化のモデル化や、その重力変化をとらえるための降水起源ノイズ低減に向けた基礎的な研究成果をもたらした。

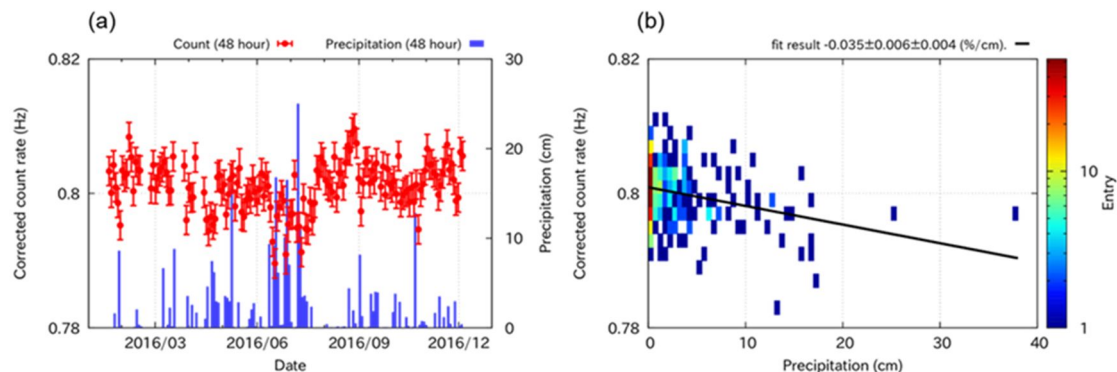


図5 有村観測坑道における宇宙線電磁成分測定結果
(a) 大気擾乱効果補正後のカウント数と48時間雨量、(b) 相関関係のフィッティング
(成果論文 Taketa et al., Sci. Rep. 2022 より抜粋)

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 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 R. Nishiyama	4. 巻 -
2. 論文標題 Detectability of gravity changes on the sea surface due to magma accumulation beneath submarine volcanoes	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Geophysical Journal International	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） 10.1093/gji/ggae146	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 西山竜一	4. 巻 -
2. 論文標題 宇宙線を用いた土壌水分量把握による土砂災害の予測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 京都大学防災研究所共同研究報告書	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） なし	査読の有無 無
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 鬼澤真也, 西山竜一, 今西祐一, 大久保修平, 安藤忍, 長岡優, 島村哲也, 平山康夫, 石原昂典, 松田健助, 金子祐也, 上田義浩, 谷田部史堯, 渡邊篤志, 安藤美和子, 坂下至功	4. 巻 97
2. 論文標題 伊豆大島における火山活動の解明と活動評価への適用に向けた合同重力観測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 東京大学地震研究所彙報	6. 最初と最後の頁 13-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15083/0002006042	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 西山竜一, 馬妍雪, 青山都和子, 清藤大河, 永井はるか	4. 巻 28
2. 論文標題 小型GNSS受信機を用いた迅速な重力探査の実行： 実習「本郷キャンパスの重力異常図を作ろう」の報告	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 東京大学地震研究所技術研究報告	6. 最初と最後の頁 6-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15083/0002006066	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 A. Taketa, R. Nishiyama, K. Yamamoto, and M. Iguchi	4. 巻 12
2. 論文標題 Radiography using cosmic-ray electromagnetic showers and its application in hydrology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-24765-7	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 R. Nishiyama	4. 巻 232(2)
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 2023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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 R. Nishiyama, S. Miyamoto, N. Shogo	4. 巻 95
2. 論文標題 Estimation of the Bulk Density of the Omuro Scoria Cone (Eastern Izu, Japan) from Gravity Survey	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15083/0002000093	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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 西山竜一
2. 発表標題 点圧力源による円錐地形の変形と重力変化
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会2023年
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西山竜一・武多昭道・山本圭吾・井口正人
2. 発表標題 坑道での宇宙線空気シャワー観測による土壌水分量の測定
3. 学会等名 令和4年度京都大学防災研究所研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西山竜一
2. 発表標題 点圧力源による無限円錐地形の変形
3. 学会等名 日本測地学会第138回講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西山竜一, 今西祐一, 武多昭道, 大久保修平, 山本圭吾, 井口正人
2. 発表標題 桜島での連続絶対重力測定
3. 学会等名 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画第2次桜島大規模噴火総合研究グループ研究集会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 R. Nishiyama	4. 発行年 2023年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 17
3. 書名 Muography and Geology: Alpine Glaciers (in "Cosmic Ray Muography")	

1. 著者名 R. Nishiyama	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Wiley	5. 総ページ数 10
3. 書名 Joint Inversion of Muography and Gravity Data for 3D Density Imaging of Volcanoes (in AGU Monograph "Muography")	

〔産業財産権〕

〔その他〕

地形を考慮した宇宙線伝播シミュレーションコード(Geant4により開発)
<https://github.com/r-nishi-eri/muography-simulator>

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

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