

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23244092

研究課題名(和文) 火山と断層の3D診断学 - 宇宙線透視と高品位重力観測の連携による新展開

研究課題名(英文) 3D tomography of volcanoes and faults using cosmic ray radiography and gravity measurement

研究代表者

大久保 修平 (Okubo, Shuhei)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：30152078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,400,000円

研究成果の概要(和文)：ミュオン以外の荷電粒子の影響は、ミュオン透視観測にとって最大の誤差要因である。これを低減するため、多層のミュオンセンサーと鉛層とを互層させる方式を開発した。この高精度化されたミュオン透視データと、重力異常データとの同時インバージョン手法を開発し、3次元密度構造を高い空間分解能で推定することに成功した。  
また、桜島など、火道の口径等の幾何形状がミュオン・ラジオグラフィーで決定された火山では、観測された重力変動から火道内のマグマ頭位の変動を推定することができるようになった。また、推定された頭位と、火山爆発活動とが対応することがわかった。

研究成果の概要(英文)：We develop an ultra low noise muography system composed of multilayer muon sensors and plumb layers. The resultant muography data are combined with surface gravity anomaly to estimate internal 3D density structure with high spatial resolution. We carried out continuous gravity observation at Sakurajima volcano whose geometry of a conduit is well known. We clearly observed excellent correlation between gravity and explosion activity there.

研究分野：測地学

キーワード：観測手法 宇宙線透視 重力 火山 断層

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線ミュオンを用いた地球内部の透視技術(ミュオン・ラジオグラフィ)は、本申請の分担者が世界で初めて開発に成功したものである。この技術はそれまでに、浅間山や昭和新山などに適用され、火山体内部の2次元断面図が得られるようになった。大気や海洋と違って、内部が不透明であるがゆえに、研究を進める上で困難さを抱えていた固体地球科学にとって、この技術は計り知れないインパクトをもっている。実際、NatureのResearch Highlights, 2007/5/24号で「火山体内部の撮像」として紹介されたり、2010年5月には学会・地球惑星科学委員会主催のシンポジウムで招待講演を行ったりするなど、国内外の注目を集めはじめていた。

(2) とはいえ、この手法で得られる密度は、宇宙線到来方向(視線方向)の平均密度に過ぎず、研究開始の時点では2次元的なイメージにとどまっていた。3次元密度分布を定量的に得る手法の開発が待ち望まれていた。

## 2. 研究の目的

(1) ミュオン・ラジオグラフィの定量的な精度の見積もりを、独立な手法でおこなうことを最初の目的とした。

(2) また、宇宙線ラジオグラフィを用いて、小～中規模火山の3次元密度分布を、数十m程度の高解像度で決定することを第2の目的とした。

(3) 3次元構造の確定した火山について、火道内マグマの移動現象をとらえることを第3の目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) ミュオンによって明らかにされるのは密度分布であるから、同じ密度に敏感な重力異常を稠密かつ高精度に計測することで、定量的な精度検証を行う。同時に重力とミュオン観測の統合インバージョン手法を開発し、3次元密度構造を高い空間解像度で推定する。

(2) ミュオン観測手法に固有の背景雑音の低減手法の開発

(3) 活動的な火山について、高精度重力観測を連日続け、火道内マグマの移動で生じる重力変動をとらえ、それをマグマ頭位変動と関係付ける。

## 4. 研究成果

(1) 精度検証と誤差要因の同定  
ミュオン観測から火山の内部密度を推定する際に、きわめて重要となるのが、ミュオン以外の荷電粒子の影響の排除である。研究開始前の状況では、背景雑音の見積もり

少なからぬ曖昧さが残っていたが、本研究を進める過程で、多層のミュオンセンサーを並べ、鉛層と互層させるカロリメーター方式を用いることで、背景雑音そのものを大幅に低減することができ、ミュオン観測の高精度化が実現された。

(2) 世界初の重力異常・ミュオン観測の同時インバージョン手法を開発することに成功した。これにより、火山の2次元断面図だけではなく、3次元密度構造が定量的に、かつ、高い空間解像度で推定できるようになった。

(3) 火道内のマグマ頭位の変動を、重力の連続観測でとらえられるようになった。具体的には、火道の口径等の幾何形状がミュオン・ラジオグラフィで決定された桜島火山を対象にして、観測された重力変動から頭位を推定すると、火山爆発活動とも対応することがわかった。

(4) 重力変動に含まれる陸水擾乱起源のノイズも、降雨・蒸発散・土壌水・地下水流動を考慮に入れた数値シミュレーションによって、補正できることを示すことに成功した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計22件)

Nishiyama, R., S. Miyamoto, S. Okubo, H. Oshima and T. Maekawa, 3D Density Modeling with Gravity and Muon-Radiographic Observations in Showa-Shinzan Lava Dome, Usu, Japan, Pure Appl. Geophys., 査読有, 2017. doi: 10.1007/s00024-016-1430-9

Nishiyama, R., A. Taketa, S. Miyamoto, and K. Kasahara, Monte Carlo simulation for background study of geophysical inspection with cosmic-ray muons, Geophys. J. Int., 査読有, 206, 2, 1039-1050, 2016. doi: 10.1093/gji/ggw191

Kazama, T., S. Okubo, T. Sugano, S. Matsumoto, W. Sun, Y. Tanaka, and E. Koyama, Absolute gravity change associated with magma mass movement in the conduit of Asama Volcano (Central Japan), revealed by physical modeling of hydrological gravity disturbances, J. Geophys. Res., 査読有, 120, 1263-1287, 2015. doi:10.1002/2014JB011563.

Kusagaya, T. and H.K.M. Tanaka, Development of the very long range muographic imaging technique to explore the internal structure of an erupting

volcano, Shinmoe-dake, Japan, Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 査読有, 4, 215-226, 2015.  
doi:10.5194/gi-4-215-2015

Kusagaya, T. and H.K.M. Tanaka, Muographic imaging with a multi-layered telescope and its application to the study of the subsurface structure of a volcano, Proc. Japan Academy, Ser. B, 査読有, 91, 501-510, 2015. doi: 10.2183/pjab.91.501

Nishiyama, R., Y. Tanaka, S. Okubo, H. Oshima, H. K. M. Tanaka, T. Maekawa, Integrated processing of muon radiography and gravity anomaly data toward the realization of high-resolution 3D density structural analysis of volcanoes: case study of Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan, J. Geophys. Res., 査読有, 119, 699-710, 2014. doi: 10.1002/2013JB010234

Tanaka, H.K.M., Kusagaya, T., Shinohara, H., Radiographic visualization of magma dynamics in an erupting volcano, Nature Communications, 査読有, 5, 3381, 2014. doi:10.1038/ncomms4381

Tanaka, H.K.M., Particle geophysics, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 査読有, 42, 535-549, 2014. doi:10.1146/annurev-earth-060313-054632

Okubo, S., Y. Tanaka, S. Ueki, H. Oshima, T. Maekawa, Y. Imanishi, Gravity variation around Shinmoe-dake volcano from February 2011 through March 2012 -Results of continuous absolute gravity observation and repeated hybrid gravity measurements, Earth Planet Space, 査読有, 65, 563-571, 2013. doi:10.5047/eps.2013.03.014

Tanaka, H.K.M., Subsurface density mapping of the earth with cosmic ray muons, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 査読有, 243-244, 239-248, 2013. doi:10.1016/j.nuclphysbps.2013.09.020

Okubo, S., T. Kazama, K. Yamamoto, M. Iguchi, Y. Tanaka, T. Sugano, Y. Imanishi, W. Sun, M. Saka, A. Watanabe, S. Matsumoto, Absolute Gravity Variation at Sakurajima Volcano from April 2009 through January 2011 and its Relevance to the Eruptive Activity of Showa Crater, Bull. Volcanol. Soc.

Japan, 査読有, 58, 153-162, 2013. doi: 10.18940/kazan.58.1\_153

Tanaka, H.K.M. and H. Muraoka, Interpreting muon radiographic data in a fault zone: possible application to geothermal reservoir detection and monitoring, Geosci. Instrum. Method. Data Syst., 査読有, 2, 145-150, 2013. doi: 10.5194/gi-2-145-2013

Imanishi, Y., K. Nawa, and H. Takayama, Local hydrological processes in a fractured bedrock and the short-term effect on gravity at Matsushiro, Japan, Journal of Geodynamics, 査読有, 63, 62-68, 2013. doi: 10.1016/j.jog.2012.10.001

Okubo, S. and H.K.M. Tanaka, Imaging density profile of volcano interior with cosmic-ray muon radiography combined with classical gravimetry, Meas. Sci. Technology, 査読有, 23(4), 1-16, 2012. doi: 10.1088/0957-0233/23/4/042001

Shinohara, H. and H.K.M. Tanaka, Conduit magma convection of a rhyolitic magma: Constraints from cosmic-ray muon radiography of Iwodake, Satsuma-Iwojima volcano, Japan, Earth Planet. Sci. Lett., 査読有, 349-350, 87-97, 2012. doi: 10.1016/j.epsl.2012.07.002

Kazama, T., Tamura, Y., Asari, K., S. Manabe, S. Okubo, Gravity changes associated with variations in local land-water distributions: Observations and hydrological modeling at Isawa Fan, northern Japan, Earth Planet Space, 査読有, 64, 309-331, 2012. doi:10.5047/eps.2011.11.003

Tanaka, H.K.M., H. Miyajima, T. Kusagaya, A. Taketa, T. Uchida, and M. Tanaka, Cosmic muon imaging of hidden seismic fault zones: Rainwater permeation into the mechanical fractured zones in Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, Japan, Earth Planet. Sci. Lett., 査読有, 306, 156-162, 2011. doi:10.1016/j.epsl.2011.03.036,

[学会発表](計44件)

大久保修平・山本圭吾・井口正人, 不圧帯水層の透水係数が重力補正に及ぼす影響 - 桜島火山の連続重力観測のケーススタディ, 日本測地学会 2016 年秋季講演会, 奥州市文化会館(岩手県奥州市), 2016 年

10月19日  
Okubo, S., Continuous absolute gravity measurements on a volcanic island - what we have learned on the dislocation, mass transport of magmatic fluid, and groundwater tide. International Symposium on Geodesy and Geodynamics, 天津市(中国), 2016年7月23日  
大久保修平・山本圭吾・井口正人・武多昭道・田中愛幸・高木悠, 桜島火山における重力変動と歪・傾斜変動の対比-2015年8月貫入イベントと2016年2月の爆発再開まで 日本地球惑星科学連合 2016年合同大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市), 2016年5月22-26日  
大久保修平・山本圭吾・井口正人, 桜島の大規模マグマ貫入にともなう重力変動 - 火道の閉塞・開口状態のDiagnosis, 日本測地学会 2015年秋季講演会, 九州大学西新プラザ(福岡県福岡市), 2015年10月15日  
大久保修平・山本圭吾・井口正人・田中愛幸・今西祐一, 火山島の地下水面の潮汐変動に由来する重力擾乱 - 桜島の爆発直前の重力シグナルを求めて -, 日本測地学会 2014年秋季講演会, つくばサイエンスインフォメーションセンター(茨城県つくば市), 2014年11月7日  
Okubo, S., Y. Tanaka, and Y. Imanishi, Precursory Gravity Variation Around Shinmoe-dake Volcano During Vulcanian Eruptions, GENAH 2014, 大観荘(宮城県松島市), 2014年7月22日~26日  
Aoki, S., Tanaka, H.K.M., Ohshiro, M., Yamashita, M., A Historical View on the Degradation on Seismic Performance of The Parthenon, Greece and Muography as the Potential Eval, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2014年4月28日.  
Hanazato, T. Tanaka, H.K.M., Kusagaya, T., Okamoto, Y., Muon radiography Monitoring for Structural Survey of the Prambanan World Heritage Temple, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2014年4月28日.  
Hernlund, J., Tanaka, H.K.M., Testing Geological Hypotheses Using Particle Physics, 日本地球惑星科学連合 2014年大会パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2014年4月28日.  
Kusagaya, T., Tanaka, H.K.M., Ohshima, H., Maekawa, T., Yokoyama, I. Muographic imaging of Usu volcano with a multilayer detector, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2014年4月28日.  
Nishiyama, R., Miyamoto, S., Ohshima, H., Okubo, S., Tanaka, H.K.M.,

Simultaneous inversion of muon radiography and gravity anomaly data for 3-D density structural analysis of lava domes, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2014年4月28日.  
Shinohara, H., Tanaka, H.K.M., Conduit magma convection: Constraints from Muography, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市), 2014年4月28日.  
Sannomiya, A., Tanaka, H.K.M., Suenaga, H., Suzuki, K., Introduction about test measurement of the muon detection system for monitoring a groundwater (With some observations), 日本地球惑星科学連合 2014年大会, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市) 2014年4月28日.  
Tanaka, H.K.M., Muographic observations in Satsuma Iwojima, Japan, 日本地球惑星科学連合 2014年大会, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市) 2014年4月28日.  
Okubo, S., T. Kazama, K. Yamamoto, M. Iguchi, Y. Tanaka, Y. Imanishi, W. Sun, M. Saka, A. Watanabe, and S. Matsumoto, Absolute gravity variation at Sakurajima volcano from April 2009 through January 2011 and its relevance to the eruptive activity of Showa crater, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, 鹿児島市民福祉プラザ(鹿児島県鹿児島市), 2013年7月24日  
Nishiyama R., Y. Tanaka, S. Okubo, H. Oshima, H. Tanaka, and T. Maekawa, Integrated processing of muon radiography and gravity anomaly data toward realizing high-resolution 3D density structural analysis of volcanoes: case study of Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市), 2013年7月21日  
Kazama T., S. Okubo, T. Sugano, S. Matsumoto, W. Sun, Y. Tanaka, and E. Koyama, Magma mass transport in the volcanic vent at Asama Volcano in the central Japan revealed by physical corrections of hydrological gravity disturbances, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市), 2013年7月21日.  
Taketa A., S. Okubo, M. Iguchi, K. Yamamoto, T. Kazama, H.K.M. Tanaka, A novel hydrological observation using cosmic ray air showers: A measurement of underground water stream on Sakurajima volcano, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市), 2013年7

- 月 21 日。  
Tanaka, H.K.M., Possible application of stroboscopic muography to monitoring periodic eruptions, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市), 2013 年 7 月 21 日
- Sannomiya A., H. Tanaka, K. Tada, Operation of a muon detection system under extremely high humidity environment for monitoring underground water table, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市), 2013 年 7 月 21 日
- ②① Kusagaya T., H.K.M. Tanaka, A. Taketa, H. Oshima, T. Maekawa and I. Yokoyama, Development of multilayer muography for imaging a middle-scale volcano, IAVCEI 2013 Scientific Assembly, かがしま県民交流センター(鹿児島県鹿児島市), 2013 年 7 月 21 日
- ②② 大久保修平・田中愛幸・今西祐一, 霧島火山新燃岳 2011 年噴火のブルカノ式噴火期にみられた、顕著な短期的重力変化, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市), 2013 年 5 月 22 日
- ②③ 西山 竜一・田中 愛幸・大久保 修平・大島 弘光・田中 宏幸・前川 徳光, 重力観測と宇宙線ミュオンラジオグラフィーの組み合わせによる火山内部密度構造の 3 次元イメージング, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市), 2013 年 5 月 19 日
- ②④ Taketa, A., S. Okubo, H. Tanaka, A new radiographic method using electromagnetic component of air shower, AGU Fall Meeting, サンフランシスコ(米国), 2012 年 12 月 4 日
- ②⑤ Okubo, S., R. Nishiyama, Y. Tanaka, and H. Tanaka, Three dimensional tomography of a volcano with unprecedented resolution -Joint inversion of gravity and muon-radiography data, China Geophysics Meeting, 北京市(中国), 2012 年 10 月 19 日
- ②⑥ 田中宏幸・草茅太郎・横山泉他, 回転多層ミュオン飛跡検出器による画像から得られた有珠火山明治新山(1910 年)の内部構造, 日本火山学会 2012 年度秋季大会, エコールみよた(長野県御代田町), 2012 年 10 月 15 日
- ②⑦ 大久保修平・植木真人・田中愛幸・大島弘光・前川徳光・今西祐一, 霧島火山新燃岳 2011 年噴火後の重力変動 - 定点連続観測及び多点ハイブリッド観測の結果, 日本地球惑星科学連合, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市), 2012 年 5 月 23 日
- ②⑧ 草茅太郎・田中宏幸・武多昭道・大島弘光・前川徳光, 有珠山の宇宙線ミュオンラジオグラフィーを行うための低ノイズカロリメータ型宇宙線ミュオン検出器の開発, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 千葉県幕張市, 2012 年 5 月 20-25 日.
- ②⑨ Kusagaya, T., T. Uchida, H. Tanaka, M. Tanaka, Development and evaluation of a time-dependent radiographic technology by using a muon read out module, European Geosciences Union General Assembly 2012, ウィーン市(オーストリア), 2012 年 4 月 23 日
- ③⑩ Tanaka, H., T. Kusagaya, A. Taketa, H. Oshima, and T. Maekawa, Development of the GDM system for imaging the internal structure of the Usu Cryptodome, European Geosciences Union General Assembly 2012, ウィーン市(オーストリア), 2012 年 4 月 23 日
- ③⑪ Nishiyama, R., H. Oshima, T. Maekawa, H. Tanaka, Y. Tanaka, S. Okubo, Development of a joint inversion technique using gravity and muon-radiographic data for resolving three-dimensional density structure of a gigantic body, European Geosciences Union General Assembly 2012, ウィーン市(オーストリア), 2012 年 4 月 23 日
- ③⑫ 西山 竜一・田中宏幸・田中愛幸・大久保修平・大島弘光・前川徳光, 「宇宙線ミュオンラジオグラフィーと重力観測を組み合わせる昭和神山溶岩ドームの内部密度構造」, 日本測地学会第 116 回講演会高山市民文化会館(岐阜県・高山市), 2011 年 10 月 28 日
- ③⑬ Tanaka, H.K.M., Muon Radiography in Japan, Int. Workshop High Energy Geophysics 2011, 八芳園(東京都・港区), 2011 年 10 月 27 日.
- ③⑭ Taketa A., S. Okubo, and H.K.M. Tanaka, New Radiography Method for Small Scale Structure Using Soft Component of Air Shower, Int. Workshop High Energy Geophysics 2011, 八芳園(東京都・港区), 2011 年 10 月 27 日.
- ③⑮ Nishiyama R., H.K.M. Tanaka, and S. Okubo, Incorporating gravimetric information to muon radiography to obtain an internal density structure of the Mt. Showa-Shinzan lava dome, Int. Workshop High Energy Geophysics 2011, 八芳園(東京都・港区), 2011 年 10 月 27 日.
- ③⑯ Tanaka, H.K.M., H. Miyajima, T. Kusagaya, A. Taketa, T. Uchida, and M. Tanaka, Cosmic Muon Imaging of Hidden Seismic Fault Zones: The Measurement of Density Variation by Rainfall Using Cosmic-ray, Int. Workshop High Energy Geophysics 2011, 八芳園(東京都・港区), 2011 年 10

月 27 日。

- ③7 Okubo, S., H. Tanaka, T. Kazama, K. Yamamoto, Y. Tanaka, and M. Iguchi, Gravity monitoring supplemented with Cosmic Ray Imaging measures rise and fall of magma head, 25-th General Assembly of IUGG Melbourne, メルボルン (オーストラリア), 2011 年 7 月 2 日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大久保 修平 (OKUBO, Shuhei)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号： 30152078

### (2) 研究分担者

田中 宏幸 (TANAKA, Hiroyuki)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号： 20503858

今西 祐一 (IMANISHI, Yuichi)  
東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号： 30260516

武多 昭道 (TAKETA, Akimichi)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号： 30589271

田中 愛幸 (TANAKA, Yoshiyuki)  
東京大学・地震研究所・助教  
研究者番号： 90508350

寺家 孝明 (JIKE, Takaaki)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教  
研究者番号： 40425400