

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25887035

研究課題名(和文)高精度陸水擾乱補正による地震火山起源のサブマイクロガル重力変化の検出

研究課題名(英文) Detections of sub-micro-gal gravity changes associated with earthquakes and volcanism, revealed by precise corrections of hydrological gravity disturbances

研究代表者

風間 卓仁 (Kazama, Takahito)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20700363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は固体地球内部における地震火山起源の質量移動を重力観測によって把握するため、重力観測データに含まれる陸水起源の重力擾乱を高精度に補正した。桜島火山では経験的な陸水モデルによって陸水擾乱を8マイクロガルの精度で再現することに成功した。また、浅間山では物理的な陸水モデルによって陸水擾乱を3マイクロガルの精度で再現するとともに、2004年噴火時の重力観測データから振幅5マイクロガルのマグマ移動起源の重力変化を抽出することに成功した。今後これらの陸水モデルを他の地域に応用することで、重力観測を用いた地震火山活動モニタリングが可能になると期待される。

研究成果の概要(英文)：In order to obtain gravity changes associated with spatiotemporal mass variations due to earthquakes and volcanic activities, we corrected observed gravity data for hydrological gravity disturbances with a high degree of precision. For Sakurajima Volcano, we reproduced the hydrological disturbances of the observed relative gravity data within 8 micro-gal, using an empirical hydrological model. For Asama Volcano, we retrieved the 5-micro-gal gravity signal due to magma movement during the 2004 eruptions, by correcting the hydrological disturbances observed by absolute gravimeters using a physical hydrological model. Gravity measurements will enable us to monitor mass redistributions related to earthquakes and volcanism, by means of these hydrological models for the hydrological disturbance corrections.

研究分野：測地学

キーワード：重力観測 地震 火山活動 陸水擾乱 桜島 浅間山 地下水 土壤水分

1. 研究開始当初の背景

重力加速度（重力）の時空間変化を精度良く捉えることで、地震火山活動に伴う固体地球内部の質量移動を把握することができる。しかしながら、重力は降水・土壌水浸透・地下水流動といった陸水変動にも敏感であり、この陸水起源の重力擾乱（陸水擾乱）が前述の固体地球起源の重力変化をしばしば覆い隠してしまう。重力観測を用いて固体地球内部の質量移動をモニターするには、陸水擾乱を高精度に再現および補正することが不可欠である。

陸水擾乱を再現するには、主に経験的手法と物理的手法が取られてきた。しかし、どちらの場合においても汎用性に乏しい陸水モデルが採用されていて、あらゆる重力観測点の陸水擾乱を再現することは困難であった。一方、Kazama et al. (2012)は鉛直1次元の物理モデルを用い、岩手県胆沢扇状地で2009-10年に観測された重力時間変化を1マイクロガルの精度で再現することに成功していた。もし彼らの1次元物理モデルを3次元に拡張できれば、あらゆる重力観測点の陸水擾乱を適切に補正できるものと期待されていた。

<参考文献>

T. Kazama, Y. Tamura, K. Asari, S. Manabe, S. Okubo (2012): Gravity changes associated with variations in local land water distributions: observations and hydrological modeling at Isawa Fan, northern Japan. *Earth Planets Space*, 64 (4), 309-331, doi:10.5047/eps.2011.11.003.

2. 研究の目的

前章の背景を受けて、本研究では以下のような目的を設定した。

- 地震火山域などで重力観測データを取得し、重力データに含まれる陸水擾乱を独自の陸水モデルによって高精度に補正する。
- 陸水擾乱補正によって重力観測データから固体地球起源の重力変化を抽出し、固体地球内部における質量移動プロセスを検証する。
- 本研究の陸水モデルによる陸水擾乱補正の有効性が確認された際には、陸水モデル作成のための独自ソフトウェアをインターネット上に公開し、研究者が自由に利用可能な状態にする。

本研究の対象地域としては、昨今の地震火山活動等を考慮して以下の通りに設定した。

- 桜島火山（2006年以降活発な噴火活動を継続しており、2008年からは高品質な重力データが取得されているため）

- 浅間山（2004年の中規模噴火以降、絶対重力計を用いた重力観測が継続されてきたため）
- 八重山諸島（スロースリップイベントを捉える目的で2011年以降重力計が設置されているため）
- アラスカ（後氷期地殻変動を捉える目的で絶対重力計や超伝導重力計による重力観測が2006年以降継続されているため）
- インドネシア（主に地下水汲み上げによる地盤沈下を捉える目的で絶対重力測定が継続されているため）

3. 研究の方法

(1) 観測データの取得および整備

まず本研究は、地震火山域で絶対重力計や相対重力計を用い、重力時空間変化を取得した。本研究の期間中には、主に桜島火山においてバネ式相対重力計による重力観測を実施し、陸水擾乱モデリングのために気象や陸水に関する観測データも取得した。また、浅間山で2000年代に絶対重力計で観測された重力データを整理した。

(2) 陸水モデルの構築および改変

次に本研究は、Kazama et al. (2012)の鉛直1次元陸水物理モデル G-WATER [1D]を3次元に拡張し、火山のような起伏に富んだ地域でも陸水時空間変化を再現できるよう改変した (G-WATER [3D])。また、3次元陸水モデルで土壌不均質を扱えるよう、ソフトウェアコードを試験的に改変した。これとは別に、本研究は複数の重力観測点の陸水擾乱を容易に再現することを想定し、経験的な陸水モデル G-WATER [E]を構築した。

(3) 陸水モデルを用いた陸水擾乱補正

さらに本研究は、前項で作成した陸水モデルを用いて、実際に観測された陸水起源の重力擾乱を数値的に再現した。浅間山については陸水擾乱を高精度に再現できることを確認したため（次章参照）、重力観測データから陸水擾乱計算値を差し引くことで陸水擾乱補正を実施し、得られた重力残差から火山内部におけるマグマ質量移動プロセスを議論した。

4. 研究成果

(1) 桜島火山

本研究は陸水モデル G-WATER [E]を用い、桜島火山の重力基準点計25点における陸水擾乱値を計算した。その結果、この陸水モデルはハルタ山観測点の絶対重力観測データを8マイクロガルの精度で再現できることが分かった。また、桜島全域で2007-09年に観測された相対重力変化の約9割は陸水擾乱に

よって説明可能であることも分かった。今後本研究の陸水モデルを過去の相対重力データに適用することで、桜島火山の中長期的な火山活動プロセスをより精確に議論できるものと期待される。

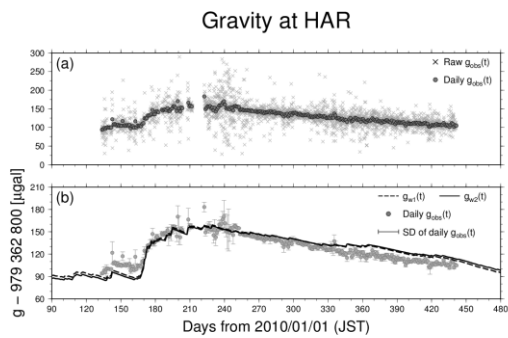


図 1：桜島ハルタ山で観測された絶対重力変化と陸水擾乱の計算値。風間ほか(測地学会誌, 2014)より。

(2) 浅間山

本研究は陸水モデル G-WATER [3D]を用い、浅間山中腹の観測所における陸水擾乱値を計算した。その結果、この陸水モデルは2004-09年に観測された絶対重力変化を3マイクロガルの精度で再現できることが分かった。また、浅間山噴火時の2004年について観測データから陸水擾乱計算値を差し引いたところ、振幅約5マイクロガルの重力残差を抽出することに成功し、しかもこの重力残差は火山火道内部におけるマグマ質量の移動によって説明可能であることが分かった。本研究で構築された陸水モデルを将来の浅間山噴火時の重力データに適用すれば、マグマ位置をリアルタイムで把握し、その後の火山活動を予測することが可能になると期待される。

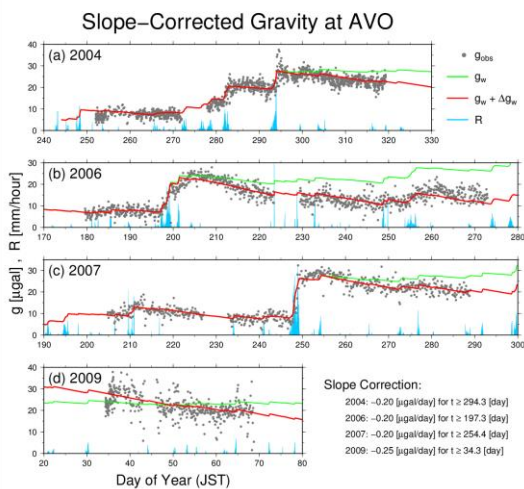


図 2：浅間火山観測所で観測された絶対重力変化と陸水擾乱の計算値。Kazama et al. (JGR, 2015)より。

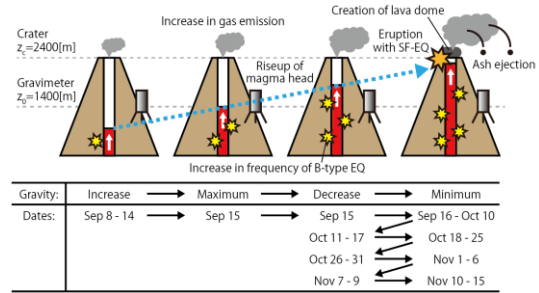


図 3：絶対重力観測および陸水擾乱補正から明らかになった、2004年浅間山噴火時のマグマ移動過程。Kazama et al. (JGR, 2015)より。

(3) 八重山諸島

本研究は八重山諸島の重力観測点や海岸63地点で土壌を採取し、土質試験によって透水性や土壌空隙率を測定した。また、このようにして得られた土壌物理パラメーターを陸水モデル G-WATER [3D]に適用し、黒島の地下水構造を推定した。その結果、土壌パラメーターの不均質性をモデルに組み込むことにより、実際の井戸で観測された地下水位を説明可能であることが分かった。本研究で構築された3次元陸水モデルを重力観測データに適用すれば、スロースリップに伴う重力変化をより詳細に把握できるものと期待される。

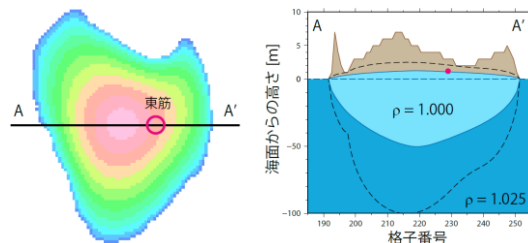


図 4：3次元陸水モデルで明らかになった黒島の地下水構造。風間ほか(連合大会, 2013)より。

(4) アラスカ

本研究はアラスカ・ジュノーの超伝導重力計で2012-13年に観測された重力データについて、潮汐解析ソフト BAYTAP を用いて潮汐と気圧変化の影響を除去した。その上で、BAYTAP 補正後の重力観測データを1次元陸水モデル G-WATER [1D]で再現可能かどうかを検証した。その結果、陸水モデルは2マイクロガルの精度で重力観測データを再現できるが、その精度は先行研究(1 microgal; Kazama et al., 2012)には及ばないことが分かった。この原因としては超伝導重力計周辺の地形や、より広域の水質量分布が影響していると考えられ、今後3次元陸水モデルや全球陸水モデルを用いた陸水擾乱補正が不可欠と考えられる。

(5) インドネシア

本研究は陸水モデル G-WATER [E]を用い、インドネシア・バンドンの各地で観測された絶対重力観測データを補正した。その結果、1年間で最大 60 マイクロガルという大きな重力変化が抽出されることがわかった。この重力変化の要因としては地下水汲み上げに伴う地盤沈下や **Lembang** 断層の活動の影響が考えられる。今後はより再現性の高い陸水モデルで陸水擾乱を補正するとともに、重力残差の物理的メカニズムをより詳細に解明する必要がある。

(6) その他

本研究は2014年10月以降に噴火活動の活発化が確認されている阿蘇山にて、絶対重力計 A10 による重力測定、およびマルチコプターによる航空写真測量を新たに実施した。今後は継続的にこれらの観測を実施し、かつ本研究の陸水モデルを活用することで、阿蘇火山内部のマグマ移動過程が解明されると期待できる。

また、本研究で開発した陸水モデル G-WATER のソフトウェアコードを一般化し、インターネット上に掲載した。今後広く研究者が本ソフトウェアを利用することで、重力観測を用いた質量移動プロセスの解明に関する研究が大いに進展すると期待される。

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) ※全て査読あり

T. Kazama, S. Okubo, T. Sugano, S. Matsumoto, W. Sun, Y. Tanaka, E. Koyama (2015): 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. (Solid Earth)*, 120 (2), 1263-1287, doi:10.1002/2014JB011563.

A. Setyawan, Y. Fukuda, J. Nishijima, T. Kazama (2015): Detecting Land Subsidence Using Gravity Method in Jakarta and Bandung Area, Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 23, 17-26, doi:10.1016/j.proenv.2015.01.004.

風間卓仁, 山本圭吾, 福田洋一, 井口正人 (2014): 相対重力データに対する陸水擾乱補正の重要性: 桜島火山を例に. *測地学会誌*, 60 (2), 73-89.

[学会発表] (計 20 件)

風間卓仁, 市川浩樹, 齊藤昭則, 小田木洋子

(2015/03/15): 4次元デジタル地球儀 **Dagik Earth** の固体地球科学系コンテンツの拡充について. **ダジック・アース**の開発と利用に関する研究会, 1-4, 京都府京都市・京都大学 (oral).

板倉 統, 福田洋一, 風間卓仁 (2014/11/07): 独立成分分析による時系列重力データの解析. 日本測地学会第 122 回講演会, 59, 茨城県つくば市・つくばサイエンスインフォメーションセンター (oral).

風間卓仁, 市川浩樹, 齊藤昭則, 小田木洋子 (2014/11/05): 4次元デジタル地球儀 **Dagik Earth** の固体地球科学系コンテンツの拡充について. 日本測地学会第 122 回講演会, 28, 茨城県つくば市・つくばサイエンスインフォメーションセンター (oral).

風間卓仁 (2014/10/04): 地下水流動モデリングの測地学的重要性: 浅間火山における重力観測を例に. 2014 年度日本水文科学学会学術大会, 06, 広島県東広島市・広島大学 (oral).

T. Kazama (2014/09/24): Absolute gravity change associated with magma mass movement in the conduit of Asama Volcano (Central Japan), revealed by physical modeling of hydrological gravity disturbances. International Workshop 2014 on Mt. Tatun: What we know and what we don't know, 3-01, Taipei, Taiwan (oral, invited).

T. Kazama (2014/08/01): G-WATER: Software packages for modeling gravity disturbances due to local land-water redistributions toward detecting gravity signals associated with earthquakes and volcanism. AOGS 11th Annual Meeting, SE37-A001, Sapporo, Hokkaido, Japan (poster).

風間卓仁, 山本圭吾, 福田洋一, 井口正人 (2014/05/01): 相対重力データに対する陸水擾乱補正の重要性: 桜島火山を例に. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SVC55-P30, 神奈川県横浜市・パシフィコ横浜 (poster).

池田絢美, 久家慶子, 風間卓仁, 松澤孝紀 (2014/05/01): 2013 年 8 月 18 日桜島昭和火口噴火にともなう九州を伝播した長周期地震波. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, SVC55-P23, 神奈川県横浜市・パシフィコ横浜 (poster).

T. Kazama, H. Hayakawa, S. Miura, M. Kaufman, T. Sato, C.F. Larsen, J.T. Freymueller (2013/12/12): Long-term variations of absolute and superconducting

gravity values in Southeast Alaska, observed by the ISEA2 project. AGU Fall Meeting, G43B-0971, San Francisco, CA, USA (poster).

Y. Tanaka, Y. Imanishi, S. Okubo, K. Nawa, H. Ikeda, T. Miyaji, T. Kazama, S. Okamura, T. Miyazaki, M. Nakamura (2013/12/12): Gravity changes observed during the long-term slow slip events at the Ryukyu Trench in May 2012 and December 2012. AGU Fall Meeting, S41B-2446, San Francisco, CA, USA (poster).

A. Setyawan, T. Kazama, Y. Fukuda, J. Nishijima, I. Gumilar (2013/10/31): Absolute Gravity Observations on Bandung Area. HAGI-IGI Joint Convention 2013, JCM2013-0190, Medan, Sumatera Utara, Indonesia (oral).

早河秀章, 三浦哲, 風間卓仁, 佐藤忠弘, M. Kaufman, J.T. Freymueller (2013/10/31): アラスカ南東部における絶対重力測定: 2013年報告. 日本測地学会第120回講演会, 64, 東京都立川市・国立極地研究所 (oral).

風間卓仁, 三浦哲, 早河秀章, 佐藤忠弘, M. Kaufman, J.T. Freymueller (2013/10/29): 超伝導重力計 iGrav #003 を用いたアラスカ南東部における重力連続観測. 日本測地学会第120回講演会, P-11, 東京都立川市・国立極地研究所 (poster).

S. Okubo, T. Kazama, K. Yamamoto, M. Iguchi, Y. Tanaka, T. Sugano, Y. Imanishi, W. Sun, M. Saka, A. Watanabe, S. Matsumoto (2013/07/24): 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, 2C-O9, Kagoshima, Kagoshima, Japan (oral).

A. Taketa, S. Okubo, M. Iguchi, K. Yamamoto, T. Kazama, H.K.M. Tanaka (2013/07/23): A novel hydrological observation using cosmic ray air showers: A measurement of underground water stream on Sakurajima volcano. IAVCEI 2013 Scientific Assembly, 2D-P3, Kagoshima, Kagoshima, Japan (poster).

T. Kazama, S. Okubo, T. Sugano, S. Matsumoto, W. Sun, Y. Tanaka, E. Koyama (2013/07/21): 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, 2F-P14, Kagoshima, Kagoshima, Japan (poster).

五島仁志, 宮崎真一, 風間卓仁, 加納将行 (2013/05/23): 地震・火山活動に伴う地殻変動の地形補正. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SSS34-P08, 千葉県千葉市・幕張メッセ (poster).

風間卓仁, 名和一成, 田中愛幸, 今西祐一 (2013/05/22): 八重山諸島における土壌の物理パラメーターとその不均質性: 地下水流動に伴う重力擾乱の高精度な計算に向けて. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SGD22-P09, 千葉県千葉市・幕張メッセ (poster).

田中愛幸, 岡村盛司, 宮崎隆幸, 風間卓仁, 名和一成, 今西祐一, 大久保修平, 中村衛 (2013/05/22): 2012年5月と12月の琉球弧の長期的スロースリップに伴う絶対重力変化. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SGD22-P08, 千葉県千葉市・幕張メッセ (poster).

板倉統, 風間卓仁, 福田洋一 (2013/05/22): 経験的および物理的モデルを用いた陸水起源の重力応答の数値計算: インドネシア・チビノン为例. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, SGD22-P07, 千葉県千葉市・幕張メッセ (poster).

[その他]

2014年10月の日本水文科学会での口頭発表においては、その研究内容や成果が認められ、2014年度日本水文科学会学術大会「優秀口頭発表賞」を受賞した。

本研究で作成した陸水モデル作成のためのソフトウェア G-WATER は以下のウェブページに掲載されている。

<http://www-geod.kugi.kyoto-u.ac.jp/~takujin/G-WATER.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

風間 卓仁 (KAZAMA, Takahito)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 25887035

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし