

大規模火山噴火 (VEI 4以上) に伴う質量移動を 衛星重力データから検出する試み

三井雄太¹・小長井 駿²

An attempt to detect mass movement associated with large volcanic eruptions (VEI 4 or higher) using satellite gravity data

YUTA MITSUI¹ and SHUN KONAGAI²

Abstract GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) mission had clarified global time-variable gravity fields since 2002. The time-variable gravity fields represent spatiotemporal mass redistribution on the Earth. Using GRACE level-3 data provided by CNES/GRGS, we attempt to detect signals of mass movement related to volcanic eruptions. We focus on the gravity data for 13 volcanoes where large (VEI 4 or higher) eruptions occurred, and perform a regression analysis with linear, annual, and semiannual components. We find that only Icelandic volcanoes have notable signals of positive changes in the linear trends of gravity (Eyjafjallajökull and Grimsvötn) and negative offset (Eyjafjallajökull) associated with the eruptions. These signals can be attributed to responses of surrounding glacial system to the eruptions rather than mass movement by the eruption themselves. In addition, small but significant signals have also been detected in other volcanoes, but their interpretation is still difficult.

Key words: Volcano, glacier, gravity, GRACE, mass movement, Iceland.

はじめに

衛星重力ミッション Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) は、国際共同研究として実施され、2002年から約15年間にわたって全地球上の重力の時間変化を記録した。GRACEでは、高度約500kmを飛ぶ2つのほぼ同一の衛星間の距離変化をマイクロ波で精密に測っていた。衛星間の距離は直下の重力の大きさに応じて変化するため、この距離変化を計測することで、その原因となる重力ポテンシャル変化を推定できる。このデータ処理の過程には複数の段階があり、様々な研究機関が各段階 (レベル) でのデータ公開を行っている (宗

包, 2013)。

GRACE データの大きな特徴は、全地球規模での重力の時間変化を、連続的に記録したことにある。これは地上観測では不可能なことである。重力は万有引力と遠心力の合力であるが、重力の変化分は万有引力の変化分、つまり地球システム上の質量移動を表すと考えて良い。そのため、GRACE データからは、地球温暖化による気候変動と関連した海水準変動 (Willis *et al.*, 2008) や氷床・氷河融解 (Chen *et al.*, 2006; Matsuo & Heki, 2010)、陸水の季節変動 (Tapley *et al.*, 2004)、さらには巨大地震の地震時・地震後地殻変動 (Han *et al.*, 2006; 田中・日置, 2017) など、地球システム上の質量再配分に関係する多

2020年3月25日受付。2020年5月19日受理。

Received: 25 March 2020 Accepted: 19 May 2020

¹静岡大学理学部地球科学科, 〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836

²元・静岡大学大学院総合科学技術研究科

¹Faculty of Science, Shizuoka University, 836 Ohya, Suruga-ku, Shizuoka, 422-8529 Japan

²Formerly at Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

E-mail: mit@shizuoka.ac.jp (Y. M.)

くの分野にまたがる知見が得られてきた。

本研究では、地球システム上で膨大な質量移動を引き起こす大規模な火山活動に注目する。火山活動は、地下物質の上昇そのものであるため、重力変化の研究と相性が良く、地上観測やモデリングが盛んに行われてきた(例. 風間, 2019)。一方で、ほとんどの火山活動は局所的な現象であるため、空間解像度が100km以上のGRACEデータから質量移動のシグナルを検出するのは一般に困難と考えられる。著者らの知る限り、これまでに報告事例はない。そこで本研究では、火山活動の中でも膨大な質量移動(物質上昇・飛散)を伴う、火山噴火指数VEI(Newhall & Self, 1982)が4以上の大規模噴火のみに焦点を絞り、GRACEデータからの質量移動シグナル検出を試みる。

手法

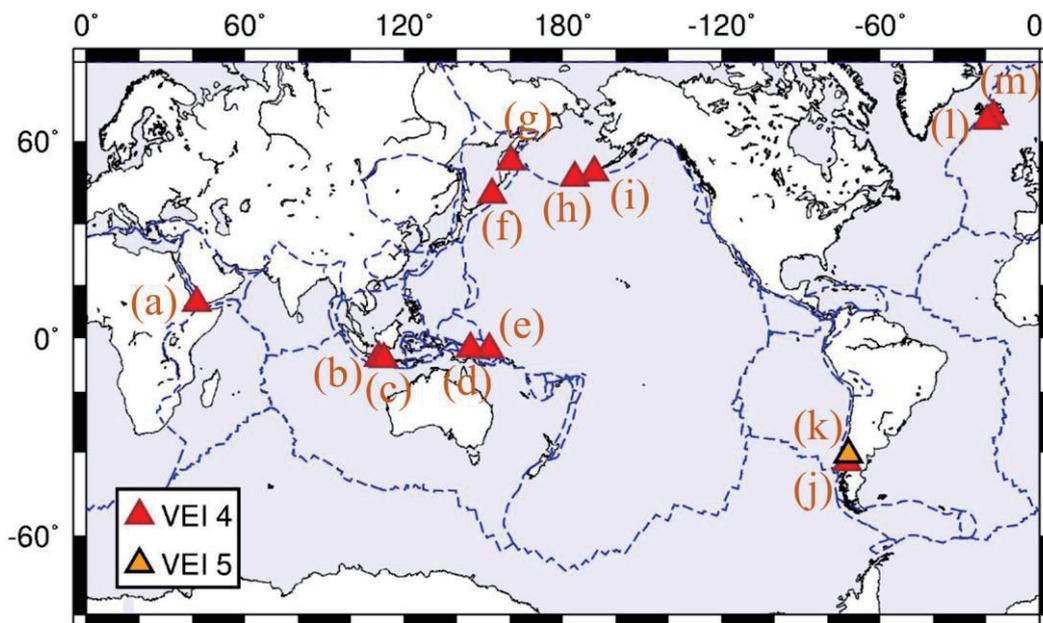
GRACEデータとして、フランスの研究機関French National Space Center / Research Group for Space Geodesy (CNES/GRGS)が公開するレベル3データ(RL05)を用いる。同データは、GRACEだけでなくSatellite Laser Ranging (SLR)のデータも組み合わせることで、球面調和関数90次までの重力場係数を推定している。この球面調和関数の重ね合わせによって、1か月ごと、緯度・経度1度ずつのグリッドごとの重力変化を、地表での水の層厚(水等価厚) h の変化として表してい

る。この値の意味は、近似的に次のように考えられる：厚さ h の無限平板からの万有引力 F を平板の上方で測定する場合、理論値 $2\pi G\rho h$ (G は万有引力定数、 ρ は平板を構成する物質の密度)を用いて、密度 $1000[\text{kg}/\text{m}^3]$ の水の層厚 $h[\text{cm}]$ に対して $F \cong 0.419h[\mu\text{gal}]$ と換算できる(福田, 2010)。

大規模火山噴火については、アメリカのSmithsonian InstitutionのGlobal Volcanism Program (GVP)のデータから、火山噴火指数VEIが4以上のものを選択した。これは、噴出物の体積が $0.1[\text{km}^3]$ を上回ることに相当する。期間は、GRACEデータの初期と末期を除いた分に対応するよう、2004年から2014年の間とした。Fig. 1に、選択された13の火山の分布を示す。また、Table 1に、それらの火山の位置・噴火開始時期・噴火終了時期をまとめた。VEI 5は一例(Puyehue -Cordon Caulle)のみで、残りの噴火はすべてVEI 4の規模だった。

噴火に伴う質量移動シグナルを調べるため、各火山の座標での噴火開始前・噴火終了後それぞれの時系列データに対して、線形成分・年周成分・半年周成分を最小二乗法で推定する回帰分析を行った。その上で、(1)噴火前後での重力の経年変動率(線形成分)の変化、(2)噴火前後の重力オフセットに注目する。重力オフセットは、噴火期間の中間時点における、噴火前データの線形成分の延長と噴火後データの線形成分の延長との差として定義した。

各々の解析に関して、エラーバーの推定も行った。経



(a) Nabro (b) Merapi (c) Kelut (d) Manam (e) Rabaul
 (f) Sarychev Peak (g) Tolbachik (h) Kasatochi (i) Okmok
 (j) Chaiten (k) Puyehue - Cordon Caulle (l) Eyjafjallajökull
 (m) Grimsvötn

図1 2004年から2014年の間にVEI 4以上の大規模噴火が発生した13の火山の分布。
 Fig. 1 Spatial distribution of 13 volcanoes with large eruptions (\geq VEI 4) during 2004-2014.

表1 2004年から2014年の間にVEI 4以上の大規模噴火が発生した火山と、その位置・噴火開始時期・噴火終了時期。

Table 1 Lists and coordinates of volcanoes with large eruptions (\geq VEI 4) during 2004-2014, and their eruption start/end times.

火山	経度[°]	緯度[°]	噴火開始 [年/月]	噴火終了 [年/月]
(d) Manam	145.037	-4.08	2004/10	2009/12
(e) Rabaul	152.203	-4.271	2006/8	2010/1
(j) Chaiten	-72.646	-42.833	2008/5	2011/5
(i) Okmok	-168.13	53.43	2008/7	2008/8
(h) Kasatochi	-175.508	52.177	2008/8	2008/8
(f) Sarychev Peak	153.2	48.092	2009/6	2009/7
(l) Eyjafjallajökull	-19.633	63.633	2010/3	2010/6
(b) Merapi	110.442	-7.542	2010/10	2012/7
(m) Grimsvötn	-17.316	64.416	2011/5	2011/5
(k) Puyehue - Cordon Caulle	-72.117	-40.59	2011/6	2012/4
(a) Nabro	41.7	13.37	2011/6	2012/6
(g) Tolbachik	160.326	55.832	2012/11	2013/9
(c) Kelut	112.308	-7.93	2014/2	2014/2

年変動率の変化については、経年変動率の95%信頼区間の大きさを噴火前後で推定し、その二乗平方根をエラーバーとした。オフセットについては、噴火期間の中間時点における、噴火前後のデータの線形成分の延長に対してそれぞれ95%信頼区間の大きさを推定し、その二乗平方根をエラーバーとした。

結果と議論

Fig. 2に、GRACEデータに基づく重力変化とその回帰分析結果の例を示す。(a) Nabroや(k) Puyehue - Cordon Caulleと比べ、(l) Eyjafjallajökullや(m) Grimsvötnでは、重力の経年変動率（線形成分）が噴火後に大きく変化していることがわかる。さらに、(l) Eyjafjallajökullでは、噴火による負の重力オフセットが明瞭に見られる。この他の火山での結果については、Appendixにまとめる。

EyjafjallajökullとGrimsvötnは共にアイスランドの火山である。アイスランドにおける上記の傾向は、先行研究によっても報告されており(von Hippel & Harig, 2019)、火山噴火と氷河の融解との関連が示唆されている。そもそもEyjafjallajökullという地名に付く「jökull」は、アイスランド語で氷河を意味する。Eyjafjallajökull火山は、名の通り氷河に覆われていたため、2010年の噴火時にも氷河湖決壊洪水を引き起こした。

アイスランドでは、火山噴火以前の1990年代後半から氷河の融解が続いていたことが知られており(Björnsson *et al.*, 2013)、GRACEデータでも重力の急速な減少トレンドが明瞭に捉えられている(Fig. 2)。これに加え、火山噴火による氷河システムの変動、具体的には熱的作用(高温物質の上昇・飛散に伴う氷河融解)や噴出物の影響(局地気候の擾乱)が、GRACEで検出されたものと考えられる。

Fig. 3とFig. 4では、噴火前後における重力の経年変動率の変化とオフセットを、13の火山についてまとめた。エラーバー(95%信頼区間)を考慮しても、アイスランドの(l) Eyjafjallajökullと(m) Grimsvötn噴火前後における、正の経年変動率変化(およそ $5\text{cm/yr} \cong 2\mu\text{gal/yr}$)は有意と言える。また、(l) Eyjafjallajökullの噴火に伴う負のオフセット(およそ $-8\text{cm} \cong -3\mu\text{gal}$)も有意である。一方で、アイスランドを除く11の火山噴火については、アイスランドの2火山と比べると、顕著なシグナルが見られなかった。特に、噴火規模としては最大の(k) Puyehue - Cordon Caulle(VEI 5)の場合にも顕著なシグナルが無いことは、火山噴火そのものに伴う質量移動(物質上昇・飛散)をGRACEデータから検出するのが現状困難なことを示唆する。この原因としては、GRACEの観測精度が十分でないということが考えられる。

ただし、アイスランドの2火山の噴火に伴うものの他

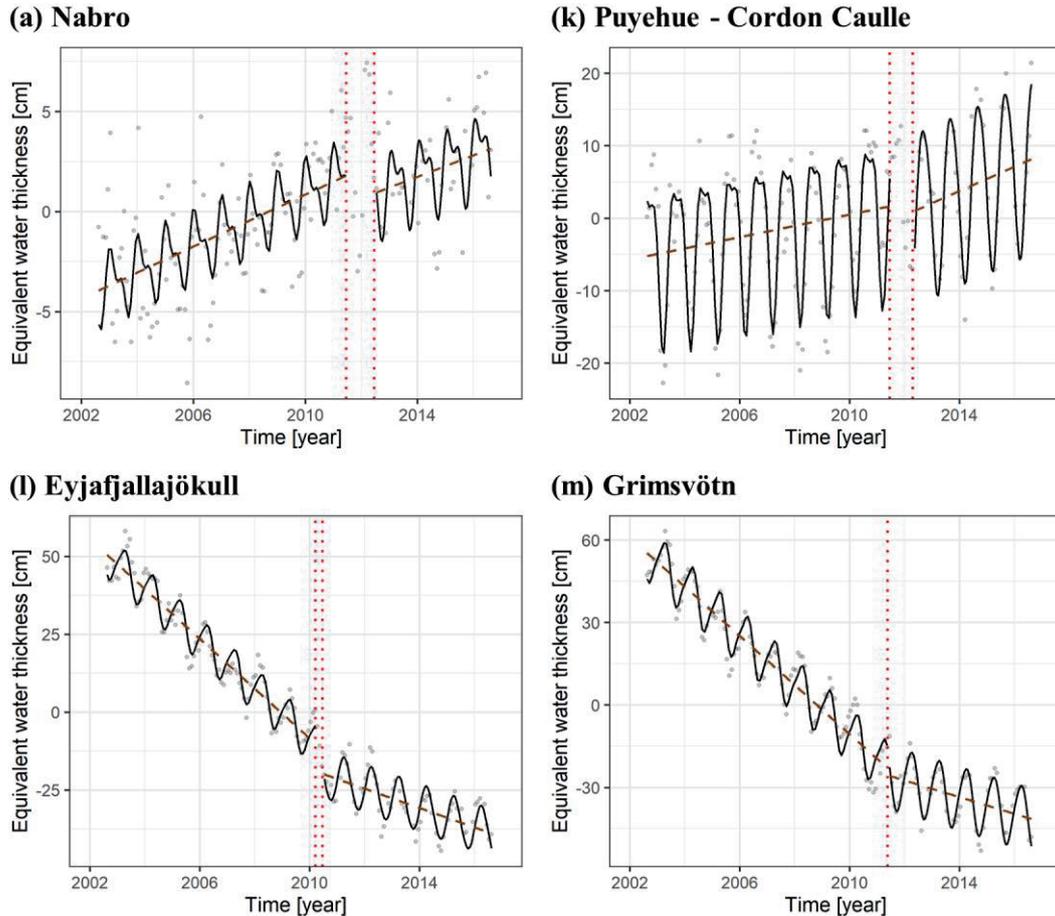


図2 重力変化の時系列データと回帰分析の例。灰色の点がGRACEデータ、黒色の線が回帰曲線、茶色の点線はその線形成分を表す。赤色の縦線は火山噴火の開始時期と終了時期を示す。

Fig. 2 Examples of the time-series data of the gravity change and the results of the regression analysis. For each figure, the gray dots represent the GRACE data, the black line is the regression curve, and the brown dotted line is its linear component. The red vertical lines indicate the start and end times of volcanic eruptions.

にも、顕著ではないが小さなシグナルが捉えられている点は興味深い。例えば、(f) Sarychev Peakについては、経年変動率変化・オフセットとも有意に正の値を取っている (Figs. 3 & 4)。特に、重力増大を意味する正のオフセット (およそ $4\text{cm} \cong 2\mu\text{gal}$) という点については解釈が難しいが、上昇した分の物質が噴火によって飛散しかなかった理由があるはずである。このような個別の火山の噴火様式について、人工衛星からの重力観測が今後重要なデータをもたらす可能性がある。

まとめ

衛星重力ミッションGRACEのデータに基づき、VEI 4以上の大規模噴火に伴う質量移動のシグナル検出を試みた。その結果、アイスランドの2つの火山 (EyjafjallajökullとGrimsvötn) で、顕著なシグナルが検出された。これは、噴火そのものに伴う質量移動 (物質上昇・飛散) というよりも、周囲の氷河システムの変動に起因すると考えられる。この他の火山でも、小さいが有意なシグナルは検出されているが、その解釈は難しい。

謝辞

石橋秀巳氏 (静岡大学理学部)、行竹洋平氏 (神奈川県温泉地学研究所) からは、原稿を改善するために有益なコメントをいただきました。感謝いたします。

引用文献

- Björnsson H., Pálsson F., Gudmundsson S., Magnússon E., Adalgeirsdóttir G., Jóhannesson T., *et al.* (2013), Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: trends and variability since the little ice age. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1546–1550.
- Chen J. L., Wilson C. R. & Tapley B. D. (2006), Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet. *Science*, **313**, 1958–1960.
- 福田洋一 (2010), 衛星・地上精密重力測定による地下水変動モニター. *In*: 谷口真人, (eds.) アジアの地下環境—残された地球環境問題—, 学報社, 115–154.

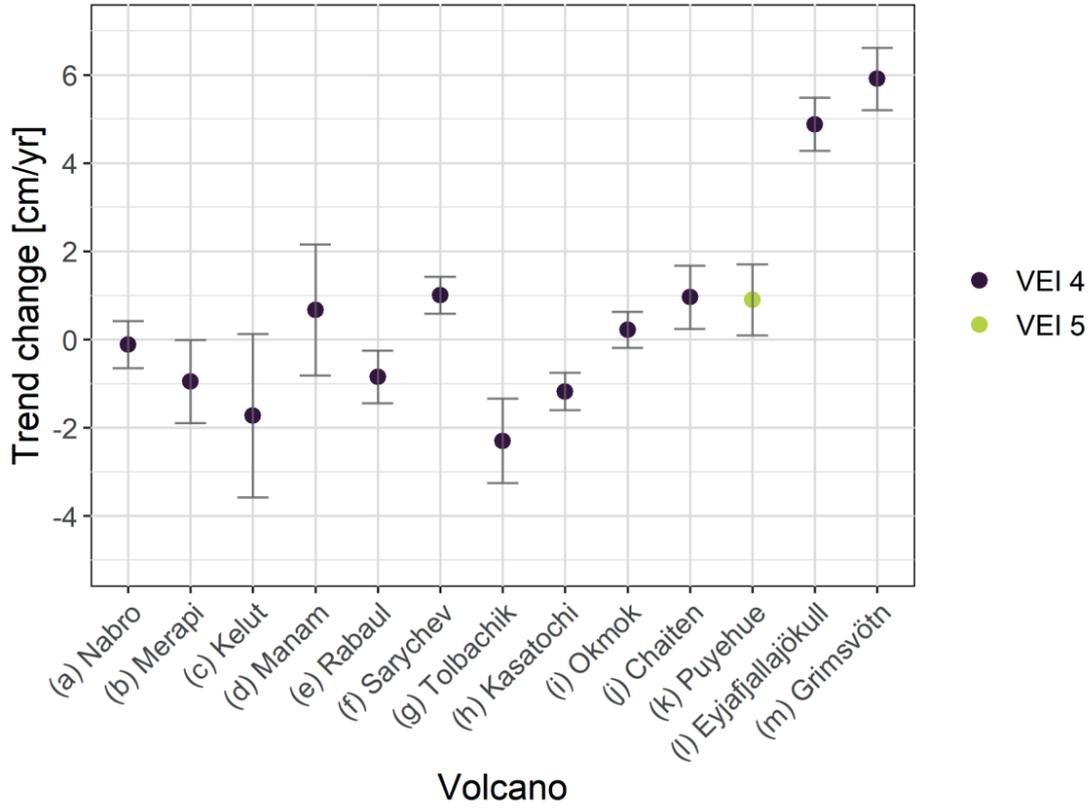


図3 噴火前後における重力の経年変動率（線形成分）の変化とその95%信頼区間.

Fig. 3 Changes in the linear trends of gravity before and after the eruption and their 95% confidence intervals.

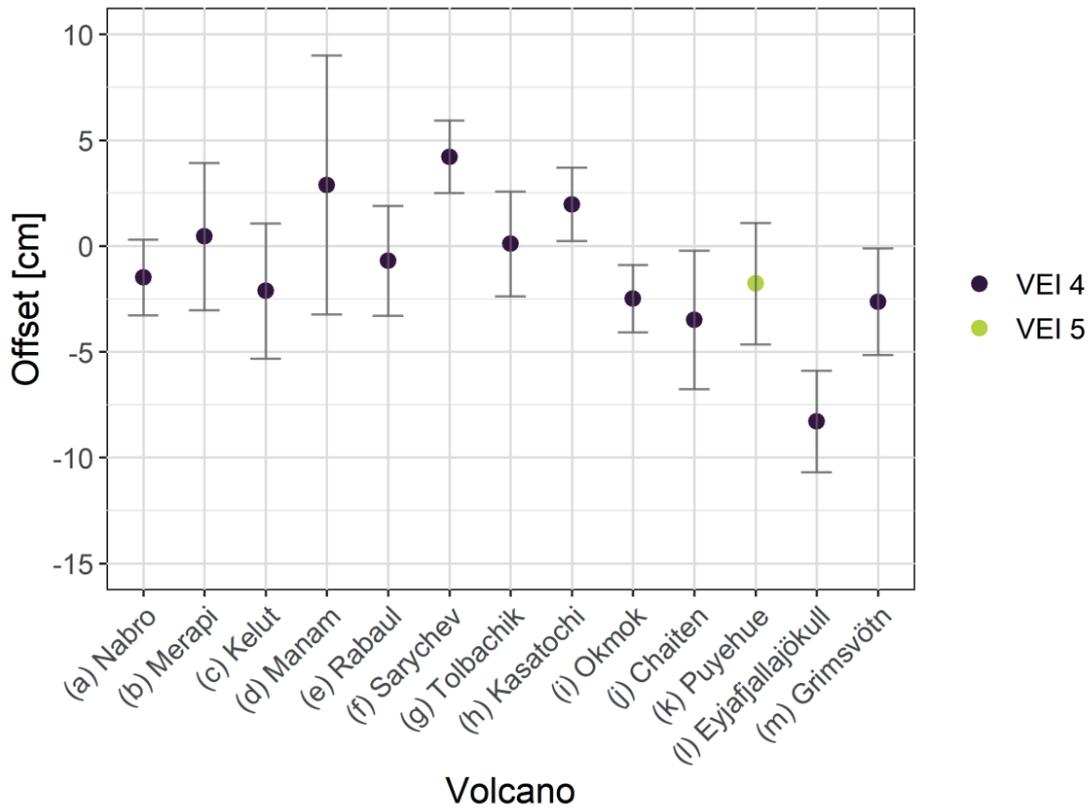


図4 噴火前後における重力オフセットとその95%信頼区間.

Fig. 4 Gravity offsets before and after the eruption and their 95% confidence intervals.

Han S.-C., Shum C. K., Bevis M., Ji C. & Kuo C.-Y. (2006), Crustal dilatation observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Science*, **313**, 658–662.

風間卓仁 (2019), 日本の火山地域における重力観測の現状と陸水擾乱問題. *火山*, **64**, 189–212.

Matsuo K. & Heki K. (2010), Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **290**, 30–36.

宗包浩志 (2013), 下から見た衛星重力ミッション GRACE. *測地学会誌*, **59**, 111–118.

Newhall C. G. & Self S. (1982), The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, **87**, 1231–1238.

田中優作・日置幸介 (2017), GRACE地震学. *地震*, **69**, 69–85.

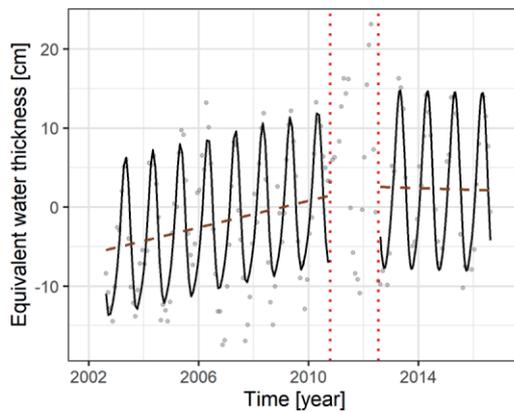
Tapley B. D., Bettadpur S., Ries J. C., Thompson P. F. & Watkins M. M. (2004), GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, **305**, 503–505.

von Hippel M. & Harig C. (2019), Long-term and inter-annual mass changes in the Iceland ice cap determined from GRACE gravity using Slepian functions. *Front. Earth Sci.*, **7**, 171.

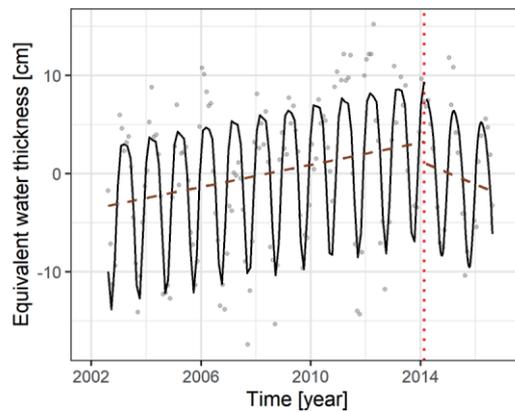
Willis J. K., Chambers D. P. & Nerem R. S. (2008), Assessing the globally averaged sea level budget on seasonal to interannual timescales. *J. Geophys. Res.*, **113**, C06015.

Appendix The time-series data of the gravity change and the results of the regression analysis, for the other volcanoes than those in Fig. 2. For each figure, the gray dots represent the GRACE data, the black line is the regression curve, and the brown dotted line is its linear component. The red vertical lines indicate the start and end times of volcanic eruptions.

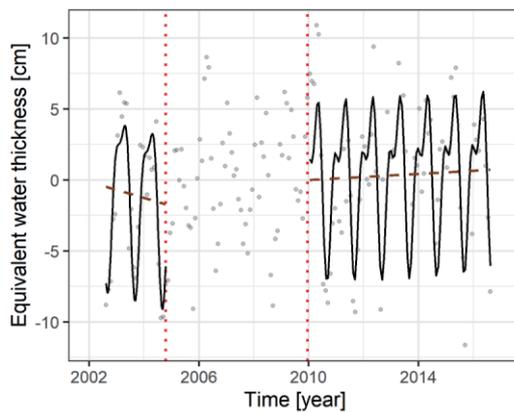
(b) Merapi



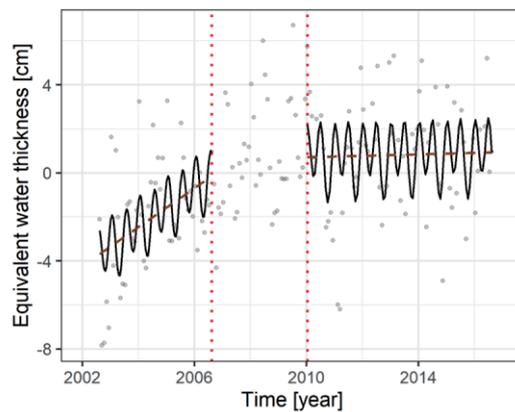
(c) Kelut



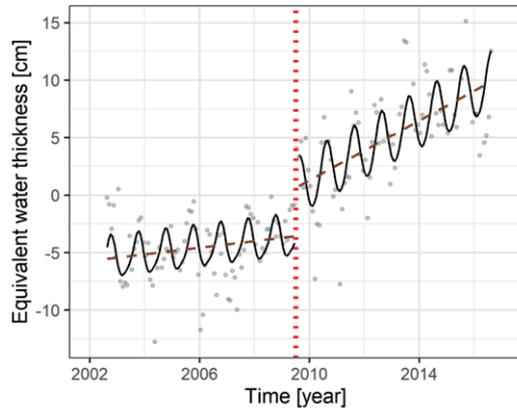
(d) Manam



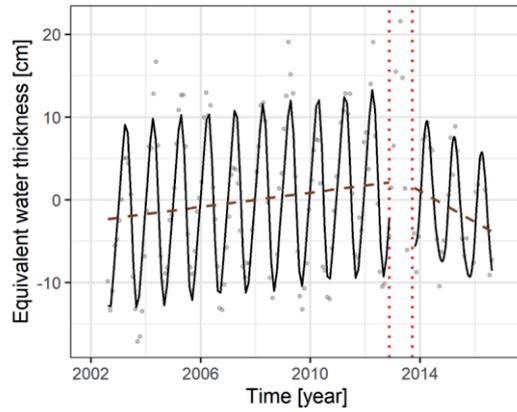
(e) Rabaul



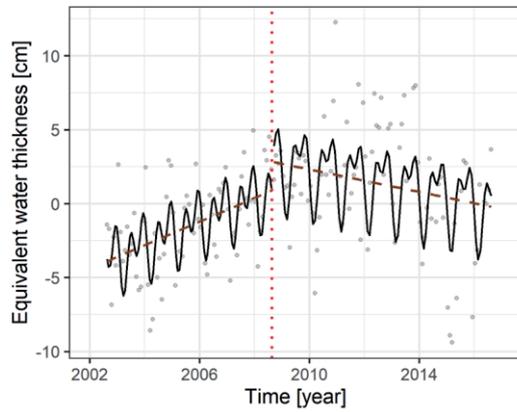
(f) Sarychev Peak



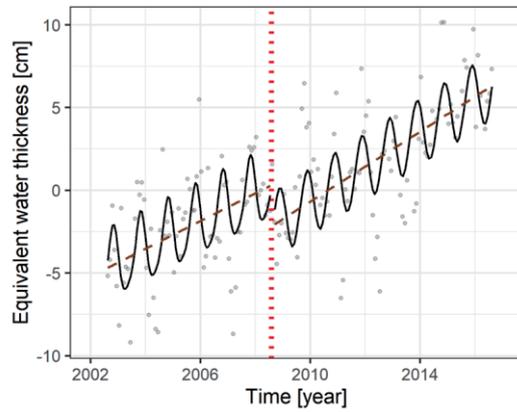
(g) Tolbachik



(h) Kasatochi



(i) Okmok



(j) Chaiten

