



Title	GNSS観測に基づく2016年熊本地震（M7.3）の余効変動時系列解析による九州地方の粘性構造の推定
Author(s)	不破，智志；大園，真子
Citation	北海道大学地球物理学研究報告，81，45-55
Issue Date	2018-03-19
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.81.45
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/68478
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
Type	departmental bulletin paper
File Information	GBHU_81_p45-.pdf



GNSS 観測に基づく 2016 年熊本地震 (M7.3) の余効変動時系列解析 による九州地方の粘性構造の推定

不破 智志・大園 真子

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

(2018 年 2 月 16 日受理)

Viscosity distribution beneath the Kyushu Island estimated by GNSS postseismic time series of the 2016 Kumamoto earthquake (M7.3)

Satoshi FUWA, Mako OHZONO

Institute of Seismology and Volcanology, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received February 16, 2018)

In order to investigate the viscosity distribution beneath the Kyushu Island, we analyzed postseismic time series of Global Navigation Satellite System induced by the 2016 Kumamoto earthquake (M7.3). For the ~ 1.5 years of daily coordinates at 135 GEONET stations, we fitted theoretical time evolutions with two approaches. (1) Assuming that the first 50-days is dominated by the afterslip, we applied both of logarithmic and exponential functions. For the estimation, we firstly found the appropriate common time decay constants for the afterslip (0.996 days), then estimated other parameters. (2) Ignoring first rapid afterslip signals, we fitted only exponential function for the time series after 50-days. As a result, both approaches indicate 10^{17} – 10^{20} Pa s of viscosity in the Kyushu Island. Especially, low viscosity of $\sim 10^{18}$ Pa s was obtained around the central region of Kyushu. This corresponds to the location of low viscosity in the lower crust. Therefore, the estimated viscosity distribution is probably affected by the beneath of the viscoelastic structure through the lower crust to the surface.

I. は じ め に

2016 年 4 月に発生した熊本地震の一連の活動は、14 日 21 時 26 分の前震 (M6.5) に始まり、16 日 1 時 25 分には本震となる M7.3 の地震を発生した。本震の震源断層は布田川・日奈久断層帯に沿った南東側の隆起を伴う右横ずれ断層で (例えば, Lin et al., 2016), 本震後も震源断層周辺やその延長上で余震活動が継続している (気象庁, 2018)。また, 国土地理院によって全国に展開されている全地球航法衛星システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) の連続観測網



GEONET や合成開口レーダーの観測からは、震源域周辺で地震時に最大約 1 m の水平地殻変動が観測されており、それらを説明するための震源断層モデルが推定されている（例えば、Ozawa et al., 2016; Himematsu and Furuya, 2016）。

本震後、地殻変動観測からは九州の広い範囲において余効変動とみられる地殻変動が記録されている（Moore et al., 2016; Pollitz et al., 2017）。この余効変動の主な発生要因は震源断層延長部が非地震性すべりを発生する余効すべり、地震時の応力の擾乱に対して下部地殻および上部マントルが流動的に応答する粘弾性緩和、震源断層周辺の間隙水圧変化に伴う間隙弾性反発が挙げられる。このうち本研究で注目する粘弾性緩和は、地下の粘性構造が地表変位に影響を与えるため、観測から得られる地表の余効変動場から地下のレオロジー特性を推定する試みがなされている。

粘弾性緩和モデルは、水平成層構造を仮定した Wang et al. (2006) や Fukahata and Matsu'ura (2006)、球面成層構造を仮定した Pollitz (1997) などがその構造の粘弾性応答から地表変位場を説明する。一方で、より現実的な地下構造を反映するべく、より複雑化されたモデル（例えば、Pollitz et al., 2015）や有限要素法を用いたモデル化（Suito and Hirahara, 1999 など多数）も提案され、世界各地で発生した大地震に伴う余効変動の説明とそのレオロジー特性の推定が試みられている。

余効変動の時系列解析においては、それぞれのメカニズムから、対数関数的な時間発展を示す余効すべりと指数関数的な時間発展を示す粘弾性緩和で各要因に伴う変動をモデル化することが可能である。しかし、実際にどの要因がどれほど時系列に寄与するのかを分離するのは難しい。例えば、Tobita (2016) は対数関数と 2 つの指数関数を組み合わせることにより 2011 年東北地方太平洋沖地震の余効変動時系列を説明している。また加えて、指数関数の緩和時間が得られれば、剛性率をある程度仮定することでその地域における実効粘性率を推定することも可能である（山口・西松, 1969）。

2016 年熊本地震の余効変動については Pollitz et al. (2017) により、余効すべり域の推定、粘弾性構造の分布の把握が行われており、得られた九州中央域の下部地殻における低粘性領域は高温の岩石の存在と火山地帯における部分熔融メルトの存在との関係性が指摘されている。一方、熊本地震の余効変動について時系列解析を詳細に行った報告はない。したがって本研究では、2016 年熊本地震で発生した余効変動の時系列解析に着目する。GEONET の GNSS 観測データから得られる約 1.5 年間の余効変動時系列から粘弾性緩和のシグナルを抽出し、九州各地での実効粘性率の値とその分布を求めることを目的とする。

II. 余効変動時系列データの作成

熊本地震発生後の余効変動時系列データを作成する。本研究では、国土地理院が提供する GEONET の日座標値（F3 解、中川・他, 2009）を用いた。対象領域は九州本土全域および天草諸島の上島、下島を含めた地域とし、計 135 の観測点について、2013 年 1 月 1 日から 2017 年 9 月

11 日までの水平成分（東西，南北成分）を使用した．観測点分布を Fig. 1 に示す．地震後に観測される地殻変動には余効変動シグナルに加え，プレート運動などの定常変動が合わせて含まれている．従って，まずは得られた観測時系列から定常変動成分を取り除いて，余効変動シグナルを抽出する作業を行う．

日座標時系列は，対象領域と同じアムールプレート上にあり，該当期間内に外的な要因による影響を受けていないと判断できた島根県浜田市の三隅 (ID: 0388) に対するものに変換し，広域的な共通誤差成分を取り除く．次に機器の保守等による人為的ステップを，国土地理院が公開する電子基準点保守作業リスト (http://terras.gsi.go.jp/denshi_hosyu.php) を元に取り除いた．地震前の期間 (2013 年 1 月 1 日 - 2016 年 4 月 14 日) の時系列に対し，時刻 t 年における定常変動量 $f(t)$ を Heki (2001) にならって以下の線形の変動成分および年周，半年周の変動でモデル化する．

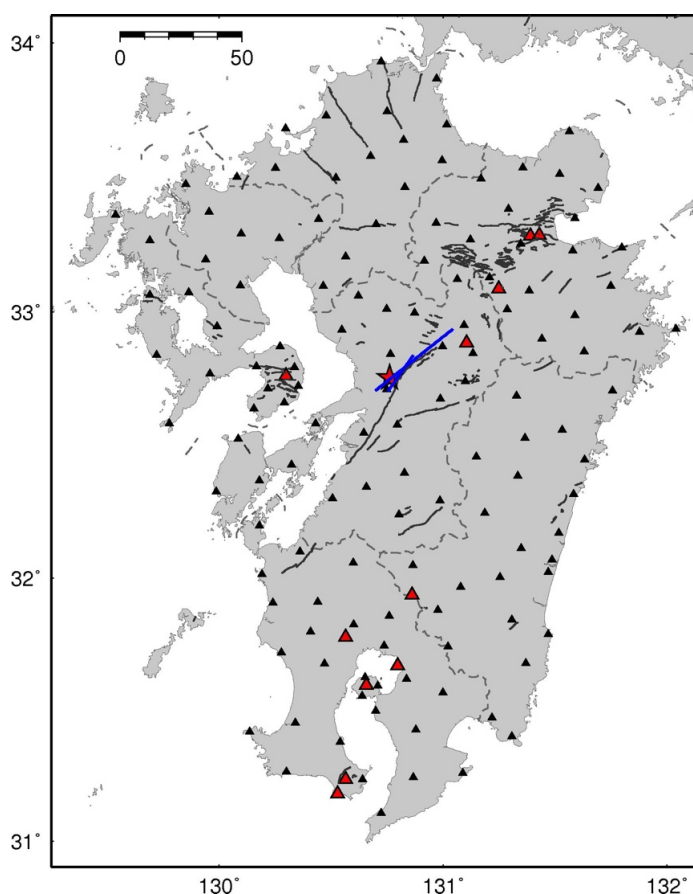


Fig. 1. Distribution of GNSS network in Kyushu Island. Black triangles indicate GNSS station used in this study. Red star is epicenter of mainshock (Japan Meteorological Agency, 2018). Blue lines are coseismic faults estimated by Himematsu and Furuya (2016) along the Futagawa and Hinagu fault. Red triangles indicate the location of active volcanoes. Solid black lines are active fault (Nakata and Imaizumi, 2002). Dashed black lines are prefectural borders.

$$f(t) = at + b + c \sin(2\pi t) + d \cos(2\pi t) + e \sin(4\pi t) + f \cos(4\pi t) \quad (1)$$

(1)式の右辺 a および b はそれぞれ線形トレンドの傾きと切片, c および d は年周変動, e および f は半年周変動に関するパラメーターである. これら a, b, c, d, e, f を観測点, 各成分に対し非線形最小二乗法で求めた. なおここでは近似手法における初期値依存性を避けるため, 試行錯誤的に初期値を変更しながら計算を行って最適値を求めた.

余効変動時系列は, このモデル化した地震前の定常変動の理論時系列を観測時系列から差し引くことで作成される. Fig. 2 にこの余効変動時系列から得られた地震後約 500 日 (2017 年 9 月 9 日まで) の累積変動場を示す. 震源域を中心に, 最大約 6 cm の地殻変動が検出され, 余効変動シグナルを抽出できていることが確認できる. 本研究では, この作業で得た水平 2 成分をまとめて水平 1 成分の観測時系列を解析に使用する.

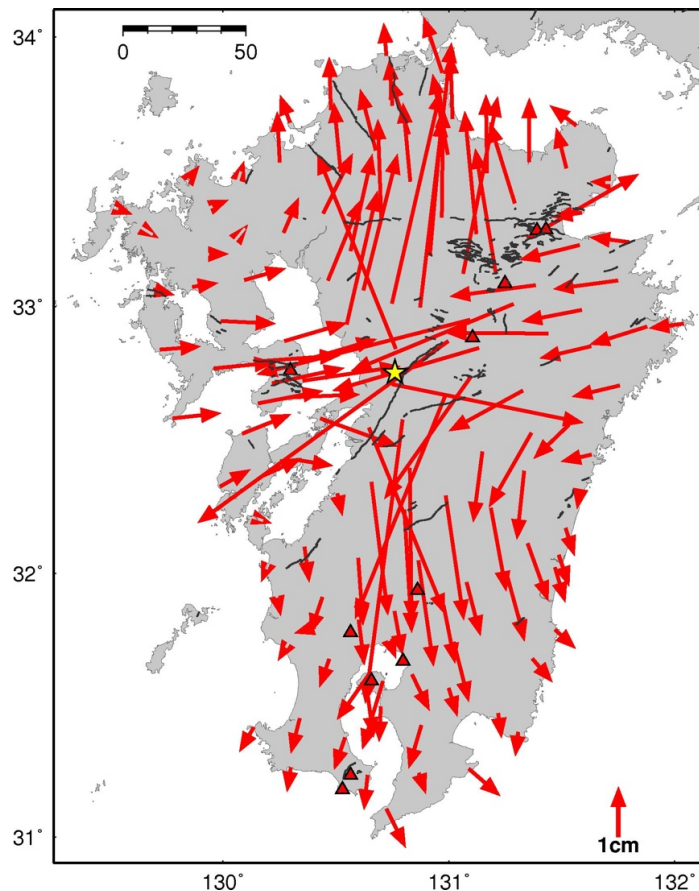


Fig. 2. Cumulative postseismic deformation for about 500 days (until September 9, 2017) observed by GNSS network in Kyushu island. Red arrows indicate postseismic displacement. Other symbols are same as in Fig. 1.

Ⅲ. 時系列解析とその結果

余効変動時系列から粘弾性緩和に起因するシグナルを抽出する．ここでは理論的な各シグナルの時間発展に基づいて余効変動時系列から余効すべりによる変動と粘弾性緩和による変動を分離する．本研究では余効すべりの発生は粘弾性緩和よりも比較的時間スケールが短く，震源断層周辺でのシグナルが大きくなる特徴を利用する．熊本地震における余効すべりは地震発生直後に集中して発生していることから (Pollitz *et al.*, 2017)，ここでは少なくとも地震発生後初期 50 日間の余効変動時系列が余効すべりによるものと仮定してそのシグナルを見積もる．またその推定結果を利用して，粘弾性緩和のシグナルの抽出を試みた．

余効すべりの時系列近似

余効すべりは，一般的に数日から数年の継続時間を持ち，その時間発展 $u_a(t)$ は，すべりの速度・状態摩擦構成則より以下の理論式が提唱されている (Marone *et al.*, 1991)．

$$u_a(t) = A \ln\left(1 + \frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

ここで t は地震発生からの経過時刻 (日)， A は振幅を表す． τ は時定数であり，継続時間の尺度となる．余効すべりはその発生メカニズムから，震源域周辺で発生する 1 つの現象と仮定することができる．従って本研究でも，全点共通の 1 つの時定数 τ' を決定することにする．まずは各点それぞれの余効変動時系列の初期 50 日間に対し，(2) 式を近似して A ， τ を求めた．得られたパラメータの値の空間分布をそれぞれ Fig. 3a および Fig. 3b に示す．なお，近似ができず，パラメータを推定できなかった点は白抜きとしている．また，求めた τ の頻度分布を Fig. 3c に示す．Fig. 3c で示すように，時定数の値は τ が 5 以下となるところに度数が集中している．したがってこの範囲から共通の時定数 τ' を絞り込む．また，余効変動シグナルが確実に現れているものから統一した時定数を決定したいため，地震後 50 日間の累積余効変動が 0.5 cm 以上を観測している観測点の τ のみを採用し，それらの平均から τ' を求めた．その結果として τ' は 0.996 となった．

この共通の時定数 τ' を用いて，再度 Marone *et al.* (1991) による理論式を余効変動時系列に近似し，振幅 A を求めた．Fig. 4 に長陽 (ID: 0701) の観測時系列の近似例を示す．得られた理論時系列を緑線で，理論時系列と余効変動時系列との残差を緑丸で示す．また，この解析によって求められた振幅 A の分布を Fig. 5 に示す．Fig. 5 の結果より震源周辺においては振幅 A が大きくなるのが分かる，これは観測された余効変動に対する余効すべりの寄与が震源に近いほど大きくなることを示している．一方で Fig. 4 より，地震後 50 日間の期間では残差時系列が非常に小さな値を示していることから，余効変動初期の余効変動時系列は余効すべりを仮定した理論時系列により説明できると考えられる．しかし一方で，地震後 50 日以降の余効変動時系列に対しては理論時系列と余効変動時系列に残差が生じる．これは，本震直後は余効すべりによる変動が卓越していたが，

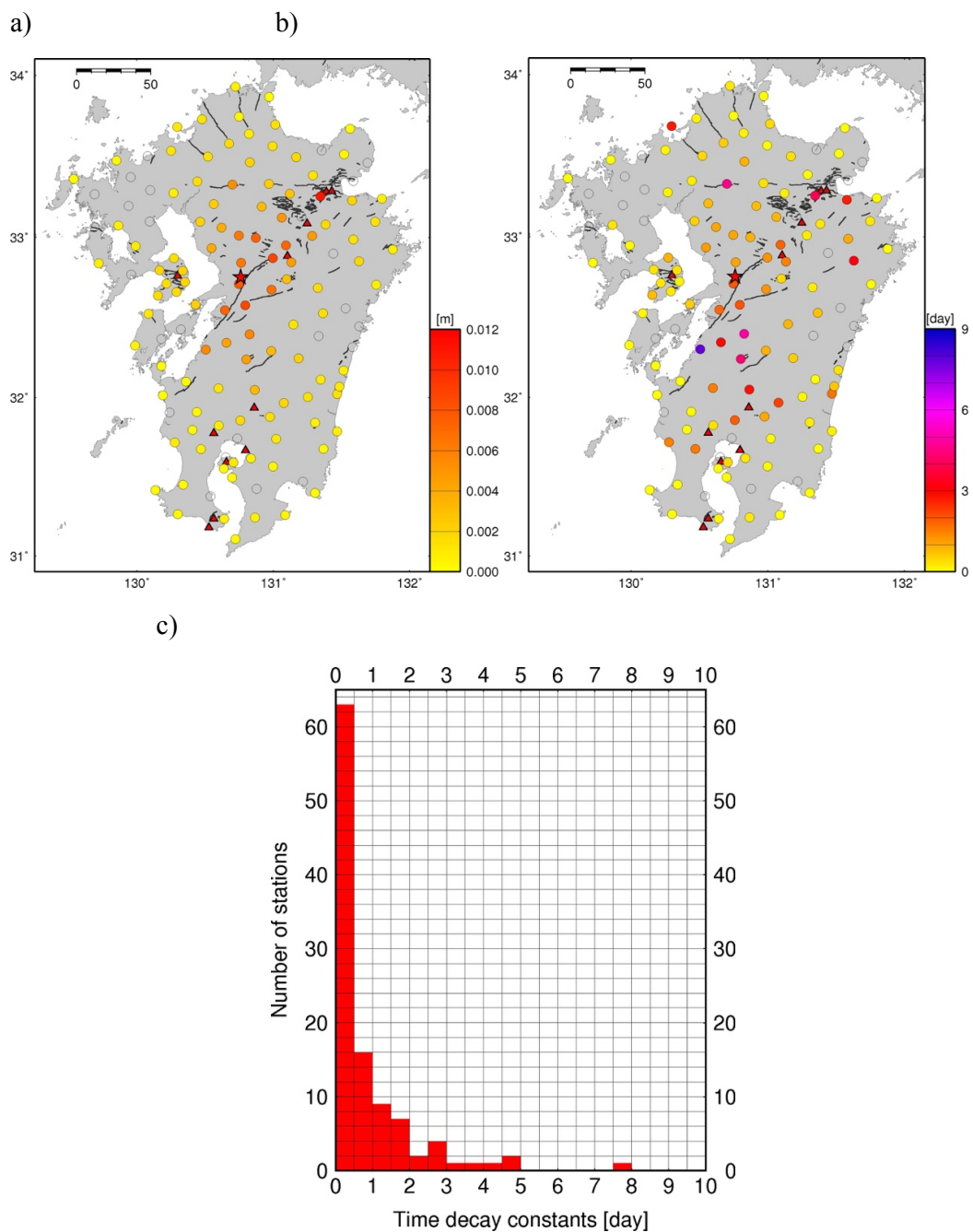


Fig. 3. a) Estimated amplitude by the fitting of logarithmic function (formula 2). Open circles indicate the station which was not estimated its value. b) Calculated time decay constants. c) Histogram of the calculated time decay constants of each station.

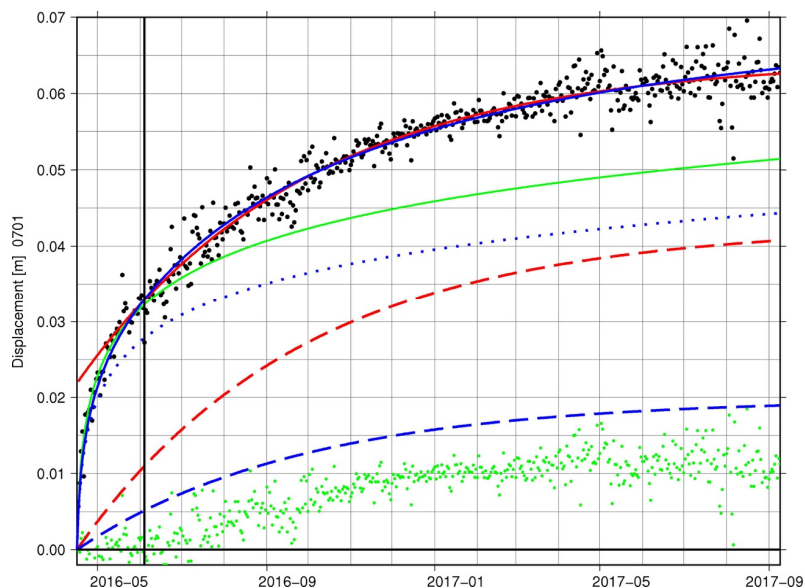


Fig. 4. Example of postseismic time series at Choyo (ID: 0701). Vertical solid line shows the 50-days form the main shock. Each lines indicate as follows: Black dots — observed postseismic daily position, green solid line — theoretical model of logarithmic function for the first 50-days fitting ($u_a(t)$, formula 2), green dots — residuals of logarithmic fitting, blue solid line — theoretical model of summation of logarithmic and exponential functions ($u(t)$, formula 3), blue dashed line — exponential component of formula 3, blue dot line — logarithmic component of formula 3, red solid and dashed — theoretical model of exponential model ($u_v(t)$, formula 4, intercept is eliminated in the dashed line).

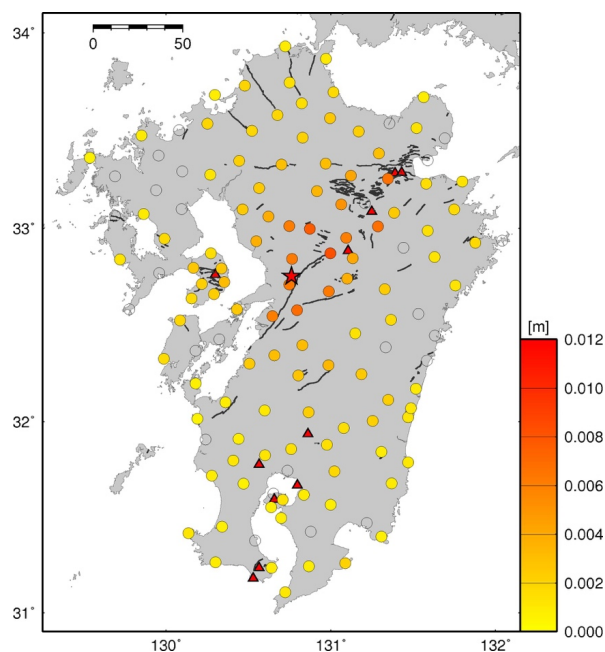


Fig. 5. Calculated Amplitude by re-fitting log model with 0.996 of the time constant in Kyushu island.

時間の経過と共に余効すべりが落ち着きはじめ、余効すべりよりも長期的にシグナルを生じる粘弾性緩和による変動が捉えられ始めたためであると考えられる。

粘弾性緩和の時系列近似

上述の通り、余効変動初期は余効すべりの寄与が大きいと仮定すると、その近似結果は、後半になるにつれどの観測点でも観測時系列と理論時系列との間に残差が生じる。本研究ではこの残差を粘弾性緩和の発生による影響と仮定する。各観測点における粘弾性緩和の効果を評価するために、次の2つの方法を用いて粘弾性緩和に関するパラメータ推定を行った。1つは余効変動時系列に対して、前節で推定した時定数 τ' を用いた余効すべりの理論式と粘弾性緩和の理論式、両方の時間発展を仮定した時系列近似によるもの、もう1つは地震発生後初期50日間を無視した時系列に対し、粘弾性緩和のみの時間発展を仮定した理論式の近似によるものである。

まずは1つ目の余効すべりと粘弾性緩和の理論式の両方を考慮した理論式の近似を行う。粘弾性緩和の理論式には Maxwell 粘弾性体を仮定した場合の指数関数的時間発展を用いる (Shen *et al.*, 1994)。(2)式と合わせて、経過時刻 t 日における余効変動量 $u(t)$ を以下に示す。

$$u(t) = A' \ln\left(1 + \frac{t}{0.996}\right) + E \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right) \right\} \quad (3)$$

右辺第1項は余効すべりの時間発展を示す(2)式からなる。時定数は前節で求めた共通の時定数 τ' である 0.996 を使用した。 A' は振幅で近似により推定される。右辺第2項は粘性緩和の時間発展を示す。 E は振幅、 τ_v は緩和時間で、これらはいずれも近似によって求められるパラメータである。長陽 (ID: 0701) における近似結果の時系列の例を Fig. 4 に示す。得られた理論時系列を青線で、余効すべり成分の理論時系列を青の点線で粘弾性緩和成分の理論時系列を青の破線で示す。

次に2つ目の余効変動時系列に対して粘弾性緩和のみを考慮した理論式の近似による推定を行う。余効すべりは地震発生直後に集中して発生している (Pollitz *et al.*, 2017)。したがって、ここでは地震発生後50日以降の余効変動時系列には余効すべりによる変動がほぼ含まれていないと仮定し、粘弾性緩和の理論式のみで近似を行う。経過時刻 t 日における粘弾性緩和による余効変動量 $u_v(t)$ は(3)式の右辺第2項およびその切片 C を用いて、以下式で表される。

$$u_v(t) = E \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right) \right\} + C \quad (4)$$

振幅 E 、緩和時間 τ_v および切片 C を未知数として、これらのパラメータを推定する。長陽 (ID: 0701) における近似結果の時系列の例を Fig. 4 に示す。得られた理論時系列を赤線で、比較の為に理論時系列から切片 C を引いた時系列を赤の破線で示す。Fig. 4 において2通りの解析で得られた粘弾性緩和の理論時系列を比較すると、期間の終わりの部分では余効すべりを含めて解析した結果は、粘弾性緩和のみを考慮した結果に比べ累積の変動量がおよそ2 cm 小さかった。他の観測点におい

でも同様の傾向が認められた。これは余効すべりを含めた解析において、粘弾性緩和による変動成分を過小評価している為、あるいは粘弾性緩和のみを考慮した解析において粘弾性緩和による変動成分を余効すべり成分も含めてしまうことで過大評価している為であると考えられる。

IV. 各観測点における粘性率に関する考察

近似手法の違いによる比較

余効変動時系列の 2 通りの近似で得られた緩和時間 τ_v を使って、各点での粘性率を求める。仮定した Maxwell 物体の粘弾性緩和について、剛性率 μ と粘性率 η から $\tau_v = \eta / \mu$ が成り立つ (山口・西松, 1969)。ここでは剛性率の値を 30 GPa と仮定した。2 つの手法を用いて求められた各地域における粘性率 η の値を Fig. 6 に示す。多くの観測点で 10^{17} – 10^{20} Pa s の粘性率の値が得られた。余効すべりを含む近似から得られた粘性率 (Fig. 6a) の方が、粘弾性緩和の影響のみを考慮したもの (Fig. 6b) よりも平均値で 2.54 倍、中央値で 1.30 倍大きく見積もられる結果となった。一方で熊本地震の余効すべりは地震発生後初期の 0.25 年ではほぼ収束していることから (Pollitz et al., 2017)、本研究で余効すべりを考慮した解析で得られた結果は粘弾性緩和による変動を過小評価し、後半の時系列においても余効すべりを過大評価していると考えられる。この結果、粘弾性緩和の緩和時間が見かけ上大きくなるために、粘性率も過大に見積もられた可能性が高い。いずれに

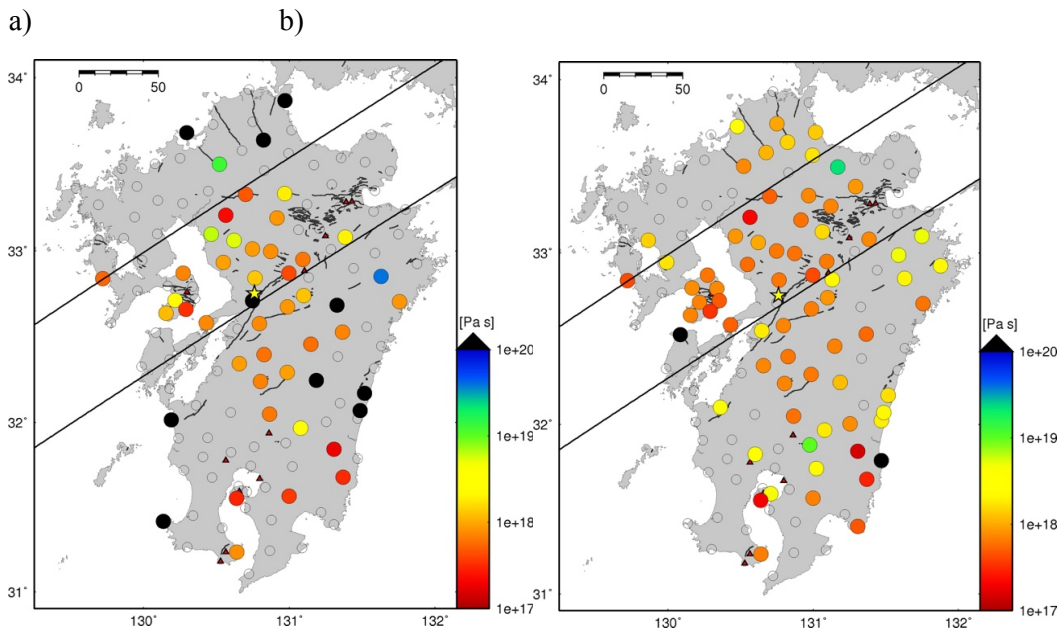


Fig. 6. Calculated viscosity assumed afterslip and viscoelastic relaxation in Kyushu island. Black lines divide into Northern Kyushu zone, Central Kyushu zone and Southern Kyushu zone. a) Viscosity estimated by first method (formula 3). b) Viscosity estimated by second method (formula 4).

せよ余効変動初期の余効すべりを考慮する、または無視することで粘弾性緩和シグナルを定量的に推定することができた。また、それらによって求めた粘性率は桁を超える違いはないため、これらに大差はないと判断できる。

粘性率の空間分布

本研究では 10^{17} – 10^{20} Pa s の範囲で粘性率が得られた観測点において中央値で九州北西域では 1.35×10^{18} Pa s, 九州中央域では 6.78×10^{17} Pa s, 九州南東域で 8.08×10^{17} Pa s の粘性率が得られ、九州中央域で相対的に低い粘性率が得られる結果となった。この結果は、先行研究で得られている傾向と比較して矛盾しない。例えば、Pollitz *et al.* (2017) では地殻熱流量の分布を基に九州地方を3分割し、それぞれ2次元の成層構造を仮定し、余効変動場を説明するための粘弾性構造を求めている。その結果九州中央域では下部地殻において 1.4×10^{18} Pa s となり、他の地域と比べて低粘性の傾向が指摘されており、高温の岩石の存在と火山地帯における部分熔融メルトの存在との関係性が示唆されている。粘性率の絶対値は異なるが、先行研究とは異なる手法によっても九州中央域で低粘性となるような結果が得られたことから、九州中央域では表層から下部地殻までの粘性構造が余効変動に影響を与えた可能性が高い。2つの異なる手法で得られた粘性率の絶対値の差については今後より検証が必要であると考えられる。本研究の対象期間では粘弾性緩和は完全には収束しておらず今後、対象期間を延長して解析を行うことにより大きな緩和時間が見積もられた場合、本研究で得られた粘性率の値は大きくなることが予想される。

本研究では、粘性率を推定する際に剛性率 μ を 30 GPa と仮定した。実際の不均質構造によっては、この値の分布についても考慮される必要があるかもしれない。今後、他の地下構造に関する特徴を考慮しつつ、より詳細を検討していく必要がある。

V. ま と め

本研究では2016年熊本地震の余効変動について、時系列解析から粘弾性緩和のシグナルを定量的に捉えることにより、九州各地での実効的な粘性率の分布を求めた。本震後およそ1.5年間に観測された余効変動時系列に対して、対数関数と指数関数を用いた2通りの解析を行い、各点における粘性率はいずれも 10^{17} – 10^{20} Pa s となった。2通りの手法から求めた粘性率の値は粘弾性緩和のみを考慮した解析結果に比べ余効すべりを考慮した解析結果はおおよそ1.30倍となった。得られた粘性率の分布は先行研究で得られているものとおおよそ一致する。先行研究において求められた下部地殻における低粘性領域が指摘されている九州中央域と対応する観測点において 10^{17} Pa s 程度の他の領域と比べ低い粘性率の値が得られた。これは表層から下部地殻における粘性構造が各観測点における粘弾性緩和の現れ方に影響を与えた可能性がある。

文 献

- Fukahata, Y., and M. Matsu'ura, 2006. Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem, *Geophysical Journal International*, 166(1), 418-434, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.02921.x.
- Himematsu, Y., and M. Furuya, 2016. Fault source model for the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 pixel-offset data: evidence for dynamic slip partitioning, *Earth Planets Space*, 68(1), 169, doi:10.1186/s40623-016-0545-7.
- Heki K., 2001. Seasonal modulation of interseismic strain buildup in northeastern Japan driven by snow loads, *Science*, 293, 89-92, doi:10.1126/science.1061056.
- 気象庁, 2018. 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震について, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2016_04_14_kumamoto/index.html.
- Lin, A., T. Satsukawa, M. Wang, Z. Asl, R. Fueta, and F. Nakajima, 2016. Coseismic rupturing stopped by Aso volcano during the 2016 Mw 7.1 Kumamoto earthquake, Japan, *Science*, 354(6314), 869-874, doi:10.1126/science.aah4629.
- Marone, C., Scholtz, and R. Bilham, 1991. On the mechanics of earthquake afterslip, *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 1978 2012, 96(B5), 8441-8452, doi:10.1029/91jb00275.
- Moore, J., H. Yu, C-H. Tang, T. Wang, S. Barbot, D. Peng, S. Masuti, J. Dauwels, Y-J. Hsu, V. Lambert, P. Nanjundiah, S. Wei, E. Lindsey, L. Feng, B. Shibazaki, 2017. Imaging the distribution of transient viscosity after the 2016 Mw 7.1 Kumamoto earthquake, *Science*, 356(6334), 163-167, doi:10.1126/science.aal3422.
- 中川弘之, 豊福隆史, 小谷京湖, 宮原伐折羅, 岩下知真子, 川元智司, 畑中雄樹, 宗包浩志, 石本正芳, 湯通堂亨, 石倉信広, 菅原安宏, 2009. GPS 連続観測システム (GEONET) の新しい解析戦略 (第 4 版) によるルーチン解析システムの構築について, 国土地理院時報, 122, 39-46
- 中田高, 今泉俊文, 2002. 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会
- Ozawa, T., E. Fujita, and H. Ueda, 2016. Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano, *Earth Planets Space*, 68(1), 186, doi:10.1186/s40623-016-0563-5.
- Pollitz, F., 1997. Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 102(B8), 17921-17941, doi:10.1029/97JB01277.
- Pollitz, F., 2015. Postearthquake relaxation evidence for laterally variable viscoelastic structure and water content in the Southern California mantle, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 120(4), 2672-2696, doi:10.1002/2014JB011603.
- Pollitz, F., T. Kobayashi, H. Yari, B. Shibazaki, and T. Matsumoto, 2017. Viscoelastic lower crust and mantle relaxation following the 14-16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake sequence, *Geophysical Research Letters*, 44(17), 8795-8803, doi:10.1002/2017GL074783.
- Shen Z-K., D. D. Jackson, Y. Feng, M. Cline, M. Kim, P. Fng, and Y. Bock, 1994. Postseismic deformation following the Landers earthquake, California, 28 June 1992, *Bull., Seis., Soc., Am.*, 84(3), 780-791, .
- Suito, H., and K. Hirahara, 1999. Simulation of postseismic deformations caused by the 1896 Riku - u Earthquake, northeast Japan: Re - evaluation of the viscosity in the upper mantle, *Geophysical Research Letters*, 26(16), 2561-2564, doi:10.1029/1999GL900551
- Tobita, M., 2016. Combined logarithmic and exponential function model for fitting postseismic GNSS time series after 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth Planets Space*, 68(1), 41, doi:10.1186/s40623-016-0422-4.
- Wang, R., F. Lorenzo-Martín, and F. Roth, 2006. PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, *Computer Geosciences*, 32(4), 527-541, doi:10.1016/j.cageo.2005.08.006
- 山口梅太郎, 西松祐一, 1969. 岩石力学入門, 41pp., 東京大学出版会