

熊本地震とその後の水圧および応力変化について

東濃地震科学研究所 佐野 修

1. はじめに

東濃地震科学研究所で開発されたボアホール設置型応力計はモルタルを介して岩盤と接触するセンサ端部に加えた圧力で較正されているので、センサ出力電圧は応力に換算できる(例えば Ishii and Asai, 2015). しかし換算された応力は、ボアホールを含む岩盤、モルタルおよびステンレス管からなる不均質異種媒体の応力センサ内の応力である。ボアホールを利用した地殻応力測定については多数の文献(例えば佐野[2005]; Sano et al. [2005])による解説があるが、その解説内容を簡単にまとめると、一般論として、岩盤内のボアホールに応力計をモルタルで固定するシステムでは、応力センサ、モルタルおよび岩盤に生じる応力は不均質であり、たがいに等しくない。応力センサ内の応力値を観測値として、いわゆる地殻応力、すなわち岩盤に生じる応力を知るためには、ボアホールから十分遠く離れた遠方の応力場を未知数とした観測方程式を解く必要がある。解析原理はすでに報告済みのとおりである[佐野ほか, 2015, 2016, 2017, 2018].

地震が発生すると、コサイスマックな応力や水圧変化の後、数日から数ヶ月にわたって水圧が変化し続けることがあり、地震動にある種の閾値があるなど、地震にともなう水圧変動に関する多くの研究成果が報告されている[例えば, Asai, 2006 ; 浅井, 2010 ; 2011 ; 浅井・石井, 2014 ; 浅井ほか, 2009]. 本研究では 2016 年 4 月 16 日に発生した熊本地震にともなうコサイスマックな応力と水圧の変化、およびその後の長期間にわたる応力と水圧の変化について、瑞浪の超深層縦孔 200 メートルレベルの水平坑道床面から掘削されたボアホールに設置された応力計(STG200n)および水圧計により記録された結果をもとに議論する。ただし、水平坑道床面から掘削されたボアホールに設置された応力計には温度擾乱が認められる。おそらく縦坑や水平坑道の通気による地下空間内の温度変化が原因であろう。通常の地震波解析のように数分～数時間程度の現象や、潮汐のように大気圧補正やトレンド補正の過程で温度擾乱も消去可能な場合は問題ないが、本研究のように長期間で、しかも理論潮汐のような参照可能な値が存在しない状態では、事前に温度擾乱を補正する必要がある。この作業とその結果は Appendix に記載する。

2. 観測方程式の解の意味

含水したきれつや空隙を含む岩盤に力が作用したときの力と変形と水の移動の関係を扱う Poroelasticity によれば、岩盤内のひずみは全応力の寄与分と水圧の寄与分の和であらわされる[例えば Wang, 2000]. 本研究で採用された応力計には、独立に校正されたひずみ感度と応力感度があり、出力電圧は応力とひずみに換算できる。したがって、応力計でえられる応力値はひずみ値と直接つながっており、この手法でえられる応力もまた全応力と水圧の寄与分の和となる。すなわち

$$\text{観測方程式の解} = \text{全応力} + \text{水圧の寄与分} (\delta_{ij} \alpha P) \quad (1)$$

ただし引張応力を正とし， α はBiot-Willisの係数， δ_{ij} はクロネッカーデルタである。

3. 熊本地震前後の応力および水圧変化

2016年4月16日の熊本地震から約6週間にわたってSTG200で観測された結果をもちいて観測方程式を解いた結果から水圧の寄与分 αP を引いてもとめた全応力の経時変化を示すと図1のとおりである。図中，水圧 P_r ，鉛直応力 $\sigma(V)$ ，および水平面内平均応力 σ_{hm} の変化が示されている。地震波到達直後に鉛直応力および水平面内平均応力が圧縮側に急変するとともに水圧が急増していることがみてとれる。これがコサイスミックな変化である。その後も水圧がゆっくりと増加し続けるとともに，鉛直応力および水平面内平均応力は減少し続けた(圧縮側に変化し続けた)。

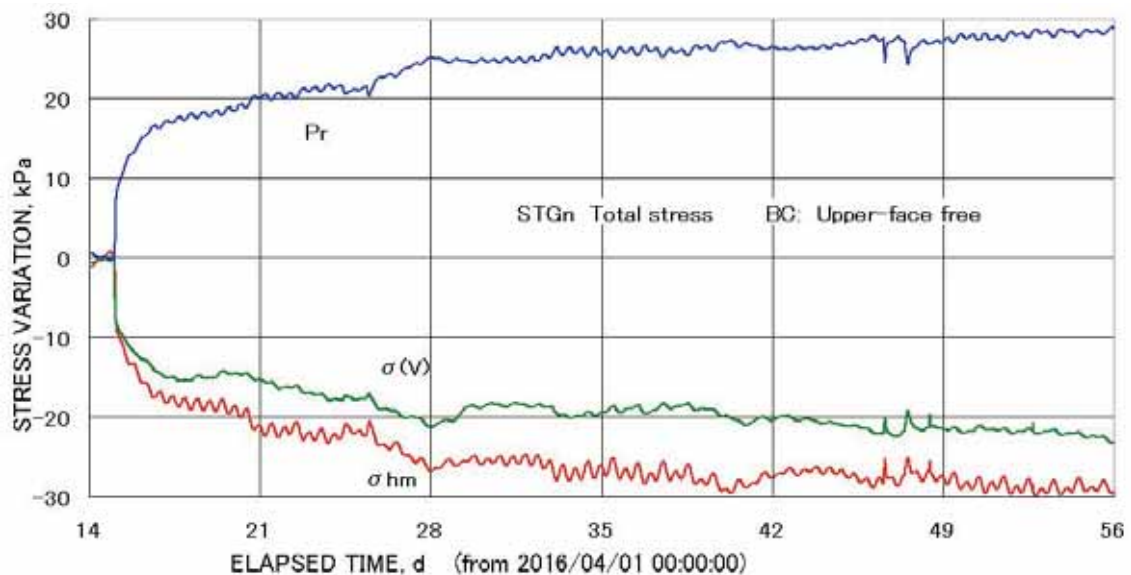


図1. 2016年4月16日の熊本地震にともなう水圧変化と全応力変化(鉛直応力 $\sigma(V)$ ，および水平面内平均応力 σ_{hm})。引張応力を正とする。

図2には，図1に示された水平面内平均応力に替わって三次元の平均応力の経時変化が再下部に示されている。図中，水圧変化と平均応力変化の絶対値がほぼ1対1となることが見てとれる。一方，非排水条件下の岩盤の変形で計測される水圧は平均応力とスケンプトン定数， B ，の積で与えられることが知られている。すなわち

$$P_r = -B (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \quad (2)$$

ただし， P_r は水圧であり，スケンプトン定数の前のマイナス記号は引張応力を正とした場合である。図2に示された結果はスケンプトン定数がほぼ1に等しいことを示すようであるが，地震波からえられるスケンプトン定数が0.75~0.85の範囲にあるので，この結果は

非排水条件が成り立っていないことを強く示唆する。なお、地震波到達直後のコサイミックな変動領域の水圧変化の大きさは平均応力の変化量より 20~30%ほど小さいので、この領域では非排水条件が成り立っていると考えられる。

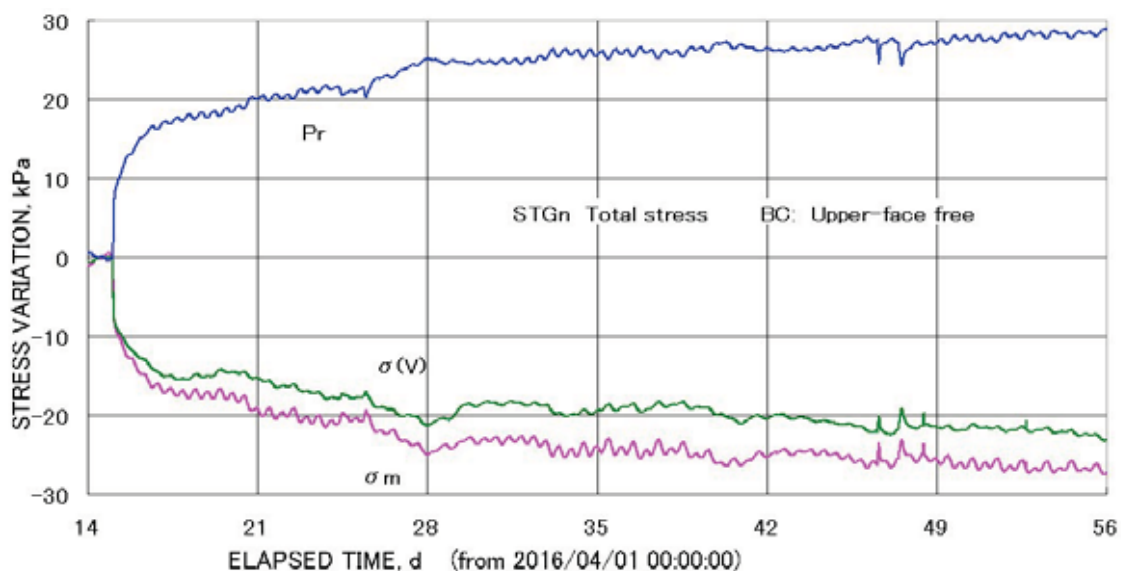


図 2. 熊本地震にともなう水圧変化と全応力変化(鉛直応力と平均応力)が示されている。コサイミックな変動領域の平均応力変化は鉛直応力変化とほぼ等しく、その大きさは水圧変化より 20~30%ほど大きい、それ以後の変動では、ほぼ 1 対 1 である。

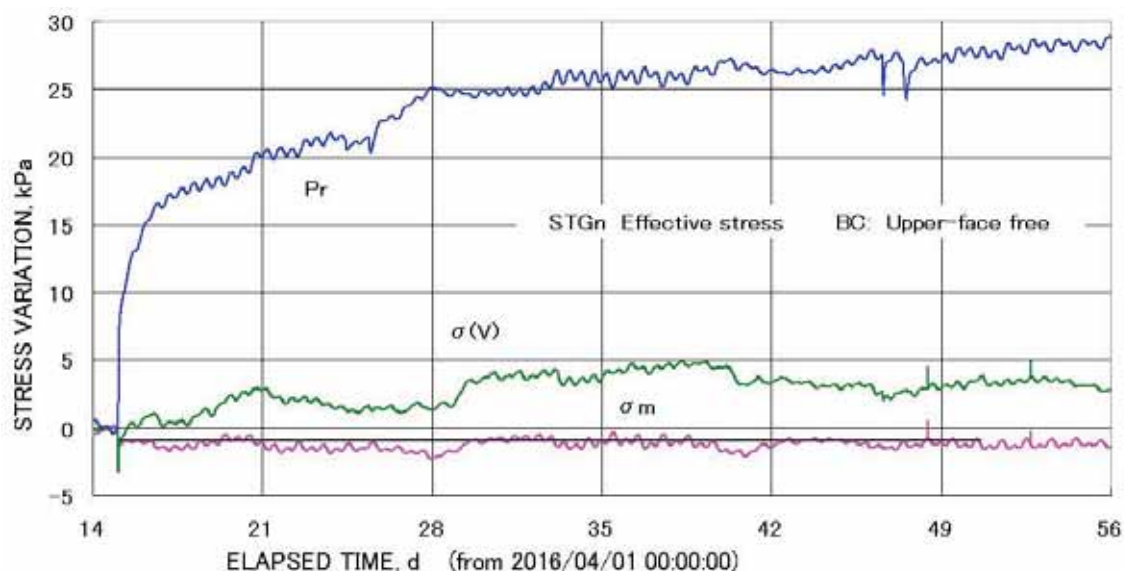


図 3. 熊本地震にともなう水圧変化と観測方程式の解(有効鉛直応力 $\sigma(V)$ 、と有効平均応力 σ_m)が示されている。図中、-1 kPa 付近の黒い直線は地震波到達 10 分後の有効平均応力値である。

図3は観測方程式の解を図示したもので、有効鉛直応力と有効平均応力が示されている。また、図中、-1 kPa 付近の黒い直線は地震波到達 10 分後の有効平均応力値である。マゼンタ色で示された有効平均応力と黒い直線がほぼ重なっているということは、地震波到達から 10 分経過したのち以降も相対的に大きな水圧変化がみられるにもかかわらず、有効平均応力がほとんど変化していないことを示している。鉛直応力が引張側であることから、有効水平面内平均応力は圧縮側である。この結果は、参照領域を取り囲む、遠方の「仮想」鉛直平面内において、面に垂直な方向の変位を拘束すると同時に、地表面の上下の動きを自由にした状態で、岩盤内に水を圧入した状態に近い現象が生じていることを示すと考えられる。なお、岩盤内への水の圧入という過程は Asai [2006] のモデルと整合的である。

図3に示された結果にもとづき、対象領域から離れた遠方の「仮想」鉛直平面内の面に垂直な変位を拘束し、地表面の上下の動きを自由にした状態で、岩盤内に水を圧入した状態に近い現象が生じていると考えたが、この境界条件は図3の結果をえる際に用いた観測方程式の感度係数が Upper-face free 条件、すなわち数値計算モデルの鉛直境界面の面に垂直な方向の変位を拘束し、地表側の境界面の上下の動きを自由にした条件と同じことに留意する必要があるかも知れない。参考までに、数値計算モデルの境界条件として、境界面の、面に垂直な変位をすべて固定した場合にえられた感度係数を用いた観測方程式の解を図4に、境界面の面に垂直な変位をすべて自由にした場合にえられた感度係数を用いた観測方程式の解を図5に示す。いずれの結果も有効鉛直応力が引張、有効水平面内平均応

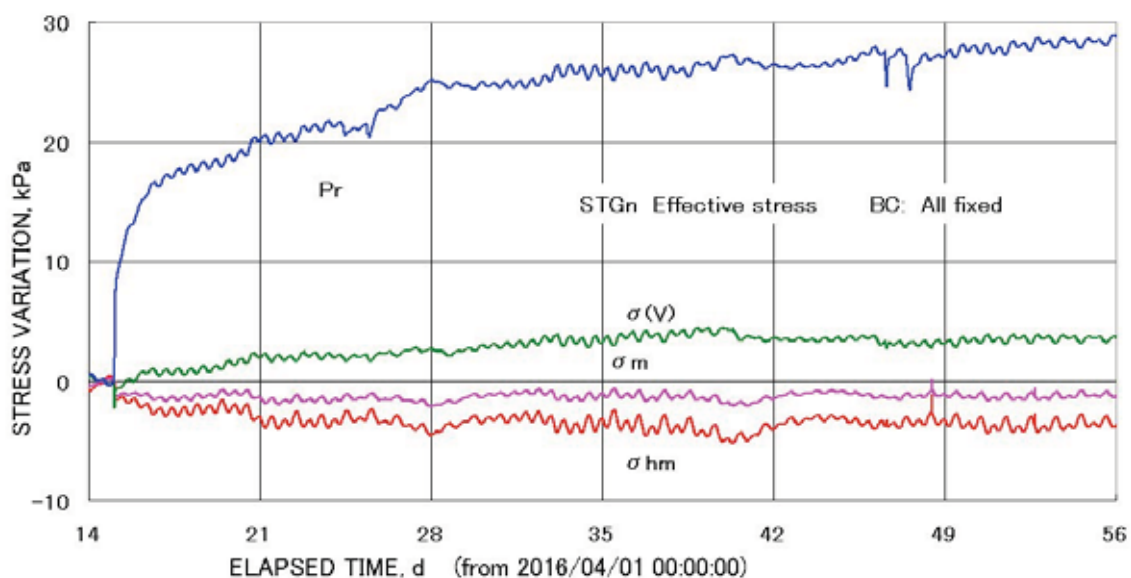


図4. 水圧変化と観測方程式の解(有効鉛直応力 $\sigma(V)$ 、有効水平面内平均応力 σ_{hm} および有効平均応力 σ_m) が示されている。観測方程式の感度係数の計算に用いたモデルのすべての境界の、面に垂直な変位を固定した条件が採用されている。

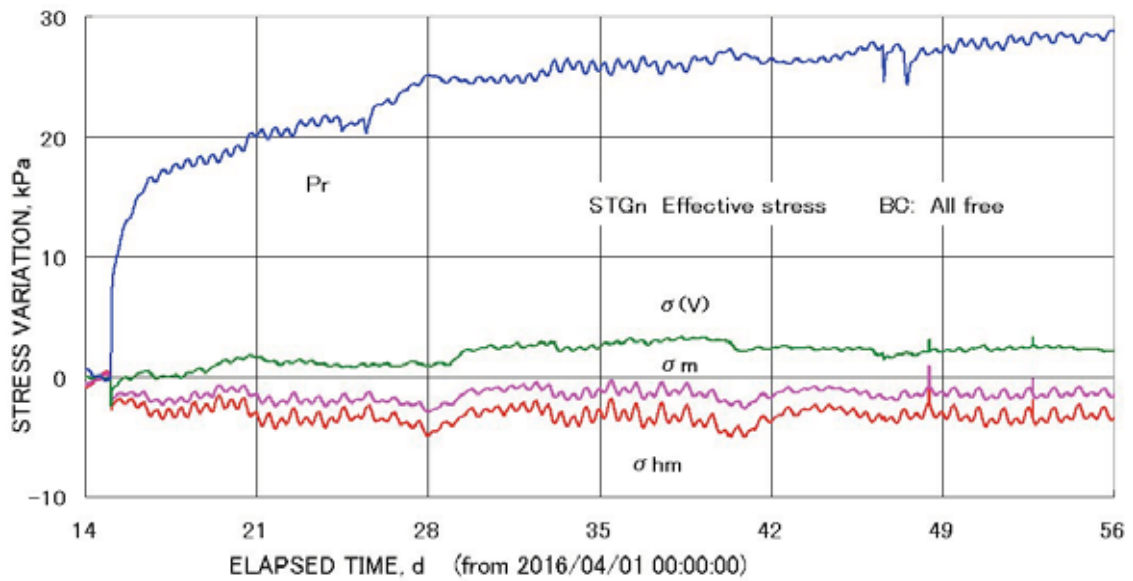


図5. 水圧変化と観測方程式の解(有効鉛直応力 $\sigma(V)$, 有効水平面内平均応力 σ_{hm} および有効平均応力 σ_m) が示されている. 観測方程式の感度係数にあたって, モデルのすべての境界の, 面に垂直な変位を自由にした条件が採用されている.

力が圧縮となっている. これらの結果は感度係数を求める際の境界条件と異なっており, 定性的には図3と同じである. 言い換えれば, 上記の推論が感度係数を計算したときのモデルの境界条件によって決まっているわけではないことがわかる.

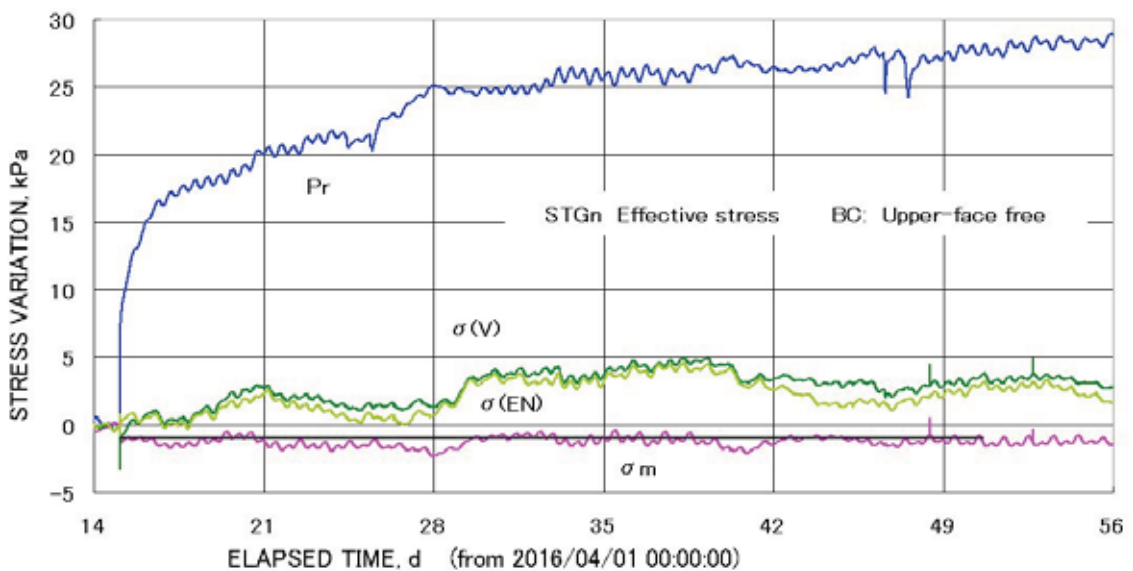


図6. 図3の結果にせん断応力成分 $\sigma(EN)$ を加筆した. せん断応力成分は28日頃まで相対的に小さいが, それ以後, 少し増加している. その原因は不明である.

水の圧入のみが生じた場合、図3に示すように有効平均応力が一定となることが想定されるが、せん断応力もまた変化しないことが予想される。そこで図3にせん断応力を加筆した結果を図6に示す。28日までは相対的に小さいことが見てとれるが、それ以後は比較的大きく、全体的に鉛直応力と同じような動きをしている。水圧の増減で水平面内の主応力方向の回転が生じた理由は現状ではよくわからない。瑞浪超深層縦坑や水平坑道の排水にともない地下水面が複雑な形状となっていることも一因と思われるが、今後の課題としたい。なお、4月25日ころ、水圧変化の傾向が変わっているが、これは、おそらく愛知県東部地震(Mj4.2)にともない、なんらかの擾乱があったためであろう。

4. まとめ

ボアホール設置型応力計の観測値から、いわゆる地殻応力、すなわち岩盤内遠方応力変化を求める問題は、周辺媒体と異種媒体内部の応力の関係を求めるインクルージョン問題である。本研究では既報にもとづき観測方程式を解くことにより地殻応力変化を求めた。また、通気の影響と思われるが、瑞浪深層縦坑に付属する水平坑道床面から掘削したボアホールに設置された応力計には温度擾乱が認められた。そこで擾乱補正を実施した結果にもとづき、観測方程式を解き、熊本地震直後とその後の水圧および地殻応力変化の解析を実施した。その結果は、熊本地震の地震波が到達10分後以降、遠方より高压の水が圧入されたと考えるモデルを支持していた。水の圧入の開始点については微妙な差異があるが、水の圧入という視点はAsai [2006]のモデルと整合的である。

謝辞 本研究で使用したデータは石井紘博士と浅井康広博士により開発されたボアホール応力計によりえられたものである。

参考文献

- Aki, Keiiti, and Paul G. Richards; Quantitative Seismology, Theory and Methods, 1980.
- Asai, Y., 2006, Study on the Mechanism of Co-seismic Groundwater Level Changes, Ph.D dissertation, Graduate School of Science, Hokkaido University, 86pp.
- 浅井康広, 石井紘, 青木治三: 歪地震動に伴う地下水位変化—2008年5月中国四川省の地震/茨城沖地震, 地殻活動研究委員会報告書(平成20年度), 2009, pp. 83-92
- 浅井康広: 岐阜県東濃地域で観測された2009年8月11日駿河湾の地震(Mj6.5)に伴う地下水位変化と歪地震動, 地殻活動研究委員会報告書(平成21年度), 2010, pp. 133-140
- 浅井康広: SN-1/SN-3号孔における地下水位地震応答を生じさせる歪地震動の振幅閾値, 地殻活動研究委員会報告書(平成22年度), 2011, pp. 25-32
- 浅井康広, 石井紘: 瑞浪超深地層研究所近傍, TGR350/TGR165で観測された推移変動に伴う歪変化, 地殻活動研究委員会報告書(平成25年度), 2014, pp. 19-26
- Ishii, Hiroshi, and Yasuhiro Asai; Development of a Borehole Stress Meter for Studying

- Earthquake Predictions and Rock Mechanics, and Stress Seismograms of the 2011 Tohoku Earthquake (M9.0), *Earth, Planets and Space*, 2015, DOI 10.1186/s40623-015-0197-z.
- 川崎一朗, 石井紘, 浅井康広, 西村卓也, 2011年 MW9.1 東北地震に伴った Mw8.4 スーパーサブイベント, *地震*, 67, 2014, doi 10.4294/zisin.67.87
- 佐野 修, 地殻応力計測手法と岩石力学, *地学雑誌*, Vol. 114, No. 6, pp. 1003-1021, 2005
- Sano, Osam, Hisao Ito, Atsuo Hirata, Yoshiaki Mizuta, Review of methods of measuring stress and its variations; *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Vol. 80, pp. 87-103, 2005.
- 佐野修, 大久保慎人, 浅井康広, 石井紘; 新開発応力計と岩盤のカップリングおよび感度について一遠方応力評価にむけて一, *地殻活動研究委員会報告書(平成 26 年度)*, 2015, pp. 1-8
- 佐野修, 浅井康広, 石井紘; 新開発応力計と岩盤のカップリングおよび感度について一遠方応力評価にむけて一 その2, *地殻活動研究委員会報告書(平成 27 年度)*, 2016, pp. 155-160
- 佐野修, 大久保慎人, 徳永朋祥, 愛知正温, 本田亮, 鶴岡弘, 浅井康広; 新開発ボアホール応力計の信頼性評価について一固体地球潮汐との比較一, *地殻活動研究委員会報告書(平成 28 年度)*, 2017, pp. 27-32
- 佐野修; 新開発ボアホール応力計の信頼性評価について一理論地震波形との比較一, *地殻活動研究委員会報告書(平成 29 年度)*, 2018, pp. 27-36
- Wang, H.; *Theory of Linear Poroelasticity with Application to Geomechanics and Hydrology*, 2000.

Appendix 応力計記録の温度補正について

本研究でもちいた応力計(STG200n)は瑞浪超深層研究所縦坑の深さ 200 メートルレベルに開削された水平坑道の床面から深さ約 30 m のボアホールに設置されている。地表面からの深さは 200 m 以上あり、本来なら地上の温度変化の影響は十分小さいはずであるが、応力計記録には比較的大きな年周が認められる。通気による温度変化が縦坑および水平坑道内にあるためと思われる、2015 年 11 月 20 日から 2 年間の応力計、水圧計および温度計による記録を図 1A に示す。いずれも観測値そのままであり、圧縮応力が正となっている。

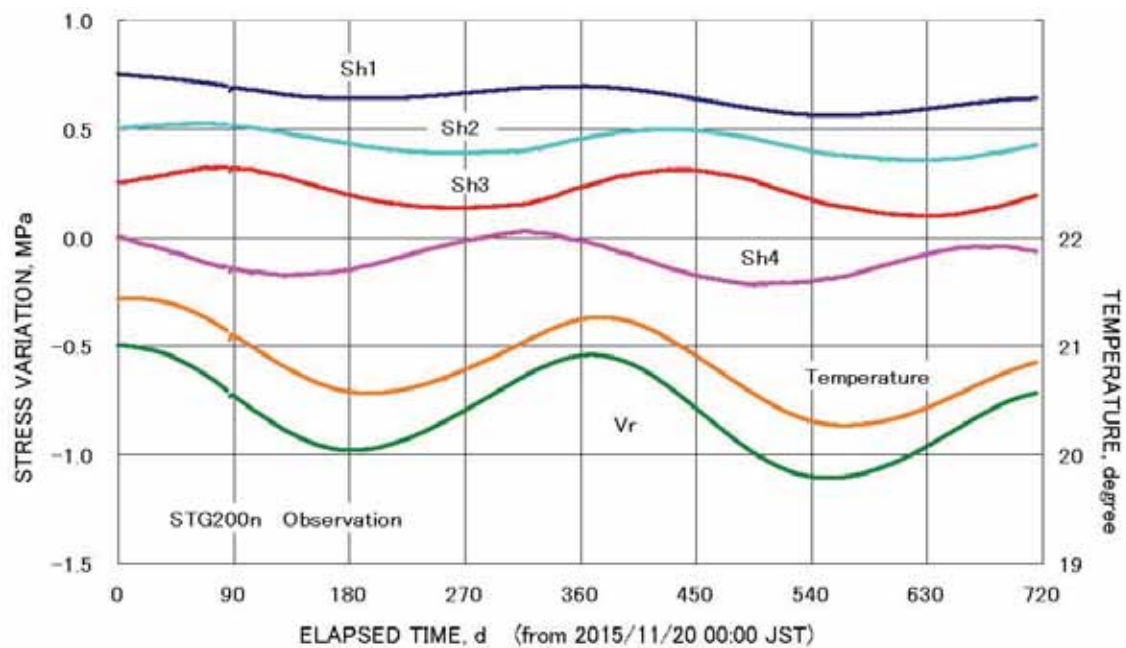


図 1A. 瑞浪超深層研究所の水平坑道(200 m)の床面から削孔されたボアホールに設置された応力計の記録(圧縮応力を正)。图中、温度記録と鉛直応力には良い相関が認められる。また、他の水平応力成分にも同様な年周が見える。

鉛直応力と温度のきわめて良い相関、および温度上昇で圧縮応力が増加している現象は、鉛直応力の年周変動が閉鎖空間内の応力センサの温度変化によることを示唆している。応力センサはモルタルを介して周辺岩盤とつながっており、センサ長さが固定されているわけではないが、試みに、応力センサ長さを固定した状態で図 1 に示された温度変化と応力変化をもたらす線膨張係数を求めると 10^{-5} のオーダーがえられる。実際のセンサの複雑な構造や岩盤との境界条件を考慮すれば十分ありうる値であろう。なお、鉛直応力センサは SUS 製筐体と連結している一方、水平センサは O-リングを介してつながっている。したがって水平センサの温度振幅が小さくなると考えられるので、相対的に小さな水平応力の年周もまた温度変化起源であると推測できる。そこで、まず、温度変化の周波数成分の解析を実施し、その結果をもちいて、応力計の各センサの温度依存性を解析することとした。

図 2A に温度変化を 12 ヶ月周期の変化と線形トレンドで近似した結果を示す．また温度記録と近似曲線の残差を 4 倍拡大して示す．ほぼ近似されているが，24 ヶ月周期が残っていることがわかる．そこで，図 2A の解析条件に 24 ヶ月周期を追加して近似した結果を図 3A に示す．

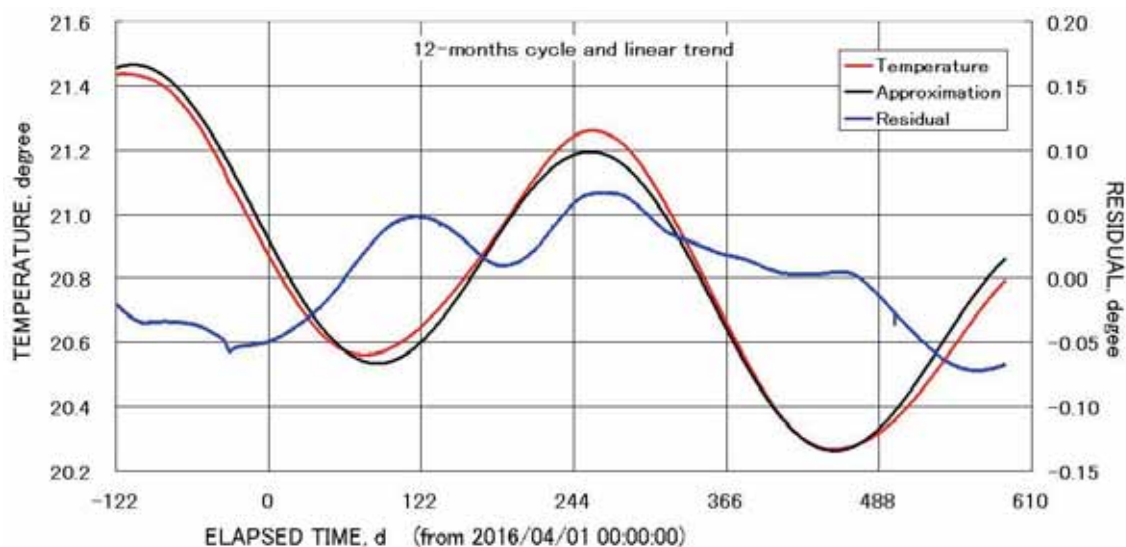


図 2A. 温度記録を 12 ヶ月および線形トレンドで近似した結果．残差のスケールは 4 倍拡大して表示されている．

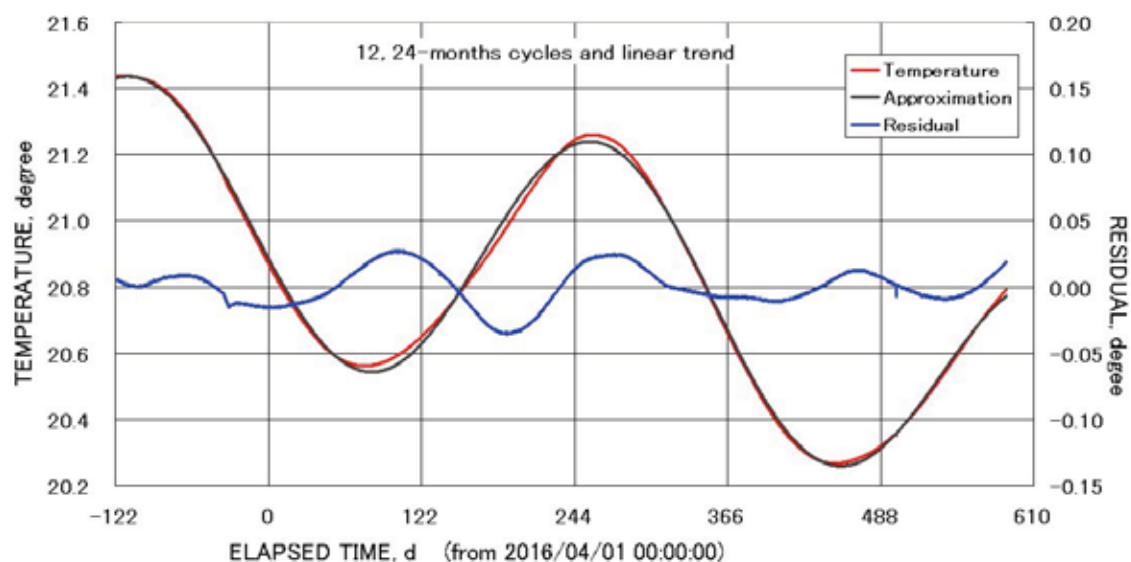


図 3A. 温度記録を 12 ヶ月，24 ヶ月，および線形トレンドで近似した結果．残差のスケールは 4 倍拡大して表示されている．

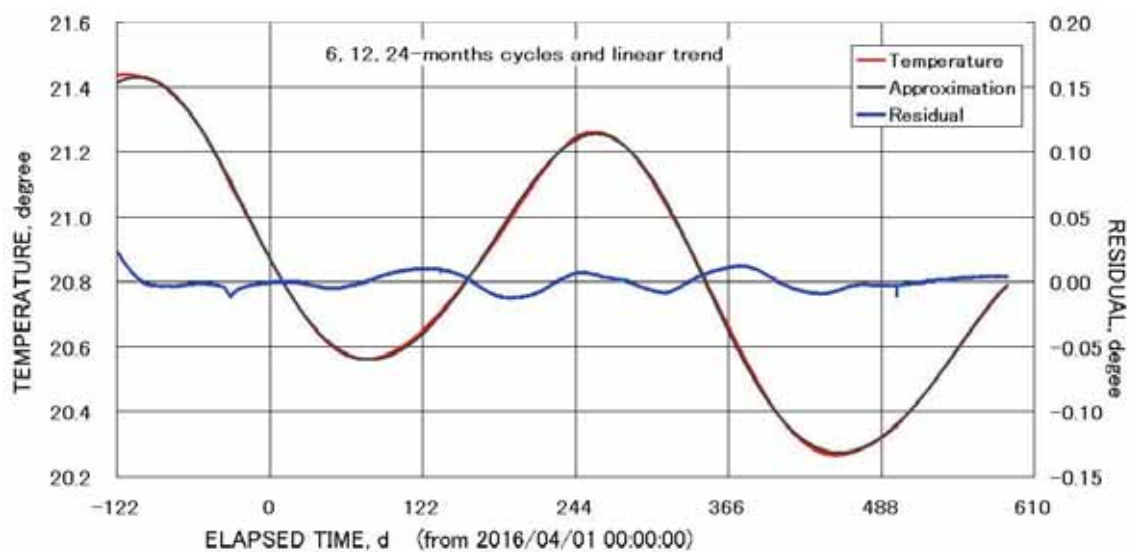


図 4A. 温度記録を 12 ヶ月, 24 ヶ月, 線形トレンドで近似した結果に 6 ヶ月周期を追加した. 残差のスケールは 4 倍拡大して表示されている.

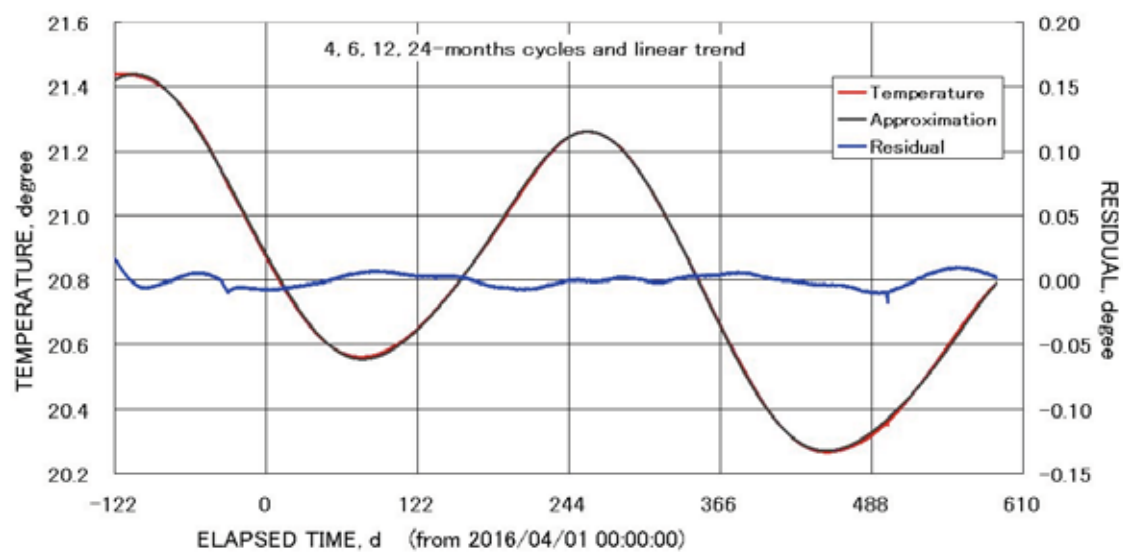


図 5A. 温度記録を 6 ヶ月, 12 ヶ月, 24 ヶ月, 線形トレンドで近似した結果に 4 ヶ月周期を追加した. 残差のスケールは 4 倍拡大して表示されている.

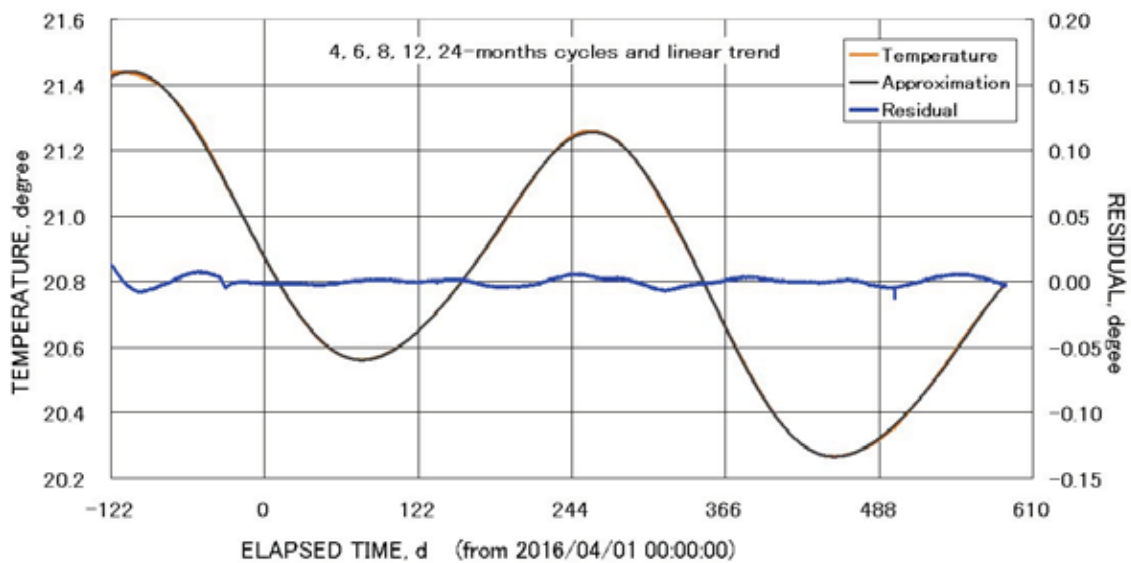


図 6 A. 温度記録を 4 ヶ月, 6 ヶ月, 8 ヶ月, 12 ヶ月, 24 ヶ月, および線形トレンドで近似した結果. 残差のスケールは 4 倍拡大して表示されている.

残差の卓越周期を順次追加することにより, 近似曲線の高度化をはかった結果を, 順に, 図 4 A, 図 5 A, 図 6 A に示す. 温度記録に含まれる周期成分がすべての応力記録にも含まれると仮定し, 応力記録の年周補正を実施した. 各周期の振幅を示すと図 7 A のとおりである. 各センサおよび温度計の, 配置は上から順に水平センサ (Sh1, Sh2, Sh3, Sh4), 温度計 (Tmp), 鉛直センサ (Vr) となっているが, 年周成分の振幅は実配置の順番どおりに並んでいる. ただし, 温度変化は, 縦坑あるいは

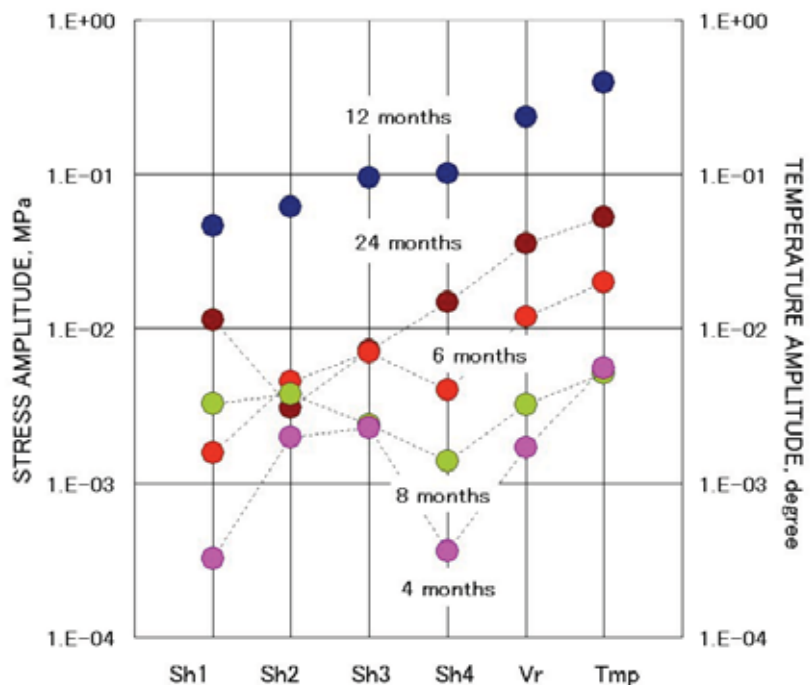


図 7 A. 温度記録と同じ周期成分を仮定して各応力センサの記録に含まれる各周期成分の振幅を求めた. 年周成分の振幅は Sh1, Sh2, Sh3, Sh4, Vr の順番に並んでいる.

水平坑道からもたらされるので、温度擾乱振幅の大きさは、常識的には逆順と思われるが、図 1 A の段階ですでに Sh1, Sh2 の年周振幅が Sh3, Sh4 の振幅より小さいことが見てとれる。また、図 1 A に示された結果は、温度計より下部にある鉛直応力の年周変化の位相が温度変化より早いことを示しており、温度擾乱が水平坑道の床面、すなわち上方からではなく、下方からきていることを示唆している。これは図 7 A に示された「逆順」と整合しているが、原因は現時点では不明である。なお、図 6 A に示された残差に小さな擾乱が残っていることにも留意する必要がある。すなわち、この結果を用いて応力計記録を解析した場合、図 6 A に示した残差に見られる変動が「ノイズ」として含まれる可能性が残っている。

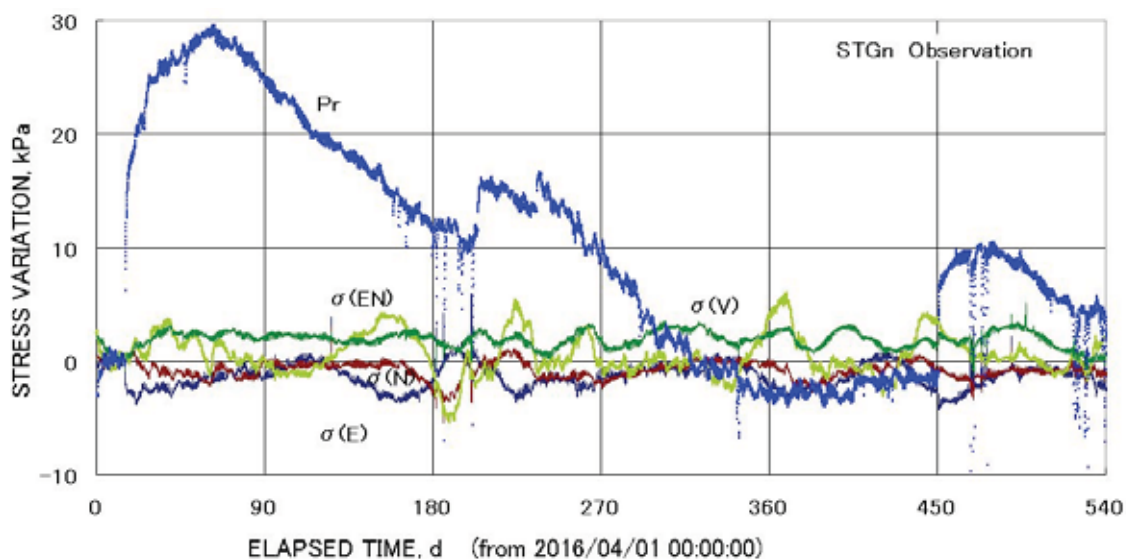


図 8 A. 温度の周期変動の影響を受けると仮定して補正された応力計の記録。5 ヶ月周期を追加すると同時に大気圧補正も行った。引張応力を正としている。

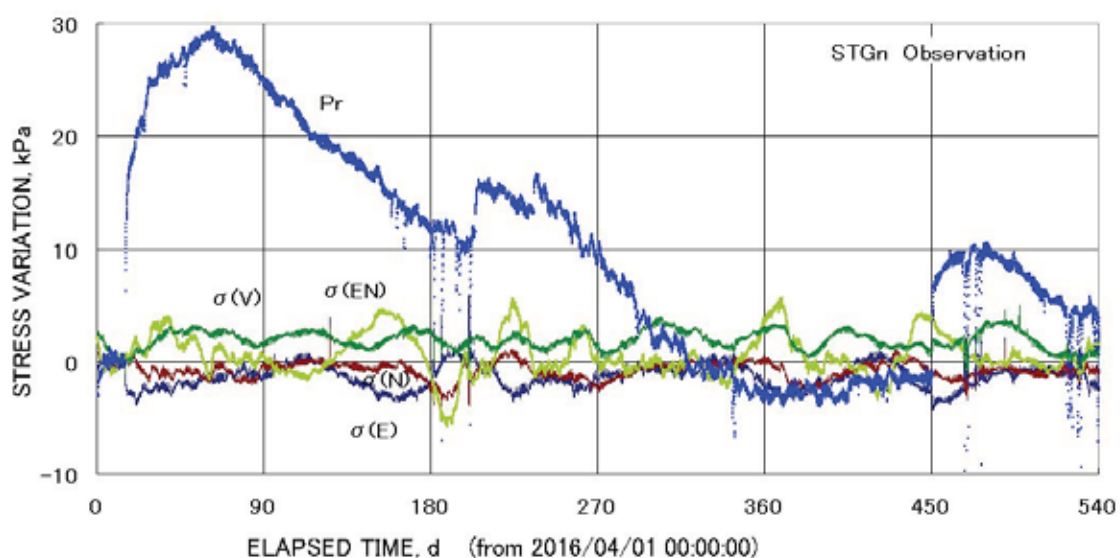


図 9 A. 図 8 A の解析条件に、さらに 2 ヶ月周期を追加した場合。

図7Aに示すとおり、温度計記録に含まれる擾乱の周期成分は、変動振幅の大きさの順に、12ヶ月、24ヶ月、6ヶ月、4ヶ月、8ヶ月と特定することができた。この状態でえられた残差には僅かであるが5ヶ月周期が認められたので、この周期成分も含めた温度擾乱成分が応力計記録に影響を及ぼしていると仮定すると同時に、大気圧変動による擾乱成分もとりさった結果をもとに、ENV座標系の応力変化に変換した結果を図8Aに示す。すべての応力成分にノイズがのったような変動が認められるが、潮汐である。なお、15日、200日、および450日近辺に認められる大きな水圧変動は、それぞれ、2016年4月16日の熊本地震(Mj7.3)、2016年11月22日の福島県沖地震(Mj7.4)、2017年6月25日の長野県南部地震(Mj5.6)、およびそれらに付随する活動によるものである。参考までに、この段階の残差の卓越周波数、2ヶ月周期を追加した結果を図9Aに示す。2ヶ月周期を取り除くと残差二乗和は減少するが、図8Aおよび図9Aにほとんど違いが認められないので、図8Aに示された結果の段階で擾乱成分はほぼ取り除かれていると考えて良いだろう。

Appendix おわり

