

平成 29 年度第 2 回地殻活動研究委員会議事要旨

日 時：平成 29 年 1 月 31 日(水)～2 月 1 日(木)

場 所：瑞浪地科学研究館 1F セミナールーム

出席者：石井 紘、板場智史、大塚成昭、笠原 稔、加納靖之、川崎一朗、木股文昭、
國友孝洋、鷺谷 威、佐野 修、鈴木貞臣、田阪茂樹、津村建四朗、名和一成、西村卓也、
長谷川 昭、古本宗充、本多 亮、宮岡一樹、向井厚志、山川 稔、山中佳子、吉岡祥一、
渡辺俊樹

オブザーバー：青木治三

事務局：浅井康広、関根正夫、田中俊行、村上 理

議 事：1 月 31 日(水) 13:30～17:15

・研究活動の紹介(1)

poroelasticity の非線形性と異方性のその場測定

古本宗充

岩石中の間隙水圧は岩体に働く応力に応答して変動する。こうした応答を研究する場合、岩体の変形は簡単にするため線形かつ等方的であることを前提とすることが多い。しかし実際の岩体は非線形的で異方性を持つことは容易に想像される。本研究の目的は、地下で観測された歪み・応力変化と水圧変化から、応答の非線形性と異方性を検出することである。今回使用したデータは、東濃地震科学研究所のステージ STG200N で測定された、2016 年に発生した世界のマグニチュード 7 以上の地震の波形である（笠原による）。これらの波形データで最大振幅を与える 20 秒表面波（レイリー波）の到着時の水圧と垂直応力の測定値の比 $r = p / \sigma_v$ を調べた。もし岩体が線形で等方的であれば、この比 r は地震の規模や発生場所によらず一定であるはずである。しかし測定された比 r は地震ごとに異なり 1～3 程度の大きな幅をとる。報告では、非線形性つまり地震動の大きさと、異方性つまり地震波の入射方向を考えれば、こうした違いは十分説明できることを示す。非線形としては、応力変化が 4 桁増加した場合に、水圧上昇が線形変化の場合に比べて 2～3 倍程度大きくなる。異方性については、レイリー波の入射の方向が東北-西南の時に水圧上昇がもっとも大きくなる。こうした応答がクラック状の間隙によるものであると考えると、観測点近傍でのクラックは北西-南東方向に延びていると推定される。

割石温泉の湯量振動解析

田阪茂樹

岐阜県飛騨市の割石温泉では、2004 年 7 月から電磁流量計を用いて 1Hz で湯量を観測して、2017 年 7 月までに約 72 個の地震に伴う湯量変動を観測した。今回の報告では、スマトラ地震、チリ地震など、特に遠地大地震に伴う湯量振動現象の観測結果を東濃地震科学研

究所の屏風山の歪計の観測結果と比較して、13年間に亘る、湯量感度特性について報告する。

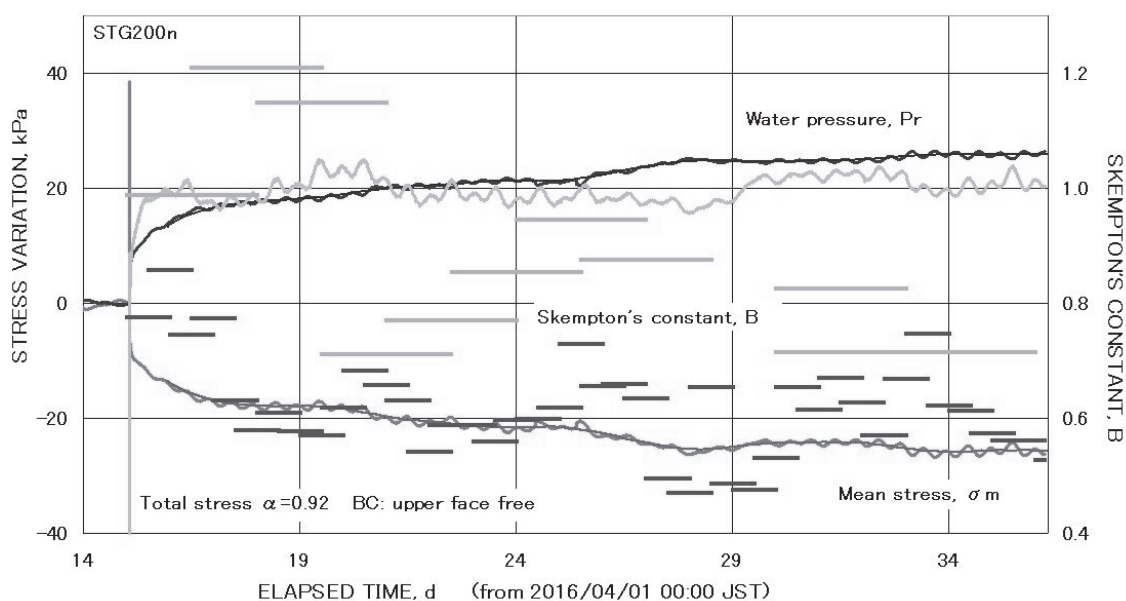
熊本地震とその後の水圧および応力変化について

佐野 修

非排水状態の岩盤に作用する外力の変化に呼応した水圧の変化は Skempton' constant で表現され、

$$P = -B (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$$

で定義される。ただし B は Skempton' s constant であり、右辺のマイナス記号は引張応力が正の場合である。定義式から明らかなように、B は 0 から 1 の間である。一般論として、岩盤内の挙動は、(1) 非排水条件で外力が変化し、そのため水圧も変化する場合、(2) 排水条件で外力が変化し、水圧が呼応して変化するか変らない場合、(3) 排水条件で水が圧入され、水圧と応力状態がともに変化する場合の三とおりが考えられる。Skempton' s constant が定義できる条件は(1)のみである。また、(2)と(3)の場合は水の移動が関与するため、水圧変化および応力変化は時間依存性となる。超深層縦坑 200 m ステージには応力計と水圧計が設置されており (STG200n)、外力と水圧の応答関係を研究するための最良の場である。浅井他の研究により、熊本地震後に STG200n の水圧が大きく変化したことが知られているが、地震直後の応力変化とその後の水圧変化が上記(1)から(3)のいずれであるか、測定結果にもとづき調べた結果、地震直後は(1)と考えて良いが、比較的早期から(3)が生じている可能性が示唆された。



ボアホール応力計の広い観測レンジと長周期観測計器の波形比較

石井 紘

東北地方太平洋沖地震（3.11 地震）においては速度型地震計のほとんどはスケールアウトして最大振幅は記録できなかった。しかしながら長周期地震波動を記録できる計器の中において当研究所で開発したボアホール応力計・歪計は最大振幅も記録できている。そこでボアホール応力計の観測可能範囲を調べた。その結果 3.11 地震より 10 倍程度大きな地震波でもスケールアウトすることなく記録できることが明らかになった。

また、長周期地震波動を記録できる STS1 地震計、サーボ式速度地震計、ボアホール応力計の記録を比較した。その結果 STS1 地震計とサーボ式速度地震計の波形はほとんど一致し、S 波以降の波形は 3 種類の地震計の波形がほとんど一致することが明らかになった。

石井式歪計・応力計で記録される地震動と地震規模の関係について（1）屏風山・研究所（歪）観測点

笠原 稔

屏風山観測点と東濃研究所観測点の多成分歪計により記録された歪地震動を、最大振幅に注目して、震源距離と地震の規模（ここでは、MJMA）の関係を整理してみた。震源距離 1000km 以内では、同じ M で見れば振幅は距離の 3 乗に逆比例し、同じ距離で見れば M が 1 つ大きくなると 1 桁大きくなる関係にある。震源距離 500km 以上では、最大振幅は表面波となるので、振幅は距離の 1.5 乗に逆比例し、M との関係は同じく 1 つ大きくなると 1 桁大きくなる。つまり、1 観測点の記録振幅から、地震規模はファクター 2~3 の範囲で、 M^9 まで直接的に推定できる。多成分歪計の利点として、異なる直交 2 成分の和として求められる歪不変量についても検討した。多成分歪計を最初に設置した屏風山観測点では、ある波群についての不一致が見られる場合があるけれども、研究所観測点の場合、その一致は非常に良い。

2011 年東北地方太平洋沖地震に先行する地殻変動の加速

鷺谷威・川島陽

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生前 15 年間にわたって、東北地方の水平変位が海溝向きに加速していたことが Mavrommatis et al. (2014, 2015) により報告されている。我々は、上下変動に注目して、同様の加速が見られるか検討を実施した。その結果、国土地理院のルーチン解（F3 解）では日本海側で隆起の加速が見られていたが、精密単独測位法を用いた再解析結果では太平洋沿岸で沈降が加速していたという結果が得られた。この沈降の加速と水平成分における海溝向きの加速は、この変化がプレート境界の固着・すべりによると仮定すると、本震震源域の深部、深さ 50km 程度ですべりの加速ないし加速的な固着のはがれが生じていたことを意味する。

3.11 東北沖地震で stress shadow にも拘わらず誘発された山形-福島県境群発地震活動

長谷川昭・吉田圭佑

2011 年東北沖地震後、陸域の広い範囲にわたって地震活動が誘発された。山形・福島県境で発生した顕著な群発地震活動もその一つであるが、この活動は、stress shadow に位置するにも拘わらず 7 日後から急激に活発化した。その原因を理解するために、調査を進めてきた。

その結果、以下のことが明らかになった。1) 一元化震源では、震源が 4 つのクラスターに別れ、それぞれが cloud 状にばらついた分布をしているが、波形相関を使って精度良く再決定すると、それぞれのクラスターで震源が複数枚の面上に乗る明瞭な面状構造をする。また、震源は個々の面上を移動しながら、全体として深部から浅部に向かって移動する傾向がある。2) メカニズム解から推定した断層強度は、顕著な時間変化をする。すなわち、活動開始直後が最小で、それがおよそ 50 日後まで急激に上昇し、その後はゆっくりと上昇しながら一定値に近づく (Yoshida et al., 2016)。3) スペクトル比やコーダ規格化法を使って推定した応力降下量も、断層強度と同様な時間変化をする (Yoshida et al., 2017)。4) b 値も顕著な時間変化をする。ただし、活動開始直後が 1.8~2.0 と大きく、その後約 50 日後まで急激に低下した後はゆっくりと低下し 1.1 程度の値に落ち着く。すなわち、断層強度や応力降下量と逆相関の時間変化をする (Yoshida et al., 2017)。5) 地震発生頻度も、断層強度や応力効果量と逆相関の時間変化をする。ETAS モデルを適用して求めた地震発生率 μ も同様の時間変化をする。

以上のことから、この活動は、東北沖地震の発生で東西圧縮応力が低下したため、直下の地殻下部から上昇してきた流体が引き起こしたと推定される。すなわち、上昇してきた流体が複数枚の既存の弱面に沿って移動したことによって、間隙流体圧が上昇し、従って断層強度が低下して発生したものと推定される。活動開始直後は間隙流体圧が非常に高く、その後流体が拡散するにつれて間隙流体圧が次第に低下したことで、断層強度、応力降下量、 b 値、 μ 値の時間変化も統一的に理解できる。

GNSS 観測による地表変位から推定した内陸断層におけるクーロン応力変化 (Δ CFS)

西村 卓也

大地震が発生したときに周囲の断層にどのような影響を与えるかを評価する指標として、クーロン応力変化 (Δ CFS) がある。

本研究では、GNSS 観測点における地表変位から直接 Δ CFS を計算する手法 (上田・高橋, 2005) を内陸活断層の Δ CFS の計算に適用し、従来の計算手法との比較検証を行った結果、震源断層からある程度離れた場所であれば、地表変位から直接計算した Δ CFS は概ね良い近似を与えることがわかった。さらに、この手法を西日本の活断層に適用し、1996-2017 年の活断層における Δ CFS を計算すると、多くの活断層で Δ CFS は数十 KPa 程度増加し、特に九州の活断層での増加量が大きいことがわかった。

南九州におけるフィリピン海プレートの沈み込みに伴う 2 次元温度構造モデリング

吉岡 祥一・末永 伸明・松本 拓己

日向灘では、1996 年 10 月と 12 月の 2 つのプレート境界地震に伴う余効すべりが見出されている。九州では、低周波地震や深部低周波微動はほとんど見出されていないが、宮崎県の太平洋岸下で深部低周波微動の集中域が存在することが指摘されている。このような地震イベントの発生メカニズムの解明に向けて、同地域において、フィリピン海プレートの沈み込みに伴う時間に依存する 2 次元箱型温度構造モデリングを行った。その結果、フィリピン海プレート上面の余効すべりが発生した領域の温度は、約 300~350 °C と求められた。深部低周波微動が発生しているマンタルウェッジ域での温度は 450~650 °C と推定された。また、含水 MORB と超苦鉄質岩の相図を用いて沈み込むフィリピン海プレート内の含水率の空間分布も推定した。その結果、余効すべりが発生した領域では、脱水を伴う顕著な相転移は認められなかったが、深部低周波微動の発生域の直下の海洋地殻で、ローソン石-青色片岩が、ローソン石-エクロジヤイトに相転移し、脱水している可能性が見出された。得られた含水量の分布は地震波トモグラフィから得られた V_p/V_s 比の分布と調和的であった。以上のことより、余効すべりはプレート境界での温度条件によって制御されており、プレート境界での固着~安定すべりの遷移領域の上限付近で発生しているものと考えられる。他方、深部低周波微動の発生を引き起こす主要因を決定することは困難であった。しかしながら、深部低周波微動の発生域では、高い V_p/V_s 比が南九州下の深さ 30~40 km で水平に広がっていることを考慮すると、温度と脱水の両方ともが深部低周波微動の発生に重要な役割を果たしていると考えられるかもしれない。

伊豆半島における東西プレート境界震源域の関連性

青木治三

南海トラフ東側では 3 個の震源域が繋がり、断層運動は東から西、西から東と交代すると示唆してきた。慶長地震、東南海地震を除けば、時間間隔は 204 年および約 61 年の長短で表すことができる。「1300 年頃発生すべき地震が 1293 年の鎌倉強震で 61 年遅れ、1361 年康安地震となった」というのがその例であるが、1923 年関東地震を考慮すると、次に起こるべき南海トラフ巨大地震は安政から 204 年後の 2060 年前後ではなく、さらに 61 年遅れて 2120 年前後、永長・康安の再現ともなるであろう。

そうなれば、東海と関東のプレート境界地震に関連性があることになる。その可能性について、関東におけるフィリピン海プレートの形状・運動を再考察した。結論としては、真のプレート境界は伊豆半島北端の直下にあり、駿河トラフはもう一つの splay fault と見た方がよい。宝永地震の震源域は駿河トラフ西側に限られ、安政東海地震の震源域は駿河トラフを跨ぐ。東海・関東間 PHS スラブの形状はそれを示唆している。伊豆半島は、地震活動も高く、未だ完全な付加体には成りきっていない中間の状態と言えるだろう。伊豆半島東側に津波が出たり出なかったりする原因になる。来るべき次の巨大地震が 2 1

世紀中に有るか無いか、気になる判定材料である。

気象庁一元化震源カタログの極微小地震データの地震活動研究への活用について

津村建四郎

気象庁一元化震源カタログには、膨大な数の極微小地震 ($M \geq 1.0$) の震源データが含まれているが、種々の原因で時間的、空間的に不均質なデータであることなどから、これまで地震活動の研究にはほとんど使われてこなかった。今回、このデータに着目して、試行的な調査を行って見たところ、新たな研究に活用できる可能性が明らかになったので報告する。

先ず、北海道から九州までの陸地と沿岸直下の例えば深さ30km以浅に限ると、1998年から2017年までの20年間の極微小地震の震源数は約120万個に達し、 $M > 1.0$ の震源数より75%も多く、前者が後者の数倍以上になる地域もある。また、震源決定精度も意外と高いことが分かった。極微小地震データも用いることによって、より詳細な震央分布図を描くことができ、過去の大地震の余震域に相当する震央の線状分布などが明瞭に認められる。さらに、SEIS-PCの時間円表示機能を使えば、高い空間分解能で、地震活動度や時間経過特性の地域分布の分析を行うことができることが分かった。

議 事 (つづき) 2月1日(木) 9:30~12:00

・研究活動の紹介(2)

2017年9月阿寒湖畔と弟子屈における絶対重力測定

名和一成

道東地域のカルデラ・火山活動のモニターを目的として、スーパー・ハイブリッド重力測定の実施を計画している。H30年度にスーパー・ハイブリッド測定の基準とする超伝導重力計の設置を予定している。それに先立つ H29年9月、超伝導重力計観測候補地であり、現行のハイブリッド測定の基準点にもなる阿寒湖畔と北大弟子屈観測所において、FG5絶対重力計による最初の絶対重力測定を実施した。その観測の概要と測定結果について紹介する。(本測定は産総研、北大、道総研、富士山研と共同で実施しました。また、東大地震研共同利用・共同研究拠点事業の援助を受けました。)

東北地震の時の日本海側沿岸部の短周期前駆津波と GPS 1秒サンプリング記録

川崎一郎

2011年東北地震のとき、日本海側沿岸部各地では、巨大地震波到達と同時に10cmから20cmの前駆津波が発生した。GPS 1秒サンプリング記録でも、断層モデルによる地殻変動でも、最大5cm程度の沈降でしかない。その意味でも、特定の場所で海底が隆起し、持ち上げられた海水が四方に逃げていくという普通の意味での津波ではない。

本研究では、短周期前駆津波と、GPS 1 秒サンプリング変位記録を比較した。その結果、酒田、新潟、富山、隠岐西郷など、観測点が河口内にあるなど閉鎖的な環境の場所では、短周期前駆津波の振幅は、GPS「水平」変位の3分の1程度にもなった。地震動が継続している最初の2分ほどは、GPS 1 秒サンプリング記録と長期録の波形は比較的対応しているように見えるが、潮位記録のサンプリング間隔が15秒なので、確定的なことは言えない。閉鎖的な観測点環境では、長周期前駆津波の振幅も大きく、短周期前駆津波の振幅と同程度である。

津波のエネルギー源は、持ち上げられた海水の位置エネルギーか、空間にたいして停止している海水に傾斜のある海底面がぶつかる運動エネルギーのいずれかであろう。後者の場合の津波を慣性津波と呼ぶことにする。短周期前駆津波は慣性津波と思われる。

ひずみ計データのスタッキングによる SSE 検出

宮岡一樹

南海トラフ監視のために、気象庁は東海地域にひずみ計観測網を展開している。現在、体積ひずみ計 16 点、多成分ひずみ計＝石井式ひずみ計 11 点（静岡県の2点も含む）が設置されている。

各成分には大きなノイズが含まれており、単独のデータで微小な変化を検出することは難しい。しかし、複数のデータをスタッキングすることで S/N 比を向上させることが可能となる。

気象庁ではフィリピン海プレート上面で発生するゆっくりすべりを検出するため、この手法を用いたひずみ計による‘アレイ観測’を行っている。この解析手法およびこれによって得られた成果などを紹介する。

1960 年代の紀伊半島の傾斜計記録の復元

加納靖之

京都大学防災研究所ではふるくから地殻変動観測を実施してきた。紀州観測点（三重県熊野市）では、1940 年代から観測がはじまり、1947 年から土地傾斜の観測をはじめている。現在、1948 年以降の横坑傾斜計の記録の存在を確認している。ブロマイド記録であり、各用紙に1週間程度記録されている。記録紙をデジタル画像化し、簡単なアルゴリズムで数値化した。その上で、現在の観測データも参照しながら、記録されている傾斜変化について検討した。今回は1960年代のデータについて報告する。

台風通過時における断層破碎帯の挙動

向井厚志、大塚成昭、福田洋一

2017 年 9 月 17 日に台風 18 号が神戸市上空を北東に向けて通過した。その際、六甲高雄観測室では、歪変化の他、湧水量変化および間隙水圧変化が観測された。台風通過時には、

地表面への大気荷重の減少によって、局地的な地殻変動が生ずる。また、観測室内の気圧低下は、観測室近傍の局所的な間隙水圧変動を引き起こす。本研究では、過去、神戸近郊を通過した台風も取り上げ、観測された歪変化、湧水量変化および間隙水圧変化に基づいて、局地的な大気荷重変動による同観測室を横切る破碎帯の応答特性や間隙水圧変動の特徴について報告する。