

Thu. Oct 29, 2020

ROOM B

Room B | Regular session | S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

[S12]PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

1:00 PM - 1:45 PM ROOM B

[S12-01] In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

○Kentaro Omura¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 1:15 PM

[S12-02] Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

○Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹ (1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2.Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3.Japan Meteorological Agency)

1:15 PM - 1:30 PM

[S12-03] Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

○Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate School of Engineering, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

Room B | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

[S09]PM-1

chairperson:Satoshi Matsumoto(Kyushu University)

1:45 PM - 2:15 PM ROOM B

[S09-01] Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule -

○Satoshi Matsumoto¹ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-02] Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

○Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho

Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

2:00 PM - 2:15 PM

Room B | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

[S09]PM-2

chairperson:Shiro Ohmi(DPRI, Kyoto University),

chairperson:Akemi Noda(MRI)

2:30 PM - 3:30 PM ROOM B

[S09-03] Shear strain energy changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

○Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at

Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5.Institute of Statistical Mathematics)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-04] Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

○Ichiro Kawasaki¹ (1.Tono Research Institute of Earthquake Science)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-05] Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

○Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-06] Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

○Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹ (1.Nihon University)

3:15 PM - 3:30 PM

Room B | Regular session | S12. Rock experiment, rock mechanics, and crustal stress

[S12]PM-1

chairperson: Kentaro Omura(NIED)

Thu. Oct 29, 2020 1:00 PM - 1:45 PM ROOM B

[S12-01] In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

○Kentaro Omura¹ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

1:00 PM - 1:15 PM

[S12-02] Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

○Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹ (1.Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2.Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3.Japan Meteorological Agency)

1:15 PM - 1:30 PM

[S12-03] Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

○Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe² (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2.Graduate School of Engineering, Kyoto University)

1:30 PM - 1:45 PM

In-situ stress at the basement under Osaka plain -estimation of stress orientations by observation of borehole breakout in deep seismic observation wells-

*Kentarō Omura¹

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震発生過程やテクトニック変動を理解する上で、重要な物理量である地殻の原位置絶対応力を求めるには、陸域にしる海域にしる、水圧破碎法、応力解放法のように、掘削と複雑な孔内計測が必要であった。しかし、最近では、岩石コアを採取して室内計測する応力測定法(ASR法、DRA法、DCDA法など)や、孔内物理検層で得られる孔壁画像から、応力方位と値を推定する手法(ボアホールブレイクアウト、DITF)が適用されてきている。本発表では、一例として、防災科学技術研究所のHi-net観測網で、大阪平野にある深層地殻活動観測井でのボアホールテレビュア検層から、ボアホールブレイクアウトが観察され、原位置地殻応力方位を推定した結果を報告する。

大阪府の此花観測井(北緯34°39' 45.92" , 東経135°23' 22.53" , 掘削深度約2033m)と田尻観測井(北緯34°23' 52.14" , 東経135°17' 01.24" , 掘削深度約1532m)において、ボアホールテレビュア検層(BHTV)が実施された。BHTVは、検層ツールのトランスデューサーを回転させ、超音波を孔壁に照射しながら孔内を上昇して、孔壁からの反射波の振幅と往復時間を濃淡表示することによって、孔壁面の画像を描く。亀裂などは、反射波の振幅が小さく、画像が黒くなる。検層ツールには磁力計が組み込まれていて、孔壁画像に写る亀裂などの方位がわかる。ボアホールブレイクアウトは、孔壁にかかる応力集中により、孔壁の一部が剪断破壊し、その部分が、崩れ、孔径が拡大する現象であり、孔壁画像で、深度方向に縦に筋が写ることで、認識される。崩壊した部分の幅から応力値が、崩壊部分の方位から応力方位が求められる。応力値には孔壁の破壊強度が直接関与し、推定が難しいため、今回は、応力方位のみ着目する。応力集中領域から90°回転した方位が原位置地殻応力の水平最大圧縮応力方位になる。

両観測井ともに、浅部の軟岩堆積層の大阪層群から、基盤は花崗閃緑岩となり、基盤のBHTV画像にボアホールブレイクアウトが認識された。図1に此花観測井のボアホールブレイクアウトのBHTV画像の例を示す。田尻でも広い範囲でボアホールブレイクアウトのBHTV画像がえられた。その方位から、原位置地殻応力の水平最大圧縮方位は、此花でN80°E-N260°E、田尻でN65°E-N245°Eとなり、+-15°程度の誤差が見込まれる。この応力方位は、周辺の北近畿地域における、東西方向の圧縮応力方位に整合的な結果になっている。BHTV検層は、標準的な検層種目となっており、観測井など孔井掘削する機会に、あわせて実施することにより、条件が適合して、ボアホールブレイクアウトが形成されれば、原位置地殻応力を求めることができる。

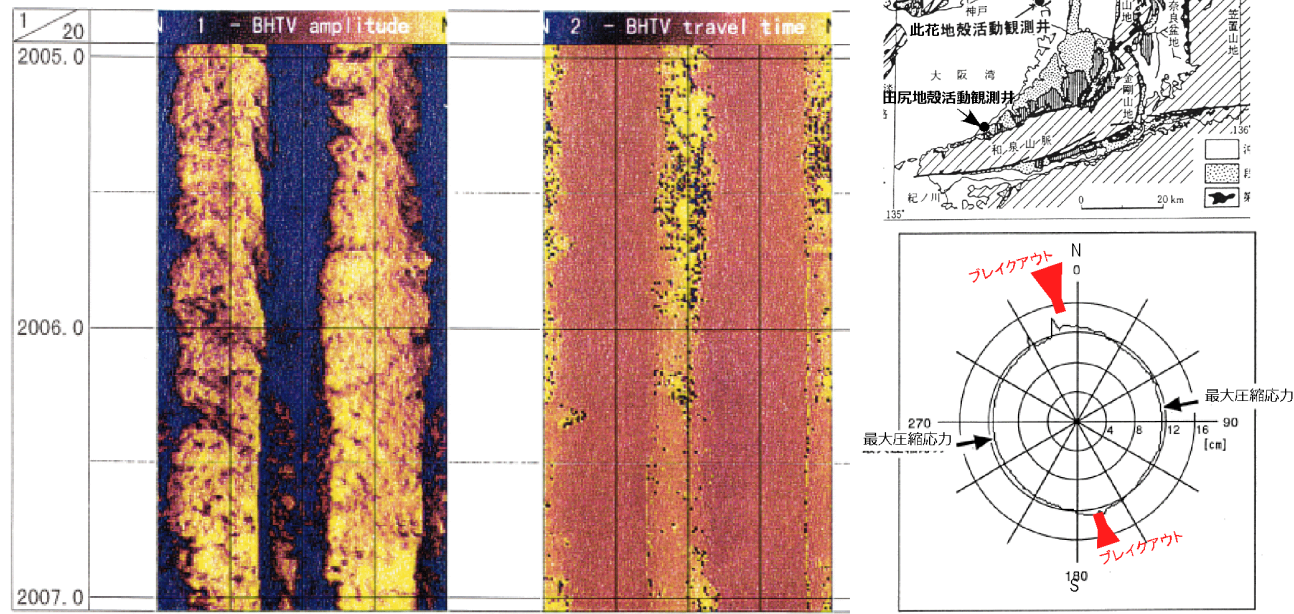


図1. 此花観測井の深度2006m付近のBHTV画像. 左が, 反射振幅, 右が往復時間を示す. 縦方向の黒い筋がボアホールブレイクアウト. 右図は, 往復時間から再現した孔壁断面で, 拡張したボアホールブレイクアウト部分から90°が最大圧縮応力方位になる

Experimental and numerical approaches for understanding a development process of composite planar fabric in faults

*Takeshi Miyamoto¹, Kiyokazu Oohashi², Akari Fuke³, Tetsuro Hirono¹

1. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 2. Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University, 3. Japan Meteorological Agency

これまで秒速ナノメートルからメートルオーダーの範囲において摩擦実験が行われ (Di Toro et al., 2011), 様々な岩種の摩擦挙動が調べられてきた。また, 摩擦実験後のせん断帯に発達する微小構造の観察も行われてきた (例えば, Marone & Scholz, 1989; Moore & Lockner, 2011 など)。しかし, それらは限られた速度範囲での実施が多く, 同一岩種に対して広い速度範囲での摩擦実験を行った例は少ない。そこで, 本研究では統一的に摩擦挙動を理解することを目的とし, 房総半島江見層群の火山砕屑性堆積物を用いて速度範囲 0.0002–1.0 m/s にて摩擦実験を行った。その他の実験条件は, 封圧 1.5–3.0 MPa, すべり量 10 m で統一し, 乾燥および水飽和条件下で行った。実験の結果, 乾燥条件では 0.1 m/s 以上で, 水飽和条件では 0.01 m/s 以上ですべり弱化を示した。実験後試料の薄片を用いた微小構造観察の結果, 乾燥および水飽和両条件において, すべり弱化を示した速度域のせん断帯にはせん断方向と平行な Y 面が, すべり弱化を示さなかった速度域ではせん断方向と斜交する R_1 面の発達が確認された。

続いて, 摩擦実験中の粒子の挙動や粒子にかかる応力状態を粒子単位, 時間ステップ単位で詳細に解析することを目的として, 個別要素法 (DEM) による摩擦実験を再現した粒子シミュレーションを行った。その結果, すべり弱化を示した速度域では, 隣接粒子間相対変位が大きい部分がせん断方向に平行に存在し, 加えて摩擦係数上昇時にはせん断方向に対して傾斜した方向に, 摩擦係数下降時には塊状に存在した。粒子にかかる応力の局所的な集中は見られなかった。一方, すべり弱化を示さなかった速度域では, 隣接粒子間相対変位と粒子にかかる応力が大きな部分の局在化が見られたが, 摩擦係数低下時と上昇時でその粒子数は大きく異なり粒子の固着と解放が繰り返し行われていた。

以上の摩擦実験と実験後試料の薄片観察, および個別要素法による数値計算の結果から, せん断帯に発達する微小構造にはすべり速度依存性があることが分かった。

しかし, 江見層群の火山砕屑性堆積物の試料には火山性ガラスが含まれており, これが複合面構造の発達に影響を与えているか不明である。そこで, 複合面構造の発達とすべり速度との関係性をより精査するために, 試料として3種類の石英砂を用いた摩擦実験を行った。実験は全て乾燥条件下で, 封圧 2 MPa, すべり速度 1.0 m/s および 0.01 m/s, すべり量 10 m で実施した。すべり速度 1.0 m/s においてはすべり弱化を示し, 摩擦係数が定常状態を示すまでの弱化距離は 8–10 m であった。0.01 m/s では, すべり量 1 m 程度までのすべり強化に続いて定常状態に達する挙動を示した。石英砂におけるすべり速度と複合面構造の発達との対応性について, 今後, 微小構造観察などを通して精査していく予定である。

Gouge friction on a meter-scale laboratory fault

*Futoshi Yamashita¹, Eiichi Fukuyama^{2,1}, Akihiro Shimoda², Shun Watanabe²

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Graduate School of Engineering, Kyoto University

防災科学技術研究所では、岩石摩擦特性のスケール依存性を調べる目的で大型振動台を利用したメートル規模の摩擦実験をおこなっている。過去に実施したメートル規模の変はんれい岩試料同士を直接接触させておこなった摩擦実験では、摩擦係数が急減する仕事率の値がセンチメートル規模に比べ1桁小さくなるというスケール依存性を確認している。さらに様々な観察に基づき、その原因が摩耗に伴って自発的に発生・成長する断層面上の応力不均質にあると結論づけられた (Yamashita et al., 2015, Nature)。しかしながら自然の断層には一般にガウジと呼ばれる微細な岩石粒子が含まれている。ガウジ層を含む断層でも摩擦特性にスケール依存性が存在するか否かは重要な問題であることから、我々はメートル規模でのガウジ摩擦実験をおこなった。本研究でも変はんれい岩のブロックを母岩として用い、長さ1.5 m、幅0.1 mの接触面上に模擬ガウジを散布して摩擦実験をおこなった。模擬ガウジとしてジェットミルによって平均粒径10 μm 、最大粒径200 μm となるよう粉碎した変はんれい岩の粉末粒子を用いた。模擬ガウジを散布する面は凹凸が一面に渡って10 μm 以下となるよう成形した後、模擬ガウジをとらえられるようサンドブラストによって粗くした。模擬ガウジを接触面上にふるいを使って可能な限り均質に散布し、厚さが3 mmになるよう余分な模擬ガウジを取り除いた後、金属板を使って手で圧密した。大型振動台によるせん断載荷をおこなう前に油圧ジャッキにより最大6.7 MPaの垂直応力を与え、実験中は一定に保った。実験後、せん断を受けたガウジ層を観察するため、1実験あたり最低3箇所ではガウジ層を採取した。残りの模擬ガウジも可能な限り収集し、接触面に残った粒子は掃除機により除去した。本研究では目的に応じて2種類のせん断載荷による実験をおこなった。1つ目は速度-状態依存摩擦 (RSF) 則のパラメタを調べるための速度ステップ変化の載荷である。載荷速度を0.01 mm/sから1 mm/sの間で繰り返し変化させ、速度増加時と減少時の応答を収録した。得られたデータは、変はんれい岩の模擬ガウジが速度弱化の特性を示すことを示唆している。RSF則のパラメタ推定に関しては別の講演で報告をおこなう予定である (下田他, 2020, 本大会)。2つ目の載荷方法は定常すべり時の摩擦特性の調査を目的としたものであり、0.01 mm/sから30 mm/sの一定速度で載荷し最大で400 mmのすべり距離を与えた。定常状態での摩擦係数と仕事率とを比較したところ、岩石試料同士を直接接触させた状態の摩擦実験で見られていた高い仕事率での摩擦係数の急減が見られなかった。局所的な応力状態を調べるため模擬断層沿いに設置した歪ゲージアレイのデータを解析したところ、すべりに伴い模擬断層面上の垂直応力分布が不均質化ではなく均質化している過程が見られた。ガウジ層を含む状態では岩石同士が直接接触した状態で見られたような応力不均質が発達しづらく、それにより摩擦係数の急減が発生しなかったと考えられる。一方、載荷速度が高い条件での実験においては、実験の最終段階において巨視的な摩擦係数が低下し始める様子が観察されている。そのような実験では、実験後のガウジ層内に黒く固結した薄いガウジ片がしばしば見つかっており、せん断変形が集中し高い仕事率が発生して局所的に摩擦係数が低下したと考えられる。歪のデータでも、一旦均質化した垂直応力分布が巨視的な摩擦係数の低下と同期して再び不均質化していく様子を確認できる。したがって、ガウジ層を含む状態では応力不均質が発達するまでにより多くのすべり距離が必要となるものの、岩石同士が直接接触した状態と同様に応力不均質に起因する巨視的摩擦係数の大幅な低下が引き起こされ、小さな規模では観察されないような低い仕事率での巨視的摩擦係数の急減が発生する可能性がある。

Room B | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

[S09]PM-1

chairperson:Satoshi Matsumoto(Kyushu University)

Thu. Oct 29, 2020 1:45 PM - 2:15 PM ROOM B

[S09-01] Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule –

○Satoshi Matsumoto¹ (1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University)

1:45 PM - 2:00 PM

[S09-02] Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

○Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake (1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University , 2.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University)

2:00 PM - 2:15 PM

Stress tensor estimation and its temporal change based on seismic moment tensor data - Implication from flow rule -

*Satoshi Matsumoto¹

1. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University

はじめに

中小地震の発震機構解やモーメントテンソルを用いた応力場推定がAngelier(1974)の先駆的な研究を皮切りに多くの手法開発や領域での推定がなされてきた（レビューとして、たとえば岩田・他，2020）。その中でMatsumoto(2016)は地震が媒質中の非弾性現象であることに着目し、マクロに見るとPrandtl-Reuss則に従うと考えて、モーメントテンソル密度が載荷される偏差応力に比例するとして応力テンソルを推定した。しかしながらその仮定が成立しているかどうかは定かではない。また、いわゆる応力インバージョンによって推定される偏差応力の比（応力比 $\phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ）ここで $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ はそれぞれ最大、中間、最小主圧縮応力は推定精度が悪く、その意味するものについても不明な点がある。そこで本研究では非常に単純な計算からこれらの点について考察する。

流れ則の有効性と応力インバージョン

ここでは静岩圧平衡状態から3軸応力がかかる状態を考える。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ をそれぞれ各タイムステップで増加させ、最大せん断応力が破壊基準を超えた時に一定の応力降下が起こるとする（図1a参照）。具体的には基準はTresca状態を考えることになる。たとえばCoulombの破壊基準（摩擦係数で最適面で滑りが起こる）であっても $\mu = 0.6$ の時 σ_1 から ± 30 度の面で滑りが起こる。どちらも同様に起こるはずであるのでこれらを足し合わせれば単純に45度のすべりのモーメント解放と同じになる（図1b）。さて、ここでは簡単のために媒質中で強度は一定とし、基準を満たした瞬間に媒質で一斉に地震が起こり、応力降下に対応したモーメントが解放されることとする。応力場は最大せん断応力になる組み合わせの大きい応力と小さい応力でそれぞれ応力降下量の半分現象、増加することになる。最大せん断応力を基準とした場合、地震後も主応力は x, y, z 軸と一致し、回転は起こらない。

載荷する応力の比 $\phi = 0.2, 0.5, 0.8$ 、（ $\sigma_1 = \sigma_x, \sigma_2 = \sigma_z, \sigma_3 = \sigma_y$ ）の3つのケースの場合の結果を図2に示す。載荷する応力（ $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ）は各時間ステップで0.1, -0.1, -0.06（ $\phi = 0.2$ ）, 0.1, -0.1, 0（ $\phi = 0.5$ ）, 0.1, -0.1, 0.06（ $\phi = 0.8$ ）MPa/time stepである。ここで強度は10MPa、応力降下は2MPaの場合を示す。この結果では以下の特徴が得られる。1）媒質が破壊強度に達するまでは媒質内の応力は載荷された応力と等しい（stage 1）。 $\sigma_1 - \sigma_3$ の組み合わせが強度に達すると地震が起き始め、差応力は強度と強度一応力降下量の間を保つ（stage 2）。 σ_2 が増加（減少）しつづけ、 $\sigma_2 - \sigma_3$ （ $\sigma_1 - \sigma_2$ ）の組み合わせが強度に達し、これらを解放する方向でも地震が起き始める（stage 3）。この結果、媒質内の応力は $\sigma_2 \approx \sigma_3$ （ $\sigma_1 \approx \sigma_2$ ）の状態になる。一方解放されるモーメントは載荷される応力に比例する。すなわち、地震を用いた応力推定においては載荷される応力（応力レート）のみが反映され、その場応力を推定することはできない。2）Stage 2においては σ_2 の影響は観測されず、応力比はいつも0.5になる。3）載荷される応力（強度を超えて）と解放される応力（非弾性ひずみ）は比例関係になり、いわゆる流れ則を満足する。

さらに、外部から瞬時に加わる応力変化から強度を見積もる方法について検討を行った。Hardebeck and Hauksson(2001)で提唱された応力比によらない主応力の回転から強度を推定する方法では応力比 < 0.5 の場合、 > 0.5 の場合では $\sigma_2 - \sigma_3$ 、 $\sigma_1 - \sigma_2$ の面内の回転は直接応力変化を示し、強度の情報は含まない。そのほかの面内の変化では強度が求められることが明らかになった。

以上のように、簡単な計算から応力場推定についての検討を行い、今後の応力場推定や強度推定、モデリング

について重要な知見が得られた。

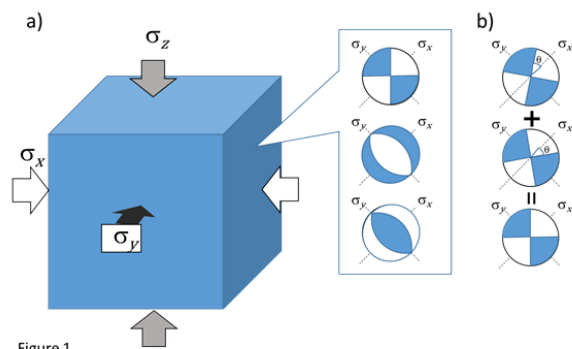


Figure 1.
a) Coordinate of the simulation in the text. Three types of seismic moment tensor indicated in right side occur inside of medium. b) Schematic illustration showing summation of two seismic moment tensor with compression angle perturbations are averaged.

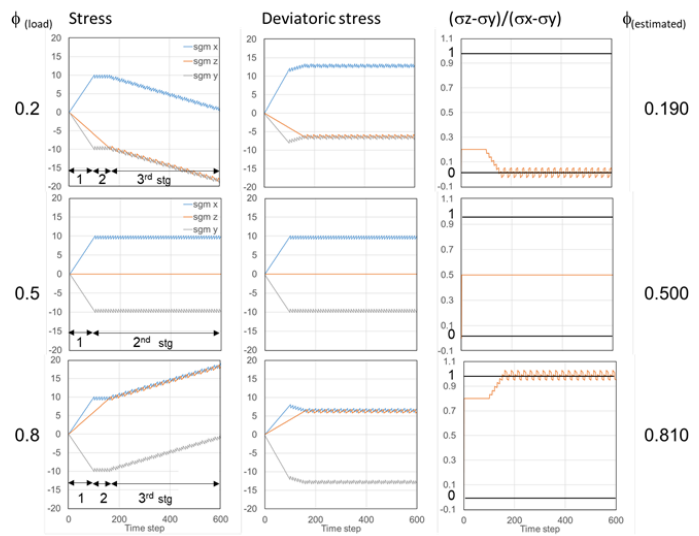


Figure 2
Column figures show temporal variations of stresses, deviatoric stress, and in-situ stress ratio, respectively. Coordinate system is shown in Fig. 1b. Colors in the figures are shown in legend. Stress ratios of given loaded from outside and estimated are indicated in the left and right of the column figures. Row corresponds to case for different loaded stress ratio. Arrows show stages of stress condition.

Characteristics of Source Parameter for Aftershocks of the 2016 Kumamoto Earthquake Estimated by the Coda Spectral Ratio Method

*Naoto Maesako¹, Satoshi Matsumoto², Ayaho Mitsuoka¹, Group for Urgent Joint Seismic Observation of the 2016 Kumamoto Earthquake

1. Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyushu University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University

地震の震源特性を理解するためには、地震モーメント M_0 、コーナー周波数 f_c 、応力降下量 $\Delta\sigma$ などの震源パラメータを推定することが基本となる。地震モーメントとコーナー周波数のスケーリング則(相似則) $M_0 \propto f_c^{-3}$ が成り立つとすれば、応力降下量は地震の規模に依らず一定の値を取ることが知られている。このような震源スケーリングや応力降下量のばらつきを調べることは、震源物理の理解だけでなく、将来起こり得る地震の強震動予測の向上のためにも重要であると言える。

本研究では、2016年熊本地震系列における余震の震源分布に焦点を当て、そのうちの318イベントを対象としたS波コーダスペクトル比法による震源パラメータの推定を行い、応力降下量のばらつきやその要因について調べた。解析は、基本的にSomei et al. [2014]の手順に倣って、観測記録から震源スペクトル比を求めた。観測記録は防災科学技術研究所(以下、防災科研)高感度地震観測網Hi-netの観測点から7点、熊本地震合同地震観測グループによる観測点から9点の計16点における速度波形データを用いた。1–30Hzの周波数帯におけるSN比(Signal-Noise Ratio; SNR)が2以上という条件を満たす地震波形データを用いて、地震モーメント比・親地震と子地震のコーナー周波数の計3つの未知パラメータを非線形最小二乗法によるインバージョンで推定した。親地震の地震モーメントは防災科研広帯域地震観測網F-netのメカニズム解による値で固定し、地震モーメント比から子地震の地震モーメントを推定した。

解析の結果、地震モーメントはコーナー周波数に対して $M_0 \propto f_c^{-4.35}$ の関係に従う様子が見られた。一般的に知られるスケーリング則である $M_0 \propto f_c^{-3}$ の関係は破綻しており、規模依存性を示唆する結果となった。また、推定されたコーナー周波数と地震モーメントを用いて、地震断層を円形クラックと仮定して応力降下量を推定した[Eshelby, 1957; Brune, 1970, 1971]。対象とした318イベントの応力降下量は0.21–17MPaの間でばらついており、幾何平均は2.6MPa($-1\sigma/+1\sigma$ はそれぞれ1.2, 5.5MPa)であった。過去に日本国内で発生した内陸地震の応力降下量[Somei et al., 2014]と比較すると、本研究の推定値は空間的なばらつきの範囲内であった。一方、本研究では詳細に推定精度を検討したところ、熊本地震震源域内においても地震の規模や震源深さに対する有意な依存性が認められ、いずれも正の相関を示した(相関係数はそれぞれ0.47, 0.43)。これらは当震源域における地震の発生メカニズムを考えるうえで重要な結果である。

謝辞：解析において、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net、広帯域地震観測網F-net、気象庁のデータも用いました。記して感謝申し上げます。

Room B | Regular session | S09. Statistical seismology and underlying physical processes

[S09]PM-2

chairperson:Shiro Ohmi(DPRI, Kyoto University), chairperson:Akemi Noda(MRI)

Thu. Oct 29, 2020 2:30 PM - 3:30 PM ROOM B

[S09-03] Shear strain energy changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

○Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵ (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at Meteorological Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5.Institute of Statistical Mathematics)

2:30 PM - 2:45 PM

[S09-04] Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

○Ichiro Kawasaki¹ (1.Tono Research Institute of Earthquake Science)

2:45 PM - 3:00 PM

[S09-05] Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

○Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹ (1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

3:00 PM - 3:15 PM

[S09-06] Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

○Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹ (1.Nihon University)

3:15 PM - 3:30 PM

Shear strain energy changes caused by the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Comparison with aftershock activity

*Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito², Eiichi Fukuyama^{3,2}, Toshiko Terakawa⁴, Sachiko Tanaka², Mitsuhiro Matsu'ura⁵

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, now at Meteorological Research Institute, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 3. Graduate School of Engineering, Kyoto University, 4. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 5. Institute of Statistical Mathematics

地殻内の歪みエネルギーを用いて断層破壊が進展することを考慮すると、地震発生層内に蓄積した歪みエネルギーの分布を明らかにすることは、地震の発生メカニズムを理解する上で重要である。本研究では、歪みエネルギーのうち地震発生との関係が深いと考えられるせん断歪みエネルギーに注目し、2016年熊本地震によるせん断歪みエネルギー変化を、地殻内の3次元空間分布として定量評価した。

地震時のせん断歪みエネルギー密度変化の空間分布を求めるには、地震による応力変化と背景応力場を知る必要がある。地震時の応力変化については、GNSS観測による地震時の地表変位データから断層すべりモデルを推定し、半無限弾性体を仮定してこのすべりモデルによる周辺地殻内の応力変化分布を計算した。一方、背景応力の向き（主応力軸の方向・応力比）は対象地域で発生する地震のメカニズム解から推定可能だが、その絶対値を知ることは難しい。そこで本研究では、背景応力の向きについてはTerakawa and Matsu'ura (2010) による応力インバージョンの結果を用い、背景応力の大きさは地殻内の摩擦強度に従うと仮定した。この際、地殻の有効摩擦係数として $\mu_{\text{eff}}=0.0, 0.1, 0.2, 0.4$ を候補に設定し、それぞれの場合のせん断歪みエネルギー密度の変化量を算出したところ、その空間分布のパターンは背景応力のレベルに強く依存することが分かった。背景応力の大きさがゼロであることを意味する $\mu_{\text{eff}}=0.0$ の場合、せん断歪みエネルギー密度は全ての場所で増加した。一方、摩擦係数が大きい場合（ $\mu_{\text{eff}}=0.4$ ）は、背景応力と地震による応力変化が同じ向きの地点でせん断歪みエネルギー密度が増加、逆向きの地点で減少した。

次に、以上のように得られたせん断歪みエネルギー密度変化を積分して、地震によるせん断歪みエネルギー変化の総量を計算した。 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ のケースでは、地殻内のせん断歪みエネルギーの総量は増加した。地震が地殻内に蓄積したエネルギーを解放する物理プロセスであることを考慮すると、これは不合理な結果である。その他のケースではせん断歪みエネルギーの総量は減少し、背景応力レベルが大きいほど減少量が大きいことが分かった。 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ のケースで見られたエネルギー増加の不合理を避けるには、有効摩擦係数は0.05以上でなければならない。これは深さ10 kmで最大せん断応力14 MPaに対応する。このように、せん断歪みエネルギー変化の総量の議論から背景応力レベルの下限値を拘束することができた。

最後に、 $\mu_{\text{eff}}=0.0$ 以外のケースについて、せん断歪みエネルギー密度変化の空間分布と、熊本地震本震後1週間のうちに発生した余震の震源分布を比較した。その結果、せん断歪みエネルギー密度増加域と余震発生域には相関が見られ、余震の総数のうち凡そ75%がエネルギー密度増加域で発生していたことが分かった。余震が完全にランダムに発生したと仮定して100,000通りの余震データセットを合成し、テスト解析を行ったところ、せん断歪みエネルギー密度増加域で75%以上の余震が発生する確率は、0.001%より小さかった。従って、熊本地震の場合、せん断歪みエネルギーの増加と余震活発化の関連性は統計的に有意だと考えられる。本震の震源断層近傍ではエネルギーの増加で説明できない余震が発生したが、これらの余震発生を理解するには間隙水圧の増加による強度低下などの別の物理プロセスを考慮する必要がある。

Reference:

Noda, A., Saito, T., Fukuyama, E., Terakawa, T., Tanaka, S., and Matsu'ura, M. (2020). The 3-D spatial distribution of shear strain energy changes associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence,

southwest Japan, Geophysical Research Letters, 47, e2019GL086369.

<https://doi.org/10.1029/2019GL086369>

Space-time separation of earthquake activities in the 1998 and the 2020 Hida-Kamikochi, central Japan, earthquake swarms

*Ichiro Kawasaki¹

1. Tono Research Institute of Earthquake Science

●2020年4月22日、驚いたことに飛騨上高地群発地震が再来した。たった20年程で激しい群発地震活動が再来したことは熱水が原因であることを示している。本発表は、気象庁HPの「震度データ検索」によって検索・作図した分布図を手掛かりに、そのメカニズムを探る試みである。

●1998年と2020年で、南北0.2分(0.37km)、東西2分(0.30km)以内で発生したM4以上の地震の組み合わせを探すと、表1のように、XA1, XA2, XB, XCの4地点が見出された。これらの地点は群発活動域が特定の時空間に移動したときの最初のM3以上の地震、あるいはそれに近いことに気が付いたので、時間区切りを「日」では無く、必要に応じて「時」、「10分」に下げると、群発地震活動は、図1のように時空間的に分離することが明瞭になった。2020の群発地震は、この予稿を準備している段階でM2以上の地震では槍ヶ岳周辺で停止してしまっているが1998年の時には富山・長野・岐阜県境まで拡大したので図には1998年の分布を示したが、時空間的に分離したことは2020年でも明瞭である。2回とも同じ区間区切りで時空間的に分離が生じたので、それは偶然ではない。

●1998年8月7日に始まった飛騨上高地群発地震と今回の群発地震のM2以上の群発活動域は、図1のような共通の区間区切りで「時空間的に分離」して移動した。図の区間を、南から北に向かって(A)(北緯36度15.5分以南。上高地周辺。地震の深度6kmから4km)、(B)(同15.5分から16.7分。西穂高岳東南側。深度6kmから4km)、(C)(同16.6分から18.8分。西穂高北側。深度5kmから4km)、(D)(同18.8分から22.3分。槍ヶ岳西山腹。深度4kmから1km)、(E)(同22.3分以上、槍ヶ岳から野口五郎岳。深度2kmから0km)と名付ける。なお、発生深度は6kmから4kmと述べた場合は深度6.5kmから3.5kmを意味する。

●特異な例を挙げておこう。

期間[2]には(C)が活動域になった。8月14日11時34分に3.1、14時6分にM4.2の地震(深度3km)が発生し、活動域は西穂高岳尾根部に向かって「南」に延びて行った。この時空間の群発活動は「半日程」で沈静化した。

期間[3]には活動域は(B)に移動した。同日23時52分、長野県側の南端近くでM4.0(深度5km)の地震が発生し、活動域は西穂高岳尾根部に向かって「北」に延びて行き、この時空間の群発活動は「1日程」で沈静化した。

●(A)から(D)の様に「空間的に分離」していることは、区間境界(例えば西穂高岳尾根部直下)に、熱水の移動を妨げる境界面があることを意味しているとしか考えられない。

「時間的に分離」していることは、地震発生域に熱水が充満して群発地震活動を引き起こしているのでは無いことを意味している。直接的な証拠は無いが、それは、「群発地震活動域の下に熱水混合層が上記区間におおよそ対応するように分離して分布しながらも、熱水脈で細々と連結して水圧は共有している。ある区間で水混合層から突破的に熱水が溢れ出して地震活動が生じると熱水混合層全体で水圧が下がり、今まで地震活動が生じていた場所では地震活動が終息する。そのようなサイクルを区間を変えて繰り返したこと」を意味しているように思われる。このようなモデルで無ければ「活動域の時空間分離」を説明することは困難であろう。

●立山・黒部地域では黒部峡谷の直下に熱水混合層が分布することは、川崎(2019, 測地学会)が1996年集中観測による地殻構造(Matsubara, et al, 2000)や重力異常データによる超低密度域(源内・他, 2002)などに基づいて議論した通りである。

槍・穂高・上高地地域にはその様な研究成果はないが、Mikumo et al. (1995)による上宝観測所や高山観測所の観測データのトモグラフィー、水谷・他(1983)による奥飛騨温泉郷の深さ700mの地熱調査井の変質鉱物組成、温泉水の化学組成、酸素・炭素同位体比の研究、焼岳の山頂の160℃程の火山ガスのヘリウム3/4比などから、地下数kmに熱水混合層が分布することは疑えない。むしろ、群発地震の活動域の「時空間的分離」こそが熱水混合層存在の強力な状況証拠であろう。

●以上はM2以上の地震による飛騨上高地群発地震像である。M2以下の微小地震で見ればもっと多彩な活動をしている（大見，私信）。両方を合わせれば群発地震の全体像になるのであろう。

	発生日	時刻	北緯	東経	深度	M
XA1	1998/08/09	12:45	36° 14.5′	137° 38.3′	4km	M4.6
	2020/04/27	11:32	36° 14.7′	137° 38.3′	5km	M4.8
XA2	1998/08/12	09:40	36° 14.2′	137° 39.0′	4km	M4.6
	2020/04/23	13:57	36° 14.1′	137° 39.0′	5km	M5.0
XB	1998/08/14	23:52	36° 15.8′	137° 38.0′	5km	M4.0
	2020/05/13	10:28	36° 15.7′	137° 38.1′	3km	M4.8
XC	1998/08/14	14:06	36° 17.8′	137° 37.6′	3km	M4.2
	2020/05/19	14:23	36° 17.6′	137° 37.7′	3km	M4.7

表 1 緯度0.2分
(0.37km)，経度
0.2分 (0.30km)
以内で，1998年と
2020年に発生した
M4以上の地震の
組み合わせ。

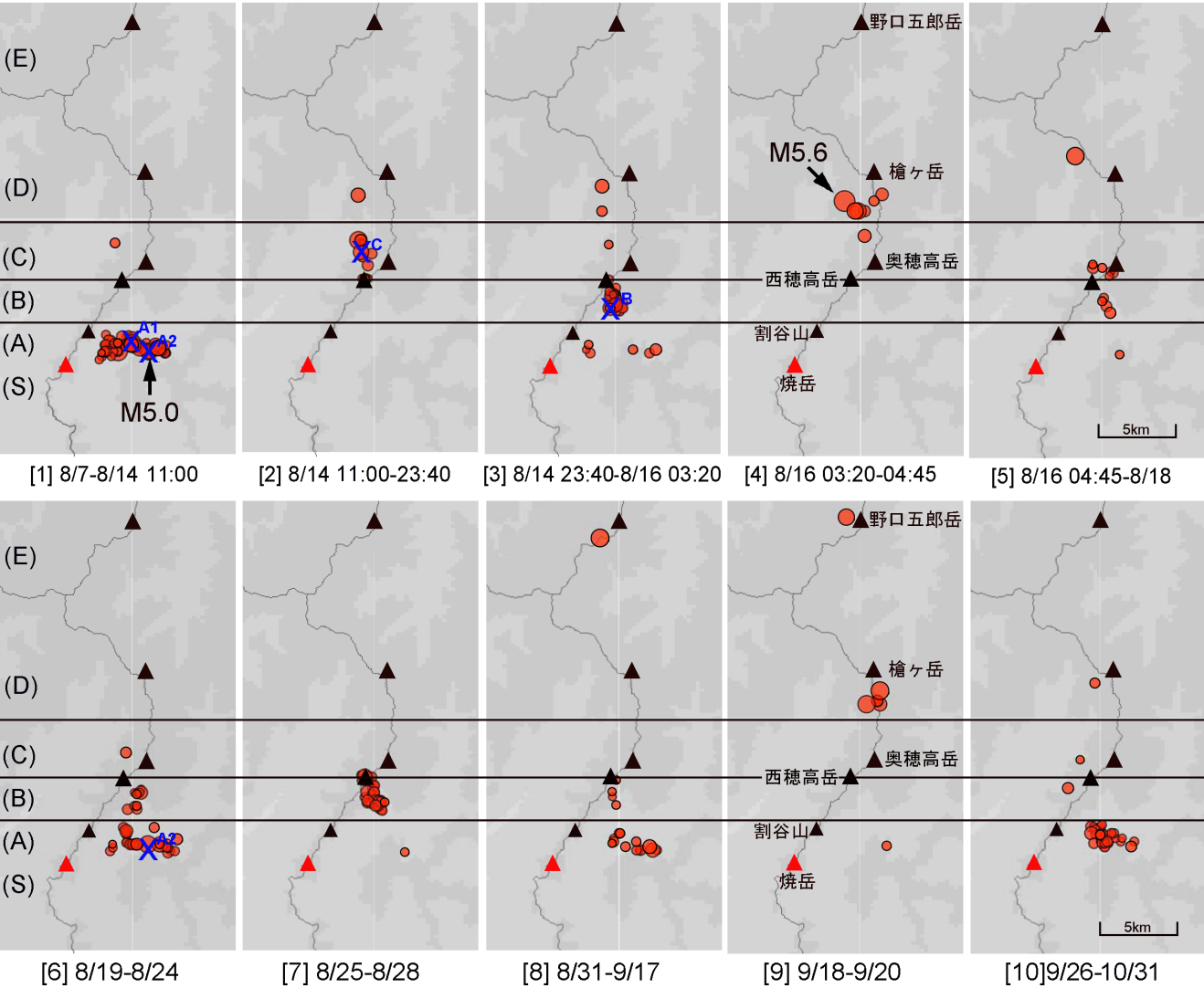


図 1 1998年飛騨上高地群発地震の期間 [1] から [10] のM2以上の地震の震央分布。
気象庁HPの「震度データベース検索」によって作図した震央分布を加筆編集した。

Swarm Activity in the Hida Mountain Range, Central Japan, Started from April 2020, Followed by a Dyke Intrusion Event Inferred from Crustal Deformation

*Shiro OHMI¹, Takuya NISHIMURA¹, Manabu HASHIMOTO¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

§はじめに：飛騨山脈南部の上高地およびその周辺において、2020年4月23日のM=5.5（以下、Mは気象庁マグニチュード）の地震を最大地震として（2020年8月下旬現在）、活発な地震活動が続いている。今回の地震活動は、4月6日の上高地徳本峠付近での小規模な群発地震で始まったと考えられる。その後若干の震源移動と消長を繰り返した後、4月22日未明にM=3.8を含む地震が徳本峠付近の4月6日の活動域とほぼ同じ位置で発生し、翌日4月23日13時44分にM=5.5の地震が発生した。その後、上高地の谷底から岳沢にかけての地域に震源域が拡大し、5月13日早朝からの活動で飛騨山脈主稜線（岐阜・長野県境）の近くまで震源域が拡大した。5月19日13時12分の地震（M=5.4）において震源域が主稜線の岐阜県側に拡大し、その後は、長野県側と岐阜県側の双方で散発的な活動が継続している。

§過去の群発地震との比較：飛騨山脈の南部の、主に鷲羽岳から焼岳付近は断続的な群発地震が頻発する地域で、京大防災研が1970年代後半に地震観測を開始して以来、既往研究によれば、主な群発地震活動が1990～1991年（焼岳および烏帽子岳付近）、1993年6月～1994年1月（槍ヶ岳）、1998年8月～2000年2月（飛騨山脈群発地震）、2011年3月～4月（東北地方太平洋沖地震直後の群発地震）、2014年5月（西穂高・千石尾根付近）、2018年11月～2019年1月（焼岳西麓および上高地）などに発生している。また、小規模ながら、上述以外にもたとえば2003年12月の焼岳北東域や2013年10月の涸沢付近などにもクラス的な地震活動が見られた。これらのうち、1998年の活動は、1970年代後半以降では最大の活動であった。同地域で発生する群発地震の震央分布をみると、2018年の活動までは大まかにみるとそれぞれの震源域が重なっておらず、震源域が「棲み分け」をする現象が観察される。また、過去の大部分の活動では一連の活動の震源域が飛騨山脈の主稜線を越えることはなく、岐阜・長野のいずれかの側に限定されることが特徴であり、これまでの唯一の例外が1998年の活動であったが、今回の2020年の活動は5月19日の段階で長野側から岐阜側へ震源域が拡大し、1990年代以降2度目の例となった。

§地殻変動データの解析：京大防災研は、焼岳中尾峠、焼岳山頂などで焼岳火山の研究観測の一環としてGNSS連続観測を実施している。また、焼岳西側山麓の奥飛騨温泉郷中尾、同・栃尾でも別プロジェクトでGNSS連続観測を継続中である（京大・名大・北大の共同運用）。これらのデータに、気象庁の焼岳南峰南東および大正池南の観測点のデータを加えて、栃尾を基準点として解析したところ、4月下旬から一部の観測点で有意な地殻変動が検出され、5月中旬にはほぼ全ての観測点で変動が加速した。今回の地震活動は、M=5.0以上の地震を複数個含む活発なものであるが、GNSSで観測された地殻変動は、地震の断層運動による地殻変動の寄与だけでは観測された変動量を説明できないことがわかった。そこで、開口断層を仮定して変動源のパラメタを推定したところ、上高地の谷底から西穂高岳の稜線にかけての位置、および西穂高岳と奥穂高岳の中間付近の稜線を跨ぐ位置に、それぞれ北西～南東方向のほぼ鉛直な開口断層（総体積変化量 $2.4\sim 2.5\times 10^6\text{m}^3$ ）を置くことにより、変動量を説明できることがわかった。なお、InSARによる解析によれば、焼岳北東斜面には長期的な膨張が認められているが（たとえば、気象庁、第143回噴火予知連絡会資料）、今回の地震活動の開始前後の比較では有意な変動は認められない。

§考察：上で求められた開口断層の位置と、防災科研のF-netにより求められた、活動期間中の主だった地震の発震機構解を比較すると、求められた開口断層の周辺に発生した地震の発震機構解にはNon Double Couple成分が大きな地震が多く見られており、今回の解析の妥当性を示すものと考えられる。今回の活動は、(1) 過去

の活動の震源域と「棲み分け」をせず1998年の震源域に重なるように発生した、(2) 飛騨山脈の主稜線を跨ぐように震源域が拡大した、の2点で特異である。また、直近の2018年の群発地震活動では、すでに現在と同様のGNSS観測網が稼働していたが有意な地殻変動は検出されなかった。このようなことから類推すると、当地域で発生する群発地震のうち、主稜線を跨ぐような規模の大きな地震活動ではダイク貫入イベント等を伴う可能性があり、今回の活動だけではなく、1998年の活動もその一つであった可能性がある。2018年の活動のような地殻変動を伴わない群発地震の発生メカニズムの考察は今後の課題である。

§謝辞：気象庁からGNSS観測データを提供していただいた。記して感謝する。

Spectral change of the deep low frequency earthquakes near Yakedake volcano in May 2020

*Daisuke Kamata¹, Motoo Ukawa¹

1. Nihon University

1.はじめに

火山地域では深部低周波地震と呼ばれる通常の構造性地震に比べて卓越周波数が低い地震が深さ10～50kmで発生する。深部低周波地震は火山深部のマグマの活動と関連して発生すると考えられているが、詳細なメカニズムは明らかになっていない。

飛騨山脈の長野県と岐阜県の境界に位置する焼岳でも深部低周波地震活動が見られる。この地域では2020年5月2日から3日にかけて、20時間以上にわたり、規模の小さい深部低周波地震が連続的に発生した。本研究では、この連続的な深部低周波地震活動のスペクトルの時間変化について述べる。

2.焼岳の深部低周波地震活動の概要

気象庁の一元化震源カタログによると、焼岳近傍では通常の構造性地震が深さ0～10 kmで、また深部低周波地震が深さ10～40 kmで発生している。深部低周波地震は焼岳の北から北西にかけて、東西に10km、南北に5kmの範囲を中心に発生している。この活動は2つの群に分かれて活動し、東側の群は主として深さ20～35 kmで発生、西側の群は主に深さ10～20 kmで発生し、西ほど浅くなる傾向がある。西側の群は東側の群に比べて活動度は低い。

焼岳周辺の深部低周波地震は大見他(2003)で指摘しているように群発的に発生する傾向が強い。2004年以降は、2004年に群発的な深部低周波地震活動が起こって以降、この活動ほど顕著ではないものの、数年に一度続発的な活動が見られ、2019年以降、活動度は高くなっていた。

3.2020年5月の活動

2020年5月2日～3日にかけて非常に規模の小さい深部低周波地震が連続的に発生した。気象庁の一元化震源カタログによると、これらの連続的な深部低周波地震のマグニチュードは-0.9～0の範囲で、西側の浅い群に属し、深さは10～20 kmに決められている。国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-net（以後、Hi-netと略す）の観測点の連続地震記録を見ると、この連続的な活動は2020年5月2日の正午ごろに始まっており、2020年5月3日の15時ごろに収束している。

4.2020年5月2日～3日の連続的発生のスペクトル

5月2日～3日の深部低周波地震活動について、鵜川(2020)と同様のウェーブレット解析を適用して、スペクトルの時間変化を調べた。ウェーブレット解析は低周波振動の中に高周波が重畳する場合に有効である。アナライジング・ウェーブレットとして下記の式で与えられるMorletのウェーブレットを採用した。

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{j\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2}$$

ここに η は無次元のパラメーター、 ω_0 は無次元の周波数パラメーターである。計算方法はTorrence and Compo(1998)に従った。本研究では、ウェーブレット解析結果から2秒間のスペクトル強度が最大となる周波数を、時間をずらしながら読み取ることで卓越周波数の時間変化の検出を試みた。地震波形データはHi-netの

100Hzサンプリング波形データを使用している。

その結果、図に示すようにHi-net観測点N.KOKH（神岡）では2020年5月2日18時頃から1Hz～2Hz程度の振動が連続的に卓越するようになり、2020年5月3日3時頃に2Hz程度の顕著な振動は見られなくなったが、1Hz程度の振動は2020年5月3日14時頃まで顕著に続いているということがわかった。同様の傾向がHi-net観測点N.KTRH（上宝）でも観測されている。

5.考察とまとめ

深部低周波地震が噴火や火山浅部の群発地震活動と同期して活発化する事例（例えば1991年ピナツボ火山噴火や1998年岩手山）があり、深部低周波地震が火山深部のマグマ活動と関連して発生していることを示していると考えられている。

焼岳近傍では2020年4月22日から地殻浅部の東北東側を中心に群発地震活動が活発化していた。5月2日～3日に発生した深部低周波地震の連続的活動は、この群発地震活動の活発な期間に発生している。浅部の群発地震と深部低周波地震の震央は一致していないが、深部からのマグマなど、火山性流体の移動を示している可能性がある。

本研究では、5月2日～3日に焼岳近傍で深部低周波地震が連続的に発生し、その卓越周波数が1～2Hzから1Hz程度に時間変化したことを明らかにした。今後、震源の精査と卓越周波数が変化するメカニズムを明らかにすることが課題である。

6.謝辞

本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所の高感度地震観測網Hi-netの地震波形データを使用した。また、図の作成にはGMT6を使用した。記してここに感謝いたします。

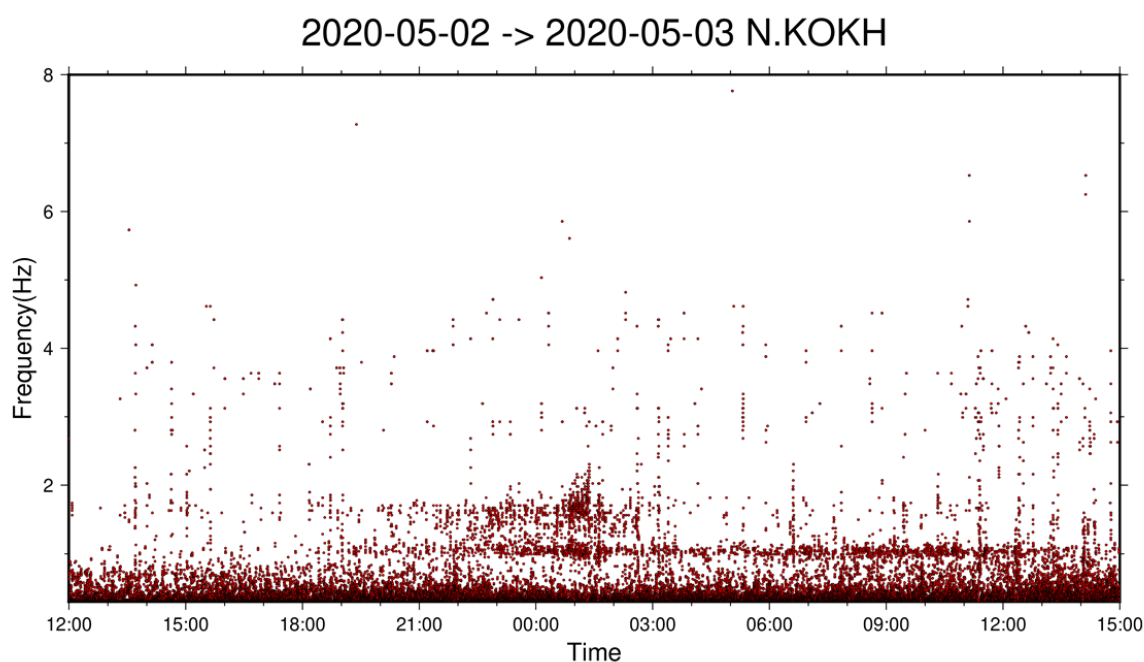


図.Hi-net観測点（N.KOKH）における5月2日12:00～5月3日15:00の卓越周波数の変化