

## 封圧下での含水砂岩の弾性波速度と電気伝導度の同時測定

Simultaneous measurements of elastic wave velocity and conductivity in a brine-saturated sandstone under confining pressures

\*南部 美菜子<sup>1</sup>、渡辺 了<sup>1</sup>

\*Minako Nambu<sup>1</sup>, Tohru Watanabe<sup>1</sup>

1. 富山大学大学院理工学教育部

1. Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama

Pore-fluid pressure is a critical parameter that governs geodynamic processes including seismic activities. Its evaluation through geophysical observations provides us insights into these processes. The quantitative evaluation requires a thorough understanding of the influence of pore-fluid pressure on geophysical parameters, such as seismic velocity and electrical conductivity. We have studied elastic wave velocities and electrical conductivity in a brine-saturated sandstone under different confining and pore-fluid pressures.

Berea sandstone (OH, USA) was selected as a rock sample for its high porosity (~20%) and permeability ( $\sim 10^{-13}$  m<sup>2</sup>). It is mainly composed of subangular quartz grains, with small amounts of feldspar grains. Microstructural examinations showed that clay minerals (e.g., kaolinite) and carbonates (e.g., calcite) fill many gaps between grains. The grain size is 100-200 micrometers. Cylindrical samples (D=26 mm, L=30 mm) were saturated with 0.1 M KCl aqueous solution. Measurements have been made using a 200 MPa hydrostatic pressure vessel, in which confining and pore-fluid pressures can be separately controlled. An aqueous pore-fluid is electrically insulated from the metal work by using plastic devices. Elastic wave velocity was measured with the pulse transmission technique (PZT transducers, f=2 MHz), and electrical conductivity the two-electrode method (f=40 - 100 kHz).

Confining and pore-fluid pressures work in opposite ways. Increasing confining pressure closes pores, while increasing pore-fluid pressure opens them. For a given pore-fluid pressure, both compressional and shear velocities increase with increasing confining pressure, while electrical conductivity decreases. When confining pressure is fixed, velocity decreases with increasing pore-fluid pressure while conductivity increases. The closure and opening of pores can explain observed changes of velocity and conductivity. For a given differential pressure, velocities show no significant change with increasing confining pressure, while conductivity decreases. The decrease in conductivity might be caused by irreversible compaction of clays under confining pressures.

キーワード：地震波速度、電気伝導度、流体、間隙流体圧

Keywords: Seismic Velocity, Electrical Conductivity, Fluid, Pore Fluid Pressure

## 含水花崗岩における弾性波速度と電気伝導度の封圧依存性

Pressure dependence of elastic wave velocity and electrical conductivity in a brine-saturated granitic rock

\*牧村 美穂<sup>1</sup>、渡辺 了<sup>1</sup>

\*miho makimura<sup>1</sup>, Tohru Watanabe<sup>1</sup>

1.富山大学大学院理工学教育部

1.Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama

Geophysical mapping of fluids is critical for understanding crustal dynamics. A unified model of a fluid-bearing rock for velocity and conductivity is essential for quantitative inference on the fluid distribution. We have measured elastic wave velocities and electrical conductivity in a brine-saturated granitic rock under hydrostatic pressures and observed pore structures by X-ray CT and BIB-SEM. Based on observation of pores, we have constructed a phenomenological model to explain the observed pressure dependence of velocity and conductivity.

Measurements were made on a fine grained biotite granite saturated with 0.1 mol/L KCl solution. Both compressional and shear wave velocities increased with increasing confining pressure and electrical conductivity decreased. The velocities approached to those of solid phase at high pressure, while the conductivity was still much higher than that of the solid phase. These changes must reflect the closure of pores under pressure.

X-ray CT examinations showed that a lot of grain boundaries were open and that they formed connected conduction paths. Few intragrain cracks were observed. BIB-SEM observations on open grain boundaries showed that the aperture varied along a grain boundary. Grain boundary segments with large apertures must be connected to form connected conduction paths under high pressure.

"Bed of nails" model (Gangi, 1978) was employed to model an open grain boundary with varying aperture. The model assumed a power law distribution of aperture. Compressional wave velocity was calculated following the formulation of Carlson and Gangi (1985). "Bed of nails" model was combined with the effective medium theory (Kirkpatrick, 1973) to calculate electrical conductivity. The observed pressure dependence of compressional wave velocity was well reproduced, while that of conductivity poorly reproduced. The calculated conductivity tends to be lower than the measured value at high pressures. The model should take into account the connectivity of pores. The spatial distribution of aperture should be investigated.

キーワード：地震波速度、電気伝導度、流体、比抵抗

Keywords: seismic velocity, electrical conductivity, fluid, resistivity

## 一軸圧縮に伴う含水花崗岩の電気伝導度変化

Electrical conductivity change in a brine-saturated granitic rock under uni-axial compression

\*澤城 凌<sup>2</sup>、森本 美咲<sup>2</sup>、渡辺 了<sup>1</sup>

\*Ryo Sawaki<sup>2</sup>, Misaki Morimoto<sup>2</sup>, Tohru Watanabe<sup>1</sup>

1.富山大学大学院理工学研究部、2.富山大学理学部

1.Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 2.Faculty of Science, University of Toyama

Geophysical observations have shown that fluids exist pervasively within the crust. Fluids fill intergrain cracks (open grain boundaries) and intra-grain cracks at the upper and middle crust conditions. Since the opening of cracks strongly depends on the stress state, electrical conductivity should be anisotropic under a stress state. We have conducted uni-axial compression tests on brine-saturated granitic rocks and studied the change in electrical conductivity in the directions parallel and perpendicular to the compression.

The loading system is composed of a hand press (Maximum load: 20 kN), a load cell and stainless steel end-pieces. A fine grained (100-500  $\mu$ m) biotite granite (Aji, Kagawa Pref., Japan) was selected as a rock sample for its small grain size and textural uniformity. A cube sample with the edge length of 25 mm was filled with 0.1 M KCl aqueous solution and loaded up to 20 MPa. Electrical impedance was continuously monitored during a compression test with two-electrode method (Ag-AgCl electrodes).

Electrical conductivity decreased with increasing axial stress in the directions parallel and perpendicular to the compression. When the axial stress was increased from 0 MPa to 5 MPa, the magnitude of decrease in conductivity was 2% and 4% in the direction parallel and perpendicular to the compression, respectively. The decrease in conductivity was much smaller than that observed in hydrostatic compression tests (e.g., Watanabe and Higuchi, 2015). The decrease in conductivity must be caused by the closure of cracks, which were perpendicular or subperpendicular to the compression.

キーワード：電気伝導度、応力、異方性

Keywords: electrical conductivity, stress, anisotropy

## 含水チャートの弾性波速度と電気伝導度

## Elastic wave velocities and electrical conductivity in a brine-saturated chert

\*貝羽 洋平<sup>2</sup>、渡辺 了<sup>1</sup>\*Youhei Kaiwa<sup>2</sup>, Tohru Watanabe<sup>1</sup>

1.富山大学大学院理工学研究部、2.富山大学理学部

1.Graduate School of Science and Engineering, University of Toyama, 2.Faculty of Science, University of Toyama

Geophysical mapping of fluids is critical for understanding crustal processes. Seismic velocity and electrical resistivity structures have been revealed to study the fluid distribution. However, the fluid distribution has been still poorly constrained. Observed velocity and resistivity should be combined to make a quantitative inference on fluid distribution. The combined interpretation requires a thorough understanding of velocity and resistivity in fluid-saturated rocks. We have studied elastic wave velocities and electrical conductivity in a brine-saturated chert to understand the connectivity of pores at low porosity.

A fine grained chert (Kyoto Pref., Japan) was selected as a rock sample for its low porosity. The rock sample was mostly composed of quartz. Circular disks (D=10 mm, L=3 mm) were cut from the rock sample, and the compressional and shear wave velocities were measured to estimate the crack density. Disc samples were filled with 0.1 M KCl aqueous solution, and the electrical conductivity was measured at ambient conditions with the two-electrode method. The relation between the crack density and electrical conductivity will be presented in our poster.

キーワード：弾性波速度、電気伝導度、流体

Keywords: elastic wave velocity, electrical conductivity, fluid

## 単斜輝石細粒多結晶体の焼結

## Sintering of fine-grained polycrystalline clinopyroxene

\*坪川 祐美子<sup>1</sup>、石川 正弘<sup>1</sup>\*Yumiko Tsubokawa<sup>1</sup>, Masahiro Ishikawa<sup>1</sup>

1. 横浜国立大学大学院環境情報

1. Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

実験室において地球内部と同じ変形メカニズムを再現するためには、実験試料の粒径の細粒化（数 $\mu\text{m}$ 程度）が必要な場合がある（e.g. Karato, 2010）。このように細粒な鉱物多結晶体を得るためには、粒径・空隙率を精密に制御できる利点から、試薬粉末を用いた合成法が有効である。しかしながら、試薬合成では天然鉱物に少量含まれる主要元素組成や微量元素組成を再現することは難しい。そこで本研究では天然鉱物の単結晶を原料として用い、天然鉱物の組成を反映した鉱物多結晶体を得ることに着目し、細粒かつ緻密な単斜輝石多結晶体の焼結を試みた。

本研究でははんれい岩・かんらん岩の主要構成鉱物の1種である単斜輝石のうち、ヘデンバーサイト（Hed:  $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ ）成分の異なる天然ディオプサイド単結晶（Di97Hed3:  $\text{Ca}_{0.99}\text{Na}_{0.01}\text{Mg}_{0.97}\text{Fe}_{0.03}\text{Si}_2\text{O}_6$ 、Di99Hed1:  $\text{Ca}_{0.97}\text{Na}_{0.02}\text{Al}_{0.02}\text{Mg}_{0.86}\text{Fe}_{0.13}\text{Si}_2\text{O}_6$ ）2種類と天然サーラ輝石単結晶（Di87Hed13:  $\text{Ca}_{0.97}\text{Na}_{0.02}\text{Mg}_{0.86}\text{Fe}_{0.13}\text{Al}_{0.02}\text{Si}_2\text{O}_6$ ）1種類を原料として用いた。3種類の単結晶はそれぞれ微粉碎を行い、その粉末を一軸加圧成型後、アルゴンガス雰囲気中または真空中で温度1230-1280 $^{\circ}\text{C}$ 、保持時間2-6時間で焼結した。得られた焼結体は鏡面研磨後、表面組織と残留空隙の観察を走査型電子顕微鏡（SEM）で行い、SEM像をもとに画像解析ソフトを用いて粒径と空隙率を計算した。焼結体の同定には、X線回折分析（XRD）、蛍光X線分析（XRF）およびラマン分光分析を行った。

得られた各焼結体の表面組織観察を行った結果、Di97Hed3焼結体は多角形状の粒子、Di99Hed1焼結体は比較的角ばった粒子から構成される組織を示した。1230 $^{\circ}\text{C}$ の焼結では、それぞれの焼結体は径2 $\mu\text{m}$ 以下の均質な粒子からなり、緻密化は粒成長と共に進行し、それぞれ理論密度の98.0%および93.5%まで到達した。これに対して1280 $^{\circ}\text{C}$ の焼結では、各焼結体は粒成長が進み5 $\mu\text{m}$ 程度の粗粒な粒子で構成され、緻密化はそれぞれ理論密度の94.1%および90.5%以下であった。これらの結果から、各焼結体において焼成温度の上昇に伴い空隙が残留したままの状態、緻密化が十分に進まずに粒成長が促進されたと考えられる。また、Di87Hed13焼結体では細粒な粒子（<1 $\mu\text{m}$ ）と粗大化した粒子（>5 $\mu\text{m}$ ）とが混在している組織を示しており、他の焼結体と比較し緻密化はあまり進まなかった。本研究の結果、1280 $^{\circ}\text{C}$ よりも1230 $^{\circ}\text{C}$ で焼結した場合に、より緻密化が進行し細粒（<2 $\mu\text{m}$ ）かつ緻密な単斜輝石多結晶体が得られることが分かった。

キーワード：焼結、単斜輝石

Keywords: sintering, clinopyroxene

## 関東山地における四万十帯の下限深度：関東山地および丹沢山地に産する岩石の高圧下における弾性波速度

Lower limit of Shimanto belt: constraints from elastic wave velocities of rocks from the Kanto Mountains and the Tanzawa Mountains

\*石川 正弘<sup>1</sup>、本多 聡子<sup>1</sup>

\*Masahiro Ishikawa<sup>1</sup>, Satoko Honda<sup>1</sup>

1. 横浜国立大学大学院環境情報研究院

1. Graduate School of Environment and Information Sciences Yokohama National University

関東下では、伊豆小笠原弧前弧がフィリピン海スラブとして陸側プレートの下に沈み込む一方、神奈川県西部では伊豆小笠原弧北部が衝突するするという複雑なテクトニクスを起こしている(Sato et al., 2005, Arai et al., 2009)。海洋性島弧の地殻断片である丹沢層群の北側には四万十帯が分布しており、島弧衝突によって四万十帯及び秩父帯・三波川帯は大きく屈曲している。四万十帯は首都圏周辺域の地下深部にも連続していると推定されているが、関東平野では第四紀堆積物が広く表層を覆っているために直接その分布を追跡することができない。しかし、関東地域における本州地殻の構造と構成岩石を推測することは、関東地域の地殻物性モデルに粘性等の拘束条件を与える上で重要であり、首都直下地震を考察する上でも必要不可欠である。そこで本研究は、関東地方の本州地殻構成岩石の初期モデルを検討する上で重要な四万十帯・秩父帯・丹沢層群を代表する岩石を対象として高圧下で弾性波速度測定実験を実施した。

弾性波速度測定実験は横浜国立大学設置のピストンシリンダー高圧発生装置を用いて、直径14mm、長さ12mmのコア試料を対象として最大圧力1.0GPa下でP波速度 ( $V_p$ )、S波速度 ( $V_s$ )、 $V_p/V_s$ を測定した。圧力媒体としてタルクとパイロフィライトを使用した。実験試料として東京都北西部に産する秩父帯ジュラ系浦山ユニットの泥岩、山梨県東部に産する四万十帯白亜系小河内層群倉掛層の砂岩、小仏層群小菅ユニットの砂岩、古第三系相模湖層群権現山ユニットの砂質泥岩、神奈川県西部丹沢山地に産する新第三系丹沢層群の緑色岩を用いた。今回の実験ではP波・S波発振用のデュアルモード圧電素子を用いたパルス反射法測定法を採用し、岩石のP波速度とS波速度を同時に測定し、 $V_p/V_s$ を決定した。パルス反射法では、まず、任意波形発生装置から特定周波数の正弦パースト波を圧電素子に入力する。次に、電気信号は圧電素子により弾性波に変換され、高圧セルシステム内のバッファロードを伝搬し、岩石試料の下面と上面で反射し、圧電素子に戻ってきた弾性波はふたたび電気信号に変換される。波形データはデジタルオシロスコープで1024回のアベレーシングを施した。岩石試料の上面と下面からの伝搬時間の差が岩石試料中を伝搬した往復走時であり、P波及びS波速度および $V_p/V_s$ を測定する。

秩父帯・四万十帯岩石の、深度約10kmまでに相当する圧力条件0.15-0.3GPaにおけるP波速度・S波速度は5.9-6.0 km/sと3.6-3.7km/sであり、 $V_p/V_s$ は四万十帯の砂岩で1.61、砂質泥岩で1.65と低い値を示す。この低い $V_p/V_s$ は石英含有率が高いことに起因していると考えられる。一方、丹沢山地に分布する緑色岩では0.5GPa以上の高圧側のP波速度が約6.6~6.7km/s、S波速度が約3.8km/s、 $V_p/V_s$ が約1.75~1.76である。

本実験によって得られた四万十帯の岩石のP波速度はArai et al. (2009)で示された四万十帯の分布域の上部地殻深部の速度(6.1-6.2km/s)とほぼ調和的であり、四万十帯が10km超の深さまで分布することを示唆する。四万十帯の分布域の深度約10km以深の地殻深部のP波速度は6.5-6.6km/sであが、本実験によって得られた四万十帯の岩石のP波速度は高圧条件下においてもP波速度6.5km/sには達しないことから、深度約10km以深に四万十帯を構成するような石英長石質岩石が存在する可能性は低いと結論される。

四万十帯の岩石は主に石英や長石の粒子から構成されており、低い $V_p/V_s$ は高い石英含有率に起因している。したがって、四万十帯は低い $V_p/V_s$ の領域として見える可能性があることがわかった。首都圏を含む関東平野部はいわゆる基盤岩石が露出していないために、首都圏周辺下の本州地殻構成岩石は現時点では不明であるが、首都直下地震観測網(MeSO-net)による地震波トモグラフィ(Nakagawa et al., 2011)からその分布を推測して行くことが今後の課題として考えられる。

キーワード：伊豆衝突帯、四万十帯、関東山地、丹沢山地

Keywords: Izu collision zone, Shimanto Belt, Kanto Mountains, Tanzania Mountains

関東山地南部秩父帯・四万十帯の砂岩・泥岩および丹沢層群緑色岩の高圧下における弾性波速度測定  
Elastic wave velocities of sandstones and mudstones from the Southern Chichibu and Shimanto belts in the Kanto Mountains and greenstone from the Tanzawa group at high pressure.

\*本多 聡子<sup>1</sup>、石川 正弘<sup>1</sup>

\*Satoko Honda<sup>1</sup>, Masahiro Ishikawa<sup>1</sup>

1.横浜国立大学環境情報学府

1.Graduate School of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

高温高圧下における弾性波速度測定は、制御震源や自然地震によって得られた地震波速度構造を構成岩石として解釈する上で重要である。

首都圏においては、フィリピン海プレートが陸側プレートに沈み込んでいる一方で、神奈川県西部では伊豆・小笠原弧がその浮遊性から本州弧に衝突・付加し(Taira et al.,1998)、複雑な地殻構造が形成されている。首都圏西部の地殻構造は、現在進行形の島弧-島弧の衝突現象および大陸地殻の成長過程を知る上でも重要である。御坂山地や丹沢山地などの伊豆小笠原弧起源の地塊の北側には、関東山地が位置しており、古アジア大陸に海洋性プレートが沈み込むことにより形成された三波川帯・秩父帯・四万十帯の各付加体からなる。地殻深部はこれらの地質体から構成されていると予想されるが、その詳細な構造については明らかにされていない。首都圏西部においては、制御震源探査が行われており、屈折法および屈折法-広角反射法解析により地震波速度構造が求められている(Arai et al.,2009,2013,2014)。伊豆衝突帯における本州弧及び伊豆小笠原弧の地殻構造について本研究により求めた弾性波速度との比較を行い、構成岩石の推定を行うことを目的とした。

高圧実験には、ピストンシリンダー型高圧実験装置を用い、P波・S波デュアルモード振動素子(10 Y-cut ニオブ酸リチウム)を用いたパルス反射法およびパルス透過法により  $V_p$ 、 $V_s$  を同時に測定した。室温25°Cにおいて圧力1.0GPaまでの弾性波速度実験を行った。試料は東京都北西部に産する秩父帯ジュラ系浦山ユニットの泥岩、山梨県東部に産する四万十帯白亜系小河内層群倉掛層の砂岩、小仏層群小菅ユニットの砂岩、古第三系相模湖層群権現山ユニットの砂質泥岩、神奈川県西部丹沢山地に産する新第三系丹沢層群の緑色岩の試料を用いた。

秩父帯・四万十帯岩石の、深度約10kmまでに相当する圧力条件0.15-0.35GPaにおけるP波速度は5.9-6.0 km/sであったが、S波速度は3.6-3.7km/sと早く、 $V_p/V_s$ は四万十帯の砂岩で1.61、砂質泥岩で1.65と低い値をとる。この低 $V_p/V_s$ は、石英含有率が高いことに起因していると考えられる。関東山地北東縁測線で行われた地震波探査(Sato et al.,2005;Arai et al.,2009)では、本州弧上部地殻の南側では深度約10kmにP波速度6.5-6.6 km/sの速度帯上部の地震波反射面(R1)が見られる。本実験結果では、高圧条件下においてもP波速度6.5 km/sには達しないことから、R1以深には秩父帯や四万十帯を構成するような岩石が存在する可能性は低い。関東山地西縁測線および北西縁測線の地震波速度断面(Arai et al.,2013,2014)では、本州弧上部地殻において甲府花崗岩帯分布域で深度約4kmまでのP波速度は5.6-6.0km/s、S波速度は3.4-3.7 km/sであり、南側の甲府盆地と御坂山地の下約6 km以深まで同様の速度帯が分布する。また、 $V_p/V_s$ は~1.6と低い値を示し、本実験結果と同様の傾向を示す。この速度帯は表層の地質および本実験結果から比較的石英含有率の高い四万十帯の岩石で構成されると推測される。

丹沢層群緑色岩の1GPaまでのP波速度は6.4-6.8 km/s、 $V_p/V_s$ は約1.75であった。P波速度は、丹沢深成岩類の弾性波速度実験結果と比較すると、丹沢トータル岩と同程度~早く、角閃石斑レイ岩と同程度~やや遅い。 $V_p/V_s$ は丹沢深成岩類よりも低いため、地震波速度断面では丹沢深成岩類より相対的に低い場所に分布すると考えられる。

キーワード：弾性波速度、四万十帯、伊豆衝突帯

Keywords: elastic wave velocity, Shimanto belt, Izu collision zone



## 隠岐島後捕獲岩の高圧高温条件下におけるP波S波同時測定

Ultrasonic measurements of P-wave velocity and S-wave velocity under high pressure and high temperature conditions in Oki-Dogo xenoliths, southwestern Japan

\*高橋 宏和<sup>1</sup>、石川 正弘<sup>1</sup>

\*Hirokazu Takahashi<sup>1</sup>, Masahiro Ishikawa<sup>1</sup>

1. 横浜国立大学

1. Yokohama National University

現在, Ito et al(2002)を初めとした地震波物理探査によって西南日本弧の地下地震波速度構造が求められている. 西南日本弧の地下深部構造を明らかにすることは, 日本列島弧の形成史を理解する上で重要である. 西南日本弧においてアルカリ玄武岩中に取り込まれた苦鉄質・超苦鉄質捕獲岩が多く見られる. 捕獲岩は通常であれば直接確認することができない地下深部のものであるため地下構造を推定する上で有用であり, Takahashi et al (1978), Arai et al(2000), Abe et al(2005)をはじめとした先行研究によって隠岐島後捕獲岩の詳細な岩石学的研究が行われている. 地下地震波速度構造を岩石学的に解釈するためには岩石の弾性波速度データが重要である. 隠岐島後捕獲岩の弾性波速度に関してはYamane et al(2012)による計算速度が報告されている. 一方, 本研究では島根県隠岐諸島島後に産する捕獲岩に対して高圧高温条件下で弾性波速度測定を行った. なお, P波 ( $V_p$ ), S波 ( $V_s$ ) は同一実験システム内で測定され, 圧力, 温度変化に対する速度変化を取得した. 弾性波速度測定には, ピストンシリンダー型高圧発生装置, 任意波形発生装置, デジタルオシロスコープを用いた. 振動素子はニオブ酸リチウムを使用し, 透過波と反射波を用いて測定を行った. 岩石試料は直径約14mm, 長さ約11mmの円柱状に成形し, その両面を研磨したものを約100°Cのオーブンで24時間乾燥させ, システムのコアとして実験セルシステムに組み込む. サンプルを組み込んだセルシステムは内径34mm, 厚さ80mmシリンダ内に封入され, 圧力0.0-1.0GPa条件下で0.05GPa毎にP波, S波をそれぞれ測定した. また, 圧力1.0, 0.8, 0.6GPa時に温度を変化させ, P波, S波をそれぞれ測定した. 一例として輝岩試料に対する測定結果を以下に示す. 圧力1.0 GPa時において $V_p$ は7.22-7.35 km/s,  $V_s$ は3.78-4.13 km/sであった. 本発表ではその他の測定結果をまとめて報告する.

キーワード: 弾性波速度、捕獲岩、高圧実験

Keywords: Elastic wave velocity, xenoliths, high pressure experiment

## 宮城県北部地震活動域の三次元地殻流体分布

## Three-Dimensional Geofluid Distribution of a Seismogenic Region, Northern Miyagi

\*齋藤 全史郎<sup>1</sup>、小川 康雄<sup>2</sup>、市來 雅啓<sup>3</sup>、鈴木 惇史<sup>1</sup>、木下 雄介<sup>1</sup>、Amatyakul Puwis<sup>4</sup>

\*Zenshiro Saito<sup>1</sup>, Yasuo Ogawa<sup>2</sup>, Masahiro Ichiki<sup>3</sup>, Atsushi Suzuki<sup>1</sup>, Yusuke Kinoshita<sup>1</sup>, Puwis Amatyakul<sup>4</sup>

1.東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻、2.東京工業大学火山流体研究センター、3.東北大学大学院理学研究科、4.Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 2.Volcanic Fluid Research Center Tokyo Institute of Technology, 3.Graduate School of Science, Tohoku University, 4.Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University

Northern Miyagi is located in one of the strain concentration zones in NE Japan (Miura et al., 2004). This area is known to have high seismicity and experienced two large earthquakes, the 1962 Northern Miyagi Earthquake (M6.5) and the 2003 Northern Miyagi Earthquake (M6.2). The 2003 earthquake was well studied and its focal mechanism and aftershock distribution support that the earthquake was a high angle reversed fault, which is a reactivation of an originally normal fault, created in the Miocene during the Japan opening. The surface extension of the fault is recognized as a flexure. Geologically, the area is mostly simply covered with thick sediment and is surrounded by granitic rocks of Kitakami Mountains to the east and to the north. A high magnetic anomaly under the Izu-Numa area may represent the existence of relatively deep sediment. The objective of this study is to image the geofluid in three dimensions and relate them to earthquake activities in the region. The previous studies were by 2D modelings. We used MT data at 52 sites in total: 24 sites are new and are arranged in an approximately 2 km grid whereas two older dataset were along profiles, one NEE-SWW profile with 18 sites (Mitsuhata et al., 2001), and one NNE-SSW profile with 12 sites (Nagao, 1997). We inverted the data using WS3dMTINV (Siripunvaraporn and Egbert, 2009) The preliminary model showed that shallow (less than 5km depth) and deep (deeper than 5km) conductors exist: Shallow conductors represent sedimentary layers. One of them runs along the edge of the Kitakami Mountains. Deep conductors may imply an anomalous body containing saline fluids originating from slab fluids. Two deep conductors are significant. One is located at south of Izu-numa with flexure, which is consistent with the previous result of Mitsuhata et al. (2001). Another deep conductor exists to the south toward the hypocentral region of the 2003 Northern Miyagi earthquake. We noticed that seismic activity is high around the deep conductors covered by high-resistivity. This may imply the episodic migration of fluid from the fluid reservoir to the upper brittle crust triggers high seismicity.

キーワード：地殻流体、MT

Keywords: geofluid, MT

## 別府一万年山断層帯の比抵抗構造

## Resistivity structure of Beppu-Haneyama fault zone

\*相澤 広記<sup>1</sup>、小山 崇夫<sup>2</sup>、志藤 あずさ<sup>1</sup>、若林 翌馬<sup>4</sup>、宮崎 真大<sup>3</sup>、内田 和也<sup>1</sup>、塚島 祐子<sup>1</sup>、塚本 果織<sup>4</sup>、高島 奏<sup>1</sup>、近藤 健太郎<sup>1</sup>、河本 洋輝<sup>4</sup>、藤田 詩織<sup>1</sup>、山本 有人<sup>4</sup>、緒方 美季<sup>4</sup>、上嶋 誠<sup>2</sup>

\*Koki Aizawa<sup>1</sup>, Takao Koyama<sup>2</sup>, Azusa Shito<sup>1</sup>, Asuma Wakabayashi<sup>4</sup>, Masahiro Miyazaki<sup>3</sup>, Kazunari Uchida<sup>1</sup>, Yuko Tsukashima<sup>1</sup>, Kaori Tsukamoto<sup>4</sup>, Kanade Takashima<sup>1</sup>, Kentaro Kondo<sup>1</sup>, Hiroki Kawamoto<sup>4</sup>, Shiori Fujita<sup>1</sup>, Yuto Yamamoto<sup>4</sup>, Miki Ogata<sup>4</sup>, Makoto Uyeshima<sup>2</sup>

1.九州大学大学院理学研究院附属・地震火山観測研究センター、2.東京大学・地震研究所、3.京都大学・防災研究所、4.九州大学理学府地球惑星科学専攻

1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2.Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3.Disaster Prevention Institute, kyoto university, 4.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University

これまで数多く行われてきた地磁気-地電流 (MT) 法による比抵抗構造調査によって、地殻内の地震発生には塩水やガスなど流体の寄与があることが示唆されてきた (e.g., Ichihara et al., 2011; Ogawa et al., 2014; Aizawa et al., 2016)。MT法では、通常、各観測点で水平電場2成分、水平磁場2成分、鉛直磁場1成分の時系列を取得し、電場-磁場の応答関数 (インピーダンス) と水平磁場-鉛直磁場の応答関数 (ティッパー) を求め、これらをインバージョンの入力として比抵抗構造を推定する。しかしながら電磁場5成分観測は設置、電源の維持の労力が大きく、多点観測によって高空間解像度の比抵抗構造を推定するのは容易ではない。これに対し、電場だけの観測点を多く設置し、異なる地点の電場-磁場間のインピーダンスを用いて比抵抗構造を推定する「磁場電場分離型MT法」が提案、実施されている (e.g., Unsworth et al., 1997, 後藤, 1999)。近年、この「磁場電場分離型MT法」用途の、安価、軽量、省電力な電場ロガーが開発され利用されるようになった (相澤他, 2015)。本発表では、「磁場電場分離型MT法」を別府一万年山断層帯東部の陸上地域に適用した結果を示す。この地域には地表に数多くの東西走行の断層が見られ、中央部に由布岳、鶴見岳、伽藍岳という火山が存在している。地震活動は火山周辺で活発であり、震源の下限分布は深さ約10 km程度と周辺に比べ浅いという特徴がある。また2007年6月、10月には震源が深部から浅部へ移動する群発地震も発生し (Maeda et al., 2010)、流体の移動が地震発生に影響を及ぼしていることが示唆された。

広帯域MT観測は2015年8~10月にかけて73点で行われた。このうち53点は電場のみを観測である。現在までの解析から得られた結果は以下の通りである。(1) 表層から地下に鉛直方向に伸びる低比抵抗体が複数推定された。(2) 周期10秒以上のphase tensor から推定される深部比抵抗構造の走行方向は、北東-南西方向であり、地表の断層走行と斜交する一方、2007年6月と10月に別府市で発生した群発地震の震源の広がり方向 (Maeda et al., 2010) に近い。(2) の深部比抵抗構造の走行は1993年にこの地域で行われた長周期MT観測の結果 (半田, 1998) と調和的であり、群発地震が比抵抗構造にそった流体の移動により引き起こされたことを示唆しているのかもしれない。本発表ではさらに解析を進め、比抵抗構造と別府一万年山断層帯での地震活動の関連について検討したい。

## 参考文献

Aizawa, K et al., 2016, Gas pathways and remotely triggered earthquakes beneath Mt. Fuji, Japan: *Geology*, v. 44, p. 127-130.

Ichihara, H. et al., 2011, A fault-zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan: *Geophys. Res. Lett.*, 38, doi:10.1029/2011gl047382.

Maeda, T., Obara, K., and Yukutake, Y., 2010, Seismic velocity decrease and recovery related to earthquake swarms in a geothermal area: *Earth Planets and Space*, 62, 685-691.

Ogawa, Y., Ichiki, M., Kanda, W., Mishina, M., and Asamori, K., 2014, Three-dimensional magnetotelluric imaging of crustal fluids and seismicity around Naruko volcano, NE Japan: *Earth Planets and Space*, 66, doi:10.1186/s40623-014-0158-y.

Unsworth, M.J., Malin, P.E., Egbert, G.D., and Booker, J.R., 1997, Internal structure of the San

Andreas fault at Parkfield, California: *Geology*, v. 25, p. 359-362.

相澤広記・他, 2015, 地電位差計を用いた大分県中南部の広帯域MT観測: 日本地球惑星科学連合2015年大会, p. 千葉幕張.

半田駿, 中部九州の火山下の下部地殻の比抵抗構造, 1998, 地震研究所彙報, 73, 345-359.

後藤忠徳, 1999, 磁場電場分離MT法を用いた比抵抗構造解析の特性. 1999年Conductivity Anomaly 研究会論文集, 14-20.

謝辞

観測において東京大学地震研究所所有の広帯域MT探査装置を使用させて頂きました(共同利用コード2015-F2-04)。気象庁柿岡地磁気観測所の地磁気3成分1秒値を磁場参照点として使用させて頂きました。本研究のために、東京大学地震研究所地震火山情報センターの計算機システムを利用しました。本研究は文部科学省による「別府-万年山断層帯(大分平野-由布院断層帯東部)における重点的な調査観測」、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けました。

キーワード: MT法、比抵抗構造、群発地震

Keywords: Magnetotellurics, Resistivity structure, Earthquake swarm

## 東北南部横断（阿賀野－鮫川）測線における広帯域MT観測について（序報）

Preliminary report on wide-band MT survey across southern part of Tohoku (on Agano-Samegawa line)

\*上嶋 誠<sup>1</sup>、市來 雅啓<sup>2</sup>、坂中 伸也<sup>3</sup>、田村 慎<sup>4</sup>

\*Makoto Uyeshima<sup>1</sup>, Masahiro Ichiki<sup>2</sup>, Shin'ya Sakanaka<sup>3</sup>, Makoto Tamura<sup>4</sup>

1.東京大学地震研究所、2.東北大学大学院理学研究科、3.秋田大学大学院工学資源学研究科地球資源学専攻、4.地方独立行政法人北海道立総合研究機構地質研究所

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Graduate School of Science, Tohoku University, 3.Department of Earth Science and Technology, Graduate school of Engineering and Resource Science, Akita University, 4.Geological Survey of Hokkaido, Hokkaido Research Organization

2011年東北地方太平洋沖地震により大きな擾乱を受けた東北日本弧に焦点を当て、地下のレオロジー不均質構造を明らかにし誘発地殻変動のメカニズム解明を図る目的で、東北各地でいくつかのターゲットを設定した観測研究が進められている。その中で、本研究では、地震直後から活発な誘発地震活動がおきたいわき－北茨城地域から、東北太平洋沖地震が起こる前にひずみが集中し、中越地震をはじめとする活発な内陸地震活動をひきおこした新潟平野にかけての地域にターゲットを設定し、比抵抗構造の推定を行おうとしている。比抵抗は、地殻内流体の存在や連結状態に特に感度がある物理量であり、震源分布・地殻変動との比較や地震波速度構造・減衰構造などとの比較から地下の物質・状態構造を明らかにし、誘発地殻変動のダイナミクス解明を図る。この目的のために、本研究とほぼおなじ測線上において地震・GPS等の総合的な観測研究が進められている。

2015年度においては、2015年11月から12月にかけて、新潟県阿賀野市から福島県鮫川村に至る約150kmの測線上の15点において広帯域MT観測を実施した。GERDが運用する山形県大蔵観測点における連続観測データや、主として九州大学の相澤氏によって維持されている宮崎県硫黄山北観測点における連続観測データをremote referenceとして用いた。本発表では、時系列解析によって得られたMT、GDS応答関数の空間・周期特性を紹介するほか、観測点間の水平磁場－水平磁場変換関数の性質を紹介し、その初期解析から得られる構造情報について議論する。

なお、本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けました。

キーワード：MT観測、東北南部、2011東北太平洋沖地震誘発地殻活動、比抵抗、地殻流体

Keywords: Magnetotelluric Survey, Southern Part of Tohoku District, crustal activities induced by the 2011 Great Tohoku Earthquake, electrical resistivity, crustal fluids

## 日本海溝プレート境界断層における陽イオン交換反応

## Exchangeable cation composition of the smectite-rich plate boundary fault at the Japan Trench

\*亀田 純<sup>1</sup>、稲生 千咲<sup>1</sup>、コニン マリナン<sup>2</sup>\*Jun Kameda<sup>1</sup>, Chisaki Inaoi<sup>1</sup>, Marianne Conin<sup>2</sup>

1.北海道大学大学院理学研究院自然史科学専攻、2.ロレーヌ大学

1.Earth and Planetary System Science Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 2.Universit  de Lorraine CNRS, CREGU

The source fault of the 2011 Tohoku-oki earthquake ( $M_w 9.0$ ) and accompanying tsunami is extremely enriched in pelagic smectite. To better understand physico-chemical processes in such a smectite-rich fault zone, we examined exchangeable cation composition of core samples recovered by the Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Expedition 343 The Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST).

The exchangeable cation compositions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  and  $\text{Mg}^{2+}$ ) for the bulk samples were determined by two methods. Four samples including two slip zone samples were analyzed by extracting cations in ammonium acetate solution (Schollenberger method), and the concentrations of extracted cations in the solution were measured using an atomic absorption photometer (Z-2000; Hitachi). Other samples were analyzed by extracting cations with cobaltihexamine [Orsini and Remy, 1976], following standard NF X31-130 at the INRA (Institut National de Recherche Agronomique) soil analysis laboratory in Arras, France.

Our chemical analyses revealed that the fractional concentrations of exchangeable  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  are higher in the slip zone than in surrounding host rocks, while  $\text{Na}^+$  is depleted in the slip zone.  $\text{K}^+$  shows a complicated depth profile, and this is probably due to strong interaction of  $\text{K}^+$  with smectite interlayer such as K-fixation. Based on pore fluid chemistry data, we estimated apparent selectivity coefficient of exchange reactions in ternary system of  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$ - $\text{Na}^+$ . Comparison of the coefficients suggests that  $\text{Na}^+$  to  $\text{Mg}^{2+}$  exchange reaction on smectite might have progressed markedly in the slip zone. One explanation for this feature is local progress of the reaction triggered by a recent thermogenic event, that was probably related with frictional coseismic slip during the earthquake. Considering that frictional property of smectite gouge is dependent on the exchangeable cation composition, chemical processes as observed in this study are intimately linked to physical aspect of smectite-bearing faults.

キーワード：東北地方太平洋沖地震、陽イオン交換反応、遠洋性粘土

Keywords: Tohoku-oki earthquake, cation exchange reaction, pelagic smectite

東南極ナピア岩体トナー島におけるグラニユライト相シュードタキライトと間震期塑性変形  
Generation of pseudotachylyte and interseismic plastic deformation under granulite facies conditions at Tonagh Island in the Napier Complex, East Antarctica

\*豊島 剛志<sup>1</sup>、小山内 康人<sup>2</sup>、大和田 正明<sup>3</sup>、角替 敏昭<sup>4</sup>、外田 智千<sup>5</sup>、重松 紀生<sup>6</sup>

\*Tsuyoshi Toyoshima<sup>1</sup>, Yasuhito Osanai<sup>2</sup>, Masaaki Owada<sup>3</sup>, Toshiaki Tsunogae<sup>4</sup>, Tomokazu Hokada<sup>5</sup>, Norio Shigematsu<sup>6</sup>

1.新潟大学理学部地質科学科、2.九州大学大学院比較社会文化研究院環境変動部門、3.山口大学理学部化学・地球科学教室、4.筑波大学生命環境系、5.国立極地研究所、6.産業技術総合研究所

1.Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University, 2.Division of Evolution of Earth Environments, Kyushu University, 3.Department of Earth Sciences, Yamaguchi University, 4.Faculty of Life and Environmental Sciences, 5.National Institute of Polar Research, 6.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Seismic faulting (pseudotachylytes-producing faulting) and plastic deformation (formation of ultramylonite) alternated under lower continental crustal conditions in Tonagh Island (Toyoshima et al., 1999). We illustrate interseismic plastic deformations related to the Tonagh pseudotachylytes as examples of ancient seismogenic zones in lower crust.

There are many granulite-facies mylonite zones in Tonagh Island, the Napier Complex, East Antarctica. In some of them, cataclastic zones occur. Cataclastic zones are composed of alternation of thin ultramylonites and pseudotachylytes formed under granulite-facies conditions. Cataclastic zones are pseudotachylyte-producing fault zones. Granulite-facies ultramylonites occur also abundant outside cataclastic zones. There are evidences for multiple generations of pseudotachylytes and ultramylonites under granulite facies conditions.

There are two different types of granulite-facies ultramylonites in microstructures of recrystallized plagioclase grains: type 1 and 2. Type 1 ultramylonites have polygonal medium grains, with abundant triplejunctions, of plagioclase with smooth grain boundaries and very weakly undulose extinction. Recrystallized quartz grains of type 1 ultramylonites have polygonal shapes, accompanied by fine recrystallized quartz grains. Type 2 ultramylonites include very fine grains and elongated fine grains of plagioclase with strongly undulose extinction and irregular grain boundaries with bulges. Plagioclase grains were fractured and became cataclasites before formation of type 2 mylonites. Quartz of type 2 ultramylonites is strongly elongated quartz porphyroclasts with bulges and fine recrystallized grains. Quartz ribbons are also abundant in type 2 ultramylonites. Type 2 ultramylonites occur only in cataclastic zones (granulite-facies pseudotachylytes-generating fault zones) and have been cut by fault veins of pseudotachylyte. Type 2 ultramylonites include porphyroclasts of plagioclase aggregates of type 1 ultramylonites. Pseudotachylytes include fragments of plagioclase aggregates of both type 1 and type 2 ultramylonites. Some of the granulite-facies pseudotachylytes were mylonitized and became type 2 ultramylonites, which have also been cut by other granulite-facies pseudotachylytes. The microstructures of quartz of type 2 ultramylonites appear occasionally to have become polygons, which observed in type 1 ultramylonites. Many of pseudotachylytes were subjected to type 2 mylonitization and show a mylonitic foliation.

We clarified generation of pseudotachylytes occurred under high-temperature, lower crustal conditions in the Tonagh Island. We also recognized the following two interseismic plastic deformations under lower crustal, high-temperature conditions.

- (1) Low strain rate or low differential stress plastic deformation
- (2) High strain rate or high differential stress plastic deformation

The microstructural and petrological features of lower crustal shear zones point to locally and temporally, high strain rate or high differential stress at the cataclastic zones immediately before and after seismic faulting. These features also suggest continuous low strain rate or low differential stress plastic deformation punctuated by episodes of high strain rate or high differential stress plastic deformation, leading of following to seismic events. This is imaged acceleration of strain rate or stress relaxation before or after seismic events, respectively.

キーワード：シュードタキライト、マイロナイト、間震期塑性変形作用、下部地殻

Keywords: pseudotachylyte, mylonite, interseismic plastic deformation, lower crust



## ニュージーランドアルパイン断層掘削DFDP-2のまとめ

### Overview and summary of operations of DFDP-2

\*重松 紀生<sup>1</sup>、Sutherland Rupert<sup>2</sup>、Townend John<sup>3</sup>、Toy Virginia<sup>4</sup>、加藤 尚希<sup>5</sup>、米谷 優佑<sup>6</sup>、林 為人<sup>7</sup>、西川 治<sup>8</sup>、森 宏<sup>1</sup>、DFDP-2 Science Team

\*Norio Shigematsu<sup>1</sup>, Rupert Sutherland<sup>2</sup>, John Townend<sup>3</sup>, Virginia Toy<sup>4</sup>, Naoki Kato<sup>5</sup>, yusuke kometani<sup>6</sup>, Weiren Lin<sup>7</sup>, Osamu Nishikawa<sup>8</sup>, Hiroshi Mori<sup>1</sup>, DFDP-2 Science Team

1.独立行政法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、2.ニュージーランド国立地質・核科学研究所、3.ビクトリア大学ウェリントン、4.オタゴ大学、5.大阪大学、6.山口大学、7.海洋研究開発機構、8.秋田大学

1.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2.GNS Science New Zealand, 3.Victoria University of Wellington, 4.The University of Otago, 5.Osaka University, 6.Yamaguchi University, 7.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 8.Akita University

ニュージーランド南島西海岸のアルパイン断層はオーストラリアプレートと太平洋プレートの境界をなす逆断層成分を持つ右横ずれ断層である。アルパイン断層は地震後経過率が高く、大地震の前兆の検出や地震前の断層の周囲の物理条件の検出が可能である。また上盤の隆起速度が 9-10 mm/年と高く、現在と同様の応力場で形成したマイロナイトが地表付近に露出している。断層深部でこのようなことからアルパイン断層は様々な角度からの研究が可能な科学的価値が高い断層である。

アルパイン断層掘削、Deep Fault Drilling Project (DFDP) の目標は、異なる深度条件において断層の試料を取得、物理条件を観測することである。これまで、断層の深部延長となる中部地殻を狙う、もしくは地震発生領域から脆性-塑性遷移に至る断層帯の発達を目指した活断層掘削は行われていない。

DFDP-2Aの掘削は2014年の8月に開始し、DFDP-2Bの掘削は2015年の1月に掘削深度 893 m まで掘削して完了した。掘削中様々な技術問題が発生した。2回に渡るボトムホールアセンブリー（ビット、スタビライザーからなる掘削編成の先端部）の落下は掘削日程が大きく遅れる原因となった。そして、最終的にはケーシングの破断によるセメンチングの失敗により、アルパイン断層を貫通する前の予定よりも浅い深度で掘削を止めることになった。

DFDP-2Bの掘削により、地質、地球物理、地球化学、そして水理学に関し膨大なデータを取得できた。岩石、流体の試料を採取するとともに、長期観測のための機器を設置した。特に重要な結果として地温勾配が極端に大きく、坑井上部において140°C/km を超えたこと、掘削前に予想された通り上盤において間隙圧が高いということがある。

本ポスターではDFDP-2掘削の技術計画、実施についてまとめるとともに、得られた科学結果の方法、データのまとめ、観測点整備についてまとめる。

キーワード：アルパイン断層、DFDP-2、断層掘削、断層の力学、検層、地震発生

Keywords: The Alipine Fault, DFDP-2, Fault zone drilling, Fault Mechanics, Geophysical wireline logging, earthquakes

## 白雲母劈開面の摩擦特性と摩擦メカニズムの考察

## Frictional Characteristics of Cleaved Mica Surfaces and Theoretical Considerations of the Frictional Mechanism

\*佐久間 博<sup>1</sup>、河合 研志<sup>2</sup>、片山 郁夫<sup>3</sup>\*Hiroshi Sakuma<sup>1</sup>, Kenji Kawai<sup>2</sup>, Ikuo Katayama<sup>3</sup>

1.物質・材料研究機構、2.東京大学、3.広島大学

1.National Institute for Materials Science, 2.University of Tokyo, 3.Hiroshima University

岩石・鉱物間の摩擦は、地震に関連した断層すべりや地滑りを理解する上で重要である。本研究では断層の最大・定常摩擦係数に着目する。雲母・粘土鉱物は例外的に小さな摩擦係数(0.1 ~ 0.8)を示し、吸着水の影響を強く受ける。

これまで層状の雲母・粘土鉱物の低摩擦係数の要因は、層間結合エネルギー(interlayer bonding energy, ILBE)と相関があると考えられていた [1]が、最近の摩擦実験や理論計算から、ILBEと摩擦係数の間の比例関係が明確でないことが示された [2-4]。本研究では、雲母・粘土鉱物の摩擦係数を支配する真の要因を明らかにすることを目的とし、2軸摩擦試験による白雲母劈開面{001}の摩擦特性の評価および第一原理電子状態計算による摩擦係数の評価を実施した。

2軸摩擦試験では、法線応力を5 MPaから60 MPaに変化させ、せん断応力を測定し、せん断応力を法線応力で除することで摩擦係数を導出した。法線応力が増加するに従って、摩擦係数は減少した。このような法線応力依存性は、雲母・粘土鉱物の粉末でも確認されている[2]。しかしながらそのメカニズムは未解明であり、今回の劈開面の摩擦実験および第一原理計算の結果からメカニズムを議論する。

## References

- [1] Moore, D.E. and Lockner, D.A. (2004) *J. Geophys. Res. -Solid Earth* 109 B03401.
- [2] Behnsen, J. and Faulkner, D.R. (2012) *J. Struct. Geol.* 42, 49-61.
- [3] K. Kawai, Sakuma, H., Katayama, I., Tamura, K. (2015) *J. Geophys. Res. -Solid Earth* 120 6209-6218.
- [4] H. Sakuma and Suehara, S. (2015) *J. Geophys. Res. -Solid Earth* 120 2212-2219.

キーワード：法線応力依存性、2軸摩擦試験、層状鉱物、水、第一原理計算

Keywords: Dependence of normal stress, Double shear test, Layered minerals, Water, First-principles calculations

## 余効すべり伝播速度に関する摩擦特性の依存性

## Characteristics of dependency of frictional properties on after-slip propagation speed

\*有吉 慶介<sup>1</sup>、松澤 暢<sup>2</sup>、長谷川 昭<sup>2</sup>、日野 亮太<sup>2</sup>、堀 高峰<sup>1</sup>

\*Keisuke Ariyoshi<sup>1</sup>, Toru Matsuzawa<sup>2</sup>, Akira Hasegawa<sup>2</sup>, Ryota Hino<sup>2</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>

1.国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター、2.東北大学大学院理学研究科附属 地震・噴火予知研究観測センター

1.Research and Development Center for Earthquake and Tsunami, Earthquake and Tsunami Forecasting System Research Group, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2.Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

大規模なプレート境界型地震が発生すると、それに伴って周囲に伝播する余効すべりによって、余震を誘発することが知られている。そのため、伝播速度をはじめとする余効すべりの物理現象を理解することは、災害リスクを事前評価する上でも重要な課題となっている。プレート境界面で発生する余効すべりの伝播速度について、室内岩石実験から推定された速度・状態依存摩擦構成則に基づいたパラメータを使って数値シミュレーションから再現できることが知られている。そこで、観測と合うように数値モデルのパラメータチューニングをすることにより、実際の場の摩擦特性を推定する研究が行われてきた。本研究ではこれをさらに発展させ、余効すべりの伝播速度について摩擦パラメータ値と有効法線応力などから構成される関数として表現できるよう、理論的な解析を行った。その結果、摩擦パラメータ $a$ と有効法線応力 $\sigma$ が大きいほど、余効すべりの伝播速度は指数関数的に減少し、摩擦パラメータ $b$ と特徴的すべり量 $d_c$ は、応力擾乱の時間関数に依存するものの、近似的には伝播速度と線形的な関係 ( $b$ は正、 $d_c$ は負の傾き) にあることが確かめられた。ここで、応力擾乱の時間関数を数理的に表現・解析できる場合には、ほぼ定量的に説明できることも確かめられた。さらに、速度状態依存摩擦構成則の一つであるNagata-lawでの摩擦パラメータ $c$ の依存性についても考察を行う。

キーワード：速度状態依存摩擦構成則、有効法線応力、数値モデリング

Keywords: rate- and state-dependent friction, effective normal stress, numerical modeling

## 断層ガウジの組織観察及び化学分析に基づく断層発達史に関する研究：屏風山断層の例

Study of fault evolution based on texture and chemical analyses of fault gouge: Case study of the Byobuyama fault, Gifu prefecture, central Japan.

\*香取 拓馬<sup>1</sup>、小林 健太<sup>2</sup>、丹羽 正和<sup>3</sup>、清水 麻由子<sup>3</sup>、小松 哲也<sup>3</sup>、安江 健一<sup>3</sup>、堀内 泰治<sup>3</sup>

\*Takuma Katori<sup>1</sup>, Kenta Kobayashi<sup>2</sup>, Masakazu Niwa<sup>3</sup>, Mayuko Shimizu<sup>3</sup>, Tetsuya Komatsu<sup>3</sup>, Ken-ichi Yasue<sup>3</sup>, Yasuharu Horiuchi<sup>3</sup>

1.新潟大学自然科学研究科、2.新潟大学理学部地質科学科、3.国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1.Graduate School of Science & Technology, Niigata University, 2.Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University, 3.Japan Atomic Energy Agency

中部地方には数多くの活断層が存在し、複雑な断層幾何学を構成している。このような活構造は、河川流路や山地の形成に大きく影響し、現在の地形の発達過程を考える上で重要な要素であると言える。活構造に関する研究は非常に多面的であるが、ある程度の時間スケールを検討する上では、地質学的視点が欠かせない。本研究では、活断層とされる屏風山断層（活断層研究会, 1991）を事例に、その運動史を解明する調査技術開発を目的とした、断層岩の組織観察及び化学分析を行った。

対象とした露頭は、岐阜県瑞浪市東部の論析地域沢沿いに露出する断層露頭で、瀬戸層群土岐砂礫層（新第三紀鮮新統）と、伊奈川花崗岩（後期白亜紀）が断層関係で接する境界断層露頭である。境界部で観察される脆性破碎帯は、大局的にカタクレサイト帯と断層ガウジ帯で構成され、カタクレサイト帯では左横ずれ、断層ガウジ帯では右横ずれ逆断層センスを示す（香取ほか, 2015）。また、断層ガウジ帯では色調及び変形様式の違いから複数のサブゾーンが認められ、それぞれ剪断センスが異なる結果が報告されている

（Katori・Kobayashi, 2015）。これらのことから、本露頭で観察される断層ガウジ帯は、複数の運動記録を保持しており、浅所での運動履歴を検討するのに適していると言える。本研究では、断層活動に伴う変形・変質作用を検討するため、偏光顕微鏡及びSEMを用いた組織観察、RockJock（Eberl, 2003）を用いたXRD定量分析、XGT面分析（測定元素：Al、Si、K、Ca、Ti、Mn、Fe）、EPMA面分析（測定元素：Na、Mg、Al、Si、P、K、Ca、Ti、Mn、Fe）を行った。

上記の解析及び分析から、以下の結果が得られた。

- ・断層ガウジ帯内部において、顕著に流動変形を被るゾーンが存在し、右横ずれセンスを示すポーフィロクラストが観察される。
- ・断層ガウジ基質部は、スメクタイト及びイライトから構成され、多くのゾーンではスメクタイトを主体とする。しかし、流動変形が見られるゾーンのみイライトを主体とする。
- ・ポーフィロクラストのテール部（プレッシャーシャドウ）において、石英・カリ長石・黒雲母は破碎による細粒化が見られるのに対して、斜長石はNaの虫食い溶脱組織が認められる。

以上の結果より、屏風山断層の主軸を構成する断層ガウジ帯は、複数の運動履歴を記録しており、その変形・変質作用には優位な違いが存在する。特に流動変形が見られる断層ガウジの組織は、多量の流体の存在を示し、イライトに富むことから比較的高温（200℃前後）の地下水が流入して形成されたと考えられる。また、斜長石の溶脱組織は、反応軟化を促進させる環境下での変形を示唆する可能性がある。本発表では、屏風山断層の断層ガウジ帯に着目し、変形・変質作用の変遷について議論する。

なお、本研究は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」で得られた成果の一部を使用した。

## 引用文献

活断層研究会編, 1991, 新編 日本の活断層. 東京大学出版会.

Eberl, D., 2003, User guide to RockJock -A program for determining quantitative mineralogy from X-ray diffraction data. U.S. Geological Survey Open File Report.

香取拓馬ほか, 2015, 岐阜県南東部に位置する屏風山断層の破碎・変質履歴. 日本地球惑星科学連合2015年大会 S-SS29-P06.

Takuma Katori and Kenta Kobayashi, 2015, Kinematic vicissitudes and the spatial distribution of the

alteration zone related to the Byobuyama fault, central Japan (Implication; Influence of another faults) . American Geophysical Union 2015 Fall Meeting T31A-2846.

キーワード：断層発達史、断層ガウジ、活断層、粘土鉱物、屏風山断層

Keywords: Fault evolution, Fault gouge, Active fault, Clay mineral, Byobuyama fault

block-in-matrix構造にみられる砂岩ブロックのサイズ分布：西南日本四万十帯の例  
Size distribution of sandstone blocks in block-in-matrix fabrics of the Shimanto Belt,  
southwest Japan

\*田淵 優<sup>1</sup>、藤内 智士<sup>2</sup>

\*Yu Tabuchi<sup>1</sup>, Satoshi Tonai<sup>2</sup>

1.高知大学大学院総合人間自然科学研究科、2.高知大学理学部応用理学科

1.Graduate School of Integrated Arts and Science, Kochi University, 2.Department of Applied  
Science, Faculty of Science, Kochi University

付加体でしばしばみられるblock-in-matrix構造は、地表付近での崩壊や地下での変形、注入などでできるとされ、付加体で起こる物質循環や地殻変動を理解するために重要である。しかし、情報の制限や変形の上書きによって全体の構造がわからないときには成因の議論が難しく、そのような場合にも有効な判断基準が必要である。そこで、ブロックのサイズ分布に注目した。たとえば、断層岩などの脆性破壊によって形成される細粒物の累積サイズ分布はべき乗分布を示す(Shimamoto and Nagahama,1992など)。しかし、数cmから10 m程度のブロックを対象とした同様の研究例はほとんどない。本発表は、成因に関する先行研究があるblock-in-matrix構造をもつ複数の堆積岩体についてブロックのサイズ分布の違いを調べ、その理由を考察した。

対象は四万十帯から5地域選んだ。それらのうち、3地域の地質体(新第三系さらし首層・古第三系室戸層・白亜系浮鞭層)は斜面崩壊堆積体(以下、崩壊体)とされ、残りの2地域の地質体(白亜系牟岐メランジュ・白亜系野々川層)は付加作用に伴い地下で膨縮された変形体(以下、膨縮体)とされている。これらの地質体はいずれも、砂岩ブロックが泥質岩基質に取り囲まれたblock-in-matrix構造をしている。また、どの地域も層理面が大局的に高角度で傾いており、測定に適した露頭が海岸にみられる。測定には、高さ1.5-50 mから鉛直下向きに撮影した画像を使い、長軸が20 pixel以上のブロックを対象とした。各地域で約400-4000個のブロックの長軸を測定した。

測定の結果、崩壊体と膨縮体とでブロックのサイズ分布が異なることがわかった。累積サイズ分布をべき乗で近似して決定係数 $R^2$ を求めると、崩壊体とされるさらし首層、室戸層、浮鞭層では、それぞれ0.993、0.984、0.997であった。それに対して、膨縮体とされる牟岐メランジュと野々川層は、それぞれ0.980および0.897であり、崩壊体に比べると小さい。

$R^2$ の値より、今回調べた3つの崩壊体について、べき乗分布していると判断した。また、浮鞭層では異なる大きさのブロックについて行った測定から、長軸径が $10^{-3}$ -10 mの範囲でこのべき乗分布を示すことがわかった。崩壊物や堆積物は運搬作用により粒径の淘汰が起こる。今回測定した崩壊体は、運搬距離が短く崩壊時のブロックのサイズ分布を保持したまま堆積したと解釈した。一方、膨縮体とされる地層について $R^2$ の値が相対的に低くなったのは、変形時の砂泥互層の層厚比と粘性率比に依存した不均質な変形により、ブロックが特定のサイズに偏ったためだと考えた。

以上のことから崩壊体と膨縮体ではブロックのサイズ分布が異なることがわかった。サイズ分布のべき乗近似からのずれは、露頭規模でみられるblock-in-matrix構造について、その成因を決める指標として有効かもしれない。

キーワード：サイズ分布、block-in-matrix構造、付加体、四万十帯、メランジュ

Keywords: size distribution, block-in-matrix fabric, accretionary complex, Shimanto Belt, mélange

## 断層運動に伴うカタクレーサイト帯の構造発達過程：中央構造線の例

## Structural development in cataclasite zones associated with faulting: an example of the Median Tectonic Line

\*荒井 駿<sup>1</sup>、竹下 徹<sup>1</sup>、岡本 あゆみ<sup>1</sup>\*Shun Arai<sup>1</sup>, Toru Takeshita<sup>1</sup>, Ayumi S. Okamoto<sup>1</sup>

1.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

1.Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

西南日本において東西方向に800km以上延長される中央構造線は、西南日本外帯の三波川帯と内帯の領家帯の境界を限る日本で最大規模の断層である。現在活動している地下の断層の動きから岩石が破壊していく様子を確認することは一般的に困難である。そのため、過去に活動していた断層の露頭を広く連続的に調査することは断層運動に伴う岩石の破壊の進展と微細構造の発達を理解する上で非常に重要である。本研究では、三重県松阪市飯高町月出に分布する中央構造線の周辺の地質図を作成し、岩石の微細構造の記載、成因の考察を行うことで、中央構造線の断層運動による脆性破壊と断層運動に関係する地質構造の発達を明らかにする。

本研究では三重県松阪市飯高町月出の東西方向に延長される中央構造線に直交する、南北方向の8本の沢(東西方向約2 km間に存在する)で300 m程度のルートマップを作成した。フィールド調査の結果、本地域では構造的低位から三波川変成岩類のチャートを含まない泥質片岩 (> 50m) と三波川変成岩類に属するチャートラミナイトを起源とする泥質片岩 (~90m), 領家花崗岩類起源のカタクレーサイト (~80m) と領家花崗岩類起源の破碎作用を受けたプロトマイロナイト (> 15m) が重なっていることが明らかとなった。さらに本地域のプロトマイロナイトとカタクレーサイトを、割れ目密度(本/cm)とマトリックス・クラスト比(%)の2種類の方法で分類した。割れ目密度測定の結果、これらの岩石は未破碎、弱破碎、中破碎、強破碎の4段階に分類できることが明らかとなった。この分類方法では、中央構造線に近いほど破碎が強くなる(割れ目の発達が著しい)、遠ざかるにつれて破碎が弱くなる(割れ目が少ない)になっていることが明らかとなった。一方、破砕片についてクラストとそれらの周りを充填している細粒なマトリックス(粒径< ~50 μmの破砕片から構成されると定義した)を識別し、マトリックスの比率を求めるマトリックス・クラスト比測定の結果からは、予察的にはあるがプロトマイロナイトとカタクレーサイト中のマトリックスの比率を大きく3段階に分けることができた：(A) ~20%, (B) 40~50%, (C) ~100%。さらに二つの分類結果の比較と走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた微細構造観察から、(A)と(C)はそれぞれ2つの段階に分けることができた。具体的には(A)の試料は割れ目の発達の程度によって2分され、(C)の試料はマトリックスに発達する強い片理構造の有無で2分された。また、割れ目密度とマトリックス・クラスト比は未破碎~弱破碎と(A)の段階では関連があるように見られるものの、その後の中破碎~強破碎、(B)~(C)の段階ではあまり相関が見られないということが明らかとなった。

以上の分類・観察結果より、本研究地域のプロトマイロナイトとカタクレーサイトは破碎の程度について、1-5(マトリックスの割合が最も小さく割れ目密度の低いものを“1”とした)の5段階に分けることができると考える。またカタクレーサイトの構造発達には、割れ目の増加(1~2)・細粒化(2~4)・片理形成(4~5)の3つのステージが存在していると推察される。細粒化のステージ(2~4)では、最初にできた割れ目が徐々に拡大し、マトリックス部分が増加していくと考えられる。また片理形成のステージ(4~5)では圧力溶解沈殿や、それに起因する石英・粘土鉱物の量比および定向配列が影響を与えている可能性がある。これらの結果を地質図に当てはめ広域的に考察すると、プロトマイロナイト帯側では1, 2が、中央構造線側では5の段階の片理を持つカタクレーサイトが存在しているが、その間では3, 4, 5の段階のカタクレーサイトが不均質に分布していることがわかる。このカタクレーサイト帯内での破碎不均質と、マトリックス部分の増加につながる割れ目の拡大は既存の断層帯発達モデル(Fusseis *et al.*, 2006, Schrank *et al.*, 2008)に対応させて議論することが可能である。

キーワード：中央構造線、カタクレーサイト、圧力溶解、断層帯

Keywords: Median Tectonic Line, cataclasite, pressure solution, fault zone





## 静岡県佐久間町浦川の中央構造線鹿塩マイロナイトの延性脆性組織

Brittle and ductile textures within Kashio mylonites along the Median Tectonic Line,  
Urakawa area, Shizuoka, Japan

\*遠藤 弘人<sup>1</sup>、道林 克禎<sup>2</sup>

\*Hiroto Endo<sup>1</sup>, Katsuyoshi Michibayashi<sup>2</sup>

1. 静岡大学大学院総合科学技術科学研究科理学専攻、2. 静岡大学理学部地球科学科

1. Graduate School of Science, Shizuoka University, 2. Institute of Geosciences, Shizuoka University

本研究では中部地方静岡県佐久間町浦川地域に分布する鹿塩マイロナイトの構造発達過程について考察した。中央構造線は日本で最も大きな断層帯であり、日本を外帯と内帯に分ける地質境界でもある。中央構造線沿いの内帯側に分布する断層岩は深成岩起源の鹿塩マイロナイトと変成岩起源のマイロナイトに分類される。研究試料の鹿塩マイロナイトは大干瀬川、尻平沢から採取した。面構造に垂直、線構造に平行な面で薄片を作成し、薄片観察とSEM-EBSDシステムによる石英の結晶方位解析を行った。また、岩石中の鉱物同定のためにXRDを用いた。鹿塩マイロナイトは細粒な基質部と粗粒なポーフィロクラストをもつ典型的な延性剪断組織を示し、基質の割合からプロトマイロナイト、マイロナイト、ウルトラマイロナイトに分類された。プロトマイロナイトは石英が動的再結晶作用によって細粒化し、比較的粗粒な長石と角閃石ポーフィロクラストを持つが一部のポーフィロクラストには割れが観察された。マイロナイトでは石英と長石からなる細粒基質部が20 $\mu$ m程度に細粒化していた。プロトマイロナイトと同様に長石のポーフィロクラストの一部で割れが観察された。ウルトラマイロナイトはポーフィロクラストがほとんどなく非常に細粒化した石英と長石を含む基質部で構成されていた。さらに基質部の一部が割れて脆性破壊しており、延性組織に重複した脆性破壊組織が発達したカタクレーサイトに変化していた。またカタクレーサイト化作用が進んだ試料では岩片状のマイロナイトが緑泥石を多く含んだ基質部に含まれていた。これらすべての岩石試料にはカルサイト脈が観察され、プロトマイロナイトとカタクレーサイトにはローモンタイト脈が観察された。結晶方位解析の結果、すべてのマイロナイトは石英のc軸がY方向に集中したファブリックを持つことがわかった。石英c軸のY軸集中ファブリックは石英のprismすべりが卓越する環境で形成されるため、中温環境で形成された可能性がある。さらに、一部のマイロナイトのファブリックには、Y軸集中に加えてクロスガードルあるいは、シングルガードルを示した。これらのファブリックは中温で卓越するprismすべりから低温で卓越するrhombすべり、さらに basalすべりに変化したと考えられる。以上の結果は静岡県佐久間町浦川地域の鹿塩マイロナイトが降温期の延性領域から脆性領域におよぶ剪断変形作用を受けたことを示唆する。このような延性から脆性までの変形環境の変化は中央構造線形成運動を反映しているかもしれない。

キーワード：中央構造線、鹿塩マイロナイト、脆性破壊組織、石英c軸ファブリック

Keywords: Median Tectonic Line, Kashio mylonite, Brittle texture, Quartz c-axis fabric

## 三重県松阪市・中央構造線栗野・田引露頭における断層ガウジの局所的な化学変化

Localized chemical changes of the fault gouges at the Awano-Tabiki outcrop of the Median Tectonic Line in Matsusaka-city, Mie Prefecture

山田 悠太<sup>1</sup>、稲生 千咲<sup>2</sup>、\*大谷 具幸<sup>1</sup>、亀田 純<sup>2</sup>、重松 紀生<sup>3</sup>、小嶋 智<sup>1</sup>

Yuta Yamada<sup>1</sup>, Chisaki Inaoi<sup>2</sup>, \*Tomoyuki Ohtani<sup>1</sup>, Jun Kameda<sup>2</sup>, Norio Shigematsu<sup>3</sup>, Satoru Kojima<sup>1</sup>

1.岐阜大学、2.北海道大学、3.産業技術総合研究所

1.Gifu University, 2.Hokkaido University, 3.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

中央構造線は国内有数の大規模な構造線であるとともに、長期にわたる活動履歴を有しており、規模の大きな破碎帯を伴っている。活動履歴の長さから、過去に断層破碎帯が地下の様々な深度に位置していたときの特徴が保存されていると期待される。本研究では、地殻内の断層で生じる化学変化を検討することを目的に、三重県松阪市の栗野・田引露頭を対象として、断層破碎帯における化学組成や鉱物組成を蛍光X線分析及び粉末X線回折分析により検討を行った。粉末X線回折分析では、標準試料としてアルミナを20 wt%混合し、RockJock (Eberl, 2003) を用いて鉱物組成分析を行った。

調査対象とした栗野・田引露頭では、標高差約35mほどの斜面に走向方向に約80mにわたり中央構造線が露出している。中央構造線の南側(下盤側)に三波川変成岩、北側(上盤側)に和泉層群相当の堆積岩、及び領家帯の畑井トール岩が分布している。三波川変成岩は中央構造線から20 mほどにわたりさまざまな程度の破碎を被っており、この内部には右横ずれを示す非対称構造が発達している(重松ほか, 2015)。露頭西側では、岩相境界及びその下盤数 mの地点に東西走向で北傾斜のすべり面が発達し、後者はより明瞭であることから主すべり面であると考えられる。上側のすべり面は、露頭東端では和泉層群相当の堆積岩中内部に位置し、露頭西端では和泉層群相当の堆積岩と三波川変成岩の岩相境界に一致している。主すべり面の内部は、黒色鱗片状ガウジ、灰色ガウジ、黒色無構造ガウジからなり、運動方向は複雑に変化する。灰色ガウジは連続的に分布し、直線的な境界を有することから、最新すべり面であると考えられる。

蛍光X線分析の結果より、灰色ガウジではCaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ignition Lossが増加し、SiO<sub>2</sub>が減少する。また、主すべり面を挟んだ両側でNa<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MnO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が異なる傾向を示す。なお主すべり面以外では、化学組成の顕著な変動は原岩が異なると考えられるフラグメントを除けば認められない。RockJockの結果より、主すべり面の上盤側と主すべり面及び下盤側で粘土鉱物の含有量が大きく異なっている。また、主すべり面ではスメクタイト、ドロマイトが周囲に比べて極端に多くなっている。なお主すべり面以外では、鉱物組成の顕著な変動は原岩が異なると考えられるフラグメントを除けば認められない。

主すべり面におけるCaO, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ignition Lossの増加とSiO<sub>2</sub>の減少は炭酸塩鉱物の形成とそれに伴うSiO<sub>2</sub>の相対的な減少で説明できる可能性がある。そこで、主すべり面近傍の試料を主すべり面の断層ガウジの原岩とみなして、そこに炭酸塩鉱物として新たにCa, Mg, Feが増加するときのSiの相対的な減少に関して検討を行った。原岩へのCa, Mg, Feの増加はそれぞれ異なる3つの独立した変数として表現し、それらの変数を用いてSiの減少を求める。次に、変数で表される化学組成の変化が主すべり面の断層ガウジの値に近づくように最小二乗法により各変数の値を求めた。その結果、下盤側の試料を原岩とすれば最小二乗法の残差がきわめて小さくなることから、主すべり面の断層ガウジは下盤側の断層ガウジを原岩として炭酸塩鉱物が形成されることによって化学組成の変化を説明できることがわかった。下盤側の断層ガウジを原岩とする点は、主すべり面と下盤側で粘土鉱物の含有量が類似している点と調和的である。

この露頭では断層破碎帯の幅が大きいにもかかわらず、化学組成及び鉱物組成の変化は主すべり面のみに集中している。これは主すべり面のみで顕著な水-岩石反応を生じたことを示唆している。Oohashi et al. (2015) はスメクタイトの割合が30 %程度を越えると摩擦係数が大きく低下することを報告している。よって、主すべり面はスメクタイトが形成される深度では水-岩石反応の結果により強度が周囲に比べてきわめて小さかったと考えられる。

Eberl (2003) USGS Open-File Rep., 2003-78.

Oohashi *et al.* (2015) *Jour. Geophys. Res.*, 120, 1572-1586.

重松ほか (2015) 日本地球惑星科学連合2016年大会予稿集, SCG57-21.

キーワード：局所的な化学変化、断層ガウジ、中央構造線

Keywords: localized chemical changes, fault gouges, Median Tectonic Line

## 塩ノ平断層及び南方延長部の破砕帯の特徴

Fault Properties of the Shionohira Fault and its Southern Extension in Fukushima and Ibaraki Prefectures, Japan

\*亀高 正男<sup>1</sup>、酒井 亨<sup>1</sup>、田中 由美子<sup>1</sup>、青木 和弘<sup>2</sup>、田中 義浩<sup>2</sup>、瀬下 和芳<sup>2</sup>、丹羽 正和<sup>2</sup>、増田 祐輝<sup>2</sup>

\*Masao Kametaka<sup>1</sup>, Toru Sakai<sup>1</sup>, Yumiko Tanaka<sup>1</sup>, Kazuhiro Aoki<sup>2</sup>, Yoshihiro Tanaka<sup>2</sup>, Kazuyoshi Seshimo<sup>2</sup>, Masakazu Niwa<sup>2</sup>, Yuki Masuda<sup>2</sup>

1.ダイヤコンサルタント、2.日本原子力研究開発機構

1.Dia Consultants, 2.Japan Atomic Energy Agency

2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震（Mj7.0；以下4.11地震）によって，福島県いわき市田人町旅人滑石から石住綱木北西に，北北西-南南東に約14kmにわたってのびる地表地震断層が出現し，塩ノ平断層と命名された（石山ほか，2011）（ここでは活動区間と呼ぶ）。

4.11地震以前の研究として，「新編 日本の活断層」（活断層研究会編，1991）などにより井戸沢断層の一部をなす「活断層の疑いのあるリニアメント」が図示されていた。塩ノ平断層は，このトレースとほぼ一致するが，「新編 日本の活断層」では，4.11地震の地表地震断層の出現位置の南端よりも南方まで線が描かれ，常磐炭田地質図（須貝ほか，1957）において車断層として示されている地質断層が連続している（ここでは非活動区間と呼ぶ）。

著者らは，4.11地震の活動区間と非活動区間の違いに着目した調査・研究を進めている（例えば，亀高ほか，2015；青木ほか，2015など）。本発表では，活動区間と非活動区間のボーリング掘削調査の結果と，得られたコア試料の破砕帯の性状を中心に報告する。

調査地域の地質は，御斎所変成岩類に属する結晶片岩と，それらを被覆する古第三系～新第三系堆積岩類が分布しており，塩ノ平断層及び南方延長部の断層は両者を切断している。活動区間では，いわき市田人町黒田の塩ノ平地点及び別当地点において，露頭調査及びロッド式定方位オールコア試錐を実施した。塩ノ平地点では鉛直及び80度の斜めボーリングを行い，両方の試錐コアで緑色片岩と堆積岩類の境界付近に，幅約20～30cmの暗緑色ガウジを伴う断層面（N20W/75W）が認められた。断層ガウジ周辺には断層角礫が発達し，特に下盤側の緑色片岩に厚く分布している。一方，別当地点では80度の斜めボーリングを行い，試錐コアでは結晶片岩の破砕帯中に幅約25cmの褐色ガウジを伴う断層面（N7W/80W）が認められた。

非活動区間では，北茨城市関本町富士ヶ丘の水北上地点においてロッド式定方位オールコア試錐を実施した。掘削したコアは深度が浅いほうから順に表土，古第三系堆積岩類（主に礫岩），緑色片岩，砂質・泥質片岩の順に分布している。このうち堆積岩類の一部，及び結晶片岩類は全て断層活動による破碎を受けている。礫岩と緑色片岩は初生的には不整合関係と考えられるが，断層による破碎のためその境界は不明瞭である。コア深度20.39m付近に幅約2cmの黒緑色ガウジを伴う断層面（N4E/74W）が，コア深度20.86m付近に幅約11cmの灰緑色ガウジ及び灰色ガウジを伴う断層面（N1E/86W）が認められる。前者は緑色片岩起源の断層角礫中に認められ，後者は緑色片岩起源の断層角礫と砂質・泥質片岩起源の断層角礫の境界に位置している。ガウジの下盤側には断層角礫が続き，一部はカタクレーサイト様の固結した性状を示す。

破砕帯の規模や構成する断層岩の性状から，塩ノ平断層及び南方延長部では古第三系堆積岩類の堆積以前から断層活動が生じていた可能性が示唆される。

X線回折分析の結果から，活動区間の塩ノ平地点及び別当地点の露頭試料の断層ガウジにはスメクタイトが多く含まれており，緑泥石の含有量は少ないかまたは検出できない。一方，非活動区間の水北上地点の断層ガウジに含まれる粘土鉱物には緑泥石が比較的多く，スメクタイトやイライトが伴われているがその量比はガウジによって若干異なっている。このように，活動区間と非活動区間では断層ガウジを構成する粘土鉱物に有意な差が認められる。

## 【文献】

青木和弘ほか，2015，塩ノ平断層における断層ガウジの摩擦特性。連合大会2015年大会講演要旨，SCG57-25。

石山達也ほか，2011，日本地震学会ニュースレター，vol.23，no.5，36-38。

亀高正男ほか，2015，塩ノ平断層の破砕部性状と断層活動性。連合大会2015年大会講演要旨，SCG57-P32。

活断層研究会, 編集, 1991, 新編 日本の活断層一分布図と資料一. 東大出版会, 437p.  
須貝貫二ほか, 1957, 常磐炭田地質図, 1:50,000ならびに説明書. 地質調査所, 154p.

キーワード: 塩ノ平断層、車断層、破碎部性状、断層ガウジ、断層活動性

Keywords: Shionohira Fault, Kuruma Fault, property of fault zone, fault gouge, fault activity

## 塩ノ平断層における断層ガウジの摩擦特性（その2）

- 車断層（塩ノ平断層南方延長部）における断層ガウジとの比較 -

## Frictional Properties of Shionohira Fault Gouge (Part 2)

- A Comparison with Kuruma Fault Gouge at the Southern Extension of Shionohira Fault -

\*青木 和弘<sup>1</sup>、瀬下 和芳<sup>1</sup>、田中 義浩<sup>1</sup>、丹羽 正和<sup>1</sup>、増田 祐輝<sup>1</sup>、亀高 正男<sup>2</sup>、酒井 亨<sup>2</sup>、嶋本 利彦<sup>3</sup>\*Kazuhiro Aoki<sup>1</sup>, Kazuyoshi Seshimo<sup>1</sup>, Yoshihiro Tanaka<sup>1</sup>, Masakazu Niwa<sup>1</sup>, Yuki Masuda<sup>1</sup>, Masao Kametaka<sup>2</sup>, Toru Sakai<sup>2</sup>, Toshihiko Shimamoto<sup>3</sup>

1.日本原子力研究開発機構、2.ダイヤコンサルタント、3.中国地震局地質研究所

1.Japan Atomic Energy Agency, 2.Dia Consultants, 3.Institute of Geology, China Earthquake Administration

2011年4月11日に発生した福島県浜通りの地震（2011年の東北沖地震の最大余震）によって、東北日本南東部の福島県いわき市で、北北西から南南東へ延びる地表地震断層が出現した。石山ほか（2011）によって塩ノ平断層と命名された（以下活動区間と呼ぶ）。この断層の南方延長部では同方向のリニアメントが識別され車断層と呼ばれているが、この区間には地表変位は現れなかった（以下非活動区間と呼ぶ）。著者らは4.11地震による活動区間と非活動区間との違いに注目した調査・研究を進めており、昨年の連合大会では活動区間の露頭サンプルを用いた摩擦実験結果を報告した。今回の発表では、活動区間と非活動区間の両方で掘削した浅層試錐コアから採取した断層ガウジを用いた低速～高速摩擦実験結果について報告する。

試験機は、中国地震局地質研究所が所有する回転剪断式低速・高速摩擦試験機を用いた。すべり速度は0.2 microns/s～2m/s、室温下で無水または含水条件、垂直応力は多くの場合 1 MPa、ホスト試料として岩石に近い挙動を示すTiAlV合金製ピストンを用いて実験をおこなった。テフロン・スリーブを用いてガウジを封入したので、実験は排水条件下でおこなった。試料は、非活動区間である車断層の水上北地点での深度20.90～20.95mの断層ガウジおよび活動区間である塩ノ平断層のうち、別当地点での深度12.82～12.87 mと塩ノ平地点での深度5.96～6.00mで採取した断層ガウジを採取した。

断層ガウジのすべり挙動は、ほとんど速度依存性が認められない低速領域（10～100 microns/s以下）、顕著な速度強化が認められる中速領域、および著しいすべり弱化的な高速領域（1～10 mm/s以上）で特徴づけられる。無水条件下のガウジは、低・中速領域において0.6～1.0の高い摩擦強度を示すが、高速下では0.1前後の低い定常摩擦係数を示す。一方含水条件下では、別当と塩ノ平の露頭試料と別当のコア試料は低速下で0.2以下の低い摩擦係数を示すが、塩ノ平コア試料および水上北コア試料は0.4～1.0の幅広い摩擦係数を示す。塩ノ平断層、車断層のガウジは含水条件下でかなり不均一な摩擦特性を示している。摩擦強度は含水量によって大きく変わるので、講演では新しいサンプルセルを用いて水の量をコントロールした実験結果も報告したい。

キーワード：摩擦特性、断層ガウジ、塩ノ平断層、低速～高速摩擦試験、福島県浜通り地震

Keywords: frictional properties, fault gouge, Shionohira fault, low to high velocity friction experiment, Fukushima-ken Hamadori earthquake

## 2000年鳥取県西部地震震央付近における断層系の分布解明

## Distribution of fault system around the epicenter area of the 2000 Western Tottori earthquake

\*内田 嗣人<sup>1</sup>、向吉 秀樹<sup>1</sup>、小林 健太<sup>2</sup>、廣野 哲朗<sup>3</sup>\*Hideto Uchida<sup>1</sup>, Hideki Mukoyoshi<sup>1</sup>, Kenta Kobayashi<sup>2</sup>, Tetsuro Hirono<sup>3</sup>

1. 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域、2. 新潟大学理学部地質科学科地球進化学、3. 大阪大学 大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻

1. Department of Geoscience Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, 2. Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University, 3. Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University

2000年鳥取県西部地震は、十分に活断層が認知されていない地域で発生したにも関わらず、マグニチュード7.3、最大震度6強の揺れを観測した大地震である。この地震の余震域周辺において新学術「地殻ダイナミクス」プロジェクトの一環として、1000点の地震計の超高密度な地震観測に基づく断層形状・亀裂分布の推定が計画されている。また、この地震観測に対比させた、余震域周辺における地表の断層分布や断層岩の性状解明に関する野外調査主体の研究も行われている。本研究は、野外調査研究の1つとして、2000年鳥取県西部地震の震央周辺の4km四方における断層系の分布解明及び断層岩の特徴を明らかにすることを目的とした調査を行った。

本研究地域周辺には根雨花崗岩体と呼ばれる白亜紀後期～古第三紀の花崗岩類が広く分布する。花崗岩類は主に粗粒黒雲母花崗岩からなり、それを貫く中性～塩基性岩脈、酸性岩脈、アプライト脈が見られる。

本研究での結果を以下に示す。調査地域に分布する断層の姿勢は、大局的に見るとN60°W-高角及びN60°E-高角の2方向に卓越している。貫入岩の姿勢はN60°W-高角に卓越している。また、花崗岩類の節理面はN70°W-高角北傾斜及びN50°E-垂直に卓越しており、断層の姿勢と類似した卓越走向である。調査地域内の複数の露頭において、NW-SE走向、NE-SW走向の断層系が互いに切断関係にあることを確認した。

断層岩の顕微鏡観察において、12枚の断層にカタクレサイトが認められた。カタクレサイトは、余震域内のみならず、余震域外においても確認された。本調査で確認されたカタクレサイトは、鏡下で黒雲母の塑性変形が強い面状カタクレサイトとランダムファブリックのカタクレサイトである。また、厚さ約40cmの断層ガウジ近傍の花崗岩試料の薄片観察より、地震時の衝撃波で形成されたと考えられる粉砕岩も認められた。

本地域の断層系は、NW-SE走向、NE-SW走向の交互切断関係が特徴的である。断層が交互に切断する関係である場合、ある程度発達した断層であっても、断層の分断化によりリニアメントを読み取ることは難しくなると考えられる。2000年鳥取県西部地震余震域周辺で報告されている、長さが短く明瞭性に欠けるリニアメントは、その結果断層分断化の影響により地形に反映されにくくなっている可能性がある。本調査地域で見られる断層系のうち、N60°W-高角の断層は、小林ほか(2003)で指摘されているように、地震学的に求められたN38°W垂直の震源断層(堀川ほか, 2001)に対するリーデル剪断面と考えられる。また、調査地域では今回の地震以前にも断層運動が繰り返し生じ、節理面より貫入面を優先して断層が発達してきたと考えられる。貫入岩も破碎されていることから、岩脈貫入後も断層活動が続いていたと考えられる。先行研究では、余震域内に限りカタクレサイトが分布すると報告されている。しかし、本研究では余震域外にも数多くのランダムファブリックのカタクレサイト、一部の面状カタクレサイトが確認された。このことから、余震域周辺の広い範囲において脆性破壊を伴うような断層活動が古くから続いていたと考えられる。粉砕岩は封圧の低いところで形成されるとされており、本研究で確認された粉砕岩は、封圧が小さい地下数km以浅で大きな地震波を伴う断層活動があった痕跡と考えられる。

キーワード：2000年鳥取県西部地震、カタクレサイト、粉砕岩、活断層

Keywords: The 2000 Western Tottori earthquake, Cataclasite, Pulverized rock, Active fault





複数の偏差応力テンソルを方解石双晶の方向データから検出する統計的混合分布モデル  
Statistical mixture model for separating deviatoric stress tensors from heterogeneous calcite twin data

\*山路 敦<sup>1</sup>

\*Atsushi Yamaji<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

機械的雙晶の形成で、結晶は単純剪断をこうむる。方解石のe雙晶の場合、雙晶面上における剪断応力の変位方向成分（分解剪断応力 $\tau$ ）がある臨界値（ $\tau_c$ , 10 MPa前後といわれる：Lacombe, 2010）を超えた場合に形成される。

この $\tau > \tau_c$ という雙晶形成条件は、差応力空間（Sato and Yamaji, 2006）を使って幾何学的条件に書き換えることができる。すなわち、雙晶面の方向と剪断方向という対になった方向データは、5次元の単位球上の点で表され（以下、データ点という）、また、雙晶形成時の偏差応力テンソルは、この球面上の小円領域（spherical cap）で表される。そして雙晶形成条件は、データ点がこのspherical capの上に存在するという条件になる（Yamaji, 2015a）。したがって、雙晶の方向データから偏差応力テンソルを推定する問題は、この球面上のデータ点のなすクラスターに、spherical capをフィッティングする問題に帰着する（Yamaji, 2015b）。しかし、天然データはたいがい不均一である。すなわち、異なる応力状態でできた雙晶が混在していることが多い。その場合、データ点は複数のクラスターをなす。ゆえに、複数のspherical capをフィッティングすることで、複数の偏差応力テンソルをとらえることができる。

そこで、spherical capの上にデータ点が存在することを確率密度関数で表現し、その混合分布を最尤法で決定することで、複数個のspherical capをフィッティングするプログラムを開発した。検出すべき偏差応力テンソルの数は情報量基準で推定する。対数尤度の最適化には、遺伝的アルゴリズムを使っている。このプログラムで決定されるのは、偏差応力テンソルを $\tau_c$ で規格化した無次元偏差応力テンソルであるが、 $\tau_c$ 値を推定することはできる（山路、本セッション）。

機械的雙晶の形成にもなって、方解石は歪み硬化をしめす。これは $\tau_c$ 値の増大とみなすこともできる。天然データを使った予察的検討では、歪み硬化の影響は見られなかった。

キーワード：混合分布、情報量規準、延性変形、造構応力

Keywords: mixed distribution, information criterion, ductile deformation, tectonic stress

## 小断層データを制約条件に加えたトライシアー・逆モデリングの手法

## Trishear inverse modeling by using fault-slip data from meso-scale faults

\*古角 晃洋<sup>1</sup>、山路 敦<sup>1</sup>、佐藤 活志<sup>1</sup>

\*Akihiro Kokado<sup>1</sup>, Atsushi Yamaji<sup>1</sup>, Katsushi Sato<sup>1</sup>

1.京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1.Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

本研究では、地下の地質構造を推定するトライシアー・逆モデリング (e.g., Allmendinger, 1998; Cardozo, 2005) の手法を改良した。トライシアー・逆モデリングとは、断層伝播褶曲の運動学的モデルであるトライシアー・モデル (e.g., Erslev, 1991; Hardy and Ford, 1997; Allmendinger, 1998) を順モデルとして、断層の形状や変位量などのパラメタを求める手法である。従来のトライシアー・逆モデリングでは、地層の位置と姿勢のデータを制約として、データに対するモデルの適合度を評価してきた。しかし、観測できる地層のデータは限られているため、適合度が同程度でありながら断層の形状などのパラメタが大きく異なる複数のトライシアー・モデルが得られることがある (Cardozo et al., 2011)。それらのモデルから最適なモデルを選択するために、著者らは逆モデリングの制約条件として小断層データを用いる手法を開発した。本手法では、モデルから計算される小断層面上の最大剪断歪み方向と、観測された小断層のすべり方向との角度差に基づいて定義した適合度を最大化する。本手法の有効性は、正解のモデルを仮定した人工データによるテストによって確かめられた。すなわち、正解のモデルに適合するように生成した小断層データを用いて、正解のモデルに近いトライシアー・モデルを選択することができた。さらに、本手法を新潟県中部の真人背斜に適用した。真人背斜は、伏在断層による断層伝播褶曲と解釈されている。ただし、この伏在断層の傾斜方向については、東向きと西向きの2つの主張がある (山田ほか, 1992; 防災科学技術研究所, 2012)。解析の結果、東傾斜のモデルの方が観測された地層面および小断層データと調和的であった。

キーワード：トライシアー、断層伝播褶曲、断層スリップデータ、逆モデリング、魚沼層

Keywords: Trishear, Fault-propagation fold, Fault-slip data, Inverse modeling, Uonuma Formation

## 混合確率分布のあてはめによる応力逆解析の解の自動検出

Automatic detection of solutions of stress tensor inversion by fitting mixture probability distribution

\*佐藤 活志<sup>1</sup>

\*Katsushi Sato<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

1. Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

小断層解析による古応力状態の推定手法は応力逆解析法と呼ばれ、構造地質学的研究において普及した技術である。また、地震学の分野でも、発震機構解から地殻応力を推定する手法として広く用いられている。しかしながら、地質時代に記録された複数の応力状態を分離して検出する手法は完全には自動化されておらず、応力状態の認定において解析者の主観を排除できていない。本研究は、応力逆解析の解を自動的に検出する手法を提案する。

応力逆解析に必要な観測データは、断層面の方位と滑り方向（断層スリップデータ）である。断層の滑り方向が剪断応力と平行であるとの仮定に基づけば、1条の断層スリップデータに適合する応力テンソルは、5次元空間（偏差応力空間）の半円弧上の点に相当する（Fry, 1999; Sato and Yamaji, 2006）。Hough変換に基づく応力逆解析法（Yamaji et al., 2006, 以下Hough法）は、多数の断層に対応する半円弧を重ね合わせて、偏差応力空間上に適合度の分布を得た後、適合度のピークの位置を最適解と見なす。適合度の分布が複数のピークを持つならば、複数の応力テンソルが解として得られる。ただし、Hough法はステレオ投影図上でピークを視認するか、閾値を設定してピーク検出処理を行う必要がある。本研究は、適合度の分布に混合確率分布をあてはめることで、ピークの認定を自動化した。上記の半円弧は偏差応力空間で異方的な形状を持つので、異方性を持つ確率分布として5次元Kent分布を採用した。また、ピークの数はいずれもベイズ情報量基準に基づいて決定した。本研究の自動検出法のテストとして、人工断層データを解析した。2つの応力に起因する断層群を混合して解析したところ、2つの適合度のピークが正しく検出された。また、天然の断層データへの適用例として、大分県別府湾の北方に分布する更新統碩南層群を切る小断層群を解析した。この地域は水平引張応力場におかれていると考えられているが、本手法によってNNE-SSWとNNW-SSEの2つの引張方向が検出された。上位の大分層群ではNNE-SSW方向の引張応力のみが検出されたことから、本地域において1 Ma頃に引張方向が変化したことが示唆された。

## References

Fry, N., 1999, *Journal of Structural Geology*, 21, 7-21.

Sato, K. and Yamaji, A., 2006, *Journal of Structural Geology*, 2006, 28, 957-971.

Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006, *Journal of Structural Geology*, 28, 980-990.

キーワード：応力逆解析、小断層解析、混合確率分布

Keywords: stress tensor inversion, fault-slip analysis, mixture probability distribution

P波初動データを用いた応力空間パターン推定手法の開発：予備的な数値実験

Development of a method to estimate spatial stress pattern from P-wave first motion data: a preliminary numerical simulation

\*岩田 貴樹<sup>1</sup>

\*Takaki Iwata<sup>1</sup>

1.常磐大学

1.Tokiwa University

A method of estimating spatial stress pattern from a centroid moment tensor (CMT) dataset has been developed by Terakawa and Matsu'ura [2008, GJI, 172, 674-685]. However, often the number of available CMT solutions is limited if our interest is the estimation for a small area. For such a case, it is difficult to apply this method because of the insufficiency of data. To meet this difficulty, this study proposes a method to estimate from P-wave first motion data, instead of CMT data. We assume that the direction of a pre-existing fault plane is random and that the direction of a seismic slip is parallel to that of the tangential component of the stress vector. Under these assumptions, we can compute the probability of the polarity (up/down) of a P-wave first motion if stress field at an hypocenter and the geometry between the hypocenter and seismic stations are given. Thus, on the basis of a likelihood function constructed from the computed probability and a prior distribution corresponding to a spatial smoothness constraint on the stress field, we can estimate the spatial stress pattern through a Bayesian approach.

The development of this method is currently at preliminary stage, and thus only a numerical simulation has been done. For the simplicity of the simulation, a case where hypocenters and seismic stations are located in a two-dimensional space (i.e., plane) is considered; one is horizontal and the other is vertical. Also, the direction of the intermediate principal stress ( $\sigma_2$ ) and that of a fault plane of each earthquake are supposed to be vertical to the considered plane. The spatial variation of the plunge of the direction of the maximum principle stress ( $\sigma_1$ ) is assumed to be follow a particular pattern (and consequently, the direction of the minimum principle stress  $\sigma_3$  is also determined). Under these conditions and assumptions about the directions of a fault plane and seismic slip as described above, datasets of P-wave first motions are generated. Then, the proposed Bayesian approach is applied to these datasets. As a result, the estimated spatial pattern almost agrees with the one assumed in the generation of the simulation datasets, which suggests the validity of developing this Bayesian approach.

キーワード：応力場、空間パターン、P波初動、ベイズ推定

Keywords: stress field, spatial pattern, P-wave first motion, Bayesian estimation

東北日本弧における(U-Th)/He熱年代マッピング：長期スケールの地殻変動像の解明に向けて  
(U-Th)/He thermochronometric mapping in NE Japan Arc: Insights into understanding  
long-term crustal deformation

\*末岡 茂<sup>1</sup>、田上 高広<sup>2</sup>、Kohn Barry<sup>3</sup>、福田 将真<sup>2</sup>

\*Shigeru Sueoka<sup>1</sup>, Takahiro Tagami<sup>2</sup>, Barry P. Kohn<sup>3</sup>, Shoma Fukuda<sup>2</sup>

1.日本原子力研究開発機構、2.京都大学地球惑星科学専攻地質学鉱物学教室、3.メルボルン大学地球科学科  
1.Japan Atomic Energy Agency, 2.Department of Geology and Mineralogy, Kyoto University, 3.School of  
Earth Sciences, University of Melbourne

東北日本弧では、測地的に観測された短期間の歪みと、地質学的・地形学的に推定された長期間の歪みにおいて、速度や方向が異なるというパラドックスが知られている（例えば、池田，1996，活断層研究）。測地的に観測される変形には、地震時にキャンセルされる弾性変形と、地形発達に寄与する永久変形（非弾性変形）の両方が含まれるが、両者の分離には、地形・地質学的調査による非弾性変形速度の評価が実践的な手段だと考えられている（池田，2012，地質雑）。筆者らは、100万年以上の長期間における鉛直方向の地殻変動像の解明を目的に、東北日本弧を横断する南北2本の測線において、(U-Th)/He熱年代解析を実施している。北測線は、北上山地～奥羽脊梁山地～太平・白神山地、南測線は、阿武隈山地～奥羽脊梁山地～飯豊・朝日山地を通過しており、試料はいずれも白亜紀～古第三紀初頭の花崗岩類である。2016年1月現在時点では、南北両測線のアパタイト(U-Th)/He年代(AHe年代)と、南測線のジルコン(U-Th)/He年代(ZHe年代)が得られている。AHe年代は、前弧側の北上山地、阿武隈山地では、一様に約50Maより古い年代が得られ、これらの地域が新生代ほぼ全体を通じて比較的安定な環境にあったことが示唆された。対して、奥羽脊梁山地および背弧側（太平・白神山地、飯豊・朝日山地）では、すべての地点で約10Maより若い年代が得られ、奥羽脊梁山地では最も若い年代は約1Maに達した。これらの年代は、約10Ma、約5Ma、約3Ma以降の3つのグループに分類することができたが、これらの時期は後背地解析から推定されている東北日本弧の山地の隆起ステージ（例えば、Nakajima et al., 2006, PPP; 守屋ほか, 2008, 地質雑）とほぼ一致する。また、試料採取地点は火山周辺の地温勾配が高い領域から十分に離れていることを考慮すると、今回得られたAHe年代は、大局的には東北日本弧の山地の隆起・削剥史を反映していると考えられる。より詳細に年代分布を見ると、背弧側では、南方の飯豊・朝日山地では約10MaのAHe年代が卓越するのに対し、北方の太平・白神山地では約5Maと、より若いAHe年代が卓越する。守屋ほか（2008）の後背地解析による検討では、約5Maの出羽山地の隆起開始時には、南方の朝日山地はすでに隆起していたことを考え合わせると、約10Maという年代は、飯豊・朝日山地の隆起開始時期を示している可能性がある。また、AHe年代とZHe年代に共通して、奥羽脊梁山地および背弧側では、山地の周縁部より中心部でより若い年代が得られる傾向が見られた。これは、木曾山脈（Sueoka et al., 2012, IAR）や赤石山脈北部（末岡ほか, 2011, 地学雑）といった西南日本弧の逆断層地塊山地で、山頂部よりも山地周縁の断層近傍で若い年代が得られたことと対照的である。原因としては、火山弧の存在による、単なる山地内の地温構造の不均質に加え、マグマの貫入によるアイソスタティックなドーム状隆起の影響などが考えられるが、今後の検討課題である。今後の展開としては、AFT年代、ZFT年代、U-Pb年代等の他の熱年代を加えたより詳細な隆起・削剥史の検討や、さらに高密度の年代測定による、各山地の隆起・削剥様式の検討などを予定している。

キーワード：東北日本弧、(U-Th)/He熱年代、長期の地殻変動

Keywords: NE Japan Arc, (U-Th)/He thermochronometry, long-term crustal deformation

東北日本弧の基盤岩類における低温領域の熱年代学データコンパイル：AFT年代測定結果速報  
Compilation of low-temperature thermochronometric data in NE Japan Arc: A preliminary  
report of apatite fission-track ages

\*福田 将真<sup>1</sup>、末岡 茂<sup>2</sup>、田上 高広<sup>1</sup>

\*Syoma Fukuda<sup>1</sup>, Shigeru Sueoka<sup>2</sup>, Takahiro Tagami<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科、2. 日本原子力研究開発機構

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Japan Atomic Energy Agency

日本列島の内陸地殻における応力と歪みの関係の理解や、弾性変形と非弾性変形の分離のために、測地学的時間スケールから地質学的時間スケールまで、様々な時間スケールにおける歪み速度が研究されており（例えば池田ほか 2012, Nishimura 2014）、その比較・検討が重要であると考えられる。測地学的タイムスケールでの歪みでは、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の前後における東北地方のGPSデータから、地震前同様に地震後も鉛直方向は沈降を観測し、測地学的歪と地質学的歪の乖離がさらに進行したとの報告がある（西村 2014）。このようなタイムスケールの異なる歪み速度のパラドックス（池田 1996, 1998）を解明するためには、地質学的タイムスケールからも定量的なアプローチを必要としていることが示唆される。

筆者らは、新学術領域研究「地殻ダイナミクス—東北沖地震後の内陸変動の統一的理解—」の一環として、低温領域の熱年代学的手法を用いて、地質時間スケールにおける東北日本弧の鉛直方向の歪み速度の推定を試みている。試料は白亜紀から古第三紀の花崗岩類を対象とし、北上山地から奥羽脊梁山脈を通過して白神山地に抜ける北測線と、阿武隈山地から奥羽脊梁山地を通過して飯豊山地に抜ける南測線の2測線、約30地点においてサンプリングを行った。北測線ではアパタイト(U-Th)/He年代(AHe年代)、南測線ではAHe年代およびジルコン(U-Th)/He年代(ZHe年代)が得られている（末岡ほか 2016）。既報の東北日本のAFT年代データによれば、太平洋岸では北上～阿武隈山地の花崗岩類から白亜紀の年代が得られており（後藤 2001; Ohtani et al., 2004）、白亜紀後期～現在までの総削剥量が約3km以下と推定される。それに対し、日本海岸の飯豊山地や越後山地では、中新世末～鮮新世の若いAFT年代の報告例があり、新第三紀末以降の急速な隆起・削剥を反映している可能性がある（後藤 2001; 末岡 未公表データ）。南測線におけるAHe年代では、前弧側の阿武隈山地で約50Maの古い年代に対し、両測線での背弧側のAHe年代値は福島盆地以西では10Maよりも若い値が得られている（末岡 2016）。これらの若い年代は、日本海拡大(25~15Ma)以降の熱史を反映しているのは間違いなく、出羽丘陵や朝日山地の隆起開始時期（守屋ほか 2008）とも整合的である。また、東北日本弧は中期中新世末から圧縮場に転じ、中新世末～鮮新世から山地の隆起が本格化したと考えられており（太田ほか 2010）、若い年代の原因として、山地の隆起に伴う削剥・冷却がまず考えられる。火成活動による年代リセットについては、第四紀火山およびその周辺の高い地温勾配を示す領域（田中ほか 2004）や新第三紀のカルデラ（Yoshida et al., 2013）との位置関係を考えると、可能性は低いと思われる。本講演では、南測線でHe年代が既に報告されている地点に対応した箇所において、新たに得られたアパタイトフィッション・トラック(AFT)年代値の報告を行い、2016年2月現在、東北地方のFT年代・He年代と併せて議論する。AFT年代の測定に関してはHasebe et al., (2004)で報告されているLA-ICP-MSを用いたFT年代測定法をもとに実施した。今後はU-Pb年代やZFT年代、さらには追加サンプリングによる高密度の熱年代データをもとに、より詳細な隆起・削剥史を検討する予定である。

キーワード：熱年代学、(U-Th)/He年代、フィッショントラック年代、東北日本弧

Keywords: thermochronology, (U-Th)/He age, fission track age, NE Japan Arc

## 新潟－神戸歪集中帯北東部の coda Q の空間分布

## Spatial variation in coda Q in the northeastern Niigata-Kobe Tectonic Zone

\*道場 正伸<sup>1</sup>、平松 良浩<sup>1</sup>\*Masanobu Doujou<sup>1</sup>, Yoshihiro Hiramatsu<sup>1</sup>

1. 金沢大学大学院自然科学研究科

1. Graduate school of Natural Science and Technology, Kanazawa University

内陸地震の発生過程の解明のために新潟から神戸にかけての歪集中帯(新潟－神戸歪集中帯)(Sagiya et al., 2000) が注目されている。Jin and Aki (2005)は新潟－神戸歪集中帯が1-4 Hzの低 coda Q 領域とほぼ一致することを報告している。Hiramatsu et al. (2013) や Tsuji and Hiramatsu (2014) は跡津川断層帯や濃尾地震震源域周辺における coda Q の空間分布から、下部地殻の変形速度が周辺領域より速いことが歪集中帯の成因であると考察している。本研究では新潟－神戸歪集中帯北東部での歪集中帯の成因を考察するために coda Q を解析する。

本研究の解析領域は北緯36°-38°、東経137.5°-140°である。この解析領域で2012年1月から2014年10月までの期間に発生し、震源が30 kmより浅く、M2よりも大きな地震を解析対象とする。防災科学技術研究所のHi-net、気象庁、国立大学の観測点を使用する。震央から30 km以内の観測点のデータから coda Q を求め、 coda Q の空間分布を作成した。

coda Q の空間分布は、低周波数帯(1-2 Hz, 2-4 Hz)、中周波数帯(4-8 Hz 8-16 Hz)、高周波数帯(16-32 Hz)でパターンが異なる。coda Q と差歪速度の空間分布を比較すると低周波数帯より中周波数帯で負の相関があった。また、低周波数帯の coda Q の空間分布は深さ25 kmのS波速度構造(Nakajima and Hasegawa, 2007)と正の相関が見られ、中周波数帯では深さ10 kmのS波速度構造と正の相関が見られた。

上記の結果から、歪集中帯北東部での低周波数帯の coda Q は下部地殻の不均質構造を、中周波数帯の coda Q は上部地殻の不均質構造を示し、中周波数帯の coda Q が歪速度の集中と関連すると考えられる。したがって、歪集中帯中部では下部地殻の高い変形速度を歪集中帯の成因であるのに対し、北東部は新潟平野が堆積盆地であることと関連して上部地殻の変形速度が速く、その結果として速い歪速度が観測されている可能性がある。ただし、本研究領域では2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動による歪速度変化が大きいため、今後2011年以前のデータについて解析を進め考察を行う必要があるであろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたり防災科学技術研究所、気象庁、東京大学地震研究所、東北大学地震・噴火予知研究観測センター、京都大学防災研究所地震予知研究センターより地震波形データを提供していただきました。京都大学の西村卓也准教授には歪速度データ、東京工業大学の中島淳一教授には地震波トモグラフィデータを提供していただきました。また、図の作成にはGMTソフトウェア(Wessel and Smith, 1998)を使用しました。ここに記して感謝いたします。

キーワード：新潟－神戸歪集中帯、coda Q、差歪速度、S波速度

Keywords: Niigata-Kobe Tectonic Zone, coda Q, differential strain rate, S-wave velocity

## 測地観測および変動地形調査によるスマトラ断層北部のすべり様式

Slip pattern along the northern Sumatran fault, Indonesia revealed by geodetic and geomorphic observations

\*田部井 隆雄<sup>1</sup>、伊藤 武男<sup>2</sup>、堤 浩之<sup>3</sup>、木股 文昭<sup>4</sup>、太田 雄策<sup>5</sup>、渡辺 愛梨<sup>1</sup>、小澤 拓<sup>6</sup>、大久保 慎人<sup>1</sup>、山品 匡史<sup>1</sup>、副田 宜男<sup>7</sup>、Gunawan Endra<sup>8</sup>、Ismail Nazli<sup>9</sup>、Nurdin Irwandi<sup>9</sup>、Sugiyanto Didik<sup>9</sup>

\*Takao Tabei<sup>1</sup>, Takeo Ito<sup>2</sup>, Hiroyuki Tsutsumi<sup>3</sup>, Fumiaki Kimata<sup>4</sup>, Yusaku Ohta<sup>5</sup>, Airi Watanabe<sup>1</sup>, Taku Ozawa<sup>6</sup>, Makoto Okubo<sup>1</sup>, Tadashi Yamashina<sup>1</sup>, Yoshio Soeda<sup>7</sup>, Endra Gunawan<sup>8</sup>, Nazli Ismail<sup>9</sup>, Irwandi Nurdin<sup>9</sup>, Didik Sugiyanto<sup>9</sup>

1.高知大理、2.名大院理、3.京大院理、4.東濃地震科学研、5.東北大院理、6.防災科研、7.西日本技術開発、8.バンドン工科大、9.シアクアラ大

1.Kochi Univ., 2.Nagoya Univ., 3.Kyoto Univ., 4.Tono Res. Inst. Earthquake Sci., 5.Tohoku Univ., 6.NIED, 7.West Japan Eng. Cons. Inc., 8.Bandung Inst. Technology, 9.Syiah Kuala Univ.

インドネシア・スマトラ断層北端部の活動履歴と現在のひずみ蓄積過程を解明する目的で、スマトラ北部のアチェ州で測地観測および変動地形調査を実施している。この地域の地震発生ポテンシャル評価が緊急に必要である理由は、全長1900 kmのスマトラ断層の中で最大のすべり速度を持っていること、120年間以上にわたり顕著な地震活動が無いこと、およびスダグ海溝で発生した2つのプレート間巨大地震（2004年スマトラ-アンダマン地震、Mw 9.2；2005年シムルー-ニアス地震、Mw 8.7）によって局地的にクーロン応力が増加していることによる。

我々は2005年以降連続および臨時GPS観測網AGNeSS (Aceh GPS Network for the Sumatran Fault System)を展開している。異なる緩和定数をもつ5年間の水平および上下変位より、余効変動を支配する複数の物理メカニズム（余効すべりと粘弾性緩和）を提唱した（Gunawan et al., 2014）。また、スマトラ断層アチェセグメントに沿ったクリープ/固着分布を推定した（Ito et al., 2012）。その結果、このセグメントはM7級の地震を発生させる可能性を有している。2013年には観測網内で相次いで2つのM6.1の地震が発生し、これに伴う明瞭な地震時変動が観測された。

断層の長期の活動履歴解明のため、合わせて変動地形学調査を実施している。ALOS/PRISMによる実体視可能な衛星画像を判読し、断層の地表トレース図を作成するとともに、それを確認するための現地調査を行った。トレースは断層崖地形、プレッシャーリッジ、線状谷、河谷の屈曲などで同定できる。さらに、測地測量の反復によって断層クリープを直接測定する小アレイを4ヶ所に設置した。2015年には、1ヶ所でトレンチ掘削調査を実施し、少なくとも3回の断層活動の履歴を発見した。今後は試料の炭素年代測定を行い、最新活動の時期と活動間隔を決定する予定である。

GPS観測点や変動地形調査地点の分布が限られるため、ALOS/PALSAR画像のInSAR解析を行った。2007年から2009年まで約3年間にわたるスタッキング画像は、断層をはさんで片側が衛星視線方向（LOS）へ短縮し、反対側が伸長する明瞭な対比を示している。断層を横断するLOS変化のプロファイルには、断層の地表トレースの位置で10-15 mm/yrの階段状のオフセットが見られる。LOS変化のパターンはスマトラ断層の右横ずれと調和的である。ただし、予測される断層すべり速度に対し、オフセット量は過大すぎるように見える。今後はGPS変位速度や変動地形学的情報も加え、LOS変化の解釈を進めたい。

キーワード：スマトラ断層、GPS、SAR、変動地形

Keywords: Sumatran fault, GPS, SAR, Geomorphology



プレート境界断層の平均応力降下量を拘束条件とした1703年元禄関東地震の滑り分布の推定  
Source fault model of the 1703 Genroku earthquake with the constraints of average stress drop

\*小森 純希<sup>1</sup>、安藤 亮輔<sup>1</sup>、宍倉 正展<sup>2</sup>

\*Junki Komori<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>1</sup>, Masanobu Shishikura<sup>2</sup>

1.東京大学大学院理学系研究科、2.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1.Graduate School of Science, University of Tokyo, 2.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, GSJ

巨大地震が発生する際、断層面のずれに伴って、地表面で隆起や沈降などの地殻変動が観測される。この際に観測される地殻変動分布から、震源断層の破壊領域やすべり量をインバージョン解析によって求める手法が広く用いられている。近年発生した地震など、詳細な地殻変動分布や地震波形データが豊富に集まっている場合は、かなり精密に断層面分布を見積もることができる。一方で、古地震研究の分野でも、残存する変動地形から見積もるなどの方法で地殻変動分布を求め、同様の手法で震源断層分布が解析されているが、隆起分布データがまばらであったり偏在したりしているために、現実の滑り分布を推定することには、相当程度の困難を要する。本研究では、1703年元禄関東地震を中心に、相模トラフのプレート境界での古地震の震源断層推定に、応力降下量という断層の物理的特性を新たな拘束条件として加えて、物理的により妥当性のある震源象を得ることを試みた。元禄地震では、房総半島南東方沖の領域が破壊したことが津波記録のみに基づいて推定されている (Matsuda et al., 1978; 行谷ほか, 2011) が、地殻変動解析からはその評価は定まっておらず、発生履歴の解明および長期予測の観点から、大きな問題となっている。

Kanamori and Anderson (1975)は、巨大地震ではその地震の規模によらず断層面上の平均的な応力降下量が1から10 MPa程度の範囲内の値を示すことを、観測データから示した。応力降下量は断層面の形状や大きさとすべり量を関係づける物理量であるため、この事実は、断層サイズ-滑り量のスケーリング則として知られるように、実際の地震時の破壊領域と滑り量との間に重要な関係性を与える。しかしながら古地震研究の分野では、過去の地震断層を数値計算で再現する際にも、この応力降下量の概念はあまり考慮されてこなかった。本研究では、元禄地震の際に発生した地殻変動量を、まず、周辺地域に残されている離水汀線の高度(宍倉, 2003)とGEONETで観測された定常的変動量から推定した。さらに、この隆起分布を基に、半無限媒質の中にいくつかの矩形断層を仮定して、データを再現する最適な断層の位置と大きさ、滑り量をグリッドサーチによって推定した。

今回、元禄地震震源断層のインバージョン解析を、応力降下量を制約条件として導入して行った結果、地上の隆起分布を再現するためにも、従来津波の発生源としてのみ想定されていた南東沖海底下の断層面が必要となることが明らかとなった。これは、房総半島南部の大きな隆起量を再現するためには、スケーリング則の制約から、単に房総半島から東京湾の直下に大きな断層滑りを与えることは出来ず、その南東方延長の領域にまで破壊領域を与える必要があるためと理解される。沖合海底直下の断層面推定には、今後さらなる定量的な評価が必要であるが、この結果からは、地震の各パラメータに関わる物理的特性についての議論が、古地震研究に新たな知見を与える可能性が示唆される。

本発表では、房総半島南東部の千倉低地における離水段丘の年代測定で、新たに明らかになった、本地域と他地域での段丘年代値のずれ(小森ほか, 2016, 本大会)が、震源断層モデルの制約から、どのように解釈されるのかについても言及する。

キーワード：1703年元禄関東地震、滑りインバージョン、古地震

Keywords: 1703 Genroku Earthquake, Slip inversion, paleo-seismology

2011年東北地方太平洋沖地震に先立つ加速的上下変動：GPSデータと潮位データに基づく考察

Accelerated vertical crustal movements in the Tohoku region prior to the 2011 Tohoku-oki earthquake: discussion of GPS and tide gauge data

\*鷺谷 威<sup>1,2</sup>、黒川 祐梨<sup>2</sup>

\*Takeshi Sagiya<sup>1,2</sup>, Yuri Kurokawa<sup>2</sup>

1.名古屋大学減災連携研究センター、2.名古屋大学大学院環境学研究科

1.Disaster Mitigation Research Center, Nagoya University, 2.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

It has been reported that horizontal crustal movements in southern Tohoku was accelerated toward the Japan Trench before the 2011 Tohoku-oki earthquake [Mavrommatis et al, (2014)]. They consider the aseismic slip acceleration on the plate interface as a possible trenchward accelerations source. If this slip acceleration occur on the plate interface, similar acceleration is expected in the vertical component. However, the previous study did not discuss the vertical crustal deformation in this region and when this acceleration start. Therefore we analyze vertical components of daily GPS coordinate data and tidal records in the Tohoku region. In regard to GPS data, we estimate the best-fit linear trend for the period 1996 to 2003 and 2003 to 2011 by using the least squares method. Then we compare the temporal change of those vertical displacement rates for each period to discuss the possible acceleration. About tidal records, we long term sea level change rates at 23 gauges obtained after removing oceanographic signals using Kato and Tsumura's method (1979). If we refer to the F3 solution in the absolute sense, the velocity changes between 2 periods appear to show systematic accelerated uplift (+2.8 mm/yr on average) in the western Tohoku region. We also find that similar systematic accelerated uplift in order part of Japan such as Kinki and Chugoku regions. However, we do not find that similar velocity changes in tidal records. Such an accelerated changes cannot be attributed to the plate subduction at the Japan Trench and we suspect these changes are related to the reference frame in the F3 solution. Thus we removed common-mode errors estimated from stations around the western Tohoku region. As a result, the vertical GPS velocity is consistent with the tide gauge data and we find accelerated subsidence along the pacific coast of Tohoku region. In particular, rapid subsidence acceleration (-3.0 mm/yr on average) occurred in the north of Oshika Peninsula. These accelerated subsidence is consistent with a deep seismic slip proposed by Mavrommatis et al. (2015) to interpret the horizontal acceleration. The estimated aseismic slip area appears to occur surrounding the coseismic slip area of the 2011 Tohoku-oki earthquake. This result suggest unfastening of coupling occur around the future coseismic slip area before Megathrust earthquake. Furthermore we estimate the vertical velocity for the period 1970 to 2011 using tide gauge data. As a result, we find significant accelerations from 1996 to 2011 as well as subsidence acceleration in GPS data. On the other hand, tidal records from 1970 to 1996 do not show significant accelerations. Consequently, the subsidence accelerations in GPS data are more likely to occur after the late 1990s.

キーワード：2011年東北地方太平洋沖地震、地殻上下変動、加速的地殻変動

Keywords: the 2011 Tohoku-oki earthquake, vertical crustal movement, accelerated deformation

## 2003年十勝沖地震の余効変動の特徴と粘弾性構造の推定

Characteristics on Postseismic Deformation following the 2003 Tokachi-oki Earthquake and Estimation of the Viscoelastic Structure in Hokkaido, Northern Japan

\*伊東 優治<sup>1</sup>、西村 卓也<sup>2</sup>

\*Yuji ITOH<sup>1</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>2</sup>

1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所

1.Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

## 1. はじめに

2003年十勝沖地震 ( $M_w 8.0$ ) は千島海溝で発生し、余効変動を伴っていることが報告されてきた。余効変動の原因は主に余効すべりと粘弾性緩和とされているが、十勝沖地震の余効変動を扱った先行研究はいずれも1年以内の変動を粘弾性緩和の影響は考慮せず余効すべりのみで推定しており、また、この地域の粘弾性構造もこれまで推定されていない。余効すべりの時空間発展を調べることは固着の回復過程を調べる手掛かりとなるが、その際粘弾性緩和の影響を適切に評価しなければ、推定された余効すべりが系統誤差を含むことになる。そこで本研究では、本震発生後2~7年目の余効変動に含まれる余効すべりと粘弾性緩和の両方の影響を同時に評価し、粘弾性構造の推定を行った。

## 2. データ解析

道内にある81点のGEONET観測点でのデータを使用した。北海道南西部の観測点は1993年北海道南西沖地震と有珠山の火山活動の影響を受けていたため使用しない。最初に、本震前の1999年3月1日~2003年9月1日のデータの線形トレンドを推定し地震後へ外挿して除去した。その後、周辺域で発生した地震時の変動をオフセット補正した。2004年釧路沖地震 ( $M_w 7.0$ ,  $M_w 6.7$ ) と2006年千島列島沖地震 ( $M_w 7.8$ ) の変動量はそれぞれ、Takahashi and Kasahara [2007], Nishimura [2009]のモデル計算値を使用し、2007, 8, 9年十勝沖地震 ( $M_w 6.0$ ,  $M_w 6.8$ ,  $M_w 6.4$ ) は、地震前後の座標値の変化を変動量とした。最後に2003年十勝沖地震発生後2~7年目のデータを、水平は1年毎、上下は2年毎に年周・半年周変動を考慮して折れ線近似して速度を得た。

## 3. モデリング

余効すべりと粘弾性緩和によって余効変動をモデル化した。観測点  $x$  の時刻  $t$  での余効すべりによる変位  $U(x, t)$  は、次の式(1)でモデル化した。

$$U(x, t) = Axu(x) \times \ln(1+t/B) \quad (1)$$

ここで、 $u(x)$  は本震直後4ヶ月間の余効すべり分布による計算値で、Nishimura [2009]の方法で推定を行った。式(1)によるモデリングは、本震直後4ヶ月間の余効すべりの空間分布が変化せず、すべり量が対数関数で時間発展をすると仮定している。さらに、4ヶ月間の余効すべり分布と調和的なモデルを得るため、

$$Ax \ln(1+1/3B) = 1 \quad (2)$$

で  $A$  と  $B$  を拘束し、時定数  $B$  のみを推定した。

粘弾性緩和は、2003年十勝沖地震と2004年釧路沖地震のものを考慮し、震源断層はそれぞれ国土地理院 [2003] と Nishimura [2009] のものを使用した。厚さ  $H$  の弾性層と粘性率  $\eta$  の半無限粘弾性層からなる成層構造を仮定し、計算コード PSGRN/PSCMP (Wang et al., 2006) でこれらの地震による粘弾性緩和を計算した。

以上による観測値と計算値を用いて grid search を行い、 $B$ ,  $H$ ,  $\eta$  と各期間、全観測点共通の並進成分を推定した。

## 4. 結果と考察

$B=0.115$ 年、 $H=50$ km、 $\eta=2.0 \times 10^{19}$ Pa·s が推定された。推定された粘弾性構造は先行研究による東北地方の前弧側の粘弾性構造 (例えば、Diao et al. 2014) と調和的だった。

水平成分は全期間で本モデルにより大局的に説明されたが、一方で系統的な残差がみられた。これらの残差は局所的に分布しており、2004年釧路沖地震や2008, 9年の十勝沖地震の余効すべりの影響によるものと考えられる。また、上下成分は、太平洋岸の隆起が定性的には説明されたが、十勝平野を中心とした広域に系統的な残差 (隆起) が分布した。これらの系統誤差は余効すべり域が4ヶ月後から変化していることを示唆しており、本

震発生後2~7年目では、本震のすべり域のdown-dip側の余効すべり速度が(1)式の対数関数モデルから計算されるすべり速度よりも大きかったことが考えられる。

2年目では余効すべりの影響がほぼ全域で卓越しており、7年目でも震源域周辺では余効すべりの影響が継続して卓越していたことがわかった。一方で北海道中央部から北部にかけては、7年目では余効すべりと粘弾性緩和の影響が同程度であった。また、2004年釧路沖地震の粘弾性緩和は、十勝沖地震の余効変動と比べて非常に小さかった。

謝辞：本研究では国土地理院による「日々の座標値（F3解）」を利用しました。

キーワード：2003年十勝沖地震、粘弾性緩和、余効すべり、余効変動、GNSS

Keywords: The 2003 Tokachi-oki earthquake, Viscoelastic relaxation, Afterslip, Postseismic deformation, GNSS

## 沈み込み帯熱対流モデルを用いた2011年東北沖地震の2次元余効変動解析

Two-dimensional analysis of post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake by subduction zone thermal-flow model

\*武藤 潤<sup>1</sup>、堀内 俊介<sup>2</sup>、岩森 光<sup>2</sup>、飯沼 卓史<sup>2</sup>、芝崎 文一郎<sup>3</sup>

\*Jun Muto<sup>1</sup>, Shun-suke Horiuchi<sup>2</sup>, Hikaru Iwamori<sup>2</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Bunichiro Shibazaki<sup>3</sup>

1.東北大学大学院理学研究科地学専攻、2.海洋研究開発機構、3.建築研究所国際地震工学センター

1.Department of Earth Science, Tohoku University, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute

Post-seismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake observed in the world densest geodetic network may provide a robust constraint to the rheological properties over the NE Japan island arc-trench system. Various geophysical observations and petrological models also have given strong constraints for the thermal-flow structure of the NE Japan. Horiuchi and Iwamori (2016) have recently created a numerical model on thermal-flow structure of a subduction zone with plate coupling and chemical reaction. The consistent model takes account of the fluid distribution incorporating slab-dehydration, mantle hydration (such as serpentinization) and melting reactions in the mantle wedge. Using this model with a range in viscosity of serpentinites, the model successfully reproduces the various observations; surface heat flow distribution, alignment of Quaternary volcanoes, and seismic velocity structures of the NE Japan arc. The viscosity distribution calculated in the model includes the temperature- and water content-dependent law for olivine, and can be incorporated into FEM to test various parameters and assumptions of the model with respect to the post-seismic deformation. We used a two-dimensional FEM model incorporating the geometry of subducting slab and viscosity distribution estimated by the thermal-flow model (Horiuchi and Iwamori, 2016). Viscosity structure in the thermal-flow model is mapped to a two-dimensional FEM model as a steady-state value to calculate viscoelastic relaxation. The coseismic slip distribution was calculated according to Iinuma et al. (2012). Preliminary results show that the observed post-seismic vertical deformation of inland area can be reproduced by the thermal-flow model with a certain parameter range. In the presentation, we will show numerical results with various parameter spaces (such as viscosities of serpentinites, water contents and so on) and compare them with those based on our previous rheological model.

キーワード：余効変動、東北沖地震、レオロジー、沈み込み帯、粘弾性緩和

Keywords: post-seismic deformation, Tohoku-oki earthquake, rheology, subduction zone, viscoelastic relaxation

重力異常解析から推定した西南日本下の地下密度構造とマントルウェッジの蛇紋岩化率  
Subsurface density structure and serpentinized rate of the mantle wedge beneath southwest Japan estimated from gravity anomaly

岩城 祐次<sup>1</sup>、澤田 明宏<sup>1</sup>、\*平松 良浩<sup>1</sup>、水上 知行<sup>1</sup>

Yuji Iwaki<sup>1</sup>, Akihiro Sawada<sup>1</sup>, \*Yoshihiro Hiramatsu<sup>1</sup>, Tomoyuki Mizukami<sup>1</sup>

1. 金沢大学

1. Kanazawa Univ.

四国地方では南海トラフの海溝軸に平行な方向に変成帯が発達し、また四国下に沈み込むフィリピン海 (PHS) プレートの遷移領域では深部低周波微動やスロースリップが発生する。微動や短期的SSEは高Vp/Vs領域に分布しており、蛇紋岩化したマントルウェッジとPHSスラブの境界部で発生していると考えられている (e.g. Matsubara et al., 2008)。本研究では重力異常データに基づき西南日本下の地下密度構造を推定し、マントルウェッジの蛇紋岩化率について議論する。

本研究で使用した重力データは、2015年までに金沢大学が測定した既存重力異常に加え、産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004)、国土地理院 (2006)、Yamamoto et al. (2011)、西南日本重力研究グループ (2001)、澤田ほか (2009) による測定または公表されたデータを引用した。仮定密度は $2670\text{kg/m}^3$ とし、澤田ほか (2015) の地形補正処理を行った。

密度構造解析を行う際の初期モデルとして、基盤深度 (防災科学技術研究所 J-SHIS)、コンラッド面・大陸モホ面 (Katsumata, 2010)、PHSスラブの海洋モホ面 (Shiomi et al. 2008) の形状データを使用した。

上記のデータを用いて初期モデルを作成し、設定した測線において二次元タルワニ法による逐次的な密度構造解析を行うことで観測重力値と理論重力値が一致する地下密度構造を推定した。今回は四国から中国地方にかけての陸域部の測線を南北方向に7本、東西方向に5本設定した。密度構造解析の拘束条件として、Katsumata (2010) によるコンラッド面と大陸モホ面の推定誤差 ( $\pm 1\sigma$ ) の2倍の範囲を初期構造からの変化量とした。まず初めに蛇紋岩化領域が存在しない場合の密度構造の推定を行った。西南日本中央部以外の南北方向の測線では、表層やスラブの効果による不一致を除いて観測値と理論値を概ね一致させることができた。東西方向の測線では、四国東部で一致させることができなかった。この原因としては、四国東部ではPHSスラブの形状が複雑であり、二次元解析が適切ではなかった可能性が考えられる。

マントルウェッジの蛇紋岩化領域として、(i) スラブの表面上、(ii) 高Vp/Vs領域、(iii) (i) と (ii) の組み合わせの3パターンを考えた。タイプ (i) では、スラブ上面からの厚さ3kmまでは蛇紋岩化率100%まであり得る範囲と考えられる。タイプ (ii) では、四国東部のみ蛇紋岩化率20%が上限であり、その他では40%が上限であると考えられる。タイプ (iii) では四国東部では蛇紋岩化率20%、四国西部では40%が上限であり、タイプ (ii) と (iii) では東部で割合が小さくなっていた。

四国東部と西部における蛇紋岩化の程度の違いは、これらの地域下でのPHSスラブの沈み込み形状の違いとプレート年齢の不均質による温度構造の違いや、それに伴うスラブ脱水と蛇紋岩化反応速度の違いに起因することが考えられる。微動の発生数は蛇紋岩化度が低い東部で相対的に少ないことから、蛇紋岩化度とスラブ脱水による間隙流体圧が相関する傾向があると考えられる。

謝辞：本研究では、基盤の等深線データは防災科学技術研究所により、PHSプレートの海洋モホ面の等深線データは同研究所の汐見勝彦博士により、地震波トモグラフィのデータを同じく松原誠博士により公表・報告されたものを使用しました。大陸モホ面・コンラッド面の等深線データは気象庁の勝間田明男博士によるものを使用しました。産業技術総合研究所地質調査総合センター、国土地理院、西南日本重力研究グループ、中部大学の山本明彦教授による重力データを使用しました。なお、本研究はJSPS科研費 24340122の助成の一部を受けて行ったものです。ここに記して感謝します。

キーワード：蛇紋岩化、マントルウェッジ、重力異常

Keywords: Serpentinization, Mantle wedge, Gravity anomaly



太平洋スラブの下部マントルへの崩壊は開始されたか

Has the collapse of Pacific slab been started into Lower Mantle

\*新妻 信明<sup>1</sup>

\*Nobuaki Niitsuma<sup>1</sup>

1. 静岡大学理学部地球科学教室

1. Institute of Geosciences, Shizuoka University

気象庁が公開しているCMT発震機構解に基づき太平洋スラブが下部マントルに到達し、崩落を開始したかを検討したので報告する。

2015年5月30日M8.1の小笠原沖の地震では震度1以上で日本列島全域が揺れ、深度682kmの震源域が太平洋スラブに連続していることを示すとともに、太平洋スラブ先端が660km以深の下部マントルに到達したことを示した。この3日後の6月3日にも同域でM5.6深度695kmと更に深い地震が起こり、下部マントル突入を確実にした。これらの地震は同じ正断層型発震機構であった。震源域では2011年3月11日の東日本大震災後、日本海溝側への引張応力増大によって発震機構が変化し、2013年11月には西之島が噴火を開始した。また南方のマリアナ海溝域で2013年5月14日M7.3pr深度619kmが、マリアナスラブは海溝から同心円状屈曲したまま下部マントル上面に沈んでいることを示した。伊豆スラブは同心円状屈曲後平面化して南ほど急斜しており、幾何学的にマリアナスラブとの間に裂け目が存在しなければならない。この裂け目の北側に位置する伊豆スラブ南端で、2015年5月・6月の下部マントル地震は起こっている。

この下部マントル地震は現在の最深記録であるが、それまでの最深記録はウラジオストック域の2009年4月18日深度671kmM5.0+ntであった。この深度も660kmの下部マントル上面深度以深である。深度660kmの下部マントル上面の温度圧力条件下では、上部マントル主要構成鉱物のカンラン石は、高密度のペロブスカイトに相転移する。この相転移は低温ほど高圧を要するため、低温のスラブは下部マントル上面を通過できず停滞すると考えられる。スラブ先端も次第に暖められ、ペロブスカイトに相転移を開始すると、浮力を失って後続のスラブを下部マントルへ引き摺り込む。低温のスラブも引き摺り込まれると高圧になり相転移が連鎖的に進行する。連鎖的相転移はスラブを下部マントルに崩落させる。映画「日本沈没」（第2版）では、日本沈没を、停滞スラブの下部マントルへの崩落によって説明している。

2009年4月18日の地震も下部マントル地震であったのであろうか。2009年4月18日の発震機構は横ずれ断層+nt型であり、停滞スラブ内の逆断層型発震機構と異っており、660kmを境界に発震機構が変わっている。また、震源がスラブの下面に位置していることは、沈込前に海底で冷却されていないことを意味しており、スラブ中で相転移し易い条件を持っていることから、下部マントル地震であったと考えられる。ウラジオストック域で太平洋スラブが下部マントルに突入していたとすると、2011年3月11日の東日本大震災の原因となったであろう。同域では、2016年1月2日にも初動震源（破壊開始）深度681km M5.7が起こっている。しかし、そのCMT震源（主要破壊）深度は641kmであり、発震機構が圧縮過剰逆断層P型と停滞スラブと同じであることから、2009年4月に下部マントルに突入を開始していたスラブ下面に停滞スラブが引き込まれて起こったと考えられる。ちなみに、2009年4月の初動震源深度とCMT深度は共に671kmであり、小笠原の下部マントル地震は、682kmと688kmおよび共に695kmである。

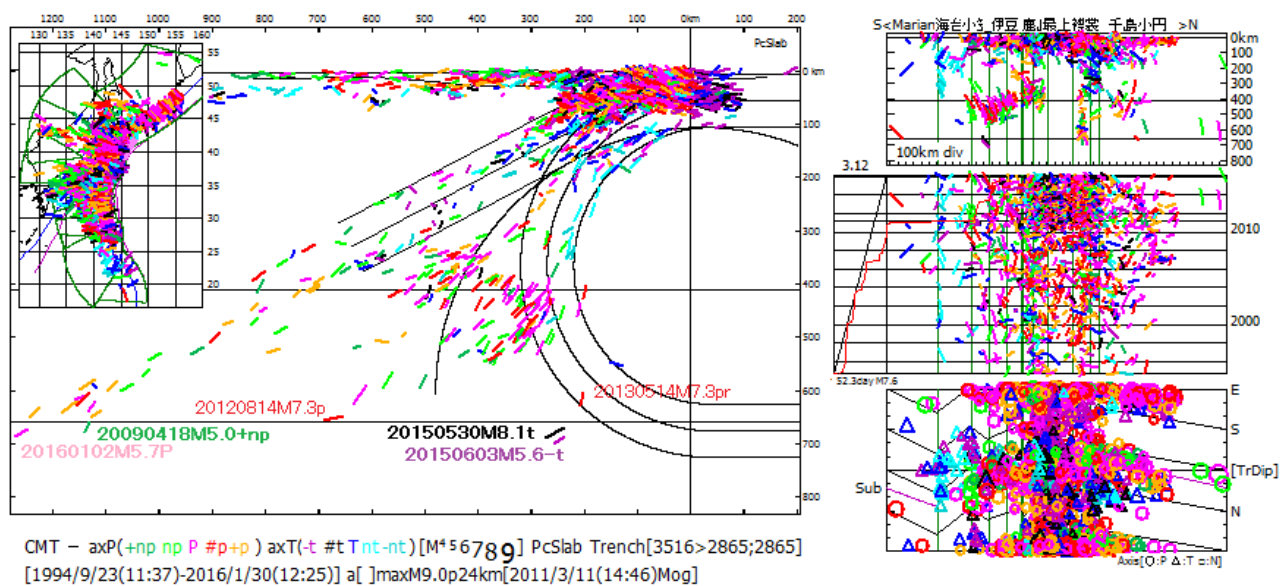
太平洋スラブは2009年4月18日に下部マントルへの崩落を開始し、2011年3月11日東日本大震災を起こし、2015年5月30日・6月3日に伊豆スラブ南端も下部マントルに崩落させ、2016年1月2日にウラジオストック域で停滞していたスラブも下部マントルに引摺り込んだ。千島海溝でも2012年8月14日深度654kmM7.3prが起こっており、660km以深の地震が起これば、太平洋スラブ全体は下部マントルへの崩落を開始する。

日本列島は、日本海拡大後の1千万年前に脊梁域まで海面下に没している。この地質記録を生かし、既に開始した日本沈没に対処しなければならない。

キーワード：太平洋スラブ、停滞スラブ、下部マントル、相転移、発震機構、日本沈没

Keywords: Pacific slab, stagnant, , , stagnant slab, lower mantle, phase transition, focal mechanism, sinking Japan





## 2000年鳥取県西部地震余震域内に露出する破碎帯露頭

## Fracture zone outcrop exposed in the 2000 Western Tottori Earthquake aftershock region

\*鈴木 俊<sup>1</sup>、小林 健太<sup>2</sup>、香取 拓馬<sup>2</sup>、高橋 啓太<sup>1</sup>、星加 夢輝<sup>1</sup>、大橋 健治<sup>1</sup>、内藤 翔平<sup>1</sup>、藤浪 知世<sup>1</sup>、菅野 萌子<sup>1</sup>、皆美 まどか<sup>1</sup>、金子 真弥<sup>1</sup>、井村 朱里<sup>1</sup>、向吉 秀樹<sup>3</sup>、内田 嗣人<sup>3</sup>

\*Shun Suzuki<sup>1</sup>, Kenta Kobayashi<sup>2</sup>, Takuma Katori<sup>2</sup>, Keita Takahashi<sup>1</sup>, Yumeki Hoshika<sup>1</sup>, Kenji Ohashi<sup>1</sup>, Shohei Naito<sup>1</sup>, Tomoyo Huzinami<sup>1</sup>, Moeko Kanno<sup>1</sup>, Madoka Minami<sup>1</sup>, Maya Kaneko<sup>1</sup>, Akari Imura<sup>1</sup>, Hideki Mukoyoshi<sup>3</sup>, Hideto Uchida<sup>3</sup>

1.新潟大学理学部地質科学科、2.新潟大学大学院自然科学研究科、3.島根大学大学院総合理工学研究科

1.Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University, 2.Graduate School of Science & Technology, Niigata University, 3.Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

2000年に発生した鳥取県西部地震(Mw6.6)は、活断層が認識されていなかった地域で発生した。断層の活動による地形的な特徴が不明瞭である場合、空中写真を用いたリアメント判読のみでは、“未成熟な活断層”の検出材料としては不十分である可能性がある。よって、よりミクロな視点(露頭スケール)で構造地質学的解析を行うことは、地形的な特徴を示していない“未成熟な活断層”の活動史や形態を捉える上で非常に重要であると考えられる。一方、本地域では新学術「地殻ダイナミクス」プロジェクトの一部として、余震の超高密度観測が計測されている。そこで本研究では、震源断層のマクロスケールでの発達過程解明の一助とすることを目的とし、以下の3つに焦点を絞って断層帯のメソスケールでの形態と発達過程を明らかにすることを目的とした。

## (I) 大規模破碎帯露頭の構造解析および化学分析

西伯郡南部町の緑水湖西側において露頭クリーニングを行い、長さ約15m・幅約2mの大規模破碎帯を新たに露出させた。本露頭では根雨花崗岩類(白亜紀)と流紋岩質貫入岩(新第三紀中新統)が接していて、境界部では破碎帯が観察される。また、周辺には玄武岩質の岩脈群が多数貫入する。断層面の一般走向はN65W70NEである。破碎帯内部では花崗岩及び貫入岩類を原岩とした断層ガウジ、カタクレサイト(暗灰色、暗緑色、褐色を呈する)が形成されている。本露頭において、露頭全体で詳細なスケッチと構造要素の記載を行うと共に、特にガウジ帯が発達する地点で断層岩の定方位試料の採取およびXRD分析用の試料採取を行った。断層岩試料は、研磨片および薄片を作成し、微小構造の観察を行った。帯状構造を呈する断層岩については各帯ごとに試料を抽出し、全岩および水ひによる粘土定方位分析を行った。

以上のような解析・分析の結果、破碎帯を通じて発達するY-P-R1ファブリックは左横ずれのセンスを示す。カタクレサイト及び断層ガウジ中には方解石が脈および破碎岩片としてしばしば観察される。また、カオリナイト、バーミキュライト、緑泥石を全体的に多く含み、イライトには乏しい。ガウジ帯ではバーミキュライトに乏しくなり、スメクタイトが増加する傾向がある。

## (II) 緑水湖付近の貫入岩体の産状

破碎帯の北縁に接している流紋岩岩脈について、その分布、変形構造、破碎帯との関係を把握した。

流紋岩は淡緑色を示し、流理構造が発達する。流理構造中には貫入時に形成されたと思われる非対称構造がみられ、おおそ東方向から西方向へ貫入したと考えられる。断層活動による破壊は破碎帯縁辺部にみられる微細な雁行裂かと方解石脈のみである。また、流紋岩の北縁でこれと接する玄武岩岩脈を新たに見出した。この岩脈は脆性破碎を受けており、方解石脈が発達している。鏡下観察では、断層岩中に含まれる玄武岩片と組織が酷似している。さらに、破碎帯露頭西方の沢と斜面において、同一の流紋岩岩脈と破碎帯の分布を確認した。このことから岩脈を伴う破碎帯は、さらに西方へ10m以上連続することになる。

## (III) 要害山周辺の火山砕屑岩類

鳥取県西部地震余震域の北東部に位置する要害山(標高331m)周辺には、中新統法勝寺層(太田, 1962)が分布する。本層は小断層が発達する石英安山岩質火山砕屑岩からなり、火成岩類・堆積岩類の礫を多く含有する。要害山周辺の地表踏査は、(I)と法勝寺層に発達する小断層の関係、(II)の貫入岩体の貫入時期の検討を目的として行った。

本層の岩相は、基質に泥を多く含み、著しく風化した弱い火山礫凝灰岩相と、石英安山岩質火山礫を含む固結

のよい溶結凝灰岩相に大分される。塊状無層理のため層厚・分布の詳細は不明である。また、要害山北西部の小規模露頭からは(Ⅱ)の貫入岩とよく似た組織を持つ細粒玄武岩礫が観察された。火山礫凝灰岩相は隔離量が数mm～数cmの小断層が一様に発達する。

断層岩の原岩種と貫入岩類の組織・配列を考慮すると、本露頭周辺においては玄武岩岩脈貫入後に、流紋岩岩脈が貫入したことが考えられる。花崗岩と岩脈(玄武岩・流紋岩)の貫入面に沿って破碎帯が発達することは、既に多くの地点で示されていたが(相沢ほか, 2000; 間中ほか, 2012), 今回そのことが破碎帯露頭(Ⅰ)および西方の沢(Ⅱ)においても追認された。本露頭は2000年の余震域に含まれ、相沢ほか(2000)の記載と合わせると出現した地表地震断層延長の約10m北側に位置すると推測される。生じた剪断センスは共に左横ずれであることから、震源断層の幾何学と何らかの共通性を持つ可能性がある。破碎帯の活動中には、粘土鉱物や方解石脈の生成に関与した流体の移動があった。またその時期は玄武岩の貫入、流紋岩の貫入や中新統火砕岩類の堆積よりも後であり、現在まで継続する活動であると結論される。

キーワード：鳥取県西部地震、未成熟な活断層、断層岩、破碎帯、粘土鉱物、貫入岩

Keywords: Western Tottori Earthquake, immature active fault, fault rock, fracture zone, clay mineral, intrusive rock