

高温高压下における弾性波速度測定と地殻構成岩石推定

Measurements of the elastic wave velocities under the high P-T conditions and estimation of the crustal composition

*山内 紘一¹、石川 正弘²、佐藤 比呂志¹、岩崎 貴哉¹、豊島 剛志³

*Koichi Yamauchi¹, Masahiro Ishikawa², Hiroshi Sato¹, Takaya Iwasaki¹, Tsuyoshi Toyoshima³

1.東京大学地震研究所、2.横浜国立大学、3.新潟大学

1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2.Yokohama National University, 3.Niigata University

リソスフェアのダイナミクスを理解する上で、構成岩石の推定は重要な問題である。地殻構成岩石の推定には、実際の地殻深部の条件下で、弾性波速度測定による岩石物性値と制御震源や自然地震による弾性波速度構造を比較する方法が有効である。これまで、地殻を構成する岩石についてはChristensen and Mooney (1995)などでまとめられてきた。しかしながら、地殻中・下部を構成する岩石についての、高温・高压下での弾性波速度測定については、未だ実測値が不足しており、今後も実験を重ねていく必要がある。

そこで、中部地殻が露出する北海道・日高地方において岩石を採取し、横浜国立大学のピストンシリンダー型高温高压発生装置を用いてP波速度 (V_p) 及びS波速度 (V_s) の同時測定を進めており、主要とされる構成岩石を対象に弾性波速度を測定した。

弾性波速度と密度より算出した音響インピーダンスにおいて、トーナル岩と角閃岩の境界は中部地殻で明瞭な反射面となる結果が得られ、深部反射法地震探査データ (Iwasaki et al., 2014) と調和する。さらに、高温条件下の実験結果と合わせて、日高変成帯におけるP波速度構造モデル (Iwasaki et al., 2004) との速度比較を行うと、中部地殻・下部地殻に対してそれぞれ、トーナル岩、角閃岩が調和的であった。また、実験より算出した岩石の V_p/V_s 比と V_p/V_s 比構造 (Matsubara and Obara, 2011) との比較により同様の傾向が得られた。

キーワード：弾性波速度、P波速度、S波速度、高温高压条件、日高変成帯

Keywords: Elastic wave velocity, P wave velocity, S wave velocity, High P-T condition, Hidaka Metamorphic Belt

3D Electromagnetic imaging of the deep structures and North Anatolian Fault in the Marmara Sea

*Tulay Kaya¹, Yasuo Ogawa¹, Takafumi Kasaya², Mustafa Kemal Tuncer³, Yoshimori Honkura¹, Naoto Oshiman⁴, Masaki Matsushima¹, Weerachai Siripunvaraporn⁵

1.Tokyo Institute of Technology, 2.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Istanbul University, 4.Kyoto University, 5.Mahidol University

In this study, we perform 3D modeling of the electromagnetic data to investigate major tectonic structures beneath the Marmara Sea. The Marmara Sea and surrounding region located in northwestern Turkey were formed as a result of closure of the Tethys Ocean and following extension and strike-slip regimes. This region accommodates the northwestern branch of 1600 km long North Anatolian Fault (NAF) that represents the main transform boundary in Turkey. NAF runs parallel to the northern coast of Turkey and reaches to the Marmara Region as three branches. Historical seismicity catalogues suggest a westward migrating pattern of destructive earthquakes along the NAF as well as a seismic gap within the Marmara Sea. Following the last two devastating earthquakes (1999 Izmit and Duzce earthquakes) that occurred at the eastern edge of the Marmara Sea, an increase in seismic energy on the Marmara Sea branches of the NAF have been monitored. Although the NAF and its branches on land are well investigated, their lateral and vertical extension within the Marmara Sea still remains elusive. Our knowledge of the continuation of tectonic structures in the Marmara Sea has a crucial role on understanding stress accumulation and geodynamic evolution after closure of the Tethys Ocean that has not been well uncovered yet. Earlier on- and off-shore magnetotelluric (MT) studies showed that MT method could be very efficient tool for the investigation of electrical resistivity variation that is now considered to be an important parameter to reveal tectonic structure of the Marmara Sea. Thus, we performed the MT method using ocean bottom electromagnetic (OBEM), wide-band and long period MT data set collected within and around the Marmara Sea. Totally at 27 sites continuous electric and magnetic fields were recorded. Phase tensor analysis and induction arrows show complexity of the structure especially at shallow depths and indicate that a 3D analysis of the data is required. They also represent existence of conductive anomalies beneath the Marmara Sea. 3D modeling results indicate high conductive anomalies, which are separated by resistive zones laterally, at crustal and upper mantle depths. Locations of these resistive-conductive boundaries clearly imply the trace of the NAF on land. Conductive and resistive zones can mark the regions with fluid rich and fluid free zones, respectively, and those regions are considered either to trigger easily a large earthquake or accumulate stress in the brittle zone of the crust. Resistivity variations resolved in this 3-D MT modelling study imply a continuation of the tectonic zones underneath the Marmara Sea in a similar fashion as observed from earlier 2-D modelling of land stations in the east.

Keywords: Magnetotelluric, Marmara Sea, North Anatolian Fault, Resistivity, Crust/upper mantle, Tectonic

岩石の空隙構造から考える上部・中部地殻の地震波速度と電気伝導度

Seismic velocities and electrical conductivity at upper- and mid-crustal depths - an inference from pore structures

*渡辺 了¹

*Tohru Watanabe¹

1. 富山大学大学院理工学研究部

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

Geophysical observations have been conducted to study the composition, structure and dynamics in the island-arc continental crust. Detailed profiles of seismic velocity and electrical conductivity have suggested that fluids (mostly aqueous fluids) exist pervasively within the crust. Spatial variations in velocity and conductivity are primarily attributed to a spatial variation in the fluid volume fraction. Cracks must be a key component of pores to govern velocity and conductivity at upper- and mid-crustal depths. Based on laboratory experiments, most of cracks have aspect ratios of less than 10^{-3} . The variation in velocity must be caused by that in fluid volume fraction of 0.1%. The spatial variation in conductivity is often up to 4 orders of magnitude. This large conductivity change must occur within a narrow range of the fluid volume fraction. If the connectivity of fluid is identical, the conductivity is proportional to the fluid volume fraction. A small change in the fluid volume fraction cannot make a change of orders of magnitude. The large change in conductivity requires the increase in connectivity of cracks with increasing fluid volume fraction. I will discuss about the connectivity of grain boundary cracks and its implications for seismic velocity and electrical conductivity.

キーワード：地震波速度、電気伝導度、空隙構造

Keywords: seismic velocity, electrical conductivity, pore structure

弾性波と電磁波のアクロスによる地殻構造のカラーホログラフィ：展望

High resolution color holography of the crustal structures by means of elastic and electromagnetic ACROSS: A perspective view

*熊澤 峰夫¹

*Mineo Kumazawa¹

1.東京工業大学地球生命研究所

1.ELSI, Tokyo Institute of Technology

ACROSS is an acronym of 'accurately controlled, routinely operated signal system', which is being used to detect the subtle temporal variation of the underground structures by elastic wave signal. Whereas seismic ACROSS has been deployed at several sites, complementary electromagnetic ACROSS has not been paid attention to be implemented. Furthermore, currently operating seismic ACROSS does not appear to exert its high potentiality expected theoretically. Recognizing the substantial potentiality of the simultaneous implementation of both seismic and electromagnetic ACROSS, the present author has kept working with several coworkers towards the better implementation strategy of ACROSS technology.

Recently (2014) we convinced to have found a reasonable way to utilize the potentiality of ACROSS, and started to work with ERI and ELSI (TITECH) to design the detailed tactics and strategy. We have a set of two important factors: (1) designing of implementation technology of ACROSS and (2) development of an 'operational digital wave theory' expected to enable us to invert the big data acquired by ACROSS to 'color holography movie of anisotropy'.

The current state of technology and its prospect are reported in this presentation.

(1) A dense array of both seismic and magnetic sensors combined with a sparse transmitter array of seismic and electromagnetic waves would provide us with such observation data on anisotropy and color (frequency dependence) holography of the crustal structures. As a matter of course, spatial resolution of color and anisotropy depends on the designing of the observation system, frequency range of operation, and also on the time period of data acquisition.

(2) An operational digital wave (ODW) theory developed in this work is quite different from the routine method commonly used on the basis of finite difference approach on wave equation with a weak form. By introducing a hyper-function calculus, differential equations of both elastic and electromagnetic waves are converted to the algebraic equation in wavenumber space in ODW theory. By introducing a sequence of finite discrete coordinates, an efficient iterative innovation strategy is realized for both forwards and inverse computations.

A set of ACROSS technology and ODW theory would promote the transition of the current 'phenomenological dynamics' to the qualified dynamics based on the physical properties of material under tectonic stress with sound physics and observation background. A good test field may be the source area of the 2000 Western Tottori Earthquake, where fluid migration dynamics along the subsurface fault zone may be traced through the observation of temporal variation in the anisotropy of conductivity and polarized shear wave velocities. Note that the high quality observation is essential for the modern tectonics studies.

キーワード：アクロス

Keywords: ACROSS

吸水反応における多結晶体の力学的応答-CaSO₄-H₂O系における反応誘起応力・歪の実験的研究-
Mechanical response of polycrystalline rock during hydration reactions -Experimental
investigation of reaction-induced stress and strain in CaSO₄-H₂O system-

*宇野 正起¹、増田 俊太郎¹、平野 伸夫¹、岡本 敦¹、土屋 範芳¹

*Masaaki Uno¹, Syuntaro Masuda¹, Nobuo Hirano¹, Atsushi Okamoto¹, Noriyoshi Tsuchiya¹

1.東北大学大学院環境科学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

沈み込み帯の水循環は脱水・吸水反応によりコントロールされ、そこから放出・吸収される水は沈み込み帯のダイナミクスに大きな影響を与える。特に吸水反応は固相の大きな体積変化を伴うため、反応のギブス自由エネルギー変化に伴い大きな応力を発生しうる。その圧力変化は熱力学的に見積もることができ、例えば蛇紋岩化反応では最大~1 GPaにもなる。このように反応誘起応力は岩石の破壊強度を超えうるため、その挙動は反応に伴う流体流路形成や、反応の空間的広がり、変形の理解に重要である。しかしながら、吸水反応による体積増加が破壊を引き起こして流体流れを増加させ、さらなる吸水反応を促進するのか、あるいは、空隙を埋めて流体流れを減少させ、吸水反応を抑制するのか、実際の岩石の力学的応答は制約されていない。本研究では、反応による体積に変化に対する多結晶体の力学的応答様式を明らかにするために、蛇紋岩化反応と同じく水との反応で大きな体積変化(~+24%)のあるCaSO₄-H₂O系で、吸水反応による反応誘起応力・反応誘起歪を測定した。

定荷重試験では、空隙率が27%と大きいにもかかわらず、0.01-10 MPaのすべての条件で反応によるバルク歪生じた。荷重の増加とともに圧力溶解沈殿クレープなどの変形メカニズムが活性化するため、バルク歪の量は減少する。一方、定体積実験では、反応誘起応力は反応速度に線形に比例することが明らかになった。以上の結果から、吸水反応による岩石の力学挙動は、反応速度と変形速度の競合によって決定されることが示唆される。

キーワード：反応誘起応力、吸水反応、力学挙動

Keywords: Reaction induced stress, Hydration reaction, Mechanical behavior

下部地殻における流体の通路

Fluid path in the lower crust

*飯尾 能久¹、青木 将¹、片尾 浩¹、米田 格¹、澤田 麻沙代¹、三浦 勉¹

*Yoshihisa Iio¹, Sho Aoki¹, Hiroshi Katao¹, Itaru Yoneda¹, Masayo Sawada¹, Tsutomu Miura¹

1.京都大学防災研究所

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

近畿地方中北部では、いわゆる「満点地震計」による稠密地震観測が行われている。2008年11月に「ひずみ集中帯」プロジェクトにより45点が設置され、2009年からは「地震・火山噴火予知のための観測研究計画」により順次増強され、現在88点が稼働している。本研究では、「満点地震計」および定常観測点、合計128点で得られた波形を用いて、S波の反射法解析を行い、下部地殻における流体の通路を推定した。片尾(1983)により有馬高槻断層帯の北側に、北落ちの反射面が推定されていたが、反射波の振幅をスタッキングすることにより、客観的に反射面の3次元的な分布を得ることが出来た。推定された反射面は、低周波地震の震源域から南上さらに、有馬高槻断層帯の直下まで続いている。これは、マントルから上がってきた流体が、低周波地震の震源域から地殻内に侵入し、活断層の深部へ到達していることを示唆している。

さらに、上記の反射面以外に、花折断層付近の深さ30km付近に反射強度の大きな領域が見出され、その近傍に低周波地震の震源が決まっている。Nakajima and Hasegawa(2007)によると、低周波地震の震源域の付近にある反射強度の大きな領域の上には、S波速度が小さな領域がある。さらに、その直上において、地震分布の下限が20km程度と非常に深くなっていることがわかる。この下限の水平変化は温度構造の不均質によると考えられていたが(例えば、Ito, 1990)、20kmという深部で局所的に温度を下げることは難しいことから、温度が原因ではなく、高間隙水圧により、断層の摩擦強度が局所的に下がったためである可能性が考えられる。

このように稠密観測網のデータを用いたS波の反射法解析により、地殻下部における1.5kmメッシュという高分解能の相対的な反射強度分布を推定することができた。得られた結果は、マントルから上がってきた流体が、低周波地震の震源域付近から地殻内に侵入し、活断層の下部延長付近に達していることを示唆している。また、トモグラフィーにより得られている速度不均質構造は、流体の分布を空間的になめらかにしたのを見ていると解釈できる。

キーワード：流体、下部地殻、低周波地震、断層、反射面

Keywords: fluid, lower crust, low frequency earthquake, fault, reflector

有馬型温泉水を含めた温泉水の起源と地殻内上昇過程の制約

Compositional variations of the Arima-type and associated spring waters in the Kinki district, southwest Japan: Implications for origin and upwelling process of deep brine

*中村 仁美^{1,2}、千葉 紀奈¹、常 青¹、森川 徳敏³、風早 康平³、岩森 光^{1,2}

*Hitomi Nakamura^{1,2}, Kotona Chiba¹, Qing CHANG¹, Noritoshi Morikawa³, Kohei Kazahaya³, Hikaru Iwamori^{1,2}

1.海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野、2.東京工業大学・地球惑星科学専攻、3.産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門

1.DSEG, JAMSTEC, 2.EPS, Titech, 3.GSJ, AIST

Rare earth elements (REEs) of the spring waters upwelling in the non-volcanic fore-arc region of the Kinki district in southwest Japan have been investigated to assess their upwelling processes and deep-seated origins [Nakamura et al., 2014; 2015]. In this study, a principal component analysis of the REE data has identified three principal components (PCs) that cover 89% of the entire sample variance: (1) PC-01, which corresponds to a dilution process by which fluids are introduced at low concentrations, previously represented by major solute binary trends, including $\delta^{18}\text{O}$ - δD systematics; (2) PC-02, which is a precipitation process of REEs from the brine; and (3) PC-03, which is an incorporation of REEs from country rock by carbonic acidity, although the types of country rocks may also have a significant impact on the spring water compositions. Based on these three PCs, together with the major solute concentrations and hydrogen, oxygen, and helium isotopic compositions determined in previous studies, five distinct types of spring waters in the Arima and Kii areas have been identified: (i) "Tansansen", (ii) "Kinsen", (iii) "Ordinary Arima", (iv) "Ginsen", and (v) "Eastern Kii". These five types probably represent (ii) a deep brine, (iii) an evolved deep brine that precipitated REE-bearing minerals, (iv) a mixture of (iii) and meteoric water, (v) a meteoric water carbonated by deep gas derived from (ii), and (i) a spring water similar to (v) with a more significant influence of the country rock constituting the aquifer. A comparison of the spring waters in the Arima and Kii areas revealed a systematic geographic distribution. The "Ordinary Arima"-type occurs along the Median Tectonic Line, and the "Eastern Kii"-type occurs in the eastern part of the Kii area. The latter seems to upwell in the restricted region where deep low-frequency tremors are observed. We suggest that the geographical distributions are linked to the tectonic setting and/or temporal evolution of fluid upwelling.

キーワード：有馬型、温泉水、スラブ、構造線、地殻流体

Keywords: Arima-type, spring water, slab, tectonic line, geofluid

チリ北部Atacama断層系Bolfin断層南端の流体移動

Fluid flow in the southern termination of the Bolfin fault of the Atacama Fault System, northern Chile

岡本 汐理¹、Gomila Rodrigo^{2,3}、*星野 健一¹

Shiori Okamoto¹, Rodrigo Gomila^{2,3}, *Kenichi Hoshino¹

1.広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻、2.Department of Structural and Geotechnical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile、3.Andean Geothermal Centre of Excellence (CEGA, FONDAP-CONICYT), Santiago, Chile

1.Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, 2.Department of Structural and Geotechnical Engineering, Pontificia Universidad Católica de Chile, 3.Andean Geothermal Centre of Excellence (CEGA, FONDAP-CONICYT), Santiago, Chile

Atacama断層系 (AFS) は、チリ北部の沿岸に沿って1000 km以上にわたって分布する海溝に平行で長大な断層系であり (Cenbrano et al., 2005), Bolfin断層はその北部の一部をなすNNW系でほぼ垂直な断層である。AFSの明瞭な左横ずれは、190 - 110 MaにかけてのAluk (Phoenix) プレーートの南東方向の沈み込みに因るものと考えられている (例えば, Schuber and González, 1999)。

本研究の調査地域は、Bolfin断層の南端に位置し、変位が小さいstrike-slipの小断層 (裂か) の集合からなるhorsetail型構造を示す (Faulkner et al. 2011)。本調査地域においても、粗粒変閃緑岩中に幅1 - 20 mmのNNW系でほぼ垂直な裂かが発達する。裂かは方解石と石英で充填され、またそれらに沿って母岩の変閃緑岩に緑泥石 (プロピライト) 化の熱水変質を与えている。当地域ではまた、幅10 cm程度のNW系でほぼ垂直な優白質岩脈が露出する。裂かのいくつかは、20 - 35 mm程度の左横ずれを伴って岩脈を切るが、多くの裂かは岩脈の南西側接触部で消滅している。この岩脈に垂直な1.8 mの範囲内に分布する幅3 mm以上の裂かの本数は、岩脈の南西側で11本であるのに対し、北東側ではわずかに4本である。以上から、これらの裂かは北北西に向けて進展したと推測される。Faulkner et al. (2011) もまた、本地域南方の露頭における裂か周辺のダメージ (変質) 帯の幅の非対称性から、プロセスゾーンモデルに基づけば、裂か先端は北西に向けて進展したと推定している。一方で、岩脈の南西側境界の変閃緑岩は著しく熱水変質を受けているが、北東側では変質がほとんど見られない。このことは、流体が裂かを浸透した際に、岩脈が流体のバリアーとなっていたことを示唆している。従って、裂かの進展と同様に、流体の移動方向の側方成分も北北西であった、即ちBolfin断層中軸部に向けて浸透したと考えられる。

裂かの母岩である変閃緑岩は、風化が著しく一部が熱水変質を受けているが、主に斜長石と角閃石から成っていたと思われる。一方で、裂かに流入した熱水による変質帯は、主に方解石、石英、緑簾石および緑泥石から成る。XRF分析と密度分析の結果、この変質により、CaOとSiO₂がそれぞれ2.77と4.21 mol/L添加され、Na₂O、K₂O、Mg₂OおよびAl₂O₃は一部除去されたことが示された。EPMA分析値に基づく緑泥石-石英温度計は、この変質の温度が330°C程度であったことを示している。一方で、裂かを充填する方解石中の流体包有物の均質化温度は280°C程度であり、CaCl₂ 相当塩濃度は11.3 wt. %である。従って、塩水の等容曲線から、流体の圧は69 MPa程度であったと推定される。

以上のデータを元に、流体が方解石、石英、緑簾石および緑泥石と平衡であり、EPMA分析値により緑簾石をepidote (0.60) - clinozoisite (0.40)、緑泥石をdaphnite (0.55) - clinocllore (0.45)の理想固溶体とし、69 MPaで340°Cから330°Cに温度が低下した場合に、裂かを方解石と石英が充填するために必要な流体量を、MIX99 (Hoshino et al., 2000) を用いてシミュレートした。その結果、裂かスペース1Lを充填するために必要な流体量は86 kgであると見積られた。従って、膨大な量の流体が、Bolfin断層中軸部に向けて浸透したと推定される。

キーワード：断層、流体、裂か

Keywords: fault, fluid, fracture

沈み込み帯におけるマントル対流と水輸送のダイナミックな相互作用

Dynamic interaction between mantle convection and water transportation in subduction zones

*中尾 篤史^{1,2}、岩森 光^{1,2}、中久喜 伴益³*Atsushi Nakao^{1,2}, Hikaru Iwamori^{1,2}, Tomoeki Nakakuki³

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻、2.海洋研究開発機構基幹研究領域地球内部物質循環研究分野、3.広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻

1.Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology, 2.Department of Solid Earth Geochemistry, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University

The effects of water on subduction dynamics, e.g., plate migration rate, slab geometry, stress field, and back arc spreading, are investigated by using a 2-D self-consistent model for lithosphere subduction and whole mantle convection. We solve water transportation coupled with hydrous mineral phase changes. Mantle flows and water transportation are interactive through constitutive and state equations for hydrous rocks. Our model has successfully reproduced the water distribution in a mantle wedge and along the slab with sufficient resolution comparable to that of previous models that focus on the mantle wedge structure. As a result, low density owing to hydration reduces subduction rates, back arc spreading, and slab stagnation on the phase boundary at 660-km depth, whereas low viscosity owing to hydration enhances rapid subduction, trench migration, and slab stagnation. We attribute these results to mechanisms that cause the hydrous buoyancy of subducting plates to reduce the slab pull force and the accompanying tensile stress on overlying lithosphere. In addition, hydrous weakening diminishes the mechanical coupling of the subducted slab with the wedge mantle and overriding lithosphere. Thus, water is capable of generating two opposite situations in the stress field of the overlying lithosphere and the subduction rate. Water is therefore expected to be an important mechanism for generating broad styles of the subduction structure and kinematics, as observed in actual subduction zones such as Tonga and Mariana, comparable to other tectonic forces such as overlying plate motion. Water in the mantle is thus a key to a better understanding of the whole mantle-scale slab dynamics as well as island arc volcanic processes.

キーワード：水輸送、自由対流、沈み込みのダイナミクス、プレート速度、スタグナントスラブ、海溝移動

Keywords: water transportation, free convection, subduction dynamics, plate velocity, stagnant slab, trench migration

三重県東部中央構造線の発展史と大規模断層帯の弱化： 試験的モデル

Evolution of the Median Tectonic Line, Mie Prefecture, south-west Japan and implication for weakening in a large-scale fault zone: a tentative model

*竹下 徹¹、荒井 駿¹

*Toru Takeshita¹, Shun Arai¹

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

中央構造線（以下、Median Tectonic Line, MTL）は西は九州東部から東は関東山地まで、西南日本を800 kmにわたって延長される日本で最も大規模な断層である。MTLの発展史は複雑であるが、もともと白亜紀の後期に西南日本内帯の領家帯に貫入した花崗岩質岩にマイロナイト帯として形成されたものが、古第三紀の初頭（63-58 Ma）に西南日本外帯の三波川変成岩の上昇により本変成岩と接合しその原型（物質境界）が形成された（市の川フェーズ）。したがって、MTLは大規模正断層として発生した（例えば、Kubota and Takeshita, 2008）。三重県東部では、MTLは第四紀に活動しておらず、MTLの原型（市の川フェーズ）を良く保持していると考えられる。我々は2014年以降、大規模断層帯の発展と弱化を解明する目的で三重県東部MTLをモデルフィールドに選びこれまで研究を重ねて来た。その結果、暫定的ではあるがいくつかの新事実が明らかとなって来たのでここに報告する。以下に結果を箇条書きにする。（1）本地域（松阪市月出地区）では、MTLは東西方向に追跡されるが、0.5 kmから1 km程度延長されるセグメント群からなり、各々のセグメントは東端で70 m程度北にステップし（断層ジョグ）、東北東—西南西方向の断層に結合される構造を持つ。現在までに3つの断層ジョグが見つかっているが、断層セグメントを結合する断層は大規模正断層形成の際に形成されたトランスファー断層と考えられる。（2）中角度で北に傾斜するMTLの上盤側には70 m程度の花崗岩質岩マイロナイト起源のカタクレーサイト（断層コア）が重なり、さらにその上位には、割れ目の発達したプロトマイロナイト（断層ダメージゾーン）が重なる。しかし、プロトマイロナイト中にも幅の狭いカタクレーサイト帯が網目状に発達する。（3）カタクレーサイトは、変形の進展とともに片状カタクレーサイトに変化していく。また、MTLに沿うカタクレーサイト中には、ウルトラマイロナイトの破片（クラスト）が認められる（Jefferies et al., 2006）。（4）割れ目の発達したプロトマイロナイト中に地震時の粉碎（rupture）によって形成されたと考えられるpulverized rocksが発見された。以上の観察事実に基づき、MTLの発展および断層帯の弱化について次のような考察を行った。MTLは最初、正断層活動の際に東西方向の短いセグメント群として形成され、それがリンクして行き、さらに変位の増加とともにカタクレーサイト帯の幅が増加した。最初にMTLが形成される時、脆性—塑性転移点の応力はインタクトな岩石の変形実験から予想される値まで増加し、ウルトラマイロナイトが形成された。しかし、地震性破壊によりカタクレーサイトが形成されると流体が浸透し、雲母・粘土鉱物が成長して摩擦係数が低下するほか、圧力溶解で変形するようになり、カタクレーサイト帯の弱化が起った。片状カタクレーサイトの組織は弱変成岩（準片岩）に酷似し、圧力溶解沈殿が顕著に起ったことを示す。カタクレーサイト帯が弱化すると、その中では応力が高まらないので地震を起こせず、周囲の未破碎岩に応力が集中し、そこで地震が生じるようになった。このような過程が繰り返されてカタクレーサイト帯の幅が増加したとすると、現在、カタクレーサイト帯の中にウルトラマイロナイトの破片があることや、カタクレーサイト帯形成の初期段階で生じた地震性破壊の痕跡がカタクレーサイト帯と接するプロトマイロナイトに認められる事実を都合よく説明することが出来る。

キーワード：中央構造線、大規模断層帯の弱化、カタクレーサイト、圧力溶解、粉碎岩

Keywords: Median Tectonic Line, weakening in a large-scale fault zone, cataclasite, pressure solution, pulverized rocks

四国西部，古第三紀における中央構造線の運動像とK-Ar年代測定による運動時期
Kinematics and K-Ar geochronology of the Median Tectonic Line of western Shikoku,
south-west Japan.

*窪田 安打^{1,2}、竹下 徹³、八木 公史⁴、板谷 徹丸⁵

*Yasu'uchi Kubota^{1,2}, Toru Takeshita³, Koshi Yagi⁴, Tetsumaru Itaya⁵

1.北海道大学大学院理学院、2.応用地質株式会社、3.北海道大学、4.株式会社蒜山地質年代学研究所、5.岡山理科大学

1.Graduate School of Science, School of Science, Hokkaido University, 2.OYO corporation, 3.Hokkaido University, 4.Hiruzen Institute for Geology and Chronology, 5.Okayama University of Science

日本最大の断層である中央構造線 (MTL) は、古第三紀 (66-26 Ma) の断層運動に不明な点が多い。Kubota and Takeshita (2008)は、古第三紀におけるMTLの運動時相は、63-58 Ma (市ノ川フェーズ)と45-25 Ma (先砥部フェーズ) に区分できることを示した。これまでに、MTL沿いの変形構造についてマップ～露頭・薄片スケールの調査にもとづいて、市ノ川フェーズはMTLが大規模な正断層運動 (Kubota and Takeshita, 2008) を行う運動時相であること、更に先砥部フェーズは、MTLに平行～雁行配列する内帯の断層群 (岡村断層、川上断層、重信川断層、伊予断層等) が左横ずれ逆断層運動 (窪田・竹下, 2015) により形成された運動時相であると示した。このように、古第三紀におけるMTLの運動像は解明されつつあるが、今後はより詳細な運動時期を把握していく必要がある。既往研究では、MTL沿いの断層粘土についてK-Ar年代測定により60Ma前後に年代値のピークが得られているが (柴田他, 1989等)、複数の運動時相を示すような測定結果は少ない。

このため本研究では、各断層運動の年代を得ることを目的として、マップ～露頭・薄片スケールの調査に基づいて、異なる運動時相の変形が重複しない箇所採取した断層粘土のK-Ar年代測定を実施した。測定対象は、断層運動により生成される自生イライトを対象とする。この測定手法の課題は、堆積岩などを母岩とする断層の試料には碎屑性イライトが混合しており、試料から自生イライトのみを分離することが困難なことである。このため、測定値は混合年代となり、断層運動の年代よりも古い測定値となる。今後、ポリタイプの解析を行って真の断層の運動年代を推定する予定である。なお、1試料に対して3フラクション (0.2-0.4, 0.4-1.0, 1.0-2.0 μ m) の粒径に属するイライト年代値を決定することで、粒径による年代値の変化やポリタイプの量比を解析する予定である。表1に、ポリタイプによる解析前のK-Ar年代測定値を示す。上記の年代測定から得られる年代値は、MTLの市ノ川フェーズと先砥部フェーズの時期をより詳細に把握できると期待される。

Kubota, Y., Takeshita, T., 2008. *Island Arc*, vol. 17, p.129-151.; 窪田・竹下, 2015, 日本地質学会学術大会第122年学術大会講演要旨 p.125.; 柴田 賢他, 1989. 地質調査所月報, 40, 12, p.661-671.

キーワード：中央構造線、古第三紀、運動史、K-Ar年代測定

Keywords: Median Tectonic Line, Paleogene, Kinematic history, K-Ar geochronology

Table 1 Result of K-Ar dating

	Sample No.	Mineral	Grain size (μm)	K content (wt.%)	Rad. ⁴⁰ Ar (10 ⁻⁸ cc STP/g)	K-Ar age (Ma)	Non-rad. ⁴⁰ Ar (%)
Okamura Fault	OK-1-A3	illite	0.2-0.4	5.886 ± 0.118	1054.6 ± 11.3	45.6 ± 1.0	9.0
			0.4-1.0	5.822 ± 0.116	1069.7 ± 11.5	46.7 ± 1.0	8.1
			1.0-2.0	5.562 ± 0.111	1046.2 ± 11.0	47.8 ± 1.1	7.6
	OK-1-A5	illite	0.2-0.4	4.927 ± 0.099	791.7 ± 10.0	40.9 ± 1.0	19.5
			0.4-1.0	4.900 ± 0.098	794.0 ± 9.8	41.3 ± 1.0	18.9
			1.0-2.0	4.871 ± 0.097	802.0 ± 9.8	41.9 ± 1.0	18.5
Shigenobu gawa F.	SG-2-A3	illite	0.2-0.4	5.990 ± 0.120	1410.0 ± 15.3	59.7 ± 1.3	9.5
			0.4-1.0	5.620 ± 0.112	1453.6 ± 15.4	65.5 ± 1.5	8.0
			1.0-2.0	5.149 ± 0.103	1403.9 ± 14.9	68.9 ± 1.5	7.4
Kawa kami F.	YY-1-A4	illite	0.2-0.4	5.917 ± 0.118	1589.7 ± 16.3	67.9 ± 1.5	4.6
			0.4-1.0	5.415 ± 0.108	1592.4 ± 16.3	74.2 ± 1.6	4.8
			1.0-2.0	5.046 ± 0.101	1485.5 ± 15.3	74.3 ± 1.6	5.5
MTL	YA-1-A1	illite	0.2-0.4	6.495 ± 0.130	1288.0 ± 13.4	50.4 ± 1.1	6.3
			0.4-1.0	6.229 ± 0.125	1336.5 ± 13.9	54.5 ± 1.2	6.2
			1.0-2.0	6.080 ± 0.122	1327.5 ± 13.7	55.4 ± 1.2	5.9

K-Ar dating of fault movement in clay rich gouge: an example from the Alpine Fault at Gaunt Creek and Waikukupa River, South Island, New Zealand

*Horst Zwingmann¹, Martin Timmerman², Masafumi Sudo², Roland Oberhänsli², Virginia Toy³

1.Department of Geology and Mineralogy, Kyoto University, 606-8502 Kyoto, Japan, 2.Institute of Earth and Environmental Science, University of Potsdam, D-14476 Potsdam, Germany, 3.Department of Geology, University of Otago, Dunedin 9054, New Zealand

The occurrence of synkinematic and authigenic clay minerals, in particular illite, is a common feature in neotectonic fault gouges. Numerous attempts have been made to date fault gouges [see summary in Zwingmann et al., 2010]. We present new age data for synkinematic illite growth in two fault gouges from surface exposures of the Alpine Fault at Gaunt Creek and Waikukupa River, South Island, New Zealand. The Alpine Fault in the South Island of New Zealand marks the Australian-Pacific plate boundary. An amphibolite-facies mid-crustal ductile shear zone (mylonite series rocks) in the Pacific Plate hanging wall is exhumed along a current brittle fault marked by cataclasite and fault gouge.

Size separation combined with mineral characterization (SEM, TEM, XRD, LPS) enables to identify suitable samples for isotopic dating. Investigations of two <2 micron illite gouge separates from fault gouge samples collected from surface exposures at Gaunt Creek and Waikukupa River yield K-Ar ages of resp. 4.1 ± 0.4 and 1.9 ± 0.2 Ma, corresponding to the late Pliocene. K-Ar illite ages are consistent with well-defined field constraints and within error similar to c. 1 to 2.5 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages for micas from hanging wall metapelites and amphibolites and to published K-Ar mica and near-zero apatite fission track ages. The corresponding illite and mica ages suggest that hanging wall rocks were rapidly exhumed and cooled c. 1–4 Ma ago with coeval exhumation resulting to extensive hydration in the brittle part of the Alpine Fault documented by illite authigenesis. Argon diffusion modeling supports the cooling timeframe. The ages of fault gouge illite provide absolute time constraints on the youngest, retrograde, neotectonic movements on this part of the Australian-Pacific plate boundary. This study highlights the potential of isotopic dating of synkinematic illite to determine upper crustal deformation events.

Zwingmann *et al.* 2010. *Geology*, v. 38, no 6, 487-490; doi10.1130/G30785.1

Keywords: fault gouge, Illite K-Ar dating, New Zealand

地殻下部における剪断帯の発達様式：ノルウェー北部，Eidsfjord剪断帯

Development of shear zones in the lower crust: Eidsfjord shear zone, northern Norway

*奥平 敬元¹、重松 紀生²、針金 由美子³*Takamoto Okudaira¹, Norio Shigematsu², Yumiko Harigane³

1.大阪市立大学大学院理学研究科地球学教室、2.産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、3.産業技術総合研究所地質情報研究部門

1.Department of Geosciences, Graduate School of Science, Osaka City University, 2.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, AIST, 3.Research Institute of Geology and Geoinformation, Geological Survey of Japan, AIST

下部地殻における剪断帯の発達様式は、地殻のレオロジーや内陸地震の発生過程において最も重要な制約条件であるにもかかわらず、その実態はほとんど分かっていない。そのため、下部地殻における剪断帯の局所化の可否や歪み速度などを明らかにすることが喫緊の課題となっている。このような問題を解く場合、下部地殻が広く露出している地域における野外調査とそれに基づく試料採取・解析が必須となる。本研究では、下部地殻が広く露出しているノルウェー北部、ロフォーテン諸島のLangøya地域において野外調査を実施し、各種変形岩（カタクレサイト、マイロナイト、シュードタキライト）試料を採取した。本調査地域には、地殻スケールのデタッチメントが推定されており、それに伴うシュードタキライト帯の存在も報告されており（e.g. Markl 1998; Plattner et al. 2003; Steltenpohl et al. 2011），下部地殻の変形過程を研究するのに適している。本調査地域には、粗粒な含輝石斜長岩とモンゾニ岩が広く分布し、その内部に幅数センチから数メートルの局所的な延性剪断帯が多数認められる。延性剪断帯は粗粒もしくは細粒のマイロナイトからなる。粗粒マイロナイトは主に平均粒径約85 μm（最大約350 μm）の斜長石やCl-rich角閃石、緑簾石、黒雲母、白雲母、藍晶石からなる。細粒マイロナイトは主に平均粒径42 μmの斜長石やCl-rich 角閃石、緑簾石、黒雲母、白雲母、ザクロ石、スカポライトからなる。斜長石は若干線構造方向に伸長した形態（アスペクト比：~2）を呈するが、波動消光などの結晶内塑性を示すような組織は認められない。細粒マイロナイトには、破碎された粗粒（数ミリ程度）の斜長石ポーフィロクラストが認められる場合がある。基質の細粒斜長石は伸長せず等粒状組織を呈する。基質とポーフィロクラストの斜長石とでは化学組成が異なり、後者の方が高いAn値を示す。ポーフィロクラスト中に発達するクラックを充填する細粒斜長石も基質と同様に等粒状組織を呈するが、細粒斜長石とその母晶及び隣接した細粒斜長石同士の間には系統的な結晶方位関係は認められない。これらの組織は斜長石の細粒化は主に、動的再結晶ではなく破碎によることを示唆する。粗粒マイロナイトに含まれる斜長石はしばしば組成累帯構造を持ち、コアはポーフィロクラスト斜長石と同程度の高いAn値を持つものに対して、リムのAn値は細粒マイロナイトの基質の斜長石と類似した値を示す。細粒マイロナイトの形成条件は、斜長石-角閃石温度計（Holland and Blundy 1994）とザクロ石-角閃石-斜長石-石英圧力計（Kohn and Spear 1990）を用いた結果、~700 °C、~800 MPaを得た。EBSDによる結晶方位解析を行った結果、細粒マイロナイトの基質及び粗粒マイロナイトの斜長石集合体は顕著な格子定向配列（LPO）を示さないため、それら集合体の変形機構は粒径依存型クリープ（拡散クリープもしくは粒界すべり）であったと考えられる。

これらの観察結果は、下部地殻において延性剪断帯は局所的に発達し、その変形機構は破碎と流体の流入と変成作用によって形成された細粒斜長石の粒径依存型クリープであったことを示唆する。なお、この粒径依存型クリープは斜長石の粒径が数百マイクロンに達した場合でも有効であったと考えられる。

引用文献：Holland and Blundy (1994) *Contrib Mineral Petrol* 116:433-447; Kohn and Spear (1990) *Am Mineral* 75:89-96; Markl (1998) *NGU Bull* 434:53-75; Plattner et al. (2003) *Contrib Mineral Petrol* 145:316-338; Steltenpohl et al. (2011) *J Struct Geol* 33: 1023-1043

キーワード：下部地殻レオロジー、斑れい岩マイロナイト、変形機構

Keywords: Rheology of the Lower crust, Gabbroic mylonite, Deformation mechanism

岩石の流動則を考慮した内陸横ずれ断層直下の下部地殻におけるせん断集中機構

Shear strain concentration mechanism in the lower crust below an intraplate strike slip fault based on rheological laws of rocks

*張 学磊¹、鷲谷 威¹

*XUELEI ZHANG¹, Takeshi Sagiya¹

1.名古屋大学環境学研究科

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

The existence of the shear zone in the lower crust under an intraplate strike slip faults has been suggested by many studies. To understand the structural characteristics of the shear zone in the lower crust under an intraplate strike slip fault (slip rate of 1mm/yr) and its temporal evolution in a geological time scale, we have been conducting 2-D numerical experiments. In our previous study (Zhang and Sagiya, 2015), stress singularity appears at the bottom of the upper crustal fault where stepwise velocity was assigned as a boundary condition. To avoid the stress singularity, we introduce a yield threshold in the brittle-ductile transition. We also add the fault fictional heating to better evaluate the amount of heat generation due to fault activity.

Calculation with wet anorthite rheology show that the viscosity of the brittle ductile transition is about 10^{22} Pa*s. The brittle-ductile transition is located approximately at 19 km depth, consistent with the cut-off depth of seismicity in the continental crust. On the other hand, for dry anorthite, the depth of the brittle ductile transition exceeds 25km. Therefore water is of importance in making the lower crust weak. Calculated temperature rise for 3Myrs is 15 K for wet anorthite and 22 K for dry anorthite, much smaller than a case of interplate fault (e.g. 30 mm/yr slip rate). Frictional as well as shear heating has very limited effects on shear localization under an intraplate strike slip fault. Grain size is another factor that controls the rheology of the lower crustal rock. While grain size determines the effective viscosity of diffusion creep, grain size varies both in time and space as a result of dynamic recrystallization and dislocation creep. In our calculation, grain size obtained from a stress dependent constitutive law ranges from several micrometers to several millimeters. On the other hand, grain size determined by balancing the shear strain rate of diffusion and dislocation creep ranges from several tens of millimeters to several centimeters. These results provide constraints on the physical mechanism of ductile flow in the lower crust through comparison with the rock sample originated from the lower crust. Our model suggests that for intraplate strike slip fault, lower crustal shear zone is produced by the stress dependent nonlinear rheology and shear and frictional heating has negligible effect on the deformation of the shear zone.

キーワード：下部地殻、せん断帯

Keywords: Lower crust, shear zone

三波川帯における併存する低速および高速変成岩上昇と変成縞構造の形成

Contrasting low and high speed exhumation and metasomatic banding in the Sambagawa metamorphic belt

*鳥海 光弘¹

*mitsuhiro toriumi¹

1. 海洋研究開発機構

1. Japan agency of marine science and technology

Contrasting low and high speed exhumation and metasomatic banding in the Sambagawa metamorphic belt
Toriumi, M. (OELE, Jamstec)

The author studied spherical transformation of quartz in albite porphyroblasts in the Sambagawa metamorphic belt in central Shikoku at 1979 and he concluded that the process is controlled simply by boundary diffusion of oxygen of albite and quartz for reducing the interfacial free energy (1). The critical spherical size of quartz inclusion in albite is then estimated by diffusion coefficient and annealing time by their 0.25 power index. Thus the critical spherical size is the potential annealing time under the given temperature.

The author thus, measured the systematic change of the critical sizes of quartz inclusions in albite of metamorphic rocks along the Asemigawa route of central Shikoku, and obtained the general trend of the increasing size by metamorphic temperature. On the other hand, the critical sizes of the highest temperature zone suddenly change the very smaller values than those of the other grade rocks, suggesting the highest grade zone rocks exhumed very rapid rather than surrounding lower grade rocks.

This enigma has not been possibly answered by any model of metamorphic exhumation. However, recent studies of high grade metamorphic terranes revealed that there are abundant dendritic grains of aplitic minerals in so-called felsitic inclusions or nanograinite inclusions in metamorphic garnet (2) (3). Therefore, it is inferred that there are a few blocks or sheets of higher grade metamorphic rocks rapidly intruded into the surrounding metamorphic belt.

The mechanism of these contrasting two exhumation at the same belt is modeled by the viscous drag to friction drag exhumation governed by fluid concentration along on the fluid concentrated faulted narrow zones. Such fluid filled damage zones are evidenced by the large scale abundant metasomatic bands in the boundary zones as described in this paper.

(1) Toriumi, M., 1979, *Lithos*, 12, 325-333. (2) Cesare, B., Ferrero, S., Salvioli-Mariani, E., Pedron, D., Cavallo, A., 2009. *Geology* 37, 627-630. (3) Hiroi, Y., Yanagi, Y., Kato, T. Kobayashi, B. Prame, T. Hokada, M. Satish-Kumar, M. Ishikawa, T. Adachi, Y. Osanai, Y. Motoyoshi and K. Shiraishi, 2013,

キーワード：変成岩の高速上昇、変成岩の焼結時間、変成縞構造

Keywords: rapid exhumation of metamorphic rocks, annealing time of metamorphic rocks, metamorphic banding

DFDP-2 BHTV解析に基づく断層岩の構造と応力解析

Tectonic stress and fault rock fabrics in the vicinity of the Alpine Fault inferred from DFDP-2 borehole televiewer (BHTV) imagery

*重松 紀生¹、Massiot Cécile²、Townend John²、Doan Mai-Linh³、McNamara David D.⁴、Toy Virginia⁵、Sutherland Rupert⁴、DFDP-2 Science Team
*Norio Shigematsu¹、Cécile Massiot²、John Townend²、Mai-Linh Doan³、David D. McNamara⁴、Virginia Toy⁵、Rupert Sutherland⁴、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.ビクトリア大学ウェリントン、3.グルノーブル大学、4.ニュージーランド国立地質・核科学研究所、5.オタゴ大学

1.Research Institute of Earthquake and Volcano Geology, Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2.Victoria University of Wellington, New Zealand, 3.University of Grenoble, France, 4.GNS Science New Zealand, 5.University of Otago, New Zealand

ニュージーランド南島の西海岸のアルパイン断層の平均活動間隔は 330 年、最新活動は1717年であり、地震後経過率が高い。アルパイン断層掘削の目的の一つに地震が起こる前の応力状態を把握することがある。従来、アルパイン断層周囲の応力は地震の発震機構による応力逆解析により求められているが、アルパイン断層近傍では地震活動は低調であり応力状態を知ることはできない。DFDP-2 の坑井を用いた現地応力測定が断層近傍の応力状態に制約を与えることが期待されていた。

しかし、DFDP-2では掘削中のトラブルにより現地応力測定を断念した。一方、DFDP-2では各種物理検層が行われた。ボアホールテレビューアー (BHTV) 検層による坑壁画像の解析から各種面状構造の方位が得られた。本発表ではBHTV検層により得られた2244個の面状構造のうち、亀裂 (断層) と考えられる1680個の方位に基づき応力解析を行った。

BHTV検層により得られた亀裂の方位は滑り方向を含まない不完全な断層スリップデータであることから、解析には画像解析で直線抽出に用いられる Hough 変換を用いた。アルパイン断層のテクトニックな状況から、亀裂は単一の応力場に支配され、逆断層成分を持ち、かつアルパイン断層に平行な亀裂はアルパイン断層同様に上盤西移動の剪断センスを持つと仮定した。

全深度の解析結果は最大圧縮応力軸の方位角と沈下角が 124° と 30° 、最小圧縮応力軸の方位角と沈下角が 23° と $19^{\circ}(\pm 30^{\circ})$ 、応力比が0.288と求まっている。これまで地震学的に求められている解とはわずかに異なる。一方、この方位はアルパイン断層近傍において地質学的に推定されている圧縮方向と引っ張り方向に比較的に近い。

次に坑井に沿って20 m 間隔ごとに応力解を求めた。大部分の深度では全深度で求めた解と同様の結果が得られている。一方、掘削深度 720-740 mと780-860 mでは最大圧縮応力軸の沈下角が浅い、もしくは最小圧縮応力軸の沈下角が大きく、また応力比も大きい。

一方、DFDP-2 では光ファイバー測温により温度分布が求められている。720 m 付近より浅い深度では $150^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 近い高い値を持つものに対し、それ以深では地温勾配が $50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 程度であり、この温度勾配の変曲点と応力テンソル逆解析の結果が一致する。また掘削泥水を用いた水理試験に基づく500 m付近で水頭高 30 m であるのに対し、720 m以深では水頭高は60 m 程度である。さらに全深度で求めた解に対する剪断応力と法線応力を深度ごとに三次元モール円にプロットすると、応力解が全体の結果と一致しない 720-740 mと780-860 mでは剪断応力の小さい亀裂が多数みられる。

間隙水圧が高い条件は、応力に対して滑りにくい方位でも滑りうる。720 m以深については、過去に高い間隙水圧であったため、亀裂分布パターンが他と異なり、このことが異なる応力解、温度構造等に影響を与えている可能性がある。高間隙水圧の可能性の検討についてはボーリングコアに基づく断層スリップデータの取得が必要である。

キーワード：アルパイン断層、BHTV 検層、断層岩の構造、応力テンソル

Keywords: the Alpine Fault, borehole televiewer imagery, fault rock fabrics, Stress tensor

方解石双晶の方位解析による古地温・古深度・古応力の推定

Paleo temperatures, depths and stresses evaluated using calcite twinning paleopiezometry

*山路 敦¹*Atsushi Yamaji¹

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

方解石のe双晶は、双晶面にかかる剪断方向の剪断応力成分がある臨界値 (τ_c , 10 MPa前後といわれる: Lacombe, 2010) を超えた場合に形成される。この双晶形成条件に依拠して、応力インバージョンを構成することができる (e.g., Etchecopar, 1984)。天然の方解石は地質学的時間をへる間に、複数の応力時階を経験していることが普通である。この場合にも、複数の偏差応力テンソルを決定することができる (山路, 本セッション)。それにより決定されるのは、検出すべき応力の数と、検出されたそれぞれの応力についての偏差応力テンソルを τ_c で割った、無次元偏差応力テンソルである。

他方、e双晶形成により、方解石の結晶は単純剪断をこうむるが、歪みの進行とともに、 τ_c 値が上昇することが、変形実験から知られている。すなわち、歪み硬化である。これは、歪みによる τ_c 値の上昇ととらえることができる。双晶形成による剪断歪みは、双晶の密度から測定することができる (e.g., Groshong, 1972)。さて、もっぱら脆性変形が進行する地殻浅部では、臨界差応力は深度に比例する。したがって、偏差応力テンソルから得た差応力により、双晶形成時の深度を推定することができる。妥当な温度勾配が仮定できれば、温度もわかる。ここで鍵になるのは、 τ_c の値である。方解石の変形実験で得られた温度・剪断歪み量・ τ_c 値をコンパイルし、Lacombe (2010) はそれらのあいだの関係を大雑把にしめした。この関係を利用することにより、無次元偏差応力テンソルにもとづいて、温度・深度・ τ_c 値にかんする連立方程式を立てて解くことができる。

この方法を、日本海拡大時のグラーベンから得られた天然データに適用した例を紹介する。古深度がわかるので、そのグラーベンがどれだけ上昇剝削を受けたかを推定することができる。

キーワード：地温、応力、昇降運動、上昇

Keywords: geothermics, stress, vertical movements, exhumation

歪み集中帯に分布する小規模断層の産状とその重要性

The nature and importance of minor faults developed in the Niigata-Kobe Tectonic Zone

*大橋 聖和¹、大坪 誠²、宮川 歩夢³、丹羽 正和⁴*Kiyokazu Oohashi¹, Makoto Otsubo², Ayumu Miyakawa³, Masakazu Niwa⁴

1.山口大学大学院理工学研究科、2.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門、3.産業技術総合研究所 地質情報研究部門、4.日本原子力研究開発機構 土岐地球年代学研究所

1.Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University, 2.IEVG, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 3.IGG, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 4.Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

近年のGPS測地観測の結果、日本列島の歪み場は不均一であり、背弧側においても部分的に歪み速度の速い“歪み集中帯”が存在することが知られている (Sagiya et al., 2000, PAGEOPH). 新潟-神戸ひずみ集中帯はその代表例であり、およそ北縁を牛首断層、南縁を高山・大原断層帯で画される範囲は10 mm/yを上回る相対変位速度を見せる (Ohzono et al., 2011, Geophys. J. Int.). 現在進行中の歪みが地殻内に弾性歪みとして蓄えられ、地震であれクリープであれ主要活断層で解放されると考えると、活断層の平均変位速度と測地観測されている歪み速度はおおよそ一致するはずである。しかしながら、この範囲内に分布するA級活断層（牛首断層、跡津川断層、高山・大原断層帯）と幾つかのB～C級と推定される活断層の平均変位速度を合算しても、GPSで観測されている歪み速度を説明することができない。一方で、本地域では、活断層から十分に離れた場所においても少なからず断層が存在する（大橋・小林, 2008, 地雑; Niwa et al., 2011, Eng. Geol.）。そこで、主要活断層による歪み解放のみを考えるという前提条件に疑問を投げかけるべく、活断層から離れた背景地域（オフフォルト地域）を対象とした断層調査を行った。

調査は、跡津川断層系の西部地域を対象に、断層系を横断する測線に沿って行った。調査の結果、幅10 cm～1 m程度の破碎帯を伴う断層ガウジ帯が複数見つかった。ガウジは可塑性を示す軟弱な粘土からなり、北東-南西走向・高角傾斜で右横ずれの剪断センスを示す。本調査地域内には、第三紀以前に形成されたと考えられるカタクレサイトを伴う断層も存在するが、これらは横ずれ剪断センスが逆であり、明確に区別される。また、幅1 cm以下のより小規模な断層ガウジも多数分布することがわかった。これら中～小規模断層の断層スリップデータを用いて、断層を動かした当時の古応力を多重逆解放により求めたところ、少なくとも牛首断層北方においては、現在の応力場（東西圧縮、南北引張の横ずれ応力場）と一致する。これらの結果は、歪み集中帯内部の、活断層の存在が知られていない背景地域に、第四紀以降に活動した中～小規模断層群が存在することを示唆する。この“オフフォルト変形”は、歪み速度のパラドックスを解消する一つの説明になりうる。また、歪み集中帯を特徴付ける地質構造であるかもしれない。小規模活断層に関しては、「C級活断層問題」（浅田, 1991, 活断層研究）として地殻変動への重要性はおろか、その実態や存在すら不明確のまま残されている。本試みは、活断層の階層構造に関する長年の問題に対し、答えを出せる可能性をも内包する。

キーワード：新潟-神戸歪み集中帯、跡津川断層、C級活断層、古応力解析、歪み速度パラドックス

Keywords: Niigata-Kobe Tectonic Zone, Atotsugawa fault, C-class active fault, Paleostress analysis, Strain-rate paradox

地殻の部分融解がテクトニクスに及ぼす影響：新潟—神戸歪集中帯を例として

Effect of crustal partial melting on tectonics of Japan Arc: Case study in the Niigata-Kobe Tectonic Zone (NKTZ)

*高橋 栄一¹、中島 淳一¹

*Eiichi Takahashi¹, Junichi Nakajima¹

1.東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

1. Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

新潟—神戸歪集中帯（以下NKTZ）は沈み込むプレート境界付近を除けば内陸部で最も顕著な地殻変動帯である（Sagiya, 2000）。NKTZ周辺の中央部から西部にかけて下部地殻に顕著な地震波低速度領域が広がっている（Nakajima & Hasegawa, 2007）。NKTZ中央部には多くの活火山が分布しており、下部地殻の低速度はマグマ溜りの存在や下部地殻が部分融解しているためと解釈されている。しかしながら、NKTZ西部には活火山は存在せず下部地殻の低速度層も中央部に比べると発達が顕著でない。このため、NKTZ西部の下部地殻の低速度帯は部分融解ではなくフィリピン海プレートの脱水に伴って放出された水が岩石中に蓄積されているためと解釈されている（Iio et al., 2002）。本講演では、NKTZ西部の下部地殻にみられる低速度帯も部分融解が原因であるとの新たな解釈について述べる。この解釈が正しいとすると地殻の部分融解が火山活動ばかりでなく地殻変動などテクトニクスにも重要な影響を与えていることになる。

岩石中に少量のシリケートメルトが分布する状態（部分融解）と水流体が粒界に含まれる状態（含水状態）はいずれもドライの岩石に比べ地震波速度が低下し、比抵抗も大幅に低下するためその区別は容易でない。両者の違いはポアソン比にもっとも敏感に表れ、部分融解では $V_p/V_s=1.8$ 以上 含水岩石では $V_p/V_s=1.8$ 以下の速度比を示すと考えられている（Watanabe, 1993; Takei, 2002）。NKTZ西部の下部地殻にみられる低速度帯の V_p/V_s は1.7程度であり、この値は粒界に含まれる水が原因であるとする従来の解釈と矛盾しない（Nakajima & Hasegawa, 2007）。しかしながら、もし仮にフィリピン海プレートの脱水に伴う水の付加が低速度の原因であるとするなら、低速度帯がMoho付近には見られず、深さ20 km付近に限って広がっていることが説明できない。一方、この分布の特徴は以下に述べるように部分融解モデルからは合理的に説明できる。

地殻を構成する様々な岩石のソリダスは実験的に詳しく研究されている。水に飽和した状態のソリダスはドライのソリダスと比較して数100°C低下する。中でも花崗岩のソリダスは下部地殻では水に飽和した場合600°Cまで低下する。安山岩、泥質堆積岩では約650°C、玄武岩では650-700°Cが水に飽和したソリダスである（Wyllie, 1977など）。すなわち、下部地殻の岩石が粒界に水を含む（水に飽和した）状態であるとすれば600-700°Cの温度以上では部分融解が必然的に起きる筈である。

Nakajima & Hasegawa (2007)によれば、NKTZ西部の地震発生震度の下限は15 km程度でありこの値はNKTZ中部の活火山から離れた地域のそれと一致している。またこの地震発生震度の下限は東北地方のそれと大差ない。地震発生震度の下限は岩石の脆性・塑性転位に対応すると考えられるのでその深さは広域的な地温勾配に比例する。すなわち、NKTZ中央部および西部の地温勾配は東北地方のそれと大差ないことになる。Takahashi (1978, 1986)は岩石学的な手法で東北地方の地温勾配を推定し、Moho面の温度を800°C以上と見積もっている。したがってNKTZ中部の地温勾配は東北地方同様にMoho(深さ30 km)で800°C以上と考えられる。しかしながらNKTZ西部の地温勾配はMoho直下に沈み込んだ低温のフィリピン海プレートが存在するため、Moho付近が深さ20 km付近よりかえって低温である可能性が高い。すなわち、NKTZ西部の低速度層がMoho付近には見られず深さ20 km付近に限られていることは部分融解モデルから合理的に説明できる。

我々の新しい解釈によれば、NKTZの大きな地殻変動は部分融解した下部地殻の高い流動性が担っていることになる。この地域では今まさにマグマタイトが下部地殻で形成されつつあるのだろう。下部地殻の低速度層はNKTZ地域よりも広がっている。本講演で述べたようにそれらが地殻の部分融解に起因するとすれば、地殻の部分融解は火山の分布よりはるかに広がっていることになる。火山はマントルから玄武岩マグマが貫入する高熱流地帯に限って形成されるのであろう。一方、プレートの脱水に伴って水が供給され、地温勾配が比較的高く、下部地殻で600°Cを超える場所では部分融解が広く起きているだろう。下部地殻の部分融解モデルは、大阪

平野下の低周波地震の存在、和歌山の中央構造線の南部にある顕著な群発地震域の下にあるマグマ溜りの起源などに統一的な説明を与え得る。

キーワード：地殻の部分融解、テクトニクス、新潟神戸歪集中帯

Keywords: crustal partial melting , tectonics, Niigata-Kobe Tectonic Zone

新潟—神戸ひずみ集中帯における定常的プレート変形の意義

Implications of Persistent Intraplate Deformation in the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Central Japan

*鷲谷 威^{1,2}、Meneses Angela²*Takeshi Sagiya^{1,2}, Angela Meneses-Gutierrez²

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

We found a persistent localized contraction along the Niigata-Kobe Tectonic Zone (NKTZ) before and after the 2011 Tohoku-oki earthquake through an analysis of GEONET coordinate data (Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016). This persistent pattern is identified as short-wavelength components in the strain rate pattern after removing the long-wavelength components. Persistency of deformation pattern under both interseismic and postseismic periods indicates that the localized contraction results from aseismic process driven by the tectonic stress field. Strain rate of this localized contraction is about 0.06 ppm/year, generally consistent with geologically estimated strain rate (Wesnousky et al., 1982, Sato, 1989). The localized pattern can be reproduced by ~10mm/year aseismic slip on a fault cutting the crust up to the depth of a few km. This implies inelastic processes have significant contribution in the crustal deformation of the Japanese island arc. Similar inelastic deformation is expected for other fault zones. However, slip rate of major active faults are smaller and the deeper locking depth makes associated deformation pattern much broader. Thus it is more difficult to detect related signals with a similar approach. The long-wavelength components in the strain rate pattern are considered to be elastic deformation caused by interaction at the plate boundary. Since our precise geodetic observation is limited for the last 20 years, we have not figured out how elastic strain accumulation and release are balanced through an earthquake cycle. Modeling effort of earthquake cycles with realistic lithospheric structure to reproduce the observed deformation pattern is essential to solve the problem.

キーワード：プレート内変形、非弾性変形、地殻ひずみ速度

Keywords: intraplate deformation, inelastic deformation, crustal strain rate

2014年長野県北部の地震の背景となった褶曲・断層構造

Fold-and-fault structure associated with the Naganoken-hokubu Earthquake in 2014

*小林 健太¹、飯田 圭輔¹、香取 拓馬²*Kenta Kobayashi¹, Keisuke Iida¹, Takuma Katori²

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

1.Department of Geology, Faculty of Science, Niigata University, 2.Graduate School of Science and Technology, Niigata University

新学術領域研究「地殻ダイナミクス」では、観察・観測による断層帯の発達過程とミクロからマクロまでの地殻構造の解明を、研究項目のひとつとしている。そこで、2014年11月22日に長野県北部の地震（神城断層地震）が発生し、観測データの蓄積が進む白馬村から小谷村を踏査し、地質図・断面図の作成を行った。また、周辺の活断層露頭を観察し、構造解析などを行った。

本調査地域を北北東-南南西に走る糸魚川-静岡構造線（神城断層）の東側には、主に新第三系が分布する。神城断層の東方約2kmを並走する小谷断層を境界に、その東側には後期中新世柳沢層、西側には鮮新世細貝層ならびに岩戸山層が分布する（中野ほか、2002：白馬岳図幅）。今回、柳沢層を下部の泥岩層、中部の泥岩優勢砂岩泥岩互層、上部の砂岩優勢砂岩泥岩互層の三部層に、また、岩戸山層を下部の凝灰角礫岩層、中部の凝灰質泥岩砂岩礫岩層、上部の溶結凝灰岩層の三部層に、各々区分した。地層を細分し、構造データを蓄積したことにより、マクロスケールの地質構造を詳しく認識することが可能となった。

細貝層と岩戸山層の分布域を通る岩戸山向斜は、青鬼断層・幸田断層により横断・斜断され（中野ほか、2002）、三つに分割される。パイダイアグラムにより求めたヒンジ線の沈下方向は南西～南であり、沈下角は北部30°、中部26°、南部9°と変化する。また、中部の褶曲軸跡は北・南部での位置よりも西方にずれ、その北半部ではほぼ松川に沿うことが明確になった。西翼部には南東傾斜の活断層（城山露頭）、東翼部には小規模な背斜を経て北西傾斜の活断層（野平露頭N・S）が、各々形成されている。両翼の断層とともに、断層ガウジの性状や岩相分布から、2014年より前に繰り返し活動したことが判っていた（小林ほか、2015）。今回、野平露頭Nにおいて簡易的な掘削調査を行い、凝灰角礫岩（岩戸山層）の分布と、それを源岩とするカタクレーサイト・断層ガウジの形成を確認した。

柳沢層の一般走向は北北東-南南西だが、幸田断層より南方では次第に東西へと変化する。部層境界の姿勢も同様に変化し、その西端で小谷断層に切断されることが明らかとなった。

岩戸山向斜は、中部の北半分では地形的な低所を通過するが、その他では山頂など高所を連ねている。地質と地形が調和する場所の岩戸山向斜は活動的であり、それに関連した活断層が両翼部に形成された可能性がある。断層活動に伴い形成されたカタクレーサイトと断層ガウジは、引き続き活動によって地表に露出した。

柳沢層の姿勢変化から、岩戸山向斜の東方にはそれと並走して、ヒンジ線が南南西に沈下する背斜がかつて存在したと推定される。北方にある日道沢背斜（中野ほか、2002）の南方延長にあたり、その褶曲軸面に沿って逆断層である小谷断層が形成された可能性がある。小谷断層に切断された背斜東翼側の柳沢層が、現在は細貝層・岩戸山層と直接している。小谷断層はその南方で中山断層に連続するとみなされ、その落差は南方ほど大きい（加藤ほか、1989：大町図幅）。大町図幅とそれに南接する信濃池田図幅（加藤・佐藤、1983）において、中山断層周辺の主要な褶曲構造のヒンジ線は、いずれも北方に沈下している。これに対し、岩戸山向斜と東側の背斜のヒンジ線は南方に沈下し、異質である。ヒンジ線の沈下が、褶曲・断層構造形成に伴う隆起に起因するならば、累積的な隆起量の極大部が本調査地域の北部にも存在し、南方に向かって徐々に減少したと考えられる。ヒンジ線は青木湖付近ではほぼ水平となり、この場所はSAR干渉画像で検出された長野県北部の地震に伴う隆起域（中埜ほか、2015）南端とほぼ一致する。すなわち、本調査地域で鮮新世以降に生じた特徴的な隆起過程は、現在まで継続しているものと結論される。

キーワード：長野県、白馬村、小谷村、神城断層、活断層、断層岩

Keywords: Nagano Prefecture, Hakuba Village, Otari Village, Kamishiro fault, active fault, fault rocks

繰り返し測量で明らかとなったフィリピン断層のクリープ変位速度の空間的多様性

Spatial variation of creep rate on the Philippine fault based on alignment array surveys

*堤 浩之¹、Jeffrey Perez²*Hiroyuki Tsutsumi¹, Jeffrey S. Perez²

1.京都大学大学院理学研究科地球物理学教室、2.フィリピン火山地震研究所

1.Department of Geophysics, Graduate School of Science, Kyoto University, 2.Philippine Institute of Volcanology and Seismology

東アジアには、海洋プレートの斜め沈み込みに起因する典型的な島弧中央横ずれ断層（中央構造線・フィリピン断層・スマトラ断層など）が発達する。プレートの収束境界に発達するこれらの大規模な横ずれ断層は変位速度が大きく、島弧の地形・地質構造の発達や地震活動に大きな影響を及ぼしている。我々はフィリピン断層を対象として、断層のマッピングや活動履歴調査を行ってきた（Tsutsumi and Perez, 2013）。その過程で、断層の中部に位置するレイテ島で地表クリープの証拠を見だし、変形した人工建造物の調査やInSAR解析に基づきクリープ変位速度を算出した（堤ほか, 2013）。

クリープ変位区間の広がりや速度を明らかにするために、2013年3月から断層を跨ぐ短い基線の繰り返し測量を実施している。2013年3月に1回目の測量を行い、その後2014年3月と11月に改測を行った。また2016年3月に再度計測予定である。現時点で、ルソン島南部に1地点、マスバテ島に5地点、レイテ島に8地点、ミンダナオ島北部に2地点の計16地点に観測基点を設けている。観測の方法は、USGSやサンフランシスコ州立大学の研究チームがサンフランシスコ湾岸地域で行っている観測方法（McFarland et al., 2015）を踏襲している。断層トレースを挟んで、3つの観測基点を設ける。それぞれの基点間の距離は約100mである。これらの基点がなす角度を、測角精度が3秒のトータルステーションを使って計測する。通常の観測条件では、2mm程度の横ずれ変位は十分な精度で検出可能である。観測基線が短いので、断層の極浅部の変位（地表クリープ）のみを捉えることができる。

2013年3月から2014年11月の観測によると、レイテ島の北部や中部の3つの観測地点では、40~50mmの累積左ずれクリープ変位が計測され、これは23~29mm/yrのクリープ変位速度に換算される。この値は、人工建造物の変位から求められる過去10~40年間のクリープ変位速度やマスバテ島でのGPS観測によって明らかとなったフィリピン断層の変位速度（ 22 ± 2 mm/yr; Bacolcol et al., 2005）とほぼ同じである。レイテ島では、過去400年間にフィリピン断層上で地震断層を伴う大地震は発生しておらず（Bautista and Oike, 2000）、フィリピン断層の変位は主にクリープ変位で解消されていると考えられる。マスバテ島では、2つの観測地点で5~10mm/yrの左ずれクリープ変位が観測された。これらの観測地点は、2003年マスバテ地震（ M_s 6.2）の際に出現した長さ約18kmの地震断層を横切っている。地震断層の最大変位量は約50cmであった（PHIVOLCS Quick Response Team, 2003）。Papiona and Kinugasa (2008)によるトレンチ掘削調査では、マスバテ区間の平均活動間隔は130~170年と見積もられている。もし2003年地震と同様な地震が繰り返しているならば、マスバテ区間の変位速度は3~4mm/yrとなり、GPS変位速度に比べて著しく小さい。我々の観測で明らかとなったクリープ変位は、マスバテ区間の変位が中規模地震とクリープ変位の両方によって賄われている可能性を示している。ルソン島やミンダナオ島のフィリピン断層は、歴史時代にM7以上の大地震で破壊し、数mの変位を伴う地震断層を出現させたことが知られている。これらの区間のクリープ変位の有無や速度を明らかにするために、観測基点を2014年11月に設置し、2016年3月に改測予定である。発表当日は、この測量結果も含めて議論する。

山陰ひずみ集中帯における最近の地殻変動と測地・地震・地質学的ひずみ速度の比較

Recent crustal deformation and comparison among geodetic, seismological, and geological strain rate in the San-in shear zone

*西村 卓也¹、高田 陽一郎²

*Takuya NISHIMURA¹, Youichiro Takada²

1.京都大学防災研究所、2.北海道大学理学研究院

1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2.Faculty of Science, Hokkaido University

はじめに

一昨年と昨年の連合大会において、我々は国土地理院のGNSS連続観測網(GEONET)のデータ解析より、山陰地方の島根県東部から鳥取県にかけて顕著な地殻変動集中域（以下、山陰ひずみ集中帯）が存在していることを指摘し、この地域に新たな稠密GNSS観測網を構築したことを報告した。本講演では、最近の山陰ひずみ集中帯における地殻変動分布と時間スケールの異なる測地・地震・地質（活断層）データからひずみ集中帯及びその周辺のひずみ速度の比較を試みた結果について報告する。

山陰ひずみ集中帯の最近の地殻変動

東北地方太平洋沖地震以前の山陰ひずみ集中帯の変動は、日本海の海岸線に沿って、東西走向の剪断帯が右横ずれ運動をしているという特徴がある。剪断帯を挟む変動速度は、2005-2009年の平均で約4mm/年であり、剪断帯の位置は山陰地方の地震帯にほぼ一致している。新規観測点を含む2013~2015年の平均水平速度場を見ると、変動パターンとしては東北沖地震以前と大きく変わらないものの、変動速度は約6mm/年に増加している。速度の増加は、東北沖地震の余効変動が原因と考えられるが、長波長の広域的な変動だけでなく、ひずみ集中帯付近での局所的な速度の増加も見られており、広域的な余効変動に伴う応力変化に対するひずみ集中帯のレスポンスが含まれている可能性がある。

測地・地震・地質学的ひずみ速度比較

日本列島では、測地学的ひずみ速度が地質学的ひずみ速度に比べて1桁大きいことが知られている。このひずみ速度の違いは、主に測地学的ひずみ速度が沈み込み帯におけるプレート間固着による弾性変形を含んでいるからだと考えられてきた（例えば、池田・他、2012）。山陰地方を含む中国地方は、沈み込み帯からの距離も比較的遠く、ひずみ速度も日本列島の中では小さいことが知られている。このような地域においても、時間スケール及び手法の異なるひずみ速度がどの程度異なるのかを検証するために、北緯34.7-35.7度、東経133.2-134.8度の領域を2×2に等分した領域毎に、測地・地震・地質（活断層）のデータから平均的ひずみ速度を算出した。測地学的速度としては、GNSS変位速度データからShen et al.(1996)の方法で歪み速度を計算した。地震学的速度としては、まず1923年以降の気象庁一元化カタログからモーメント解放速度を計算し、モーメント解放速度とひずみ速度の関係式(WGCEP, 1995)を用いて、ひずみ速度に変換した。地質学的ひずみ速度としては、地震本部及び産総研の活断層データベースに含まれる活断層の長さと同平均変位速度をデータとして、Kaizuka and Imaizumi(1984)の方法でひずみ速度を計算した。これら3つのひずみ速度を比較すると、山崎断層を含む領域を除いて測地学的ひずみ速度が地震学的ひずみ速度より1桁大きく、地質学的ひずみ速度よりも2桁大きかった。一方、山崎断層を含む領域では、3者のひずみ速度が同じ桁となった。また、それぞれのひずみ速度で地域毎を比較すると、測地学的ひずみ速度と地震学的ひずみ速度では山陰側が瀬戸内側に比べて数倍以上大きいものに対し、地質学的ひずみ速度では、山崎断層を含む瀬戸内側の領域が他の地域よりも1桁以上大きかった。測地学的及び地震学的ひずみ速度は、数年から百年の時間スケールのひずみ速度を表すことを考えると、現在の山陰地方のひずみ速度は、地質学的時間スケールの平均ひずみ速度と比べて、はるかに大きくなっていることを示唆する。また、測地学的ひずみ速度が地震学的ひずみ速度よりも大きいことは、測地学的ひずみ速度の大部分が非弾性的変形であることを示唆する。

キーワード：ひずみ集中帯、GNSS、山陰地方

Keywords: Strain concentration zone, GNSS, San-in region

2000年鳥取県西部地震余震域における断層系の分布と断層岩の特徴

Distribution of fault system and its characteristics around the aftershock area of the 2000 Western Tottori earthquake

*向吉 秀樹¹、内田 嗣人¹、小林 健太²、廣野 哲朗³、山口 昌克⁴、山本 康平⁴

*Hideki Mukoyoshi¹, Hideto Uchida¹, Kenta Kobayashi², Tetsuro Hirono³, Masakatsu Yamaguchi⁴, Kohei Yamamoto⁴

1.島根大学大学院総合理工学研究科、2.新潟大学理学部、3.大阪大学大学院理学研究科、4.島根大学理学部
1.Department of Geoscience, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Shimane University, 2.Fuculty of science, 3.Graduate school of science, Osaka University, 4. Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

2000年鳥取県西部地震 (Mj 7.3) は、活断層やその可能性があるリニアメントが認知されていなかった地域で発生した地震である。この地域では、現在においても、Mj 1以上の余震活動が頻繁に観測されている。この余震域周辺において、新学術「地殻ダイナミクス」プロジェクトの一研究課題として、1000点の簡易型地震計口ガーを用いた超高密度な観測が計画されている。本研究では、この高密度地震観測予定地点内における地表地質調査を行い、地震観測に対比させた断層分布や断層岩の特徴を明らかにすることを目的とした。

調査地域は2000年鳥取県西部地震の震央付近を中心とした北西-南東方向の約12 km×4 kmの範囲である。本研究地域周辺には白亜紀後期～古第三紀の主に黒雲母花崗岩からなる花崗岩類が広く分布する。また、花崗岩類を貫く中新世（一部更新世）の中性～塩基性岩脈および酸性岩脈が数多く見られる。

調査の結果、余震域北西部、余震域中央部、余震域南東部において、約1000本の断層が確認された。これらの断層姿勢は地域によって異なる。北西部ではさまざまな方向に断層が発達し、断層姿勢に集中が見られない。一方、中央部では、西北西走向と北東走向に断層姿勢の集中が見られる。また、南西部では北北西から北西方向と北東方向に断層姿勢の集中が見られる。断層岩は主に厚さ数mm～数cmの断層ガウジおよび厚さ数cm程度のカタクレーサイトからなる。ほとんどのカタクレーサイトが熱水の影響により変質しており、淡橙色や淡緑色を示す。また、北西走向および北東走向の複数の断層において、互いに切断関係が認められる。

2000年鳥取県西部地震後の地震観測から求められた亀裂分布（行武，2010）は、震央北西部では幅広い亀裂分布を示し、その方向にもばらつきがみられる。一方、震央から南東部にかけては、亀裂は余震域の中心部に集中し、その方向も北西走向に集中している（行武，2010）。本調査で確認された断層調査地域ごとの断層姿勢の違いは、地震観測から求められた亀裂分布の方向と概ね一致する。このことは、2000年鳥取県西部地震を発生させた断層の幾何学と、地質時代に形成された断層の規模や姿勢に相互関係があることを示している。カタクレーサイトにみられる熱水変質は、カタクレーサイトが地下において熱水のある環境下で形成されたことを示しており、断層活動への流体の関与が強く示唆される。2000年鳥取県西部地震後の地形判読において、複数のリニアメントが判読されたが、各リニアメントの長さはいずれも10km以下と短く、また、共役関係にあると考えられているリニアメントも判読されている（高田ほか，2003）。本調査で観察された北西方向および北東走向の断層に見られる切断関係は、共役関係にある断層のどちらかが優先的に発達することではなく、互いに切断しあうことによって生じる断層のセグメント化を見ている可能性がある。詳細は現在調査中であるが、このような切断関係により、2000年鳥取県西部地震の余震域周辺においては、明瞭なリニアメントが発達することなく、小規模で明瞭性に欠く複数のリニアメントが存在しているのかもしれない。

キーワード：2000年鳥取県西部地震

Keywords: 2000 Western Tottori earthquake

日本列島基本構造モデルの構築 -海溝軸・プレート境界モデル-

Fundamental Structure Model of Island Arcs and Subducted Plates in and around Japan

-Trench and Plate Boundary Models -

*岩崎 貴哉¹、佐藤 比呂志¹、篠原 雅尚¹、石山 達也¹、橋間 昭徳¹、程塚 保行²、雨宮 由美²

*Takaya Iwasaki¹, Hiroshi Sato¹, Masanao Shinohara¹, Tatsuya Ishiyama¹, Akinori Hashima¹, Yasuyuki Hodotsuka², YUMI AMEMIYA²

1.東京大学地震研究所、2.株式会社海洋先端技術研究所

1.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2.Ocean High Technology, Inc.

The eastern margin of the Asian continent is a well-known subduction zone, where the Pacific (PAC) and Philippine Sea (PHS) plates are being subducted. In this region, several island arcs (Kuril, Northeast Japan, Southwest Japan, Izu-Bonin and Ryukyu arcs) meet one another to form a very complicated tectonic environment. At 2014, we started to construct fundamental structure models for island arcs and subducted plates in and around Japan. Our research is composed of 6 items of (1) topography, (2) plate geometry, (3) fault models, (4) the Moho and brittle-ductile transition zone, (5) the lithosphere-asthenosphere boundary, and (6) petrological/rheological models.

This paper is mainly related with the results of items (1) and (2). The area of our modelling is set 12°-54° N and 118°-164° E to cover almost the entire part of Japanese Islands together with Kuril, Ryukyu and Izu-Bonin trenches. The topography model was constructed from the 500-m mesh data provided from GSJ, JODC, GINA and Alaska University.

Plate geometry models are being constructed for the Pacific and Philippine Sea plates through the two steps. In the first step, we constructed "base" models with very smooth boundaries in our whole model area, providing fundamental geometry of the plates. For 41,892 earthquake data from JMA, USGS and ISC, 7,853 cross sections were taken with several different directions to the trench axes. 2D plate boundaries were defined by fitting to the earthquake distribution forming the Wadati-Benioff zone, from which we obtained equi-depth points for each boundary. These equi-depth points were approximated by spline interpolation technique to make longer wave-length (>75-150 km) equi-depth lines of the plate boundary. The grid data for the individual 3-D "base" plate models were constructed from these equi-depth lines.

As the second step, regional plate configuration including shorter wave-length geometry (<50-100 km) is being constrained in the vicinity of Japan by recent results from seismic tomography, RF analysis and active source experiment. We have collected 44 references, from which plate position data were constructed. These data are used as 'correction terms' which are superposed to the "base" plate models described above. Preliminary analysis indicates that the plate boundary of the PAC plate from the controlled source experiments is systematically shallower than that from natural earthquakes in a depth range of 10-30 km, which may arise from the difference between the structural and mechanical boundaries of the subducted plate. These regional data are also very important for modelling the PHS plate, particularly beneath the SW Japan arc with less seismic activity.

キーワード：構造、プレート境界、海溝

Keywords: tectonic structure, plate boundary, trench

地震, 測地, 地形データから推定される島弧地殻の変形速度

Deformation rates of island-arc crust estimated from seismic, geodetic, and geomorphic data

*松浦 充宏¹、野田 朱美²、深畑 幸俊³

*Mitsuhiro Matsu'ura¹, Akemi Noda², Yukitoshi Fukahata³

1.統計数理研究所、2.構造計画研究所、3.京都大学防災研究所

1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Kozo Keikaku Engineering Inc., 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Steady plate subduction brings about steady uplift of the island-arc lithosphere [1]. This process is simply explained as convex upward bending of an elastic plate by the effect of gravity [2]. So, there is no analogy in mechanism between the steady uplift and steady horizontal shortening or stretching of island-arc crust. The island-arc crust is basically elastic, but it includes a number of defects. Brittle fracture and/or plastic flow at these defects, which occur so as to release the overall elastic strain energy produced by mechanical interaction at plate interfaces, cause the horizontal shortening or stretching of island-arc crust [3]. To sum up, the crustal shortening or stretching is a purely inelastic deformation process. In northeast Japan, for example, the evidence of crustal shortening has been reported from seismic, geodetic, and geomorphic data [4, 5]. The point is a discrepancy in its rates. One of the reasons is difference in the length of observation periods. Actually, geodetic observation is too short to cover the entire cycle of large earthquakes. Another, more essential, reason is that different kinds of data provide different information about crustal deformation; that is, seismic and geomorphic data provide information about purely inelastic crustal deformation, whereas geodetic data provide information about total (elastic + inelastic) crustal deformation. So, we cannot directly compare the crustal shortening rates from geodetic data with those from seismic and geomorphic data unless geodetically observed deformation is divided into the elastic and inelastic parts [3].

References

- [1] Matsu'ura, M. and T. Sato (1989), A dislocation model for the earthquake cycle at convergent plate boundaries, *Geophys. J. Int.*, 96, 23-32.
- [2] Fukahata, Y. and M. Matsu'ura (2016), Characteristics of island arc deformation due to steady plate subduction, *Geophys. J. Int.*, 204, 825-840.
- [3] Noda, A. and M. Matsu'ura (2010), Physics-based GPS data inversion to estimate 3-D elastic and inelastic strain fields, *Geophys. J. Int.*, 182, 513-530.
- [4] Wesnousky, S.G., C.H. Scholz, and K. Shimazaki (1982), Deformation of island arc: Rates of moment release and crustal shortening in intraplate Japan determined from seismicity and Quaternary fault data, *J. Geophys. Res.*, 87, 6829-6852.
- [5] Ikeda, Y., S. Okada, and M. Tajikara (2012), Long-term strain buildup in the Northeast Japan arc-trench system and its implications for gigantic strain-release events, *J. Geol. Soc. Jpn.*, 118, 294-312.

キーワード：島弧地殻、変形速度、非弾性歪み、地震データ、測地データ、地形データ

Keywords: island arc, deformation rate, inelastic strain, seismic data, geodetic data, geomorphic data

湿潤変動帯の山地におけるテクトニクス—削剥—地形発達のリンケージ：宇宙線生成核種を用いたアプローチ

Linkages between tectonics, denudation, and landscape evolution in humid active orogens, revealed by terrestrial cosmogenic nuclides

*松四 雄騎¹

*Yuki Matsushi¹

1.京都大学防災研究所 地盤災害研究部門 山地災害環境分野
1.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

地球表面には宇宙線由来の中性子やミューオンが常に降り注いでおり、地表近傍の鉱物結晶中には、造岩元素の原子核と宇宙線粒子との核反応の結果として宇宙線生成核種が蓄積する。鉱物中の宇宙線生成核種の濃度は、その鉱物粒子の宇宙線への曝露量を反映する。石英のような核種生成率が既知の鉱物試料に含まれる宇宙線生成核種を加速器質量分析で定量することにより、その場の地表面が形成されてからの経過時間（露出年代）や、地表面が侵食によって更新されてゆく速度（削剥速度）を知ることができる。本講演では、日本の山地の削剥速度を宇宙線生成核種の適用によって定量化した研究を紹介し、小起伏でなだらかな丘陵から大起伏で急峻な山岳まで、湿潤変動帯の多様な地形の条件下における山地の削剥過程をテクトニクスと関連付けて議論する。

キーワード：宇宙線生成核種、削剥速度、低温域熱史解析、地理情報システム、地形発達モデル

Keywords: terrestrial cosmogenic nuclides, denudation rate, low-temperature thermochronology, geographic information systems, landscape evolution modeling

東北沖地震間における東北日本弧の変形過程：垂直変動と水平歪

Deformation processes of island arc during the interseismic period of Tohoku-oki earthquake: Vertical movement and horizontal strains

*芝崎 文一郎¹、松本 拓己²、西村 卓也³、三浦 哲⁴、武藤 潤⁴、飯沼 卓史⁵

*Bunichiro Shibazaki¹, Takumi Matsumoto², Takuya NISHIMURA³, Satoshi Miura⁴, Jun Muto⁴, Takeshi Iinuma⁵

1.建築研究所国際地震工学センター、2.防災科学技術研究所、3.京都大学防災研究所、4.東北大学大学院理学研究科、5.海洋研究開発機構

1.International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Building Research Institute, 2.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 3.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 4.Graduate School of Science, Tohoku University, 5.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

This study models the deformation of the crust and upper mantle of the northeastern Japan island arc during the interseismic period of the Tohoku-oki earthquake considering heterogeneous rheological structure. Nishimura (2012) investigated the crustal deformation of northeastern Japan based on geodetic data for the 120-year period preceding the 2011 Tohoku-oki earthquake. The results indicate north-south extension and east-west compression along the central axis of northeastern Japan. Vertical deformation data for a 100-year period indicates uplift in the backarc region but subsidence in the forearc region. Recently, Shibazaki et al. (2014) calculated the effective viscosity of the crust and upper mantle of the Japanese island arc based on the thermal structure obtained by dense geothermal observations using Hi-net boreholes (Matsumoto, 2007) and by Tanaka et al. (2004). They reproduced several elongated low-viscosity regions in the crust and upper mantle of the northeastern Japan arc, striking transverse to the arc, which correspond to hot fingers. We develop a finite element model of the viscoelastic deformation processes during the interseismic period considering heterogeneous viscosity structures. In order to model interseismic coupling, we give back-slip along the subduction plate boundary for 500 years. We investigate several cases by changing back-slip distribution to model interseismic deformation. To reproduce the uplift observed from the volcanic front to the backarc and the subsidence in the forearc, we need to consider back-slips at the deeper subduction plate interface. In this region, the back-slip rate decreases from 8 cm/yr at a depth of 40 km to 0 cm/yr at a depth of 90 km. Compared with the model with only elastic structures, the smaller amount of the deep back-slip is necessary for the model with the heterogeneous viscoelastic structure to reproduce the observed uplift. Strain rates during the interseismic period show east-west compression and north-south extension. Our results indicate that the heterogeneous rheological structure of the crust and upper mantle of the island arc and back-slip at the deeper region are necessary to reproduce the observed interseismic strain distribution and vertical deformation.

キーワード：東北沖地震、東北日本弧、地震間の変形、粘弾性、バックスリップ、深部における固着
Keywords: The Tohoku-oki earthquake, The northeastern Japan arc, Interseismic deformation, Viscoelasticity, Back-slip, Deep coupling

岩手・宮城内陸地震震源域の3次元流体分布と地殻変動

Three dimensional fluid distribution and crustal deformation around the focal area of Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake

鈴木 惇史²、*小川 康雄¹、齋藤 全史郎²、潮田 雅司⁵、市原 寛³、市來 雅啓⁴、三品 正明
Atsushi Suzuki², *Yasuo Ogawa¹, Zenshiro Saito², Masashi Ushioda⁵, Hiroshi Ichihara³, Masahiro
Ichiki⁴, Masaaki Mishina

1.東京工業大学火山流体研究センター、2.東京工業大学地球惑星科学専攻、3.神戸大学、4.東北大学、5.産総研

1.VFRC Titech, 2.EPS Titech, 3.Kobe Univ., 4.Tohoku Univ., 5.AIST

The 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake (M 7.2) was an unusually large earthquake, which occurred near the volcanic regions. We used new data at 66 sites in a few kilometer grid intervals and existing data at 44 sites on three profiles. We inverted detailed 3d resistivity structure. In our final resistivity structures, aftershocks are distributed in high resistivity zones and avoiding low resistivity anomalies. We found a pathway of fluids from Mt. Kurikoma to the hypocentral area at 10km depth. The hypocenter is located at the rim of the conductor.

Large coseismic slip zones are located in high resistivity in our model. On the other hand, post-seismic slip zones are located in low resistivity zones and high resistivity zones. Iinuma et al.(2009) showed two different kinds of triggers of post-seismic slips. One comes from fluids and the other comes from the static stress change caused by mainshock. Our results imply the different triggers of post-seismic slips as implying in the previous work. These results would come from the difference of character like ductile or brittle and the existence of fluids.

キーワード：流体、比抵抗、地殻変動、マグネトテルリック法

Keywords: fluids, resistivity, crustal deformation, magnetotellurics

東北日本背弧における島弧直交方向の山地の成因：南北圧縮の重要性

On the causes of across-arc mountain ranges in the back-arc region of Tohoku arc:

Importance of north-south compression

*深畑 幸俊¹

*Yukitoshi Fukahata¹

1. 京都大学防災研究所

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

東北地方では基本的に島弧の走向方向である南北方向に地形の連続性が良い。山地で言えば太平洋側から順に、北上・阿武隈山地、奥羽脊梁山脈、出羽山地が配列する。その一方、火山フロントをなす脊梁山脈よりも背弧側では、島弧の横断方向（東西方向）にも明瞭な地形的高まりが認められる。北から順に、白神山地、森吉山・太平山地、神室山地・丁岳山地（烏海山）、月山・朝日山地、飯豊山地といった具合である。この東西方向の地形的高まりは、火山分布やトモグラフィによる地震波低速度域と良い対応を示し、その説明として、島弧下のマンテルウェッジで背弧側から脊梁山脈下に向かって指状に熱いマンテル物質が上昇してくるモデル (hot finger model; Tamura et al., 2002) が提唱され広く受け入れられている。

しかし、世界中の沈み込み帯を広く見渡してみると、東北日本のように島弧の走向と直交する方向に山地列が分布することはほとんど全くない。敢えて言えば、やや斜行しているが、伊豆弧の北端部で類似した構造が認められるくらいである。このことは、マンテルウェッジでの上昇流という他の島弧でも起こるであろう一般的な理由のみによる説明では、本質的に不十分であることを示唆する。

世界中の島弧において、地形的高まりと火山分布の関係を調べてみると、圧縮場においては常に火山フロントが地形的高まりと一致することが分かる。その一方、伸張場ではこの関係は成り立たない。従って、東北日本では、まず東西圧縮応力が重要であるが（それにより、南北走向の山地が形成されている）、第二義的には南北圧縮応力が重要ではないかと考えられる。地震のメカニズム解も東西方向に圧縮軸を持つ逆断層タイプが多く、この考えと矛盾しない。

キーワード：東北日本弧、沈み込み帯、梯子状構造

Keywords: Northeast Japan arc, subduction zone, ladder structure

東北日本の応力不均質と2011年東北沖地震による誘発地震活動

Stress heterogeneity in northeastern Japan and its relationship with induced seismic activities by the 2011 Tohoku-Oki earthquake

*吉田 圭佑¹、長谷川 昭²、松澤 暢²

*Keisuke Yoshida¹, Akira Hasegawa², Toru Matsuzawa²

1.国立研究開発法人 防災科学技術研究所、2.東北大学

1.National research institute for earth science and disaster prevention, 2.Tohoku University

大地震は、多くの場合、余震・誘発地震活動を伴うことが知られている。その発生原因は必ずしもよくわかっていては、主に次の3つの効果が考えられる。(1) 静的応力変化によるクーロン応力増加、(2) 動的応力変化によるクーロン応力増加、(3) 間隙水圧増加に伴う摩擦強度の減少である。

2011年 M9東北沖地震においては、その規模のため、誘発地震活動の活発化が、大すべり域から数百 km以上離れた内陸部にまで及んだ。この地震の場合、その規模が極めて大きいことから、現象を通常では解像できないような詳細な特徴まで拡大してみることができると期待される。したがって、誘発地震活動の発生メカニズムを理解する上で有用であると考えられる。本研究では、誘発地震活動の発生原因の理解のため、既存研究の結果を整理するとともに、東北沖地震前後の地震活動・メカニズム解・応力場の詳細な特徴を調べた。

東北沖地震による誘発地震活動は、クラスター状に分布し、その発生位置は、東北日本において以前から地震活動が活発であった場所と空間的に異なる場合が多い。メカニズム解としては、東北沖地震発生前に顕著であった東西圧縮の逆断層型とは大きく異なるものが見られる。それらの誘発地震活動に、応力テンソル・インバージョン法を適用すると、東北沖地震による静的応力変化とほぼ一致する応力方向が得られる [Yoshida et al., 2012]。このことは二つの可能性を示唆する；1) 2011年東北沖地震の静的応力変化により、応力の方向が回転。2) 東北日本の中で元々周囲と応力方向が異なる領域が存在し、その応力方向が静的応力変化と一致したことによる地震トリガー。

両者を区別する目的で、東北大学の読み取りデータ (1980-2003年) により新たにメカニズム解を推定し、それをYoshida et al. (2015a)で求められたデータセットと併せて応力推定に用いることで、東北地震前の応力の詳細な空間分布を調べた。東北日本の島弧・背弧域においては、最大水平圧縮方向が、非常に一様に西北西-東南東方向を向くことが知られているが、応力方向がそれと顕著に異なる小領域が複数見つかった。それらの領域は、東北沖地震後に、周囲と異なるメカニズム解で地震が発生した領域に近く、そのメカニズム解と調和的な応力方向を持つ。このことは、(2)の可能性を示唆する。

それらの領域は、1896年陸羽地震や、1904年庄内地震、1913年秋田仙北地震などの過去の大地震の震源域に対応しているように見える。最近発生した2008年岩手・宮城内陸地震や 2011年福島県浜通り地震においては、本震後の応力方向が空間変化を持ち、そのパターンが本震の静的応力変化とよく一致することから、それらの本震の静的応力変化により応力が擾乱した可能性が示唆されている [Yoshida et al., 2014; Yoshida et al., 2015a]。かつての同規模の地震の場合にも、同様の応力の回転が生じて、現在までそれが残っていることを意味しているのかもしれない。そのようなことは、東北日本における応力場と地形の相関から見積もられた差応力の絶対値 ~ 20 MPa [Yoshida et al., 2015b] が正しければ、十分に起こりそうである。あるいは、温度構造による影響 [芝崎・他, 2015, SSJ]や、千島スリバーによる影響 (T. Yoshida et al., 2013)も含まれているかもしれない。

関東地方においては、東北沖地震前から活動が活発であった領域で、東北沖地震後に地震活動の活発化がみられる。これらの地域においては、広域応力と静的応力変化と方向が一致していることにより、応力が増加し活発化したと考えることができる [Yoshida et al., 2012]。

一方で、静的応力変化では活発化が説明できない領域も存在する。山形-福島県境付近で活発化した顕著なクラスターは、静的応力変化によりクーロン応力が低下する領域に位置する [e.g. Terakawa et al., 2012]。このクラスターでは、地震の活発化が東北沖地震の発生直後ではないこと、地震活動の明瞭なmigrationが見られること、大峠カルデラの真下に位置することから、間隙流体圧による影響が示唆されている。吉田・長谷川 [2015, SSJ]では、メカニズム解の多様性を用いて、摩擦強度の時間発展を調べた。その結果、メカニズム解の

多様性の変化に伴う、強度の時間的増加傾向が見られた。このことは、この活動が、東北沖地震後に地殻深部から上昇し拡散していった流体に起因すると考えれば理解できる。

以上のことは、地震発生の理解のために、応力・強度両方の理解が不可欠であることを示す。地震発生に至る応力・強度の時間発展について、詳細な情報を得ることは非常に難しいが、今回見つかったおよそ100年前の大震災震源域における空間不均質性の時間発展を追うことが、その重要な手掛かりになり得ると考えられる。

キーワード：2011年東北沖地震、誘発地震活動、応力、摩擦強度

Keywords: the 2011 Tohoku-Oki earthquake, induced seismicity, stress, frictional strength

茨城県北部・いわき地域における誘発地震発生域の断層面分布

Various fault geometries in the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki

*加藤 愛太郎¹、小原 一成²、酒井 慎一²、武田 哲也³、飯高 隆²、岩崎 貴哉²

*Aitaro Kato¹, Kazushige Obara², Shin'ichi Sakai², Tetsuya Takeda³, Takashi Iidaka², Takaya Iwasaki²

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.東京大学地震研究所、3.防災科学技術研究所

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3.National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

We relocated numerous earthquakes in the source regions of normal faulting sequences induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki, using seismic waveforms retrieved from a dense seismic network deployed after the Tohoku-Oki earthquake. The seismic network has consisted of around 60 portable stations equipped with short-period sensors. Initially, we detected earthquakes from continuous waveforms from July 2011 to June 2014, by applying an automatic detection algorithm. Then, we calculated differential arrival times obtained by the automatically picked and waveform correlation method. We obtained more accurate differential arrival times that contained 56 million P wave observations and 51 million S wave observations for use in the double difference relocation. Applying a double-difference algorithm to the arrival data-set, we succeeded to relocate ~200000 earthquakes with high accuracy. We found that most earthquakes show planar alignments, and the fault distribution varies along the source region. At the northern part, many tiny fault planes are distributed like a flower structure. In contrast, a sharp fault well develops in the central portion. The thinnest width of the sharp fault is close to only 100 m. At the southern part, there are some conjugate fault systems. These spatial variations of fault geometries in the source region of normal faulting sequence reflect fault evolutions.

北海道南西沖地震震源域に分布する断層関連褶曲と余震分布の関係性

Relationship between fault-related folds in the focal area of the Hokkaido Nansei-Oki Earthquake and the aftershock distribution

*森 宏¹、阿部 信太郎¹、青柳 恭平²*Hiroshi Mori¹, Shintaro Abe¹, Yasuhira Aoyagi²

1.産業技術総合研究所、2.電力中央研究所

1.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), 2.Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)

新潟県沖から北海道沖の日本海東縁部においては、後期鮮新世以降の東西圧縮によって多くの逆断層が発達し、それに伴って幅10-20 km程度の並列した断層関連褶曲が形成され、全体としては長さ約1000 km、幅100 km以上に達する大規模なひずみ集中帯が形成されている^[6]。また、これら逆断層の活動により、20世紀以降だけでもマグニチュード(M)7を超える地震が複数回発生し(e.g. 1983年・日本海中部地震)、大きな被害が生じている。その一つとして、日本海東縁中部^[6]に位置する奥尻島周辺では、1993年7月に、M7.8の北海道南西沖地震が発生した。同地震発生時およびその直後には、地震学的観測データが得られており^{e.g.[2],[3]}、これらを基にした震源断層モデルの提案^{e.g.[1],[4]}、さらには津波の数値シミュレーションも行われている^{e.g.[5]}。その一方で、奥尻島周辺海域における断層分布・形状を含めた地質構造(浅部の地殻構造)の詳細は明らかとなっておらず、奥尻島周辺の変動地形や北海道南西沖地震の震源断層との関係性についても未解明な点が多い。本研究では、奥尻島周辺海域で取得された反射法音波探査記録に基づいて、北海道南西沖地震の震源海域における断層分布・性状を含めて地質構造を明らかにし、北海道南西沖地震の震源断層と累積的な変位を伴う地質構造の関連性を検討した。

使用したデータは、産業技術総合研究所(旧地質調査所)により、日本周辺海域における地質図整備の一環としてGH94・GH95航海で取得されたシングルチャンネル反射法音波探査記録である。調査対象は、奥尻島を中心とした南北約170 km、東西約130 km(約41°20'-42°50'N, 約138°50'-140°20'E)の範囲であり、約4 km間隔の格子状の測線に沿って探査記録が得られている。

本海域はひずみ集中帯特有の海嶺と海盆を繰り返した複雑な海底地形を呈するとともに、これら海底地形と地質構造の間には明瞭な対応関係が認められる。特に、奥尻島以南の日本海盆東縁、奥尻海脚西縁、大陸棚縁辺部の急崖に沿っては、顕著な基盤の高まりが発達する。また、日本海東縁部において特徴的な構造として捉えられている断層関連褶曲が、本調査範囲内でも発達しており、一部では褶曲に伴う海底地形の変位も認められる。これら基盤高低差および褶曲構造の側方への連続性の追跡より推定される断層としては、南北走向の断層長数十km以上の逆断層が卓越して分布する。奥尻島以南では、西から東に、日本海盆内、奥尻海脚周辺、および大陸棚縁辺部の各海域において、主に東傾斜を呈する逆断層が発達し、三列の断層帯を形成している。一方、奥尻島以北では、奥尻海嶺周辺において、西傾斜の逆断層群が卓越し、全体として数十kmの幅を持った断層帯として捉えられる。

本研究により確認された断層分布位置と、青柳ほか(2000)の余震分布を比較すると、奥尻島以南では、奥尻海脚西の急崖に沿って発達する東傾斜の逆断層の分布に概ね一致する。奥尻島以北でも、日本海盆内に分布する西傾斜の逆断層に沿って余震分布が集中する。また、これら余震分布を基に推定された震源断層モデルの断層形状^[1]とも概ね一致しており、本研究によって、反射法音波探査より推定される浅部の地質構造と地震学的観測データに基づく深部構造の整合性が示された。

今後、本研究で得られた浅部の地質構造を考慮するとともに、浅部堆積層の変形構造に基づく断層の活動性等も明らかにすることで、より高精度な断層モデルの構築につながると期待される。

【引用文献】

[1] 青柳ほか. 2000. 電力中央研究所報告, U99077, 18p.

[2] 青柳ほか. 1998. 地震, 2, 451-459.

[3] 日野ほか. 1994. 月刊地球特集号「北海道南西沖地震と津波」, 35-42.

- [4] 久家ほか. 1994. 月刊地球特集号「北海道南西沖地震と津波」, 21-28.
- [5] 松山ほか. 2002. 電力中央研究所報告, U99034, 18p.
- [6] 岡村ほか. 1998. 地質調査所月報, 49, 1-18.

キーワード：北海道南西沖地震、日本海東縁部、ひずみ集中帯、震源域、断層関連褶曲、奥尻島

Keywords: Hokkaido Nansei-Okai Earthquake, eastern margin of the Japan Sea, contraction deformation zone, focal area, fault-related fold, Okushiri Island

地震のモーメントテンソルから見た九州地方における地震発生層の非弾性ひずみ

Inelastic strain in the seismogenic zone, Kyushu, Japan inferred from focal mechanism of earthquakes

*松本 聡¹、西村 卓也²

*Satoshi Matsumoto¹, Takuya NISHIMURA²

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、2.京都大学防災研究所地震予知研究センター
1.Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Sciences, Kyushu University, 2.Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Strain in the seismogenic zone of the crust is a key parameter to understand crustal dynamics. GNSS data provide us with great information about deformation rate at the surface, which have been investigated by many researches and modeled kinematic behavior as elastic medium. Generally, strain in the earth's medium consists with elastic and inelastic ones. The two kinds of strain result different effects on the stress field. Therefore, detecting inelastic strain is important to know state of stress in the crust as well as elastic one. Inelastic strain is caused by such as fault creep, viscoelastic response, and earthquakes. Here, we showed the inelastic strain in the seismogenic zone of Kyushu, Japan from seismic moments and focal mechanisms data by counting Kostrov's sum in the spatial bins. Seismic moment tensors about 9000 earthquakes with magnitude greater than 2 for 13.5 years were obtained from seismic network data in Kyushu Island and F-net catalog. Total released moment at every spatial bin with 0.15×0.15 degree in latitude and longitude was estimated and then strain rate was calculated from the moment, compliance of the medium, and volume of the bin. The estimated maximum strain rate achieves 10^{-7} strain/year. This strain rate is comparable with that from GNSS data. However, the strain rate mainly revealed the different principal direction from the one of GNSS. On the other hand, the directions were similar to the behavior of active faults in Kyushu. The result in this study showed that inelastic strain due to earthquakes is enough large, suggesting that the effect should be considered for modeling crustal dynamics.

キーワード：非弾性ひずみ、地震モーメントテンソル、九州

Keywords: inelastic strain, seismic moment tensor, Kyushu

高密度GNSS速度場のクラスタ解析による日本列島の変形場の解析

Cluster Analysis of the Velocity Field in the Japanese Islands Derived from Dense GEONET Data

*高橋 温志¹、橋本 学²*Atsushi Takahashi¹, Manabu Hashimoto²

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

地震活動や活断層の形成は、固体地球内部の変形の集中によるものと考えられる。したがって、観測データから変形境界をとらえることは、テクトニクス理解において根本的で重要な課題である。近年、GNSS速度場にクラスタ解析を適用し、地殻変動の空間的な分類を行う試みがアメリカ西海岸でなされて大きな成果を上げている。Simpson et al. (2012)およびSavage and Simpson (2013)は、それぞれアメリカ・カリフォルニア州のサンフランシスコ・ベイエリア、モハーベ砂漠のGNSS速度場データにクラスタ解析を適用し、地殻ブロックの運動境界を推定した。得られた境界は既知の断層系とよい対応関係を示し、地殻ブロックを定量的な基準で決定する方法として、有力な手法の一つであることを示した。

本研究では先行研究の手法に改良を加えて、日本列島に適用し、得られたクラスタ境界の結果を地質情報等と比較することにより、手法の有効性を検証した。本研究ではGNSS観測データの水平成分に、クラスタ解析のアルゴリズムの一つである階層型凝集クラスタリング(Hierarchical Agglomerative Clustering)アルゴリズムを適用し解析した。階層型凝集アルゴリズムとは、速度空間上の構成要素(以下、データと呼ぶ)を、その幾何学的な距離に応じて順番に結合していく手法である。まず、初期データ数をM個用意し、初期クラスタとする。次に、データ間の距離を計算し、もっとも距離の近いデータを選び、その重心に新たなデータを作成する。選ばれたデータをクラスタの構成要素(以下、メンバーと呼ぶ)に追加し、そのデータを削除する。この処理をデータが最後の一つになるまで繰り返すことで、クラスタの階層を作成する手法である。高い階層のクラスタは大きな運動像を反映し、低い階層のクラスタは小さな地殻構造を反映する。

しかし、主要な地殻構造を反映した適切なクラスタ階層の決定方法には任意性が残る。先行研究はクラスタ階層を決める際の手法にGap Statisticsという統計評価関数を用いた。この手法はランダムな標本と得られたデータのまとまり具合を比較することで分割の有意度を決定する手法である。しかしながら、ランダム標本のサンプリング方法に任意性が残っており、サンプリングエリアのサイズを変えれば有意に違う結果を導いてしまう根本的な問題があった。

本研究ではクラスタ間、クラスタ内標準偏差比を使ったシンプルなクラスタ評価関数を提案し導入した。基本的な考えは、主要な構造よりも細分割すると、クラスタのサイズの変化率が大きく鈍るという特徴を使い、その屈曲点を最適値として選ぶ方法である。その結果、先行研究の手法面での問題を解決し、最適なクラスタ階層(クラスタ数)を決定し、観測されている速度場の中に見られる主要なグループを特定した。

導入した評価関数に基づいてクラスタ階層を決定した結果、地理的な拘束条件を課していないにもかかわらず、地域的に相関をもった速度場のグループを推定することができた。その結果、地域的な運動像を見通しよく考えられるようになった。加えて、大部分のクラスタ境界は既知の主要な断層系とよい対応を示した。よって、求まったクラスタ境界は地殻ブロックの境界の候補を、GNSSデータのみから統計的に提案することが出来た。加えて相対運動の大きな様子も捉えられた。さらに、解析地域の内部変形の度合いが最適値をとったときのクラスタ間・クラスタ内標準偏差比として求めることができ、地域性を反映した。

具体的な結果として、九州地方中部では、南北伸長、東西圧縮を示すダブルカップルを示唆するクラスタ境界が得られた。近畿地方では有馬・高槻構造線や花折断層・琵琶湖西岸断層系がクラスタ境界と対応した。

キーワード：GNSS、地殻変動、統計処理

Keywords: GNSS, Crustal Deformation, Statistics

ダイク貫入時における非地震性横ずれすべりの検出：2005-2010年エチオピア・Afar
Aseismic strike slip associated with the 2005-2010 Afar rifting event

*姫松 裕志¹、古屋 正人¹

*Yuji Himematsu¹, Masato Furuya¹

1.北海道大学大学院理学院

1.Graduate School of Science, Hokkaido University

Himematsu and Furuya (2015) は2007年にNatron湖（タンザニア北部）で発生したダイク貫入イベント時にグラーベン構造の沈降領域で非地震性横ずれ滑りの発生を示唆するシグナルを検出した。これまではリフト帯で発生する群発地震とマグマ貫入を伴うダイク貫入イベント時に生じる地殻変動において、変動域中央部に位置するグラーベンの沈降領域は水平変動を伴わずに、ただ鉛直下向きに沈降する挙動が想定されていた。東西の引張応力場下にあるNatron湖において拡大軸と平行方向のおよそ南向きへの変動の発生を指摘したシグナルは、これまでリフト帯で発生したダイク貫入イベントに伴う地殻変動を扱ったどの先行研究でも指摘されていなかった。

そこで我々は2005-2010年にエチオピアのAfar盆地で断続的に発生したダイク貫入イベントに伴う地殻変動データの再解析を行った。グラーベンの沈降領域における横ずれ滑りを示すシグナルは2007年Natron湖のイベントで特有なものなのか、リフト帯におけるダイク貫入イベントで普遍的に発生しているものなのかを検証することが本研究の目的である。一連のイベントで一番初めに発生した2005年9月のイベントに伴う3次元地殻変動はSARデータや光学画像データを用いて先行研究で既に報告されている (Wright et al., 2005; Grandin et al., 2009)。先行研究が示したイベントに伴う地表3次元変位はグラーベンの沈降領域において顕著な横ずれ滑りの発生を指摘しなかった。一方、2006年以降のイベントに伴う地殻変動データには変動域中央部にデータの欠損が見られ、詳細に地殻変動を検出したとは言えない。我々は先行研究よりも長波長のマイクロ波で観測するSARデータを用いたInSAR解析の結果は、先行研究が示した解析結果のように変動域中央部で変位データの欠損領域が表れてしまった。InSAR解析よりも強健に地殻変動データを得る為にALOS/PALSARデータにOffset trackingを適用した。Offset trackingによって得られる衛星進行方向の変位に感度を持つAzimuth offsetの解析結果は、グラーベン構造を形成するような変動の沈降領域、特に群発地震の震源域の北側において、水平北西向きの変動を示すシグナルを明らかにした。このシグナルはグラーベンの沈降領域における横ずれ滑りに伴う変位が生じなければ説明できない。Azimuth offsetと同様に衛星進行方向の変位に感度を持つMAI (Multiple Aperture Interferometry)の結果も、Azimuth offsetが明らかにしたようにグラーベンの沈降領域において水平北西方向の水平変位を示すシグナルを捉えた。一方衛星視線方向の変動を示すRange offsetの結果は、先行研究でも報告されているグラーベン構造を形成する変位が生じたことを示す地殻変動の発生を明らかにした。これまでAfarのダイク貫入イベントに伴う地殻変動を扱った先行研究はグラーベンの沈降領域における横ずれすべりの存在を明らかにしていない。イベント時における地震波観測の結果も横ずれ地震の発生を指摘していないため、本研究で我々が捉えたグラーベンの沈降領域における横ずれ滑りを示すシグナルは「非地震性横ずれ滑り」の発生を示唆した。我々が検出した沈降領域における水平北西方向の水平横ずれ滑りの発生メカニズムを、群発地震と非地震性横ずれすべりの関連性に注目しながら解明するために、議論をする。

キーワード：ダイク貫入、合成開口レーダ、非地震性すべり、プレート発散境界、群発地震、ALOS/PALSAR
Keywords: Dike intrusion episode, Synthetic Aperture Radar, Aseismic slip, Divergent plate boundary, Earthquake swarm, ALOS/PALSAR

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¹、渡辺 了¹

*Minako Nambu¹, Tohru Watanabe¹

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 ($\sim 10^{-13}$ m²). 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¹、渡辺 了¹

*miho makimura¹, Tohru Watanabe¹

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²、森本 美咲²、渡辺 了¹

*Ryo Sawaki², Misaki Morimoto², Tohru Watanabe¹

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 μ 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²、渡辺 了¹

*Youhei Kaiwa², Tohru Watanabe¹

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¹、石川 正弘¹*Yumiko Tsubokawa¹, Masahiro Ishikawa¹

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 μm 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、ヘデンバージャイト（Hed:CaFeSi₂O₆）成分の異なる天然ディオプサイド単結晶（Di97Hed3:Ca_{0.99}Na_{0.01}Mg_{0.97}Fe_{0.03}Si₂O₆, Di99Hed1:Ca_{0.97}Na_{0.02}Al_{0.02}Mg_{0.86}Fe_{0.13}Si₂O₆）2種類と天然サーラ輝石単結晶（Di87Hed13:Ca_{0.97}Na_{0.02}Mg_{0.86}Fe_{0.13}Al_{0.02}Si₂O₆）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°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°Cの焼結では、それぞれの焼結体は径2 μm 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°Cの焼結では、各焼結体は粒成長が進み5 μm 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 μm ）と粗大化した粒子（>5 μm ）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°Cよりも1230°Cで焼結した場合に、より緻密化が進行し細粒（<2 μm ）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¹、本多 聡子¹

*Masahiro Ishikawa¹, Satoko Honda¹

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バ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回のアベレージングを施した。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¹、石川 正弘¹

*Satoko Honda¹, Masahiro Ishikawa¹

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¹、石川 正弘¹

*Hirokazu Takahashi¹, Masahiro Ishikawa¹

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¹、小川 康雄²、市來 雅啓³、鈴木 惇史¹、木下 雄介¹、Amatyakul Puwis⁴

*Zenshiro Saito¹, Yasuo Ogawa², Masahiro Ichiki³, Atsushi Suzuki¹, Yusuke Kinoshita¹, Puwis Amatyakul⁴

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

*Koki Aizawa¹, Takao Koyama², Azusa Shito¹, Asuma Wakabayashi⁴, Masahiro Miyazaki³, Kazunari Uchida¹, Yuko Tsukashima¹, Kaori Tsukamoto⁴, Kanade Takashima¹, Kentaro Kondo¹, Hiroki Kawamoto⁴, Shiori Fujita¹, Yuto Yamamoto⁴, Miki Ogata⁴, Makoto Uyeshima²

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¹、市來 雅啓²、坂中 伸也³、田村 慎⁴

*Makoto Uyeshima¹, Masahiro Ichiki², Shin'ya Sakanaka³, Makoto Tamura⁴

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¹、稲生 千咲¹、コニン マリナン²*Jun Kameda¹, Chisaki Inaoi¹, Marianne Conin²

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 (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ and 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 Ca^{2+} and Mg^{2+} are higher in the slip zone than in surrounding host rocks, while Na^+ is depleted in the slip zone. K^+ shows a complicated depth profile, and this is probably due to strong interaction of 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 Ca^{2+} - Mg^{2+} - Na^+ . Comparison of the coefficients suggests that Na^+ to 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¹、小山内 康人²、大和田 正明³、角替 敏昭⁴、外田 智千⁵、重松 紀生⁶

*Tsuyoshi Toyoshima¹, Yasuhito Osanai², Masaaki Owada³, Toshiaki Tsunogae⁴, Tomokazu Hokada⁵, Norio Shigematsu⁶

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¹、Sutherland Rupert²、Townend John³、Toy Virginia⁴、加藤 尚希⁵、米谷 優佑⁶、林 為人⁷、西川 治⁸、森 宏¹、DFDP-2 Science Team

*Norio Shigematsu¹, Rupert Sutherland², John Townend³, Virginia Toy⁴, Naoki Kato⁵, yusuke kometani⁶, Weiren Lin⁷, Osamu Nishikawa⁸, Hiroshi Mori¹, 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¹、河合 研志²、片山 郁夫³*Hiroshi Sakuma¹, Kenji Kawai², Ikuo Katayama³

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¹、松澤 暢²、長谷川 昭²、日野 亮太²、堀 高峰¹

*Keisuke Ariyoshi¹, Toru Matsuzawa², Akira Hasegawa², Ryota Hino², Takane Hori¹

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 σ 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¹、小林 健太²、丹羽 正和³、清水 麻由子³、小松 哲也³、安江 健一³、堀内 泰治³

*Takuma Katori¹, Kenta Kobayashi², Masakazu Niwa³, Mayuko Shimizu³, Tetsuya Komatsu³, Ken-ichi Yasue³, Yasuharu Horiuchi³

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¹、藤内 智士²

*Yu Tabuchi¹, Satoshi Tonai²

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¹、竹下 徹¹、岡本 あゆみ¹*Shun Arai¹, Toru Takeshita¹, Ayumi S. Okamoto¹

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¹、道林 克禎²

*Hiroto Endo¹, Katsuyoshi Michibayashi²

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 μ 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¹、稲生 千咲²、*大谷 具幸¹、亀田 純²、重松 紀生³、小嶋 智¹

Yuta Yamada¹, Chisaki Inaoi², *Tomoyuki Ohtani¹, Jun Kameda², Norio Shigematsu³, Satoru Kojima¹

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, Fe₂O₃, Ignition Lossが増加し、SiO₂が減少する。また、主すべり面を挟んだ両側でNa₂O, Al₂O₃, CaO, MnO, MgO, Fe₂O₃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, Fe₂O₃, Ignition Lossの増加とSiO₂の減少は炭酸塩鉱物の形成とそれに伴うSiO₂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¹、酒井 亨¹、田中 由美子¹、青木 和弘²、田中 義浩²、瀬下 和芳²、丹羽 正和²、増田 祐輝²

*Masao Kametaka¹, Toru Sakai¹, Yumiko Tanaka¹, Kazuhiro Aoki², Yoshihiro Tanaka², Kazuyoshi Seshimo², Masakazu Niwa², Yuki Masuda²

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¹、瀬下 和芳¹、田中 義浩¹、丹羽 正和¹、増田 祐輝¹、亀高 正男²、酒井 亨²、嶋本 利彦³*Kazuhiro Aoki¹, Kazuyoshi Seshimo¹, Yoshihiro Tanaka¹, Masakazu Niwa¹, Yuki Masuda¹, Masao Kametaka², Toru Sakai², Toshihiko Shimamoto³

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北上地点での深度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¹、向吉 秀樹¹、小林 健太²、廣野 哲朗³*Hideto Uchida¹, Hideki Mukoyoshi¹, Kenta Kobayashi², Tetsuro Hirono³

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碎岩も認められた。

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。粉碎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碎岩は、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、粉碎岩、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¹

*Atsushi Yamaji¹

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 τ ）がある臨界値（ τ_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 τ_c で規格化した無次元偏差応力テンソルであるが、 τ_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ともなって、方解石は歪み硬化をしめす。これは τ_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¹、山路 敦¹、佐藤 活志¹

*Akihiro Kokado¹, Atsushi Yamaji¹, Katsushi Sato¹

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¹

*Katsushi Sato¹

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、適合度のピーク的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礫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¹

*Takaki Iwata¹

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 (σ_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 (σ_1) is assumed to be follow a particular pattern (and consequently, the direction of the minimum principle stress σ_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¹、田上 高広²、Kohn Barry³、福田 将真²

*Shigeru Sueoka¹, Takahiro Tagami², Barry P. Kohn³, Shoma Fukuda²

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¹、末岡 茂²、田上 高広¹

*Syoma Fukuda¹, Shigeru Sueoka², Takahiro Tagami¹

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¹、平松 良浩¹*Masanobu Doujou¹, Yoshihiro Hiramatsu¹

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¹、伊藤 武男²、堤 浩之³、木股 文昭⁴、太田 雄策⁵、渡辺 愛梨¹、小澤 拓⁶、大久保 慎人¹、山品 匡史¹、副田 宜男⁷、Gunawan Endra⁸、Ismail Nazli⁹、Nurdin Irwandi⁹、Sugiyanto Didik⁹

*Takao Tabei¹, Takeo Ito², Hiroyuki Tsutsumi³, Fumiaki Kimata⁴, Yusaku Ohta⁵, Airi Watanabe¹, Taku Ozawa⁶, Makoto Okubo¹, Tadashi Yamashina¹, Yoshio Soeda⁷, Endra Gunawan⁸, Nazli Ismail⁹, Irwandi Nurdin⁹, Didik Sugiyanto⁹

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-ニマス地震、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¹、安藤 亮輔¹、宍倉 正展²

*Junki Komori¹, Ryosuke Ando¹, Masanobu Shishikura²

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

*鷲谷 威^{1,2}、黒川 祐梨²

*Takeshi Sagiya^{1,2}, Yuri Kurokawa²

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¹、西村 卓也²

*Yuji ITOH¹, Takuya NISHIMURA²

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 η 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 , η 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¹、堀内 俊介²、岩森 光²、飯沼 卓史²、芝崎 文一郎³

*Jun Muto¹, Shun-suke Horiuchi², Hikaru Iwamori², Takeshi Iinuma², Bunichiro Shibazaki³

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¹、澤田 明宏¹、*平松 良浩¹、水上 知行¹

Yuji Iwaki¹, Akihiro Sawada¹, *Yoshihiro Hiramatsu¹, Tomoyuki Mizukami¹

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 2670kg/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¹

*Nobuaki Niitsuma¹

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。

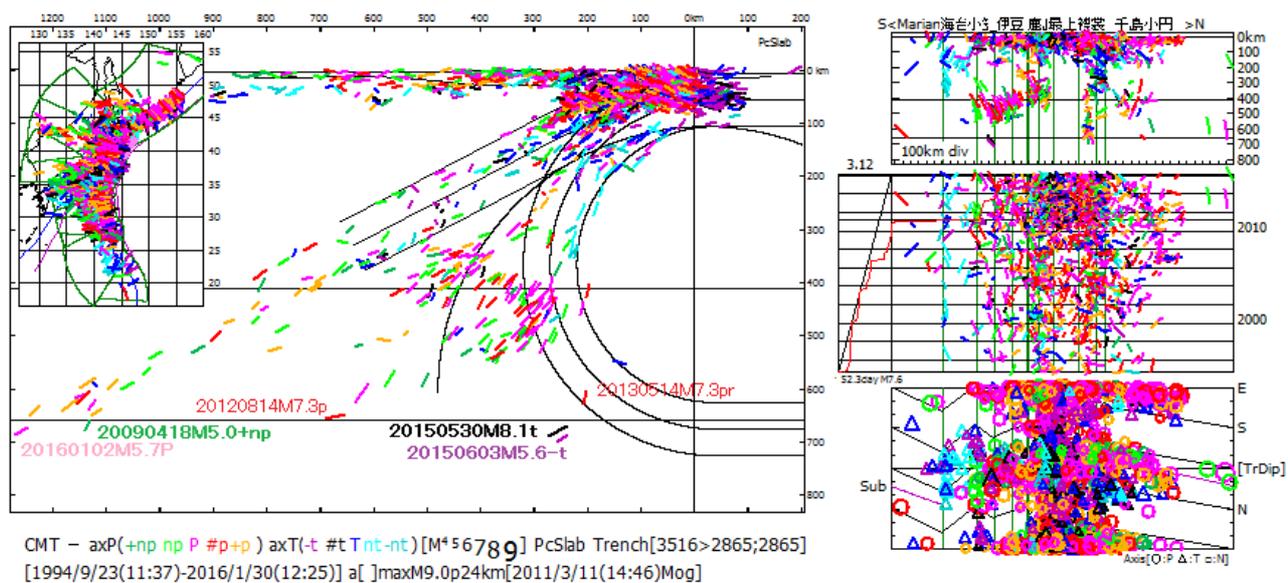
2009年4月18日の地震も下部マントル地震であったのであろうか。2009年4月18日の発震機構は横ずれ断層+nt型であり、停滞スラブ内の逆断層型発震機構と異っており、660kmを境界に発震機構が変わっている。また、震源がスラブの下面に位置していることは、沈込前に海底で冷却されていないことを意味しており、スラブ中で相転移し易い条件を持っていることから、下部マントル地震であったと考えられる。ウラジオストック域で太平洋スラブが下部マントルに突入していたとすると、2011年3月11日の東日本大震災の原因となったであろう。同域では、2016年1月2日にも初動震源（破壊開始）深度681km M5.7が起こっている。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¹、小林 健太²、香取 拓馬²、高橋 啓太¹、星加 夢輝¹、大橋 健治¹、内藤 翔平¹、藤浪 知世¹、菅野 萌子¹、皆美 まどか¹、金子 真弥¹、井村 朱里¹、向吉 秀樹³、内田 嗣人³

*Shun Suzuki¹, Kenta Kobayashi², Takuma Katori², Keita Takahashi¹, Yumeki Hoshika¹, Kenji Ohashi¹, Shohei Naito¹, Tomoyo Huzinami¹, Moeko Kanno¹, Madoka Minami¹, Maya Kaneko¹, Akari Imura¹, Hideki Mukoyoshi³, Hideto Uchida³

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ニ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