

## 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<sup>1</sup>、石川 正弘<sup>2</sup>、佐藤 比呂志<sup>1</sup>、岩崎 貴哉<sup>1</sup>、豊島 剛志<sup>3</sup>

\*Koichi Yamauchi<sup>1</sup>, Masahiro Ishikawa<sup>2</sup>, Hiroshi Sato<sup>1</sup>, Takaya Iwasaki<sup>1</sup>, Tsuyoshi Toyoshima<sup>3</sup>

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 Kaya<sup>1</sup>, Yasuo Ogawa<sup>1</sup>, Takafumi Kasaya<sup>2</sup>, Mustafa Kemal Tuncer<sup>3</sup>, Yoshimori Honkura<sup>1</sup>, Naoto Oshiman<sup>4</sup>, Masaki Matsushima<sup>1</sup>, Weerachai Siripunvaraporn<sup>5</sup>

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<sup>1</sup>

\*Tohru Watanabe<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>

\*Mineo Kumazawa<sup>1</sup>

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-CaSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O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 CaSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O system-

\*宇野 正起<sup>1</sup>、増田 俊太郎<sup>1</sup>、平野 伸夫<sup>1</sup>、岡本 敦<sup>1</sup>、土屋 範芳<sup>1</sup>

\*Masaaki Uno<sup>1</sup>, Syuntaro Masuda<sup>1</sup>, Nobuo Hirano<sup>1</sup>, Atsushi Okamoto<sup>1</sup>, Noriyoshi Tsuchiya<sup>1</sup>

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CaSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O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<sup>1</sup>、青木 将<sup>1</sup>、片尾 浩<sup>1</sup>、米田 格<sup>1</sup>、澤田 麻沙代<sup>1</sup>、三浦 勉<sup>1</sup>

\*Yoshihisa Iio<sup>1</sup>, Sho Aoki<sup>1</sup>, Hiroshi Katao<sup>1</sup>, Itaru Yoneda<sup>1</sup>, Masayo Sawada<sup>1</sup>, Tsutomu Miura<sup>1</sup>

## 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<sup>1,2</sup>、千葉 紀奈<sup>1</sup>、常 青<sup>1</sup>、森川 徳敏<sup>3</sup>、風早 康平<sup>3</sup>、岩森 光<sup>1,2</sup>

\*Hitomi Nakamura<sup>1,2</sup>, Kotona Chiba<sup>1</sup>, Qing CHANG<sup>1</sup>, Noritoshi Morikawa<sup>3</sup>, Kohei Kazahaya<sup>3</sup>, Hikaru Iwamori<sup>1,2</sup>

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  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  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<sup>1</sup>、Gomila Rodrigo<sup>2,3</sup>、\*星野 健一<sup>1</sup>

Shiori Okamoto<sup>1</sup>, Rodrigo Gomila<sup>2,3</sup>, \*Kenichi Hoshino<sup>1</sup>

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SiO<sub>2</sub>がそれぞれ2.77と4.21 mol/L添加され、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、Mg<sub>2</sub>OおよびAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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、CaCl<sub>2</sub> 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<sup>1,2</sup>、岩森 光<sup>1,2</sup>、中久喜 伴益<sup>3</sup>\*Atsushi Nakao<sup>1,2</sup>, Hikaru Iwamori<sup>1,2</sup>, Tomoeki Nakakuki<sup>3</sup>

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<sup>1</sup>、荒井 駿<sup>1</sup>

\*Toru Takeshita<sup>1</sup>, Shun Arai<sup>1</sup>

1.北海道大学大学院理学院自然史科学専攻

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

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<sup>1,2</sup>、竹下 徹<sup>3</sup>、八木 公史<sup>4</sup>、板谷 徹丸<sup>5</sup>

\*Yasu'uchi Kubota<sup>1,2</sup>, Toru Takeshita<sup>3</sup>, Koshi Yagi<sup>4</sup>, Tetsumaru Itaya<sup>5</sup>

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 $\mu$ 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. <sup>40</sup> Ar (10 <sup>-8</sup> cc STP/g)	K-Ar age (Ma)	Non-rad. <sup>40</sup> 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 Zwingmann<sup>1</sup>, Martin Timmerman<sup>2</sup>, Masafumi Sudo<sup>2</sup>, Roland Oberhänsli<sup>2</sup>, Virginia Toy<sup>3</sup>

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.  $4.1 \pm 0.4$  and  $1.9 \pm 0.2$  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<sup>1</sup>、重松 紀生<sup>2</sup>、針金 由美子<sup>3</sup>\*Takamoto Okudaira<sup>1</sup>, Norio Shigematsu<sup>2</sup>, Yumiko Harigane<sup>3</sup>

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<sup>1</sup>、鷲谷 威<sup>1</sup>

\*XUELEI ZHANG<sup>1</sup>, Takeshi Sagiya<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>

\*mitsuhiro toriumi<sup>1</sup>

## 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<sup>1</sup>、Massiot Cécile<sup>2</sup>、Townend John<sup>2</sup>、Doan Mai-Linh<sup>3</sup>、McNamara David D.<sup>4</sup>、Toy Virginia<sup>5</sup>、Sutherland Rupert<sup>4</sup>、DFDP-2 Science Team

\*Norio Shigematsu<sup>1</sup>、Cécile Massiot<sup>2</sup>、John Townend<sup>2</sup>、Mai-Linh Doan<sup>3</sup>、David D. McNamara<sup>4</sup>、Virginia Toy<sup>5</sup>、Rupert Sutherland<sup>4</sup>、DFDP-2 Science Team

1.独立行政法人産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、2.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 $124^{\circ}$ と $30^{\circ}$ 、最小圧縮応力軸の方位角と沈下角が $23^{\circ}$ 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<sup>1</sup>\*Atsushi Yamaji<sup>1</sup>

1. 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

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

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 ( $\tau_c$ , 10 MPa前後といわれる: Lacombe, 2010) を超えた場合に形成される。この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  $\tau_c$  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、 $\tau_c$  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  $\tau_c$  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、 $\tau_c$  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・ $\tau_c$  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・ $\tau_c$  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<sup>1</sup>、大坪 誠<sup>2</sup>、宮川 歩夢<sup>3</sup>、丹羽 正和<sup>4</sup>\*Kiyokazu Oohashi<sup>1</sup>, Makoto Otsubo<sup>2</sup>, Ayumu Miyakawa<sup>3</sup>, Masakazu Niwa<sup>4</sup>

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-神戸歪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<sup>1</sup>、中島 淳一<sup>1</sup>

\*Eiichi Takahashi<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup>

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<sup>1,2</sup>、Meneses Angela<sup>2</sup>\*Takeshi Sagiya<sup>1,2</sup>, Angela Meneses-Gutierrez<sup>2</sup>

1.名古屋大学減災連携研究センター、2.名古屋大学大学院環境学研究科

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

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<sup>1</sup>、飯田 圭輔<sup>1</sup>、香取 拓馬<sup>2</sup>\*Kenta Kobayashi<sup>1</sup>, Keisuke Iida<sup>1</sup>, Takuma Katori<sup>2</sup>

1.新潟大学理学部地質科学科、2.新潟大学大学院自然科学研究科

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<sup>1</sup>、Jeffrey Perez<sup>2</sup>\*Hiroyuki Tsutsumi<sup>1</sup>, Jeffrey S. Perez<sup>2</sup>

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（ $22 \pm 2$ 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賅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<sup>1</sup>、高田 陽一郎<sup>2</sup>\*Takuya NISHIMURA<sup>1</sup>, Youichiro Takada<sup>2</sup>

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<sup>1</sup>、内田 嗣人<sup>1</sup>、小林 健太<sup>2</sup>、廣野 哲朗<sup>3</sup>、山口 昌克<sup>4</sup>、山本 康平<sup>4</sup>\*Hideki Mukoyoshi<sup>1</sup>, Hideto Uchida<sup>1</sup>, Kenta Kobayashi<sup>2</sup>, Tetsuro Hirono<sup>3</sup>, Masakatsu Yamaguchi<sup>4</sup>, Kohei Yamamoto<sup>4</sup>

1.鳥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.鳥根大学理学部  
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<sup>1</sup>、佐藤 比呂志<sup>1</sup>、篠原 雅尚<sup>1</sup>、石山 達也<sup>1</sup>、橋間 昭徳<sup>1</sup>、程塚 保行<sup>2</sup>、雨宮 由美<sup>2</sup>

\*Takaya Iwasaki<sup>1</sup>, Hiroshi Sato<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Tatsuya Ishiyama<sup>1</sup>, Akinori Hashima<sup>1</sup>, Yasuyuki Hodotsuka<sup>2</sup>, YUMI AMEMIYA<sup>2</sup>

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<sup>1</sup>、野田 朱美<sup>2</sup>、深畑 幸俊<sup>3</sup>

\*Mitsuhiro Matsu'ura<sup>1</sup>, Akemi Noda<sup>2</sup>, Yukitoshi Fukahata<sup>3</sup>

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<sup>1</sup>

\*Yuki Matsushi<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、松本 拓己<sup>2</sup>、西村 卓也<sup>3</sup>、三浦 哲<sup>4</sup>、武藤 潤<sup>4</sup>、飯沼 卓史<sup>5</sup>

\*Bunichiro Shibazaki<sup>1</sup>, Takumi Matsumoto<sup>2</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>3</sup>, Satoshi Miura<sup>4</sup>, Jun Muto<sup>4</sup>, Takeshi Iinuma<sup>5</sup>

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<sup>2</sup>、\*小川 康雄<sup>1</sup>、齋藤 全史郎<sup>2</sup>、潮田 雅司<sup>5</sup>、市原 寛<sup>3</sup>、市來 雅啓<sup>4</sup>、三品 正明  
Atsushi Suzuki<sup>2</sup>, \*Yasuo Ogawa<sup>1</sup>, Zenshiro Saito<sup>2</sup>, Masashi Ushioda<sup>5</sup>, Hiroshi Ichihara<sup>3</sup>, Masahiro Ichiki<sup>4</sup>, 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<sup>1</sup>

\*Yukitoshi Fukahata<sup>1</sup>

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<sup>1</sup>、長谷川 昭<sup>2</sup>、松澤 暢<sup>2</sup>

\*Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Akira Hasegawa<sup>2</sup>, Toru Matsuzawa<sup>2</sup>

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<sup>1</sup>、小原 一成<sup>2</sup>、酒井 慎一<sup>2</sup>、武田 哲也<sup>3</sup>、飯高 隆<sup>2</sup>、岩崎 貴哉<sup>2</sup>

\*Aitaro Kato<sup>1</sup>, Kazushige Obara<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>2</sup>, Tetsuya Takeda<sup>3</sup>, Takashi Iidaka<sup>2</sup>, Takaya Iwasaki<sup>2</sup>

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<sup>1</sup>、阿部 信太郎<sup>1</sup>、青柳 恭平<sup>2</sup>\*Hiroshi Mori<sup>1</sup>, Shintaro Abe<sup>1</sup>, Yasuhira Aoyagi<sup>2</sup>

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<sup>[6]</sup>。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<sup>[6]</sup>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<sup>e.g.[2],[3]</sup>、これらを基にした震源断層モデルの提案<sup>e.g.[1],[4]</sup>、さらには津波の数値シミュレーションも行われている<sup>e.g.[5]</sup>。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<sup>[1]</sup>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-Oki 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<sup>1</sup>、西村 卓也<sup>2</sup>

\*Satoshi Matsumoto<sup>1</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>2</sup>

1.九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター、2.京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  $0.15 \times 0.15$  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<sup>1</sup>、橋本 学<sup>2</sup>\*Atsushi Takahashi<sup>1</sup>, Manabu Hashimoto<sup>2</sup>

1.京都大学大学院理学研究科、2.京都大学防災研究所

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

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<sup>1</sup>、古屋 正人<sup>1</sup>

\*Yuji Himematsu<sup>1</sup>, Masato Furuya<sup>1</sup>

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