総説

陸域断層の内部構造

Architecture of onshore fault zones

重松紀生^{*} 大谷具幸^{**} 小林健太^{***}
奥平敬元^{****} 豊島剛志^{***}

Norio Shigematsu^{*}, Tomoyuki Ohtani^{**},
Kenta Kobayashi^{***},
Takamoto Okudaira^{****} and
Tsuayoshi Toyoshima^{***}

2017年8月11日受付.

2018年1月18日受理.

^{*} 産業技術総合研究所地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,

^{**} 岐阜大学工学部
Faculty of Engineering, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

^{***} 新潟大学理学部
Faculty of Science, Niigata University, Niigata 950-2181, Japan

^{****} 大阪市立大学理学部
Faculty of Science, Osaka City University, Osaka 558-8585, Japan

Corresponding author: N. Shigematsu,
n.shigeamtsu@aist.go.jp

はじめに

日本地質学会の100周年から、しばらくした1998年に地質学論集第50号「21世紀の構造地質学に向けて」が出版された。この中で断層の内部構造に関連した内容として、清水(1998)、Takeshita et al.(1998)、金川(1998)、高木(1998)、嶋本(1998)が総説をまとめている。その後の約20年間に、1995年の兵庫県南部地震後に野島断層、1999年の台湾集集地震後にチェルンブ断層において行われた断層掘削の成果が公表された。さらにさまざまな断層帯での研究が行われることにより断層の内部構造に関する理解が深まった。断層の内部構造に関する研究は、断層岩類の分布に留まらず、断層岩の物性、脆性–塑性遷移、下部地殻における変形など多岐にわたる。本総説はこれらのうち、陸域断層の内部構造に関する研究に関し、この約20年間の日本地質学会会員の成果を中心に、地殻浅部から下部地殻の順序で紹介する。

なお付加体を含む海溝沈込み境界断層についても、大きな進展があったが(例えば、Chester et al., 2013; Ujiie and Kimura, 2014)、本総説では取り扱わない。

Abstract

We review research on the architecture of onshore fault zones. Drilling the Nojima Fault was a turning point in studies of shallow brittle faults, stimulating research on their hydrological and frictional properties. Investigations of the deep seismogenic zone of faults such as the Median Tectonic Line (MTL) have identified deformation mechanisms such as pressure solution, creep, and crystal plasticity of mica in foliated cataclasite. Cataclastic damage causes increased intracrystalline strain in surrounding rocks. Several studies of the Auke shear zone and the MTL have estimated the stress and strain rate in the brittle–plastic transition zone. Some studies of the Hatagawa fault zone have revealed the processes involved in fracture nucleation and documented heterogeneous deformation on the scale of tens of kilometers. In the lower crust of the Hidaka metamorphic belt, evidence was found for plastic deformation of plagioclase and pyroxene by dislocation creep. It was also found that formation of fine-grained aggregates during deformation results in weakening by a change in deformation mechanism from dislocation creep to grain boundary sliding. Recently, evidence of fracturing has been found in deformed lower crustal rocks, possibly resulting from stress concentration at the down-dip termination of earthquake ruptures, although further studies are needed to confirm this inference.

Keywords: Fault zone architecture, Fault core, Damage zone, Cataclasite, Brittle-plastic transition, Mylonite, Lower crust

脆性領域：地表付近の断層帯の内部構造

1. 内部構造

地表付近の脆性断層は固結性に乏しい断層ガウジや断層角礫から構成される。その内部構造は、断層の変位の大部分をまかない透水性の小さい断層コアと、亀裂が多く透水性が大きいダメージゾーンに分けられる(例えば、Caine et al., 1996)。国内における脆性断層帯の内部構造の研究は、1995年兵庫県南部地震の後に行われた野島断層掘削がひとつの契機となった(例えば、Ohtani et al., 2000)。その後、断層掘削は、1999年台湾集集地震後のチェルンブ断層掘削(例えば、徐ほか, 2009)、アメリカサンアンドレアス断層におけるSan Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD)(例えば、Bradbury et al., 2011)、ニュージーランドのアルバイン断層掘削(例えば、Sutherland et al., 2012)、中国における汶川地震断層掘削(WFSD)(例えば、Xue et al., 2013)と続いている。ここではまず、野島断層掘削の成果を、その後に他の断層帯の研究による成果を紹介する。

野島断層掘削では京都大学防災研究所(以下京大防災研)、地質調査所(現：産業技術総合研究所、以下産総研)、防災科

Fig. 1. Outline of the Nojima Fault drilling project (modified from Ohtani et al., 2000). (a) Generalized geology of the northern part of Awaji Island. The locations of GSJ, NIED, and DPRI (Kyoto University) boreholes are indicated. (b) Geological column and three kinds of fault gouge in GSJ borehole. The fault gouge at 625.1 m depth is thought to include a late-stage slip plane, as no structures cut the steep foliation, whereas at 623.6 m and 624.7 m the steep foliation is cut by low-angle structures.

第1図 野島断層掘削の概要 (Ohtani et al., 2000 を一部修正)。(a) 淡路島北部の一般地質図。地質調査所 (GSJ: 現産業技術総合研究所), 防災科学技術研究所 (NIED), 京都大学 (DPRI) のそれぞれの掘削地点を示した。(b) 地質調査所コアの柱状図と断層コアにおける3種類の断層ガウジ。623.6 m や 624.7 m の断層ガウジは高角の全体の面構造を切る低角の構造が発達する。一方、625.1 m の断層ガウジは高角の面構造を切断する構造がなく、最新のすべり面を含むと考えられる。

学技術研究所 (以下防災科研) の3機関により、ボーリング掘削が実施された (Fig. 1)。断層コアの位置は、京大防災研 500 m 掘削孔では大阪層群 (下盤側) と白亜紀花崗岩 (上盤側) の間に、他の2本の掘削孔では白亜紀花崗岩の中に位置している。Tanaka et al. (2001a) は、京大防災研掘削孔において断層ガウジが上盤側で幅広く発達するのに対し、下盤側では 15 mm しかないことを見出した。このことから普段は断層ガウジが流体をシールし上盤側のみで変質が生じるのに対して、地震後は破碎によりシールが破れ下盤側にも流体が移動すると考えた。Ohtani et al. (2000) は、断層破碎帯および断層コアの幅がそれぞれ 46.5 m 以上および 0.3 m であり、断層コアは3種類の断層ガウジからなることから、1995年の地震より前に形成された断層ガウジが地震に伴う断層変位で破壊されずに保存されていることを示した。また、断層破碎帯形成に関連した熱水変質作用には、200°C 以下で沸石類を生じるステージと、より新しい炭酸塩鉱物を生じるステージの大きく2回のステージを見いだしている。なお、これら2回ステージは繰り返して生じていることから、地震サイクルとの関連を指摘している。Tanaka et al. (2001b) は元素分析結果より、断層活動初期には破碎活動が広く及んでいたものが、その後は一部の小断層帯に変位が集中したことを示した。Matsuda et al. (2004) は、防災科研 1800 m 掘削孔に見られる3つの断層破碎帯のうち1995年の地震におけるすべり面を含むと考えられる深度 1140 m 付近の破碎帯では特に上盤側で破碎と変質が強いこ

とを示した。これに対し、他の破碎帯では変質が弱い、あるいは変質が上盤側と下盤側で違いがない、という異なる傾向を示す。このように、変質作用やそれに伴う元素移動に着目することにより、断層破碎帯の長期的な発達過程や最新のすべり面を挟んだ上盤側と下盤側での流体移動の違いが明らかにされた。

他の断層帯の研究として、Mitchell et al. (2011) と Lin and Yamashita (2013) が、有馬-高槻構造線を対象として断層コアを挟んだ両側のダメージゾーンの発達の違いについて考察している。Mitchell et al. (2011) は白水峡において、断層を境に白亜紀花崗岩と白亜紀流紋岩が接し、両者の間でダメージゾーンの幅が大きく異なることを明らかにした。ダメージゾーンでは鉱物粒子は著しく破碎されているものの、もともとの粒子の外形が保存され微細亀裂が引張割れ目で方位は定向配列を示さないこと、破片がほとんど回転をした痕跡を示さないことから、サンアンドレアス断層などで報告されているパルバライズ断層岩 (例えば、Dor et al., 2006) であるとした。また、室内実験によって原岩の P 波速度が花崗岩では常に流紋岩より大きいことを示し、野外における破碎の状況と非対称性が、地下深部で断層を挟んで地震波速度が速い方が最初にダメージを生じる現象 (Ampuero and Ben-Zion, 2008) によるものと考えた。Lin and Yamashita (2013) は、有馬高槻構造線と六甲淡路断層帯の内部構造の面的な分布を広範囲の調査によって明らかにし、ダメージゾーンの幅の変化と主断層を挟んだ非対称性が、主として左

雁行の横ずれ断層の断層セグメント間の圧縮応力の局所的な集中によるものとした。両者の研究はダメージゾーンの幅が原岩や断層の配列によって規制されることとした。

また Niwa et al. (2009) は、阿寺断層の破碎帯について露頭～顕微鏡スケールでの詳細な記載を行った。断層コアは幅約 1.2 m であり、1.6 Ma の苦鉄質火山岩類の岩片を含むことから、断層コアの形成時期を拘束できることを示した。また、大橋・小林(2008)は、牛首断層中央部において、断層ガウジやカタクレサイトの分布を調査した。その結果、大局的にはセグメントとジョグの幾何学で特徴づけられ、一部に横ずれデュプレックスを伴う、幅 250~600 m の剪断帯を認定した。さらに大橋・小林(2008)は、剪断帯の幾何学と断層岩の組織観察から、最初は左横ずれ運動によって形成された剪断帯が、後に右横ずれ運動へ変化したと考えた。活断層としての牛首断層は、剪断帯の主断層沿いを通過する。このように活断層破碎帯の調査により、形成時期に制約を与えたり、現在と過去の運動像の対比がなされるようになった。

なお、相澤ほか(2005)は、2000 年鳥取県西部地震の余震域とその周辺で、断層岩類(主に断層ガウジ)の分布密度、幅、姿勢と剪断センス、色相を調査した。断層ガウジ帯の分布密度は、震央を含む余震域の中央部と東に隣接する地域において高く(11 枚/5 m 以上)、ガウジ帯の幅も広い(3 cm 以上)。一方、余震域の中央部と東に隣接する地域では、断層ガウジの色相に明確な差異が認められ、後者は前者に比べて赤色系統の割合が圧倒的に高い。そのため、断層形成環境や、引き続き物質移動の様式が異なっていたと考えた。さらに、個々のガウジ帯の姿勢は余震分布と斜交し、剪断センスと合わせ、 R_1 面および R_2 面に相当すると判断される。つまり、2000 年鳥取県西部地震の余震域(断層帯)は、断層発達過程の初期の姿を保っていると考えられる。

2. 断層破碎帯の透水構造

断層破碎帯の透水構造は断層滑りのみならず、石油貯留層形成など工学的側面からも重要である(例えば、Faulkner, et al., 2010)。野島断層では、地表露頭試料と掘削コア試料の双方で、透水係数がダメージゾーンで大きく、断層コアで小さい結果が得られている(Mizoguchi et al., 2008; Lockner et al., 2009)。これらから、地表から深度 2 km まではダメージゾーンは高透水性を示す流体の通路になると考えられる。一方で、断層コアは断層を横切る方向への流体流動を妨げる役割を果たすと考えられる。中央構造線(MTL)においても、野島断層同様のダメージゾーンと断層コアに対応した透水係数の変化が見られる(Wibberley and Shimamoto, 2003)。なおニュージーランドのアルパイン断層のような活動度の高い逆断層成分を持つ断層では、透水構造と断層運動に伴う地形に支配された地下水流動が上盤の温度分布に影響を与えることが報告されている(Sutherland et al., 2017)。このことは破碎帯内部の粘土鉱物の空間分布に影響を与え、摩擦の速度依存性に空間的不均質を生ずるため、地震時の滑り分布等に影響を与える可能性がある。

3. 高速摩擦を示す構造

Otsuki et al. (2003) は、野島断層の地表露頭より採取したシュードタキライト(PST)と断層ガウジの互層試料を用い、もともと 1 つであった破片の片割れが同一薄片内で見つかる確率から、粉体流動の発生の有無を検討した。この結果に基づき、断層運動によってひとたび粉体流動が生じると、すべり面の摩擦抵抗がきわめて小さくなると考えた。また、PST に含まれる溶融していない粒子の割合から溶融したガウジの温度を求め、溶融が 750°C で生じ始めて 1280°C まで温度が到達したと考えた。これに基づき、溶融の初期段階では、溶融相の粘性が大きく地震性すべりが抑制されるのに対し、ひとたびこの状況を乗り越えると粘性が急激に低下して、すべりが加速し破壊が止まらなくなると考えた。

チェルンブ断層掘削の成果は、徐ほか(2009)の総説にまとめられている。詳細はそちらに譲るものの、さまざまな化学的指標、特に微量元素の組成変化の結果を用いて、摩擦発熱に伴う最大被熱温度を推定した。また、帯磁率や磁化強度の変化、黄鉄鉱の溶脱、緑泥石からの鉄元素の溶脱、鉄やマンガン等の遷移元素の酸化等から地震時の断層物質における物質循環においてラジカル反応が重要な役割を果たすことを述べている。Tanikawa and Shimamoto (2009) は掘削試料を用いた断層ガウジの低速・高速摩擦試験を行い、チェルンブ断層の北部と南部で高速摩擦時の透水係数が大きく異なることを示した。この結果に基づいて、断層の動的強度低下機構として thermal pressurization が重要であることを指摘した。

この他、前述の MTL で得られた透水係数の構造(Wibberley and Shimamoto, 2003)に基づき、地震時の変位を考慮すると thermal pressurization による摩擦弱化により、断層内部構造が地震時の滑り分布等に影響を与える可能性が指摘されている(Wibberley and Shimamoto, 2005)。

4. 断層の摩擦溶融時期

PST は地震時の高速摩擦を示す直接的な証拠と考えられ、地殻の様々な深度での形成が報告されている(例えば、Lin, 1994, 2008; Toyoshima, 1990; Toyoshima et al., 2004)。断層における摩擦溶融時期に関してさまざまな手法により研究が進んでいる(Tagami, 2012)。Murakami and Tagami (2004) は、野島断層の PST のジルコンフィッション・トラック(FT)解析を行い、 56 ± 4 Ma の年代値を得た。この値は母岩の冷却年代より若いため、野島断層は 56 Ma ごろには形成しており、断層近傍の堆積物の分布からの見積に比べて、かなり古いことを示している。Yamada et al. (2007) は野島断層防災科研の掘削コアを用いてアパタイトとジルコンの FT 解析を行った。ジルコンは 57~69 Ma で掘削深度による大きな違いがないのに対し、アパタイトは PST や断層ガウジなどの大きな変位を有すると考えられる断層の 2 m 下の試料において 48 Ma 付近の年代を示す。これについて、48 Ma 以降に 2 つの鉱物の FT 年代の閉鎖温度の間を最高温度とする二次的な熱異常が断層に沿ってあったと考えた。Takagi et al. (2010) も MTL の PST の FT 解析を行って

Fig. 2. Geology in the region of the Median Tectonic Line (MTL) in Mie Prefecture. (a) Index geological map of the MTL in Mie Prefecture. Modified from the seamless digital geological map of Japan [URL1]. (b) Microstructure of a foliated cataclasite (Shigematsu et al., 2012). The lineation (X), foliation normal (Z), and foliation (S) are indicated. (c) Microstructure of mylonite containing F-type quartz (Shigematsu et al., 2012). Qz: dynamically recrystallized quartz, Pl: plagioclase porphyroclast, Cal: calcite vein.

第2図 三重県地域の中央構造線 (MTL) の地質。産総研地質調査総合センター, 20 万分の 1 日本シームレス地質図 [URL1] に基づく。(a) 調査地域。(b) 三重県 MTL に沿う面状カタクレサイトの微細構造 (Shigematsu et al., 2012)。線構造方向 (X) と面構造の法線方向 (Z), 面構造方向 (S) を図に示した。(c) F タイプ石英を含むマイロナイトの微細構造 (Shigematsu et al., 2012)。Qz: 動的再結晶した石英。Pl: 斜長石ポーフィロクラスト。Cal: 方解石脈。

るが、これについては後述する。

以上のように、野島断層掘削をきっかけに内部構造のみならず、断層の水理学的性質や摩擦の研究がさかんに行われるようになった。それらを通じ、断層の高速摩擦における動的強度低下機構への理解が進み、また高速摩擦の痕跡から形成時期をフィッシュトラック年代により捉えられるようになった。

脆性領域：浅部から深部への断層帯内部構造の変化

1. 脆性領域深部の断層帯内部構造・変形機構

脆性領域深部の断層は固結したカタクレサイトやウルトラカタクレサイトから構成される (例えば, Sibson, 1977)。これは高い封圧に加え、断層岩中の変質鉱物が温度条件により異なることが関係していると考えられる (例えば, Inoue, 1995)。ここではカタクレサイトを含む断層岩の

産状について、国内では比較的良好に記載されている MTL 沿いを中心に紹介する (Fig. 2a)。

三重県内の MTL は東西走向北傾斜であり、北側の領家帯側の岩石は、ほぼ東西走向北傾斜の面構造を持つマイロナイトの変形を広く被る。MTL 近傍は、より低温における変形を被っている (高木, 1985; 榊原, 1996; 島田ほか, 1998)。中軸部付近では、マイロナイトを原岩とするカタクレサイトの中に強い面構造を持つ面状カタクレサイト (フィロナイト) が分布する (Jefferies et al., 2006b)。フィロナイトは、白雲母・緑泥石などのフィロ珪酸塩鉱物の強い定向配列、圧力溶解シームやクラストの溶脱などで特徴づけられ、圧力溶解クリープが重要な変形過程であったと考えられる (Jefferies et al., 2006b)。Shigematsu et al. (2012) は、三重県内で産総研がボーリング掘削した MTL を貫通する掘削孔 (ITA-1) に見られる各種断層岩の変質鉱物から、面状カ

タクレサイト (Fig. 2b) は脆性-塑性遷移条件の直上で形成したと考えた。

断層岩内で圧力溶解クリープが発生した場合、岩塩と雲母を用いたアナログ実験から、圧力溶解が雲母の劈開面上の摩擦すべりに対する補償機構として働き、全体の強度は摩擦強度の小さい雲母に支配される (Bos and Spiers, 2002; Niemeijer and Spiers, 2005)。このため、断層岩の強度は一般的な岩石の静止摩擦強度 (Byerlee, 1978) に対し著しく弱くなる。従って MTL に沿う面状カタクレサイトは断層の強度弱化の証拠と考えられている (Holdsworth, 2004; Jefferies et al., 2006b)。

圧力溶解クリープの特徴を持つ面状カタクレサイトは、長野県内の MTL でも見いだされる (Jefferies et al., 2006a)。彼女らは、長野県の方が三重県より浅い深度で形成したと考えた。すなわち MTL の断層強度は広い地殻深度にわたり圧力溶解により弱化している可能性がある。同様の強い面構造を持つ断層岩は世界各地で報告されている (例えば, Stewart et al., 2000; Gratier et al., 2011; Wallis et al., 2015)。

一方、三重県内の MTL 沿いには PST が複数報告されている (Shimada et al., 2001; Takagi et al., 2010; Shigematsu et al., 2012)。Shimada et al. (2001) は PST と他の断層岩との切断関係、PST を切る方解石脈の双晶の産状から、PST が脆性-塑性遷移条件の直上で形成した可能性を指摘した。Takagi et al. (2010) は同じ PST の FT 解析に基づきこの可能性を検証した。PST 脈のジルコン FT 年代 (60.0 ± 3.5 Ma) に対し原岩のマイロナイトの年代 (69.8 ± 1.2 Ma) が有意に古い。また PST に観察される長石内のジルコンのトラックは、摩擦熱融解時に完全にアニーリングされたことを示す。一方、母岩のアパタイトの FT 年代が 38.0 ± 1.5 Ma であることから、母岩の冷却時の $250 \sim 100^\circ\text{C}$ の条件で PST が生成したと結論付けられ、Shimada et al. (2001) の解釈を支持する。また、ITA-1 掘削孔の PST は、面状カタクレサイトの面構造に平行な断層脈を持つ (Shigematsu et al., 2012)。このことから PST は面状カタクレサイトの断層運動に伴い形成されたことが示唆される。

ところで圧力溶解による変形が面状カタクレサイト内で卓越した場合、摩擦の速度依存性は正となり (Niemeijer and Spiers, 2005; Niemeijer and Spiers, 2006)、地震は発生しない。このことは一見、同じ条件における PST の存在とは矛盾する。ただし、変形速度が速い場合には補償機構としての圧力溶解が全体の変形に追いつかないため、速度依存性は負になる (Niemeijer and Spiers, 2005, 2007)。面状カタクレサイトの力学挙動と PST の関係については、今後の検討が必要である。

なお面状カタクレサイトとして、Lin (1999) は、六甲-淡路断層帯において複合面構造を有する S-C カタクレサイトを記載した。S-C カタクレサイト中では石英・長石は脆性変形の微細構造を示すのに対して、黒雲母は粒子が紡錘状に引き延ばされたフィッシュを形成し結晶塑性による変形が示唆される。このことから S-C カタクレサイトは

150 から 250°C の温度で形成したと考えられる。Lin (1999) は、この深度の断層強度に対し、S-C カタクレサイトの変形過程が重要な役割を果たすことを提案した。MTL 沿いにおいても、三波川帯側の中軸部で S-C カタクレサイトが見いだされており、白雲母がフィッシュを形成し結晶塑性による変形が示唆される (Shigematsu et al., 2017)。

以上のように、脆性領域深部で形成したと考えられる面状カタクレサイトには、圧力溶解クリープが重要な変形過程である場合と、雲母類がフィッシュを形成し結晶塑性による変形が起きている場合が報告されている。

2. 深度によるダメージゾーン発達の違い

断層に沿うダメージゾーンの幅は断層のスケーリング (例えば, Wibberley et al., 2008; Trabi and Berg, 2011; Choi et al., 2016)、地震破壊時のエネルギー消費 (例えば, Chester et al., 2005)、断層幾何学との関係 (例えば, Kim et al., 2004) などから議論されている。一方, Takagi et al. (2012) は、三重県内の MTL と跡津川断層の比較調査に基づき、花崗岩類中のダメージゾーンの発達様式の地殻深度による違いを指摘した。Takagi et al. (2012) は、肉眼で見える亀裂密度に基づきダメージゾーン幅を、X 線回折による石英の (110) ピーク半値幅 (β) と (212) ピークによる結晶化指数 (CI) に基づき結晶内部歪を評価した。さらに結晶内部歪が大きいと考えられる β が大きく CI が小さい試料について透過電子顕微鏡 (TEM) により転位構造の検討を行った。MTL ではダメージゾーンの幅は 400 m 以内であり、亀裂密度に対応して結晶内部歪が高い。一方、跡津川断層ではダメージゾーンの幅は 10 m 以内に限られ、亀裂密度と石英の結晶内部歪の対応が認められない。これらのことから、脆性領域浅部では、断層運動による亀裂密度が高い範囲は局所的で結晶塑性には影響しないのに対し、深部では広い範囲に渡り亀裂密度が高く、また断層運動が結晶塑性に影響を与えるものと考えられる (Takagi et al., 2012)。

なお、三重県内の MTL では三波川帯側において、より新しい断層運動を被っており (Wibberley and Shimamoto, 2003; Shigematsu et al., 2012; 2017)、再活動を繰り返し、地殻深度が深い古い断層運動に、浅い新しい断層運動が重複している様子が観察される (Shigematsu et al., 2017)。この場合、より深い深度で形成した破碎帯は、比較的広い範囲にわたり岩石が全体に破碎されている。これに対し、より浅い深度で形成した破碎帯は、非常に狭い範囲に変位が集中した主断層面が発達し、その周囲には主断層面に対するリーデル剪断面 (R_1 剪断面) に対応した派生断層が発達している。

一方、四国の MTL を横断する地磁気地電流法 (magnetotelluric method, MT 法) 探査に基づく、低比抵抗領域 ($< 30 \sim 80 \Omega\text{m}$) が MTL の深部 (< 20 km 深度) に存在する (Fig. 3)。この低比抵抗帯は $0.6 \sim 7.1$ vol.% の間隙率をもったダメージゾーンで、流体 (3.6 wt% KCl 流体) に飽和しているとされた (Ikeda et al., 2013)。この低比抵抗帯の外側は高比抵抗 ($200 \Omega\text{m}$) となっており、低比抵抗帯に比べ著しく低い間隙率 (0.1 vol.% 程度) が見積もられている。これらの解析結果は、MTL の深部に沿って流体が局在化し

Fig. 3. Geological interpretation of the resistivity structure across the MTL in the Shikoku region, to 20 km depth (modified from Ikeda et al., 2013).

第3図 四国地域におけるMTL深度20 kmまでの比抵抗構造の地質学的解釈(Ikeda et al. (2013)を修正)。

ていることを示唆する。また、断層沿いやその周囲の井戸水や温泉水の地球化学的解析($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比やLi/Cl比など)から、断層に沿ったマントル起源(スラブ由来)の深部流体の存在が指摘されている(Matsumoto et al., 2003; Doğan et al., 2006; 風早ほか, 2014)。このような断層沿いにおける深部流体の局在は、地表断層の深部延長がマントルにまで達することを示唆する。

以上のようにダメージゾーンの発達には地殻深度による違いが見られる。より深い深度では岩石が全体に破碎され主断層から離れた場所まで影響が及ぶのに対し、浅い深度では主断層面に対するリーデル剪断面の方位に発達する派生断層によってダメージゾーンが特徴づけられ、その影響は主断層と派生断層の直近に集中する。さらに、深い深度では岩石に結晶塑性の影響がみられる。またダメージゾーンに沿って流体が局在化していることが、MT探査から示唆される。

脆性から塑性領域への断層帯内部構造の変化

地震発生層より深い深度での断層は、構成鉱物等が塑性流動により変形したマイロナイトなどから構成される。マイロナイトのような変形岩は一般に狭長な剪断帯として産するため、断層(脆性剪断帯)の深部延長であるとされ(例えば、Sibson, 1982; Scholz, 2002)。SibsonやScholzの断層モデルでは、下部地殻の延性剪断帯は上部地殻の脆性剪断帯よりも幅広く発達すると考えられている。

1. 脆性-塑性遷移を挟む応力条件

脆性-塑性遷移付近の応力条件は、地殻の強度や地震発生過程など地球科学の様々な側面において重要である(例えば、Sibson, 1982)。これについて国内には複数の研究例がある。

三重県内のMTL沿いの領家帯マイロナイト中には、極めて細粒な石英(Fタイプ石英)を含むマイロナイト・ウルトラマイロナイトが見られる(高木, 1985; 島田ほか, 1998)(Fig. 2c)。Shigematsu et al. (2012)はこれらのマイロナイト・ウルトラマイロナイトが脆性-塑性遷移条件の直下で形

成したと考えた。Okudaira and Shigematsu (2012)は、ITA-1掘削孔から得られたFタイプ石英を含むマイロナイトについて走査型電子顕微鏡(SEM)の電子線後方散乱回折(EBSD)を用いて、結晶定向配列(LPO)および微細構造の解析を行った。Fタイプ石英のLPOには歪のZ軸付近にc軸が集中するパターン(Z軸集中パターン)とランダムファブリックがある。前者は{basal} <a>を卓越すべり系とする転位クリープ、後者は粒界滑りによる変形と考えられ、同一変形条件で異なる変形機構が作用したと考えられる。両者の平均粒径は3 μm程度(断面の面積を測定し、相当円の直径)で、後者が若干小さい。このことから、Okudaira and Shigematsu (2012)は、2つの異なる変形機構の流動則から岩石が被った差応力と歪速度を、300°Cの温度を仮定した場合は280 MPa、 $1.2 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ 、400°Cの温度を仮定した場合は110 MPa、 $1.0 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ と見積もった。平均粒径3 μm程度という粒径は、平均再結晶粒径と応力の関係(例えば、Twiss, 1977; Stipp and Tullis, 2003; Shimizu, 2008)を考慮すると、変形時の高い差応力を示唆している。一方前述の面状カタクレサイトが強度弱化的証拠と考えられることから、脆性-塑性遷移を挟み差応力のギャップが示唆される(Shigematsu et al., 2012)。同様のギャップについて海外ではより定量的に評価されている例がある(Behr and Platt, 2011, 2014)。この差応力ギャップの成因について、間隙圧の影響が脆性変形領域と塑性変形領域で異なることなどが議論されている(例えば、Hirth and Beeler, 2015)。

一方、Mori et al. (2015)は、ITA-1掘削孔の試料も用い、炭質ウラマン温度計をMTL下盤の三波川帯の泥質片岩に適用し、断層運動に伴う剪断発熱を検討した。この結果、MTLの断層面から垂直方向に約150 mの範囲において、周辺岩石の推定温度約340°Cに対し約60°Cの温度上昇を見出し、剪断発熱によるものとした。剪断発熱には、ある程度大きな剪断応力が必要であり、これはMTLが履歴として持つ正断層では説明できない。従って温度上昇は、周辺岩石の示す推定温度約340°Cに相当する深度で形成したと考えた(Mori et al., 2015)。さらにこの剪断応力が、断層の変位速度などを考慮すると、摩擦係数にして0.4以上に相当する値であることを示した(Mori et al., 2015)。

Kanai and Takagi (2016)は愛知県の足助断層帯において脆性-塑性遷移付近の応力条件の評価を行っている。足助断層帯は北東-南西走向に長さ14 kmにわたり、数mmから10 cm以上の幅のマイロナイト、カタクレサイト、PSTを含む多数の小剪断帯が雁行上に分布し、脆性-塑性遷移付近の条件で形成したと推定される(酒巻ほか, 2006)。Kanai and Takagi (2016)はマイロナイト中の多結晶石英のLPOを、SEM-EBSDにより測定を行った。この結果、Z軸集中パターンとランダムファブリックが同一試料に共存し、変形機構として転位クリープと粒界滑りが同時に作用したと考えた。多結晶石英の粒径が6.4–7.8 μmであることから300°Cの温度を仮定した場合には差応力を110–130 MPaと見積もった。一方、150–200°Cの脆性領域における変形

Fig. 4. Geology of the Hatagawa Fault Zone. (a) Index map (Shigematsu et al., 2009). (b) Quartz (qz) microstructure in a mylonite with microstructure A (cross-polarized light) within the HFZ. Pl: plagioclase porphyroclast (Shigematsu et al., 2009). (c) Microstructure of an ultramylonite. The arrows indicate a crush zone (Shigematsu et al., 2004). (d) Outcrop extent of mylonite microstructures along the HFZ (Shigematsu et al., 2009). The shaded area in (d) indicates the largest outcrop extent of microstructure A.

第4図 畑川破砕帯の概要。(a)全体図(Shigematsu et al., 2009)。(b)微細構造Aのマイロナイトの石英(qz)微細構造。Pl: 斜長石ポーフロクラスト。(c)畑川破砕帯に沿うウルトラマイロナイトの微細構造。ウルトラマイロナイトに沿って粉碎領域(矢印)が見られる(Shigematsu et al., 2004)。(d)Shigematsu et al. (2009)に基づく畑川破砕帯沿いのマイロナイト微細構造の変形の空間分布。影をつけた領域は微細構造Aの最大分布域。

について、PSTに含まれる杏仁状構造を形成する方解石のe双晶の状況から40–80 MPaと推定した。また方解石のe双晶を用いた応力逆解析(Yamaji et al., 2006)から、マイロナイト変形とPSTを作った脆性変形が一連の変形であると推定した。

三重県のMTLでは脆性–塑性遷移を挟んだ差応力のギャップが示唆されるのに対し、足助剪断帯ではそのようなギャップは考えられない。ただし、後者は現地の岩石試料から直接差応力を見積もっているのに対し、前者は実験室の外挿により脆性領域の差応力を推定しており、注意が必要である。

ITA-1掘削孔では、Fタイプ石英を含むウルトラマイロナイトは幅2 m程度である(Shigematsu et al., 2012)。剪断帯の幅 w 、剪断歪速度 $\dot{\gamma}$ と変位速度 v の関係 $v = \dot{\gamma}w$ と上

記のFタイプ石英において見積もられた歪速度を用いると変位速度は 1.3 mm yr^{-1} から 11 mm yr^{-1} 程度となる(Okudaira and Shigematsu, 2012)。これは現在のMTLの変位速度 $10\text{--}20 \text{ mm yr}^{-1}$ 程度(Tabei et al., 2003; 堤・後藤, 2006; Noda and Toshimitsu, 2009)と大きく違わない。従って、MTL沿いのマイロナイトが過去のMTLの深部延長であると考えて矛盾しない(Okudaira and Shigematsu, 2012)。

2. 塑性変形と破壊の共存

三重県内のMTL沿いに見られるFタイプ石英を含むマイロナイト・ウルトラマイロナイト(高木, 1985)と類似のマイロナイト・ウルトラマイロナイトは福島県の畑川破砕帯(HFZ)に沿っても観察される(例えば, Shigematsu and Yamagishi, 2002)。HFZは福島県の阿武隈山地東部の花

Fig. 5. Geology of the Hidaka Metamorphic Belt. (a) Outcrop extent of mylonites that formed during different tectonic stages (modified from Toyoshima et al., 1997). (b) and (c) Microstructures and crystallographic fabrics of plagioclase in a granulite-facies shear zone of the HMB (modified from Raimbourg et al., 2008). (b) EBSD map and distributions of poles to (001) planes and <100> directions for coarse-grained matrix plagioclase and (c) SEM-forescattered electron image and distributions of poles to (001) planes and <100> directions for a fine-grained layer.

第5図 日高変成帯の地質概要。(a) 日高変成帯の内部の異なるステージに形成したマイロナイトの分布(豊島ほか(1997)に加筆)。(b) (c) 日高変成帯のグラニュライト相剪断帯の微細構造と結晶方位分布(Raimbourg et al., (2008)を修正)。(b) 粗粒斜長石マトリックスのEBSD結晶方位マップと(001)面の極と<100>方位の結晶方位分布。(c) 細粒層のSEM前方散乱電子像と斜長石(001)面の極と<100>方位の結晶方位分布。

崗岩類中に北北西-南南東走向に分布する断層帯で(例えば、久保・山元, 1990), 左横ずれマイロナイト帯, カタクレサイト帯, 小断層帯群という3つの構成要素からなる(例えば, Tomita et al., 2002) (Fig. 4a). このうちカタクレサイト帯は幅50~100 mで40 km以上にわたり連続的に分布し, これに沿う形で最大幅1 kmの北北西-南南東走向で鉛直に近い面構造を持つ左横ずれマイロナイトが不均質に分布している。また, 小断層帯群は北東-南西走向と東西走向の共役関係にある幅数mm~数mの小断層帯が北北西-南南東方向に分布している(Takagi et al., 2000)。

Shigematsu and Yamagishi (2002) は最大幅1 kmの左横ずれマイロナイトの微細構造を大きく微細構造Aと微細構造Bに分類した。両者は石英の微細構造, LPO, 石英と共存する長石の変形様式が異なり, 微細構造Aが微細構造Bより低温で変形したものである(Shigematsu and Yama-

gishi, 2002; Shigematsu et al., 2009)。微細構造A中の再結晶石英は数μmと小さく, 三重県内のMTL沿いに見られるFタイプ石英と類似する(Fig. 4b)。またHFZの小断層帯群のマイロナイトの変形微細構造は, 左横ずれマイロナイトの微細構造Aの特徴を持つ(Shigematsu, 1999; Shigematsu et al., 2004)。

HFZの微細構造Aの左横ずれマイロナイトおよび小断層帯群では, シアバンドなどの塑性変形が集中した場所に沿ってしばしば破壊を生じている(Takagi et al., 2000; Tomita et al., 2002) (Fig. 4c)。これらは, 破壊と塑性変形の繰り返し, PST(久保・高木 1997)やカタクレサイトがウルトラマイロナイト化するなどの特徴を示し, 脆性-塑性遷移領域付近に形成したものと考えられる(Takagi et al., 2000; Tomita et al., 2002; Shigematsu et al., 2009)。これらのマイロナイトでは, サブミクロンの細粒長石層にしばしば塑

性変形が集中している(Shigematsu, 1999; Shigematsu and Tanaka, 2000). 詳細な SEM 観察から変形集中に伴う破壊は、細粒斜長石層の塑性変形過程で生ずる微小空洞と、空洞の連結により破断面を形成する延性破壊によると考えられる(Shigematsu et al., 2004). この細粒長石の延性破壊は、脆性-塑性遷移条件付近における重要な破壊開始過程と考えられ、実験的にも再現されている(例えば, Rybacki et al., 2008, 2010). また塑性変形中に発生する微小空洞は、変形中のマイロナイト中の重要な流体移動機構であると考えられている(Fusseis et al., 2009).

日高変成帯(HMB)の中でもマイロナイトの変形集中した場所に沿って PST が形成している例が報告されている(Toyoshima et al., 2004) (Fig. 5a). HMB は北海道日高山脈の東側に南北方向に分布し、日高主衝上断層を西端とし東から西に変成度が上昇する(小山内, 1985). この中には 2 種類の PST があり、このうちマイロナイトの変形が強くなった場所に沿って PST が分布するタイプは主として HMB の南部に分布する(Toyoshima et al., 2004). これらの PST は幅数 m 未満の小断層の中心部に分布するが、小断層帯では変形に伴い石英が減少し雲母類が増加し、シアバンドや C 面などの変形集中域に沿って PST が見られる(Shimada et al., 2004).

3. 脆性-塑性遷移領域の変形の空間的広がり

上記の HFZ の左横ずれマイロナイト帯、カタクレーサイト帯の分布を見ると、微細構造 B のマイロナイトとカタクレーサイトは、断層に沿って 40 km 以上にわたり分布している。一方、微細構造 A のマイロナイトは断層の走向方向に 6 km 程度の限られた範囲にしか分布しない(Fig. 4d). またカタクレーサイトが岩片として、微細構造 A のマイロナイトを含む範囲もこの 6 km 付近に限定されている(Shigematsu et al., 2009). すなわち脆性-塑性遷移条件に相当する深度では、塑性変形による断層変位はごく限られた区間でしか起こっていない。このような塑性変形の不均質は応力集中を招き、地震発生の原因となる応力蓄積過程で重要な役割をしている可能性がある(Shibasaki et al., 2004; Shigematsu et al., 2009). なお、内陸活断層で発生する大地震の震源断層長を考えると(例えば, 松田, 1975), HFZ で明らかになったような脆性-塑性遷移条件付近の走向方向に数 10 km の変形の不均質の情報は重要と考えられるが、十分な研究例はない。

HFZ の微細構造 B のマイロナイトは石英の c 軸が Y 軸に集中することを特徴とする(Shigematsu and Yamagishi, 2002). また、変形の進行に伴い 50 μm 未満の長石と石英からなる細粒多相集合体が増大する(Tsurumi et al., 2003). この細粒多結晶体はカリ長石ポーフィロクラスト周囲のミルメカイト形成反応、流体を介したカリ長石の移動により形成し、マイロナイト中の重要な変形過程と考えられる(Tsurumi et al., 2003). 同様に石英の c 軸が Y 軸集中を示し、長石を含む細粒多相集合体から構成されるマイロナイトは、他のマイロナイト帯においても報告されている(例えば, Ishii et al., 2007; Fukuda et al., 2012). 以上のように脆

性-塑性遷移より深く、塑性変形が卓越する深度においては c 軸が Y 軸集中を示す LPO で特徴づけられる石英の塑性流動と長石を含む細粒多相集合体の流動が支配的と考えられる。

下部地殻の断層帯内部構造

1. 下部地殻の断層帯の産状・変形機構

下部大陸地殻は、斑れい岩など斜長石を主要構成鉱物として含む岩石から構成される。角閃岩相からグラニュライト相に相当する高温・高圧条件下における変形では、斜長石や輝石の転位クリープによる変形が重要である(Ji and Mainprice, 1988, 1990; Kruse et al., 2001; Rosenberg and Stünitz, 2003; Kanagawa et al., 2008; Raimbourg et al., 2008). また、鉱物の粒径が減少すると、転位クリープから拡散クリープや粒界すべりといった粒径依存クリープへの遷移が起こり、有効粘性率の低下につながる(例えば, Stünitz and Tullis, 2001; Warren and Hirth, 2006; Ohuchi et al., 2015). ここでは島弧地殻が横倒しになったことにより下部地殻の断面が露出したとされる HMB(例えば, Komatsu et al., 1983)における例を紹介する(Fig. 5a). HMB は前述の通りの地質産状を呈するが、下部地殻において厚さ数 100 m から 2 km の上盤南移動の水平に近いマイロナイト帯が形成(D₂期)したのち、右横ずれトランスプレッション変形により地殻が横倒しになったものと考えられている(D₃期)(Toyoshima et al., 1994) (Fig. 5a).

Raimbourg et al. (2008) は HMB 北部のグラニュライト相で変形した斑れい岩マイロナイトの微細構造と LPO の解析を行った。このマイロナイトは斜長石層と、面構造に平行に引き延ばされた斜方輝石ポーフィロクラストを含み、その強い LPO は、転位クリープによる変形を示唆する(Fig. 5b). 一方、斜方輝石ポーフィロクラストからは細粒マトリックスが伸びており、その構成鉱物の弱い LPO と粒子形状は、粒界滑りによる変形を示唆する(Fig. 5c). 細粒マトリックスは斜方輝石の垂粒回転により形成されたと考えられ、この粒径減少による変形機構の遷移がグラニュライト相の変形における重要な弱化機構であると考えられる。

また Kanagawa et al. (2008) は同じく HMB 北部においてグラニュライト相から角閃岩相への後退変成作用を受けた斑れい岩マイロナイトおよびウルトラマイロナイト(約 600 MPa, 600–700°C)の微細構造と輝石と斜長石の LPO の解析を行っている。Raimbourg et al. (2008) のグラニュライト相における変形と同様に輝石ポーフィロクラストと斜長石は強い LPO を持ち、前者は(100) <001>, 後者は(001) 1/2 <110>の卓越すべり系が示唆される。一方、変形と後退変成作用によって、輝石、石英、角閃石、黒雲母、イルメナイトからなる細粒多相集合体が形成され、そこでの変形機構は粒界滑りである(Kanagawa et al., 2008). しかし、粒界滑りによる変形は限定的であり、下部地殻の斑れい岩の強度は斜長石の転位クリープ強度に相当するとした。

以上のように、斜長石や輝石の転位クリープとともに、変形中の細粒物質形成と、その粒径依存型クリープによる変形

Table 1. Pressure (P)–temperature (T) conditions of dynamic recrystallization of naturally deformed plagioclase.

P (GPa)	T (°C)	Mechanism of dynamic recrystallization	References
0.4–0.6	650–825	Grain boundary migration associated with fractures	Díaz-Azpiroz et al. (2011)
0.5–0.56	700–750	Grain boundary migration and subgrain rotation	Egydio-Silva and Mainprice (1999)
1	750–950	Grain boundary migration with subsidiary subgrain rotation	Ji and Mainprice (1988), Ji and Mainprice (1990)
0.3–0.4	600–700	Subgrain rotation?	Ji and Mainprice (1988)
?	600	Grain boundary migration with subsidiary subgrain rotation	Ji and Mainprice (1988), Ji and Mainprice (1990)
1	900	Grain boundary migration with subsidiary subgrain rotation	Ji and Mainprice (1988), Ji and Mainprice (1990)
0.6	660–700	Grain boundary migration	Kanagawa et al. (2008)
0.4–0.6	500–650	Subgrain rotation	Kenkmann and Dresen (2002)
0.9	700	Bulging of grain boundaries with subsidiary subgrain rotation	Kruse and Stünitz (1999)
0.08–0.11	800–950	Subgrain rotation	Mehl and Hirth (2008)
?	740–840	Subgrain rotation	Miranda et al. (2016)
0.6–0.8	700–800	Subgrain rotation with subsidiary grain boundary migration	Olsen and Kohlstedt (1985)
0.61–0.72	800–900	Subgrain rotation associated with fractures	Raimbourg et al. (2008)
0.6–0.85	580–670	Subgrain rotation associated with grain boundary migration at high- <i>T</i>	Rosenberg and Stünitz (2003)
		Nucleation and growth of new grain at low- <i>T</i>	
0.85	650–750	Bulging (i.e., local grain boundary migration combined with subgrain rotation) associated with fractures	Stünitz (1998)

が下部地殻における重要な変形過程としてあげられる。下部地殻構成岩石においては、同様の斜長石や輝石の動的再結晶を含む細粒化による軟化は他にも報告されている(例えば、Kruse et al., 2001; Rosenberg and Stünitz, 2003)。本論では、これまで下部地殻条件において有効な細粒化過程として報告されている斜長石の動的再結晶作用の温度・圧力条件を、Table 1 にまとめた。

2. 下部地殻における変形過程と破壊

近年、下部大陸地殻の条件の変形に破壊が関与している例が報告されている(Fig. 6)。Okudaira et al. (2015, 2017) はノルウェーの下部地殻で形成した斑れい岩や斜長岩起源のマイロナイトを解析し、破碎とそれに引き続く吸水変成反応・粒径依存型クリープ(転位緩和型粒界すべり)による変形過程を見出した。また、粒径依存型クリープで変形した斜長石集合体の平均粒径に基づき、差応力を斜長石の流動則(Rybacki and Dresen, 2004) から 0.01–50 MPa と見積もった(歪速度は 10^{-12} s^{-1})。岩石は一般に間隙圧(P_f)が高ければ、低応力(有効応力, σ_{eff})でも破壊する。しかし、高温高压条件では、塑性変形や亀裂の癒合により、破壊強度に対する間隙水圧の影響は小さくなる(Hirth and Beeler, 2015)。このことから、Okudaira et al. (2015, 2017) は Goetze's criterion (Kohlstedt et al., 1995) を考慮し、下部地殻の剪断帯に見られる破碎について、岩石が周囲の圧力(封圧)程度の差応力を経験し、この後に差応力が一桁以上低くなった結果とした。すなわち破碎が地震時における高差応力に(例えば、Trepmann and Stöckhert, 2002)、破壊後の粒径依存型クリープが地震発生後の応力緩和(余効変動)に対応していると考えた。

なお破碎組織と関連した変成鉱物が認められる場合、破碎作用時の温度、圧力、および流体組成を見積もることが可能である。ただし、見積もられた温度・圧力条件は、破碎作用の下限を示しており、実際はその条件よりもより高温・高

圧条件で形成された可能性が高いことを留意しなければならない。また、PST が変成作用を被っている場合も、その変成鉱物から推定される温度・圧力条件の多くは破碎作用の下限を示しているであろう。本論では、これまで見積もられた地殻深部(圧力条件が 400 MPa 以上のもの)における破壊作用の温度・圧力条件を、Table 2 にまとめた。

地殻深部における破壊が起こる温度・圧力条件は、圧力については地下約 70 km に相当する(岩石密度は 2800 kg m^{-3} を仮定) 2 GPa まで、温度については少なくとも約 800°C までは発生するようである。温度については McKenzie et al. (2005) が見積もった地震発生の上限温度(約 600°C) よりも高く、破壊が起きるために必要な高い差応力が少なくとも 800°C 程度までは十分に発生することを示唆する。

Okudaira et al. (2015, 2017) は、下部地殻における高応力の原因として地震を考えた。地震は破壊域においては周囲の地殻応力を減少させるが、破壊域先端においては局所的な応力集中(>200 MPa)を引き起こす。特に下部地殻ではこの応力は一定時間継続する可能性がある(例えば、Ellis and Stöckhert, 2004)。サンアンドレアス断層周辺における微小地震や余効変動などの観測から、地震発生領域直下における応力集中が指摘されており、地震サイクルシミュレーションによってその応力集中の過程が再現されている(Jiang and Lapusta, 2016)。

一方で、(超)高温変成帯などにおいては、破碎された変成岩に部分溶融メルトや熱源のマグマの細脈がネットワーク状に貫入している例や、アグマタイトやミグマタイトを形成して変成岩の角礫がメルトに包有されている例がしばしば認められる(例えば、Toyoshima et al., 1994, 1999)。これらは超高温条件またはメルトを含む条件での破碎現象を示しており、メルトポケットやマグマ溜まりの高流体圧や、メルトやマグマの流動に伴う高速変形(> $\sim 10^{-6} \text{ s}^{-1}$)にその原因が求められている(例えば、Lister and Kerr, 1991; Tuffen et

Fig. 6. Development of fracturing in lower crustal rocks (Okudaira et al., 2015). (a) Overview of an ultramylonite shear zone (bottom) and associated fractures that are oriented at a low angle to the ultramylonite zone (top). (b) Intragranular and intergranular fractures in plagioclase in the host rock. (c) Boundary between fractured host rock and the shear zone.

第6図 下部地殻における破壊を示す構造(Okudaira et al., 2015). (a)ウルトラマイロナイト(下部)とそれに伴う亀裂(上部). (b)原岩の斜長石内の粒子間および粒子内亀裂. (c)亀裂の入った原岩と剪断帯の境界.

al., 2008). このような破碎現象と地下深部における剪断帯の形成との関連性は不明な点が多いが、今後の重要な研究課題の一つである。以上のように、破壊は地下深部でも起きており、破碎・粉砕による構成鉱物の細粒化は重要な過程の一つであると考えられる(例えば, Handy and Stünitz, 2002; Menegon et al., 2013; Okudaira et al., 2015, 2017)。

今後の課題

下部地殻における破壊は数値シミュレーションによっても再現されているが、下部地殻は転位クリープで延性変形させ時間発展も与えていないため(Ellis and Stöckhert, 2004; Shimamoto and Noda, 2014; Jiang and Lapusta, 2016)、破壊後に粒径依存型クリープが卓越し、粒成長とともにその粘性率が増加するといった天然の観察結果は数値シミュレーションには十分には組み込まれていない。今後は天然の観察結果、変形実験そして数値シミュレーションを総合して、下部地殻の延性剪断帯の実態に迫っていく必要がある。

脆性領域深部に見られる面状カクレーサイトにおいて、圧力溶解により断層が弱化する可能性について述べた(Holdsworth, 2004; Jefferies et al., 2006b)。一方、この推定は実験室の外挿に基づいていることに注意が必要である。また、圧力溶解が断層を癒着する効果も報告されており(例えば, Kaner et al., 1997; Olsen et al., 1998)、その効果は単純ではない。圧力溶解による時間発展の効果も含め(例えば, Gratier et al., 2003)、今後検討していく必要があるであろう。

この25年において、限られたスケールにおける断層内部構造の理解は深まったように思われる。一方、地震を含む断層に沿う現象の理解には、常にスケールの違いが問題になり、全体像の把握には困難が伴う(例えば, Row and Griffith, 2015)。今後、断層に沿う現象を理解していく上では、異なるスケール間のつながりを正確に把握していくこと、そのための新たな技術・調査手法の開発を行っていくことが必要であろう。

Table 2. P–T conditions of fracturing in deep-seated rocks (greater than ~0.4 GPa).

P (GPa)	T (°C)	Sample	Reference
1–1.5	450	Pseudotachylyte, ophiolite gabbro and mantle peridotite, Schistes Lustrés of Cape Corse, Alpine Corsica	Andersen and Austrheim (2006)
1.8–1.9	790–820	Pseudotachylyte, anorthosite gabbro, Bergen arcs, western Norway	Austrheim and Boundy (1994)
0.68–0.78	700	Pseudotachylyte, granulite facies gneiss, MacRobertson Land, east Antarctica	Clarke and Norman (1993)
0.4–0.6	700–900	cm-scale shear zone, spinel lherzolite, Ivrea–Verbano Zone, Southern Alps	Handy and Stünitz (2002)
2	640	Pseudotachylyte, gabbro and eclogite, central Zambia	John and Schenk (2006)
2	650–700	Pseudotachylyte, Kråkenes gabbro, Western Gneiss Complex, Norway	John et al. (2009)
0.32–0.65	640–720	Pseudotachylyte, anorthosite, Eidsfjord shear zone, northern Norway	Leib et al. (2016)
0.87–1.15	630–710	Pseudotachylyte, anorthosite, Fiskfjord shear zone, northern Norway	Leib et al. (2016)
0.8	650–700	Pseudotachylyte granulitic gneiss and granite, Woodroffe thrust zone, central Australia	Lin (2008)
0.65–0.8	700–730	Mylonite, mangerite-charnockite, northern Norway	Menegon et al. (2013)
0.5–0.6	700–750	cm-scale shear zone, Hasvik gabbro, northern Norway	Okudaira et al. (2015)
0.7	600	Mylonite, Eidsfjord anorthosite complex, northern Norway	Okudaira et al. (2017)
0.4–0.6	500–650	Pseudotachylytes, Premosello metagabbro, Ivrea zone, northern Italy	Pittarello et al. (2012)
0.35–0.45	675–700	cm to dm-scale shear zone, anorthosite-leucogabbro, western Greenland	Svahnberg and Piazzolo (2010)
0.74–0.86	620–640	cm-scale shear zone, anorthosite-leucogabbro, western Greenland	Svahnberg and Piazzolo (2013)
0.5–0.6	800	Fractures filled with igneous veins, Hidaka metamorphic belt, northern Japan	Toyoshima et al. (1994)
0.7–1.1	800	Pseudotachylyte, Balmuccia peridotite, Ivrea zone, northern Italy	Ueda et al. (2013)

謝 辞

金川久一氏と匿名の査読者、および担当編集委員である石井和彦氏の指摘により、本論文は大いに改善された。また石井和彦氏には本原稿を書く機会を与えていただいた。本文中の英語表現の一部についてはニュージーランドオタゴ大学の Virginia Toy 氏に確認していただいた。本研究の内容の一部に、文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究 26109004 を使わせていただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

- 相澤泰隆・小林健太・梅津健吾・山本 亮 (Aizawa, Y., Kobayashi, K., Umetsu, K., and Yamamoto, R.), 2005, 2000 年鳥取県西部地震の余震域およびその周辺に分布する断層岩類 (Fault rocks in the aftershock area and the neighborhood of 2000 Tottori-ken Seibu earthquake). 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **111**, 737–750.
- Ampuero, J. P. and Ben-Zion, Y., 2008, Cracks, pulses and macroscopic asymmetry of dynamic rupture on a bimaterial interface with velocity-weakening friction. *Geophys. Jour. Int.*, **173**, 674–692.
- Andersen, T. B. and Austrheim, H., 2006, Fossil earthquakes recorded by pseudotachylytes in natural peridotite from the Alpine subduction complex of Corsica. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **343**, 58–72.
- Austrheim, H. and Boundy, T. M., 1994, Pseudotachylytes generated during seismic faulting and eclogitization of the deep crust. *Science*, **265**, 82–83.
- Behr, W. M. and Platt, J. P., 2011, A naturally constrained stress profile through the middle crust in an extensional terrane. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **303**, 181–192.
- Behr, W. M. and Platt, J. P., 2014, Brittle faults are weak, yet the ductile middle crust is strong: Implications for lithospheric mechanics. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 8067–8075.
- Bos, B. and Spiers, C. J., 2002, Frictional–viscous flow of phyllosilicate-bearing fault rock: microphysical model and implications for crustal strength profiles. *Jour. Geophys. Res.*, **107**, 1–13.
- Bradbury, K. K., Evans, J. P., Chester, J. S. and Chester, F. M., Kirschner, D. L., 2011, Lithology and internal structure of the San Andreas fault at depth based on characterization of Phase 3 whole-rock core in the San Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD) borehole. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **310**, 131–141.
- Byerlee, J., 1978, Friction of rocks. *Pure Appl. Geophys.*, **116**, 615–626.
- Caine, J. S., Evans, J. P. and Forster, C. B., 1996, Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, **24**, 1025–1028.
- Chester, F. M., Rowe, C., Ujiie, K., Kirkpatrick, J., Regalla, C., Remitti, F., ... Expedition 343 and 343T Scientists, 2013, Structure and composition of the plate-boundary slip zone for the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, **342**, 1208–1211.
- Chester, J. S., Chester, F. J. and Kronenberg, A. K., 2005, Fracture surface energy of the Punchbowl fault, San Andreas system. *Nature*, **437**, 133–136.
- Choi, J.-H., Edwards, P., Ko, K. and Kim, Y.-S., 2016, Definition and classification of fault damage zones: A review and a new methodological approach. *Earth-Sci. Rev.*, **152**, 70–87.
- Clarke, G. L. and Norman, A. R., 1993, Generation of pseudotachylyte under granulite facies conditions, and its preservation during cooling. *Jour. Metamorph. Geol.*, **11**, 319–335.
- Díaz-Azpiroz, M., Lloyd, G. E. and Fernández, C., 2011, Deformation mechanisms of plagioclase and seismic anisotropy of the Acebuches metabasites (SW Iberian massif). In Prior, D. J., Rutter, E. H. and Tatham, D. J., eds., *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Microstructures*,

- Mechanics and Anisotropy*, Geol. Soc. London, Spec. Publ., **360**, 79–95.
- Doğan, T., Sumino, H., Nagao, K. and Notsu, K., 2006, Release of mantle helium from forearc region of the Southwest Japan arc. *Chem. Geol.*, **233**, 235–248.
- Dor, O., Ben-Zion, Y., Rockwell, T. K. and Brune, J., 2006. Pulverized rocks in the Mojave section of the San Andreas Fault Zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **245**, 642–654.
- Egydio-Silva, M. and Mainprice, D., 1999, Determination of stress directions from plagioclase fabrics in high grade deformed rocks (Além Paraíba shear zone, Ribeira fold belt, southeastern Brazil). *Jour. Struct. Geol.*, **21**, 1751–1771.
- Ellis, S. and Stöckhert, B., 2004, Elevated stresses and creep rates beneath the brittle-ductile transition caused by seismic faulting in the upper crust. *Jour. Geophys. Res.*, **90**, B05407, doi: 10.1029/2003JB002744.
- Faulkner, D. R., Jackson, C. A. L., Lunn, R. J., Schlische, R. W., Shipton, Z. K., Wibberley, C. A. J. and Withjack, M. O., 2010, A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Jour. Struct. Geol.*, **32**, 1557–1575.
- Fukuda J., Okudaira, T., Satsukawa, T. and Michibayashi, K., 2012, Solution–precipitation of K-feldspar in deformed granitoids and its relationship to the distribution of water. *Tectonophysics*, **532–535**, 175–185.
- Fusseis, F., Regenauer-Lieb, K., Liu, J., Hough, R. M. and De Carlo, F., 2009, Creep cavitation can establish a dynamic granular fluid pump in ductile shear zones. *Nature*, **459**, 974–977.
- Gratier, J.-P., Favreau, P. and Renard, F., 2003, Modeling fluid transfer along California faults when integrating pressure solution crack sealing and compaction processes. *Jour. Geophys. Res.*, **108**, B2, 2104, doi: 10.1029/2001JB000380.
- Gratier, J.-P., Richard, J., Renard, F., Mittempergher, S., Doan, M.-L., Di Toro, G.,...Hadizadeh J. and Boullier, A.-M., 2011, Aseismic sliding of active faults by pressure solution creep: Evidence from the San Andreas Fault Observatory at Depth. *Geology*, **39**, 1131–1134.
- Handy, M. R. and Stünitz, H., 2002, Strain localization by fracturing and reaction weakening – a mechanism for initiating exhumation of subcontinental mantle beneath rifted margins. In De Meer, S., Drury, M. R., De Bresser, J. H. P. and Pen-nock, G. M., eds., *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics: Current Status and Future Perspectives*, Geol. Soc. London, Spec. Publ., **200**, 387–407.
- Hirth, G. and Beeler, N. M., 2015, The role of fluid pressure on frictional behavior at the base of the seismogenic zone. *Geology*, **43**, 233–226.
- Holdsworth, R. E., 2004, Weak faults-rotten cores. *Science*, **303**, 181–182.
- Ikeda, M., Kato, S., Nishizaka, N., Ohno, Y., Matsuo, K. and Kishimoto, M., 2013, Magnetotelluric imaging of the Median Tectonic Line in western Shikoku, southwest Japan: Implications of the fault-related low-resistivity zone. *Tectonophysics*, **601**, 78–86.
- Inoue, A., 1995, Formation of clay minerals in hydrothermal environments. In Velde, B. ed., *Origin and Mineralogy of Clays*, Springer, Berlin, 268–329.
- Ishii, K., Kanagawa, K., Shigematsu, N. and Okudaira, T., 2007, High ductility of K-feldspar and development of granitic banded ultramylonite in the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **29**, 1083–1098.
- Jefferies, S. P., Holdsworth, R. E., Shimamoto, T., Takagi, H., Lloyd, G. E. and Spiers, C. J., 2006a, Origin and mechanical significance of foliated cataclastic rocks in the cores of crustal-scale faults: Examples from the Median Tectonic Line, Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **111**, B12303, doi: 10.1029/2005JB004205.
- Jefferies, S. P., Holdsworth, R. E., Wibberley, C. A. J., Shimamoto, T., Spiers, C. J., Niemeijer, A. R. and Lloyd, G. E., 2006b, The nature and importance of phyllonite development in crustal-scale fault cores: an example from the Median Tectonic Line, Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 220–235.
- Ji, S. and Mainprice, D., 1988, Natural deformation fabrics of plagioclase: implications for slip systems and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, **147**, 145–163.
- Ji, S. and Mainprice, D., 1990, Recrystallization and fabric development in plagioclase. *Jour. Geol.*, **98**, 65–79.
- Jiang, J. and Lapusta, N., 2016, Deeper penetration of large earthquakes on seismically quiescent faults. *Science*, **352**, 1293–1297.
- John, T., Medvedev, S., Rüpke, L. H., Andersen, T. B., Podladchikov, Y. Y. and Austrheim, H., 2009, Generation of intermediate-depth earthquakes by self-localizing thermal runaway. *Nature Geosci.*, **2**, 137–140.
- John, T. and Schenk, V., 2006, Interrelations between intermediate-depth earthquakes and fluid flow within subducting oceanic plates: Constraints from eclogite facies pseudotachylytes. *Geology*, **34**, 557–560.
- 金川久一(Kanagawa, K.), 1998, 岩石の摩擦と流動に対する熱水および化学反応の影響: 主要未解決問題(Effects of hydrothermal fluids and chemical reactions on friction and flow of rocks: major unsolved problems). 地質学論集(Mem. Geol. Soc. Japan), **50**, 47–57.
- Kanagawa, K., Shimano, H. and Hiroi, Y., 2008, Mylonitic deformation of gabbro in the lower crust: A case study from the Pankenushi gabbro in the Hidaka metamorphic belt of central Hokkaido, Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **30**, 1150–1166.
- Kanai, T. and Takagi, H., 2016, Determination of the stress conditions of the ductile-to-brittle regime along the Asuke Shear Zone, SW Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **85**, 154–167.
- Kaner S. L., Marone, C. and Evans, B., 1997, Laboratory study of fault healing and lithification in simulated fault gouge under hydrothermal conditions. *Tectonophysics*, **277**, 41–55.
- 風早康平・高橋正明・安原正也ほか(Kazahaya, K., Takahashi, M., Yasuhara, M. and others), 2014, 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴(Spatial distribution and feature of slab-related deep-seated fluid in SW Japan). 日本水文学会誌(Jour. Japan. Assoc. Hydrol. Soc.), **44**, 3–16.
- Kenkmann, T. and Dresen, G., 2002, Dislocation microstructure and phase distribution in a lower crustal shear zone – an example from the Ivrea-Zone, Italy. *Int. Jour. Earth Sci.*, **91**, 445–458.
- Kim, Y.-S., Peacock, D. C. P. and Sanderson, D.J., 2004, Fault damage zones. *Jour. Struct. Geol.*, **26**, 503–517.
- Kohlstedt, D. L., Evans, B. and Mackwell, S. J., 1995, Strength of the lithosphere: Constraints by laboratory experiments. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 17587–17602.
- Komatsu, M., Miyashita, S., Maeda, J., Osanai, Y. and Toyoshima, T., 1983, Disclosing of a deepest section of continental-type crust up-thrust as the final event of collision of arcs in Hokkaido, North Japan. In Hashimoto, M. and Uyeda, S., eds., *Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions*. TERRAPUB, Tokyo, 149–165.
- Kruse, R. and Stünitz, H., 1999, Deformation mechanisms and phase distribution in mafic high-temperature mylonites from the Jotun Nappe, southern Norway. *Tectonophysics*, **303**, 223–249.
- Kruse, R., Stünitz, H. and Kunze, K., 2001, Dynamic recrystallization processes in plagioclase porphyroclasts. *Jour. Struct. Geol.*, **23**, 1781–1802.
- 久保和也・高木秀雄(Kubo, K. and Takagi, H.), 1997, 畑川破砕帯西部, 阿武隈花崗岩中に発見されたシュードタキライト(New finding of pseudotachylyte from the Abukuma Granites on the west of Hatagawa fracture zone). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **103**, 798–801.

- 久保和也・山元孝広 (Kubo, K. and Yamamoto, T.), 1990, 阿武隈山地東縁原町地域の白亜紀貫入岩類—岩石記載および K-Ar 年代— (Cretaceous intrusive rocks of the Haramachi district, eastern margin of the Abukuma Mountains: petrography and K-Ar age). 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **96**, 731–743.
- Leib, S. E., Moecher, D. P., Steltenpohl, M. G. and Andersen, A., 2016, Thermobarometry of metamorphosed pseudotachylyte and associated mylonite: Constraints on dynamic co-seismic rupture depth attending Caledonian extension, North Norway. *Tectonophysics*, **682**, 85–95.
- Lin, A., 1994, Glassy pseudotachylyte veins from the Fuyun fault zone, northwest China. *Jour. Struct. Geol.*, **16**, 71–83.
- Lin, A., 1999, S-C cataclasis in granitic rock. *Tectonophysics*, **304**, 257–273.
- Lin, A., 2008, Seismic slip in the lower crust inferred from granulite-related pseudotachylyte in the Woodroffe thrust, central Australia. *Pure Appl. Geophys.*, **165**, 215–233.
- Lin, A. and Yamashita, K., 2013, Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: An example from active faults in southwest Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **57**, 1–15.
- Lister, J. R. and Kerr, R. C., 1991, Fluid-mechanical models of crack propagation and their application to magma transport in dykes. *Jour. Geophys. Res.*, **96**, 10049–10077.
- Lockner, D. A., Tanaka, H., Ito, H., Ikeda, R., Omura, K. and Naka, H., 2009, Geometry of the Nojima Fault at Nojima-Hirabayashi, Japan – I. A Simple Damage Structure Inferred from Borehole Core Permeability. *Pure Appl. Geophys.*, **166**, 1649–1667.
- 松田時彦 (Matsuda, T.), 1975, 活断層から発生する地震の規模と周期について (Magnitude and recurrence interval of earthquakes from a fault). 地震第2輯 (Jour. Seismol. Soc. Japan, 2nd. Ser.), **28**, 269–283.
- Matsuda, T., Omura, K., Ikeda, R., Arai, T., Kobayashi, K., Shimada, K., Hirano, S., 2004, Fracture-zone conditions on a recently active fault: insights from mineralogical and geochemical analyses of the Hirabayashi NIED drill core on the Nojima fault, southwest Japan, which ruptured in the 1995 Kobe earthquake. *Tectonophysics*, **378**, 143–163.
- Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K. and Mimura, K., 2003, $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan: surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **216**, 221–230.
- McKenzie, D., Jackson, J. and Priestley, K., 2005, Thermal structure of oceanic and continental lithosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 337–349.
- Mehl, L. and Hirth, G., 2008, Plagioclase preferred orientation in layered mylonites: Evaluation of flow laws for the lower crust. *Jour. Geophys. Res.*, **113**, B05202, doi: 10.1029/2007JB005075.
- Menegon, L., Stünitz, H., Nasipuri, P., Heilbronner, R. and Svahnberg, H., 2013, Transition from fracturing to viscous flow in granulite facies perthitic feldspar (Lofoten, Norway). *Jour. Struct. Geol.*, **48**, 95–112.
- Miranda, E. A., Hirth, G. and John, B. E., 2016, Microstructural evidence for the transition from dislocation creep to dislocation-accommodated grain boundary sliding in naturally deformed plagioclase. *Jour. Struct. Geol.*, **92**, 30–45.
- Mitchell, T. M., Ben-Zion, Y. and Shimamoto, T., 2011, Pulverized fault rocks and damage asymmetry along the Arima-Takatsuki Tectonic Line, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **308**, 284–297.
- Mizoguchi, K., Hirose, T., Shimamoto, T. and Fukuyama, E., 2008, Internal structure and permeability of the Nojima fault, southwest Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **30**, 513–524.
- Mori, H., Wallis, S., Fujimoto, K. and Shigematsu, N., 2015, Recognition of shear heating on a long-lived major fault using Raman carbonaceous material thermometry: implications for strength and displacement history of the MTL, SW Japan. *Island. Arc*, **24**, 425–446.
- Murakami, M. and Tagami, T., 2004, Dating pseudotachylyte of the Nojima fault using the zircon fission-track method. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L12604, doi: 10.1029/2004GL020211.
- Niemeijer, A. R. and Spiers, C. J., 2005, Influence of phyllosilicates on fault strength in the brittle-ductile transition: insights from rock analogue experiments. In Bruhn, D., Burlini, L. eds., *High-Strain Zones: Structure and Physical Properties*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., **245**, 303–327.
- Niemeijer, A. R. and Spiers, C. J., 2006, Velocity dependence of strength and healing behaviour in simulated phyllosilicate-bearing fault gouge. *Tectonophysics*, **427**, 231–253.
- Niemeijer, A. R. and Spiers, C. J., 2007, A microphysical model for strong velocity weakening in phyllosilicate-bearing fault gouges. *Jour. Geophys. Res.*, **112**, B10405, doi: 10.1029/2007JB005008.
- Niwa, M., Mizuochi, Y. and Tanase, A., 2009, Reconstructing the evolution of fault zone architecture: Field-based study of the core region of the Atera Fault, Central Japan. *Island Arc*, **18**, 577–598.
- Noda, A. and Toshimitsu, S., 2009, Backward stacking of submarine channel-fan succession controlled by strike-slip faulting: The Izumi Group (Cretaceous), southwest Japan. *Lithosphere*, **1**, 41–59.
- Ohtani, T., Fujimoto, K., Ito, H., Tanaka, H., Tomida, N. and Higuchi, T., 2000, Fault rocks and past to recent fluid characteristics from the borehole survey of the Nojima fault ruptured in the 1995 Kobe earthquake, southwest Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **105**, 16161–16171.
- Ohuchi, T., Kawazoe, T., Higo, Y., Funakoshi, K., Suzuki, A., Kikegawa, T. and Irifune, T., 2015, Dislocation-accommodated grain boundary sliding as the major deformation mechanism of olivine in the Earth's upper mantle. *Sci. Adv.*, **1**, e1500360.
- Okudaira, T., Jeřábek, P., Stünitz, H. and Fusses, F., 2015, High-temperature fracturing and subsequent grain-size-sensitive creep in lower crustal gabbros: evidence for coseismic loading followed by creep during decaying stress in the lower crust? *Jour. Geophys. Res.*, **120**, 3119–3141.
- Okudaira, T. and Shigematsu, N., 2012, Estimates of stress and strain rate in mylonites based on the boundary between the fields of grain-size sensitive and insensitive creep. *Jour. Geophys. Res.*, **117**, B03210, doi: 10.1029/2011JB008799.
- Okudaira, T., Shigematsu, N., Harigane, Y. and Yoshida, K., 2017, Grain size reduction due to fracturing and subsequent grain-size-sensitive creep in a lower crustal shear zone in the presence of a CO₂-bearing fluid. *Jour. Struct. Geol.*, **94**, 171–187.
- Olsen, M. P., Scholz, C. H. and Léger, A., 1998, Healing and sealing of a simulated fault gouge under hydrothermal conditions: Implications for fault healing. *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 7421–7430.
- Olsen, T. S. and Kohlstedt, D. L., 1985, Natural deformation and recrystallization of some intermediate plagioclase feldspars. *Tectonophysics*, **111**, 107–131.
- 大橋聖和・小林健太 (Ohashi, K. and Kobayashi, K.), 2008, 中部地方北部、牛首断層中央部における断層幾何学と過去の運動像 (Fault geometry and paleo-movement of the central part of the Ushikubi fault, northern central Japan). 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **114**, 16–30.
- 小山内康人 (Osana, Y.), 1985, 静内川上流地域における日高変成帯主帯変成岩類の地質と変成分帯 (Geology and metamorphic zoning of the Main Zone of the Hidaka Metamorphic Belt in the Shizunai River region, Hokkaido). 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **91**, 259–278.

- Otsuki, K., Monzawa, N. and Nagase, T., 2003, Fluidization and melting of fault gouge during seismic slip: Identification in the Nojima fault zone and implications for focal earthquake mechanisms. *Jour. Struct. Geol.*, **108**, 2192, doi: 10.1029/2001JB001711.
- Pittarello, L., Pennacchioni, G. and Di Toro, G., 2012, Amphibolite-facies pseudotachylytes in Premosello metagabbro and felsic mylonites (Ivrea Zone, Italy). *Tectonophysics*, **580**, 43–57.
- Raimbourg, H., Toyoshima, T., Harima, Y. and Kimura, G., 2008, Grain-size reduction mechanisms and rheological consequences in high-temperature gabbro mylonites of Hidaka, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **267**, 637–653.
- Rosenberg, C. L. and Stünitz, H., 2003, Deformation and recrystallization of plagioclase along a temperature gradient: an example from the Bergell tonalite. *Jour. Struct. Geol.*, **25**, 389–408.
- Row, C. D. and Griffith, W. A. 2015, Do faults preserve a record of seismic slip: A second opinion. *Jour. Struct. Geol.*, **78**, 1–26.
- Rybacki, E. and Dresen, G., 2004, Deformation mechanism maps for feldspar rocks. *Tectonophysics*, **382**, 173–187.
- Rybacki, E., Wirth, R. and Dresen, G., 2008, High-strain creep of feldspar rocks: Implications for cavitation and ductile failure in the lower crust. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L04304, doi: 10.1029/2007GL032478.
- Rybacki, E., Wirth, R. and Dresen, G., 2010, Superplasticity and ductile fracture of synthetic feldspar deformed to large strain. *Jour. Geophys. Res.*, **115**, B08209, doi: 10.1029/2009JB007203.
- 榊原信夫 (Sakakibara, N.), 1996, 石英の変形微細組織と格子定向配列による変形温度・歪速度の推定 (Qualitative estimation of deformation temperature and strain rate from microstructure and lattice preferred orientation in plastically deformed quartz aggregates). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **102**, 199–210.
- 酒巻秀彰・島田耕史・高木秀雄 (Sakamaki, H., Shimada, K. and Takagi, H.), 2006, シュードタキライトの選択的生成場—足助断層帯の例— (Selective generation surface of pseudotachylyte-example from the Asume Shear Zone, SW Japan-). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **112**, 519–530.
- Scholz, C. H., 2002, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting (2nd Edition)*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 471 p.
- Shibazaki, B., Shigematsu, N. and Tanaka, H., 2004, Modeling slips and nucleation processes at the deeper part of the seismogenic zone. *Earth Planets Space*, **56**, 1087–1093.
- Shigematsu, N., 1999, Dynamic recrystallization in deformed plagioclase during progressive shear deformation. *Tectonophysics*, **305**, 437–452.
- Shigematsu, N., Fujimoto, K., Ohtani, T. and Goto, K. 2004, Ductile fracture of fine-grained plagioclase in the brittle-plastic transition regime: implication for earthquake source nucleation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **222**, 1007–1022.
- Shigematsu, N., Fujimoto, K., Ohtani, T., Shibazaki, B., Tomita, T., Tanaka, T. and Miyashita, Y., 2009, Localisation of plastic flow in the mid-crust along a crustal-scale fault: Insight from the Hatagawa Fault Zone, NE Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **31**, 601–614.
- Shigematsu, N., Fujimoto, K., Tanaka, N., Furuya, N., Mori, H. and Wallis, S., 2012, Internal structure of the Median Tectonic Line fault zone, SW Japan, revealed by borehole analysis. *Tectonophysics*, **532–535**, 103–118.
- Shigematsu, N., Kametaka, M., Inada, N., Miyawaki, M., Miyakawa, A., Kameda, J.,...Fujimoto, K., 2017, Evolution of the Median Tectonic Line fault zone, SW Japan, during exhumation. *Tectonophysics*, **696–697**, 52–69.
- Shigematsu, N. and Tanaka, H., 2000, Dislocation creep of fine-grained recrystallized plagioclase under low-temperature conditions. *Jour. Struct. Geol.*, **22**, 65–79.
- Shigematsu, N. and Yamagishi, H., 2002, Quartz microstructures and deformation conditions in the Hatagawa shear zone, north-eastern Japan. *Island. Arc*, **11**, 45–60.
- Shimada, K., Kobari, Y., Okamoto, T., Takagi, H. and Saka, Y., 2001, Pseudotachylyte veins associated with granitic cataclasites along the Median Tectonic Line, eastern Kii Peninsula, Southwest Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **107**, 117–128.
- 島田耕史・高木秀雄・大澤英昭 (Shimada, K., Takagi, H. and Osawa, H.), 1998, 横ずれ圧縮場における地質構造発達様式: 紀伊半島東部, 領家帯南縁部のマイロナイト化と褶曲形成の時空間関係 (Geotectonic evolution in transpressional regime: time and space relationships between mylonitization and folding in the southern Ryoke belt, eastern Kii Peninsula, southwest Japan). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **104**, 825–844.
- Shimada, K., Tanaka, H., Toyoshima, T., Obara, T. and Niizato, T., 2004, Occurrence of mylonite zones and pseudotachylyte veins around the base of the upper crust: An example from the southern Hidaka metamorphic belt, Samani area, Hokkaido, Japan. *Earth Planets Space*, **56**, 1217–1223.
- 嶋本利彦 (Shimamoto, T.), 1998, 地震予知研究における構造地質学の役割 (The role of structural Geology in the earthquake prediction studies), 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), **50**, 205–212.
- Shimamoto, T. and Noda, H., 2014, A friction to flow constitutive law and its application to a 2-D modeling of earthquakes. *Jour. Geophys. Res.*, **119**, 8089–8106.
- 清水以知子 (Shimizu, I.), 1998, 岩石における動的再結晶 (Dynamic recrystallization in rocks). 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), **50**, 1–12.
- Shimizu, I., 2008, Theories and applicability of grain size piezometers: the role of dynamic recrystallization mechanisms. *Jour. Struct. Geol.*, **30**, 899–917.
- Sibson, R. H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms. *Jour. Geol. Soc. London*, **133**, 191–213.
- Sibson, R. H., 1982, Fault zone models, heat flow, and depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **72**, 151–161.
- 徐垣・谷川 亘・廣瀬丈洋・林 為人・谷水雅治・石川剛志.....Kuo-Fong Ma (Soh, W., Tanikawa, W., Hirose, T., Lin, W., Tanimizu, M., Ishikawa T.,...Ma, K-F.), 2009, 1999 年台湾集集地震を引き起こしたチェルンブ断層の深部掘削の成果概要—明らかにしてきた断層岩の物質科学と今後の課題— (Overview of scientific results of the deep drilling project of the Chelungpu Fault, upon which the 1999 Chi-Chi (Taiwan) earthquake occurred: Main findings and future research). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **115**, 488–500.
- Stewart, M., Holdsworth, R. E. and Strachan, R. A., 2000, Deformation processes and weakening mechanisms within the frictional-viscous transition zone of major crustal-scale faults: insights from the Great Glen Fault Zone, Scotland. *Jour. Struct. Geol.*, **22**, 543–560.
- Stipp, M. and Tullis, J., 2003, The recrystallized grain size piezometer for quartz. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi: 10.1029/2003GL018444.
- Stünitz, H., 1998, Syndeformational recrystallization - dynamic or compositionally induced?. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **131**, 219–236.
- Stünitz, H. and Tullis, J., 2001, Weakening and strain localization produced by syn-deformation reaction of plagioclase. *Int. Jour. Earth Sci.*, **93**, 136–148.
- Sutherland, R., Townend, J., Toy, V., Upton, P., Coussens, J., Allen, M.,...Zimmer, M., 2017, Extreme hydrothermal conditions at an active plate-bounding fault. *Nature*, **546**, 137–140.
- Sutherland, R., Toy, V. G., Townend, J., Cox, S. C., Eccles, J.

- D., Faulkner, D. R.,...Kopf, A. J., 2012, Drilling reveals fluid control on architecture and rupture of the Alpine fault, New Zealand. *Geology*, **40**, 1143–1146.
- Svahnberg, H. and Piazzolo, S., 2010, The initiation of strain localisation in plagioclase-rich rocks: Insights from detailed microstructural analyses. *Jour. Struct. Geol.*, **32**, 1404–1416.
- Svahnberg, H. and Piazzolo, S., 2013, Interaction of chemical and physical processes during deformation at fluid-present conditions: a case study from an anorthosite–leucogabbro deformed at amphibolite facies conditions. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **165**, 543–562.
- Tabei, T., Hashimoto, M., Miyazaki, S. and Ohta, Y., 2003, Present-day deformation across the southwest Japan arc: Oblique subduction of the Philippine Sea Plate and lateral slip of the Nankai forearc. *Earth Planet. Space*, **55**, 643–647.
- Tagami, T., 2012, Thermochronological investigation of fault zones. *Tectonophysics*, **538–540**, 67–85.
- 高木秀雄 (Takagi, H.), 1985, 紀伊半島東部粥見地域における領家帯の圧砕岩類 (Mylonitic rocks of the Ryoke belt in the Kayumi area, eastern part of the Kii peninsula). 地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan), **91**, 637–651.
- 高木秀雄 (Takagi, H.), 1998, 破碎–塑性遷移領域の断層岩類 (Fault rocks in the cataclastic-plastic transition zone). 地質学論集 (Mem. Geol. Soc. Japan), **50**, 59–72.
- Takagi, H., Goto, K. and Shigematsu, N., 2000, Ultramylonite bands derived from cataclastite and pseudotachylyte in granites, northeast Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **22**, 1325–1339.
- Takagi, H., Shimada, K., Iwano, H. and Danhara, T., 2010, Old-est record of brittle deformation along the Median Tectonic Line: fission-track age for pseudotachylyte in the Taki area, Mie Prefecture. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **116**, 45–50.
- Takagi, H., Takahashi, K., Shimada, K., Tsutsui, K., Miura, R., Kato, N. and Takizawa, S., 2012, Integrated estimates of the thickness of the fault damage zone in granitic terrain based on penetrative mesocracks and XRD analyses of quartz. *Jour. Struct. Geol.*, **35**, 64–77.
- Takeshita, T., Nishikawa, O., Tagami, M. and Ando, J., 1998, Progress in the studies of texture development in quartzite: recent topics. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **50**, 21–32.
- Tanaka, H., Hinoki, S., Kosaka, K., Lin A., Takemura K., Murata, A. and Miyata, T., 2001a, Deformation mechanisms and fluid behavior in a shallow, brittle fault zone during coseismic and interseismic periods: Results from drill core penetrating the Nojima Fault, Japan. *Island Arc*, **10**, 381–391.
- Tanaka, H., Fujimoto, K., Ohtani, T. and Ito, H., 2001b, Structural and chemical characterization of shear zones in the freshly activated Nojima fault, Awaji Island, southwest Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **106**, 8789–8810.
- Tanikawa, W. and Shimamoto, T., 2009, Frictional and transport properties of the Chelungpu fault from shallow borehole data and their correlation with seismic behavior during the 1999 Chi-Chi earthquake. *Jour. Geophys. Res.*, **114**, B01402.
- Tomita, T., Ohtani, T., Shigematsu, N., Tanaka, H., Fujimoto, K., Kobayashi, Y.,...Omura, K., 2002, Development of the Hatagawa Fault Zone clarified by geological and geochronological studies. *Earth Planets Space*, **54**, 1095–1102.
- Toyoshima, T., 1990, Pseudotachylyte from the Main Zone of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, northern Japan. *Jour. Metamorph. Geol.*, **8**, 507–523.
- Toyoshima, T., Komatsu, M. and Shimura, T., 1994, Tectonic evolution of lower crustal rocks in an exposed magmatic arc section in the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, northern Japan. *Island. Arc*, **3**, 182–198.
- 豊島剛志・小松正幸・志村俊昭 (Toyoshima, T., Komatsu, M. and Shimura, T.), 1997, 日高変成帯の形成テクトニクス (Tectonics of the Hidaka metamorphic belt, northern Japan). 地質学論集 (Mem. Geol. Soc. Japan), **47**, 259–277.
- Toyoshima, T., Obara, T., Niizato, T., Tanaka, H., Shimada, K., Komatsu, M.,...Koyasu, T., 2004, Pseudotachylytes, related fault rocks, asperities, and crustal structures in the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, northern Japan. *Earth Planets Space*, **56**, 1209–1215.
- Toyoshima, T., Osanai, Y., Owada, M., Tsunogae, T., Hokada, T. and Crowe, W. A., 1999, Deformation of ultra-high-temperature metamorphic rocks from Tonagh Island in the Napier complex, east Antarctica. *Polar Geosci.*, **12**, 29–48.
- Trabi, A. and Berg, S. S., 2011, Scaling of fault attributes: A review. *Mar. Petrol. Geol.*, **28**, 1444–1460.
- Trepmann, C. and Stöckhert, B., 2002, Cataclastic deformation of garnet: a record of synseismic loading and postseismic creep. *Jour. Struct. Geol.*, **24**, 1845–1856.
- 堤 浩之・後藤秀昭 (Tsutsumi, H. and Goto, H.), 2006, 四国の中央構造線断層帯の最新活動に伴う横ずれ変位量分布 (Surface offsets associated with the most recent earthquakes along the Median Tectonic Line active fault zone in Shikoku, southwest Japan). 地震 第2輯 (Jour. Seismol. Soc. Japan, 2nd Ser.), **59**, 117–132.
- Tsurumi, J., Hosonuma, H. and Kanagawa, K., 2003, Strain localization due to a positive feedback of deformation and myrmekite-forming reaction in granite and aplite mylonites along the Hatagawa Shear Zone of NE Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **25**, 557–574.
- Tuffen, H., Smith, R. and Sammonds, P. R., 2008, Evidence for seismic fracture of silicic magma. *Nature*, **453**, 511–514.
- Twiss, R. J., 1977, Theory and applicability of a recrystallized grain-size paleopiezometer. *Pure Appl. Geophys.*, **115**, 227–244.
- Ueda, T., Obata, M., Di Toro, G., Kanagawa, K. and Ozawa, K., 2013, Mantle earthquakes frozen in mylonitized ultramafic pseudotachylytes of spinel-lherzolite facies. *Geology*, **36**, 607–610.
- Ujiie, K. and Kimura, G., 2014, Earthquake faulting in subduction zones: insights from fault rocks in accretionary prisms. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**: 7, doi: 10.1186/2197-4284-1-7.
- Wallis, D., Lloyd, G. E., Phillips, R. J., Parson, A. J. and Walshaw, R. D., 2015, Low effective fault strength due to frictional-viscous flow in phyllonites, Karakoram Fault Zone, NW India. *Jour. Struct. Geol.*, **77**, 45–61.
- Warren, J. M. and Hirth, G., 2006, Grain size sensitive deformation mechanisms in naturally deformed peridotites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **248**, 438–450.
- Wibberley, C. A. J. and Shimamoto, T., 2003, Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: the Median Tectonic Line in Mie Prefecture, Southwest Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **25**, 59–78.
- Wibberley, C. A. J. and Shimamoto, T., 2005, Earthquake slip weakening and asperities explained by thermal pressurization. *Nature*, **436**, 689–692.
- Wibberley, C. A. J., Yielding, G. and Di Toro, G., 2008, Recent advances in the understanding of fault zone internal structure; a review. In Wibberley, C. A. J., Kurz, W., Imber, J., Holdsworth, R. E., Collettini, C. eds., *Structure of Fault Zones: Implications for Mechanical and Fluid-flow Properties*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., **299**, 5–33.
- Xue, L., Li, H.-B., Brodsky, E. E., Xu, Z.-Q., Kano, Y., Wang, H., ...Huang, Y., 2013, Continuous permeability measurements record healing inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone. *Science*, **340**, 1555–1559.
- Yamada, R., Matsuda, T. and Omura, K., 2007, Apatite and zircon fission-track dating from the Hirabayashi-NIED borehole, Nojima Fault, Japan: Evidence for anomalous heating in fracture zones. *Tectonophysics*, **443**, 153–160.
- Yamaji, A., Otsubo, M. and Sato, K., 2006, Paleostress analysis

using the Hough transform for separating stresses from heterogeneous fault-slip data. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 980–990.
[URL1] 20 万分の 1 日本シームレス地質図(The Seamless Digital Geological Map of Japan (1: 200,000)), <https://gbank.gsj.jp/seamless/>.

(著者の貢献)

重松紀生 総括および本文の「脆性領域：浅部から深部」と「脆性から塑性領域への断層帯内部構造の変化」を執筆.

大谷具幸 総括および本文の「はじめに」と「脆性領域：地表付近の断層帯の内部構造」を執筆.

小林健太 本文の「脆性領域：地表付近の断層帯の内部構造」を執筆.

奥平敬元 本文の「下部地殻の断層帯内部構造」を執筆.

豊島剛志 本文の「下部地殻の断層帯内部構造」を執筆.

(要 旨)

重松紀生・大谷具幸・小林健太・奥平敬元・豊島剛志, 2018, 陸域断層の内部構造. 地質雑, **124**, 759–775. (Shigematsu, N., Ohtani, T., Kobayashi, K., Okudaira, T. and Toyoshima, T., 2018, Architecture of onshore fault zones. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 759–775.)

断層の内部構造に関し, この 25 年間における主として日本地質学会員の成果を中心にまとめた. 脆性断層の研究において, 野島断層掘削をきっかけに内部構造のみならず, 断層の水理学的性質や摩擦の研究がさかんに行われ, 断層研究における大きな転機となった. より深い脆性領域の断層岩内では圧力溶解クリープと, 雲母類の塑性変形が報告され, そのダメージは結晶内歪を周囲の岩石に与えることなどが明らかになった. また脆性–塑性遷移領域に対しては応力や歪速度の条件を地質学的の評価しようとする試みが行われ, 破壊開始過程や変形の空間的不均質が明らかにされている. さらに下部地殻では斜長石や輝石の転位クリープの一方で, 変形中の細粒物質の生成による変形機構遷移の重要性が指摘されている. 近年, 下部地殻における破壊現象の痕跡が見つかり, 地震による応力集中が一つの可能性として考えられている. その理解には今後の研究が期待される.