

令和 2 年 4 月 3 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05613

研究課題名(和文)変形微細組織から読む下部地殻強度の時間発展

研究課題名(英文)Temporal change in crustal strength based on the analysis of deformation microstructures in the lower crustal rocks

研究代表者

奥平 敬元 (Okudaira, Takamoto)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：20295679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：地震発生領域直下の下部地殻における延性剪断帯の発生・発達過程は、内陸地震の発生において本質的に重要である。本研究では、天然の変形岩試料の解析を通して、下部地殻上部での延性剪断帯の発生・発達過程の解明を目的とした。下部地殻条件で形成された延性剪断帯が卓越するノルウェー北部ロフォーテン諸島・ベステローテン諸島において地質調査と変形岩試料の採取を行い、採取された変形岩(主に斜長岩マイロナイト)に対して、SEM-EDS, WDS, EBSDなどを用いた構造地質学的・岩石学的解析を行った。その結果、下部地殻の延性剪断帯の発生・発達過程においては、動的破壊が重要であることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震発生帯直下の下部地殻が局所的に延性変形すれば、その直上の断層に応力が集中することが期待されるため、地震発生帯直下の下部地殻延性剪断帯の発生・発達過程は、内陸地震の発生において重要である。本研究では、下部地殻剪断帯を詳細に観察できるノルウェー北部ベステローテン諸島において地質調査を行い、採取された変形岩を解析し、動的破壊が下部地殻の延性剪断帯の発生・発達過程において重要であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Since the deformation in the lower crust immediately below a seismogenic fault can accumulate the stress on the fault, understanding the dominant deformation mechanism and the formation of ductile shear zones in the lower crust is crucial to reveal the occurrence of intraplate earthquakes. Based on the petrological and microstructural analyses for deformed rocks developed in Lofoten and Vesterålen, northern Norway, we revealed that dynamic fracturing is a dominant grain-size reduction mechanism and subsequent grain-size-sensitive creep (e.g., grain-boundary sliding) is a dominant deformation mechanism at high temperatures. Fracturing facilitates fluid flow due to the increased dilatancy and connectivity of pore spaces. An influx of fluid enhances hydration reactions, which form small, strain-free recrystallized grain. This process would promote grain-size-sensitive creep in the narrow zones, and result in the development of ductile shear zones in the lower crust.

研究分野：構造岩石学

キーワード：延性剪断帯 下部地殻 破壊 地震発生領域 変形機構 斜長石

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

内陸地震発生機構として、断層の深部延長である下部地殻の剪断帯がクリープ変形することにより、その直上の断層に摩擦強度を超える応力集中が起き、地震が発生するというモデルが近年注目されている。このモデルの成立の可否は下部地殻剪断帯の強度(粘性率)によって決まり、これは地表に露出した過去の下部地殻剪断帯の変形様式を解析することによって明らかとなる。

下部地殻は主に斜長石と輝石からなる岩石(斑れい岩・斜長岩)から構成され、下部地殻のレオロジー特性は一般に斜長石集合体の変形様式によって近似される。無水斜長石集合体が転位クリープで変形する場合(温度: 700, 歪み速度: 10^{-14} s), その粘性率は 10^{22} Pa·s 程度であり、上記地震発生モデルは成立しない。しかし、含水の細粒斜長石集合体が拡散クリープで変形する場合、その粘性率は無水集合体の転位クリープの場合よりも 5 桁程度低くなり、モデルは成立する。剪断帯の粒径や含水量は変成再結晶作用によって変化するため、剪断帯の粘性率は時間発展することが期待される。この発展過程を明らかにすることは、内陸地震の発生機構に解明において本質的に重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、下部地殻強度の時間発展を岩石の変形微細組織から評価し、内陸地震の発生機構の解明に寄与することである。本研究では世界各地の下部地殻剪断帯において、変形微細組織観察および後方散乱電子回折(EBSD)法による結晶方位解析により、主要構成鉱物である斜長石や輝石の細粒化過程とそれに引き続くクリープ変形様式を明らかにする。その成果に基づき、異なる細粒化過程の卓越する条件(温度, 圧力, 含水量, 流体組成など)の整理とクリープ変形の時間発展に関する新たなモデルを構築する。

3. 研究の方法

様々な条件で形成された下部地殻剪断帯における斜長石・輝石の再結晶化過程を、後方散乱電子回折(EBSD)法およびエネルギー分散型分光(EDS)法を用いて解析する。温度・圧力・含水量, 流体組成などのパラメータの範囲を広く設定するため、解析試料としてノルウェーの Hasvik 斑れい岩やロフォーテン諸島およびベストローデン諸島の斑れい岩類, パキスタンの Chilas Complex の輝石グラニュライトや Kamila 角閃岩, 日本の領家変成帯に産する斑れい岩などの形成条件の異なる天然試料を用いる予定である。このうち Chilas Complex や領家変成帯などの試料はすでに取得済みであり、本応募研究においては主に、平成 28 年度においてノルウェー・ロフォーテン諸島において系統的な試料採取を行う。

研究期間を通して、ノルウェー・ロフォーテン諸島において採取された岩石試料および採取済みの他地域の岩石試料に対して光学・電子顕微鏡観察や EBSD 法による系統的な結晶方位解析を行い、斜長石・輝石の再結晶化過程を明らかにする。これと併せて変形構造に参加している鉱物の化学組成を EDS 法によって明らかにし、既存の地質温度・圧力計を用いて変形時の温度・圧力条件を推定する。岩石薄片内のある領域の化学組成を EDS 法により明らかにし、その化学組成を用いて熱力学計算により安定な鉱物組み合わせ・鉱物化学組成を推定する(シュードセクション法)。この計算には含水量をパラメータとして入れ、計算された安定な鉱物組み合わせ・鉱物化学組成と地質温度・圧力計の結果とを比較することにより、変形時の含水量の推定を行う。また、熱力学計算や顕微ラマン分光法による解析から流体組成を明らかにする。以上の解析によって得られた成果に基づき、異なる細粒化過程の卓越する条件(温度, 圧力, 含水量, 流体組成など)の整理とクリープ変形の時間発展に関する新たなモデルを構築する。

4. 研究成果

平成 28 年度は、ノルウェー北部ロフォーテン諸島およびベステローデン諸島において地質野外調査と岩石試料の採取を行った。採取された岩石は、斜長岩および斑れい岩起源の変形岩（マイロナイトやシュードタキライト）である。採取された変形岩（主に斜長岩マイロナイト）に対して、SEM-EDS, WDS, EBSD などを用いた構造地質学的・岩石学的解析を、大阪市立大学、京都大学、産業技術総合研究所などにおいて行った。その結果、以下の研究成果を得た。

(1) 斜長岩マイロナイトにおいては、動的再結晶ではなく破壊と吸水変成作用によって構成鉱物が細粒化し、その細粒鉱物集合体は粒径依存型クリープ（転位すべり緩和型粒界すべり）により変形していることが明らかとなった。また、吸水変成作用は緑帘石角閃岩相（600 , 700 MPa）の条件下において起きたが、系外から流入した流体組成は CO₂ や Cl を含むような流体であることが指摘された。この破壊 構成鉱物の細粒化/流体の流入・吸水変成作用 粒径依存型クリープという変形過程により、粘性率の著しい低下と狭長な領域への歪みの集中が起き、延性剪断帯が形成されたことが示唆された (Okudaira et al. 2017)。

(2) 一部の斜長岩マイロナイトにおいては、地震に起因する動的破壊により形成されると考えられる粉砕作用 (pulverization) が認められることが明らかとなった。粉砕作用の結果形成される粉砕岩は、見かけの間隙率が上昇するため、下部地殻における地殻流体の流路となり得る。実際、粉砕岩には、加水反応の結果形成された含水鉱物が認められ、それら鉱物を用いた熱力学的解析から、地殻下部条件 (700 , 700 MPa) での加水作用が確認された (Soda and Okudaira 2018)。下部地殻における粉砕岩の発見は世界初であり、下部地殻における剪断帯の形成および地殻流体の循環を考察する場合、極めて重要な知見を提供することができた。

(3) 斜長石集合体が拡散クリープ（粒界すべり）によって変形する場合、一般には結晶定向配列を示さないとされているが、EBSD による斜長岩マイロナイト中の斜長石の結晶方位解析の結果、粒界すべりによっても斜長石集合体に結晶定向配列が認められることが明らかとなった (Soda et al. 2019)。これは、斜長石のような劈開や双晶が発達する鉱物が粒界すべりで変形する場合、ある特定の結晶面で粒界すべりが起きることを示した世界初の例である。

(4) 斜長岩マイロナイトの斜長石にはしばしば特徴的な組成累帯構造が認められるが、その特徴的な組成累帯構造の成因としては、高温斜長石の低温での相分離であるという説が提案されており、この相分離は粒径減少を伴うことが期待されるため、下部地殻における主要な粒径減少機構である可能性が指摘されている。しかし、WDS による鉱物化学組成や SIMS による酸素同位体組成の解析結果からは、この説は支持されず、等温減圧による二段階成長であることが明らかとなった (Soda et al. 2020)。これは斜長石の相分離が下部地殻における主要な粒径減少機構ではないことを示唆する。

また、これまでの研究成果を総括し、異なる細粒化過程の卓越する条件（温度、圧力、含水量、流体組成など）の整理とクリープ変形の時間発展に関する新たなモデルを提案した論文を国内学術雑誌において発表した（奥平・豊島 2019）。

なお、予定期間内（平成 28 年度から平成 30 年度）に公表する予定であった論文作成・投稿が期間内に完了しなかったための研究期間を 1 年間延長した。令和元年度（平成 31 年度）は博士研究員を雇用し、予定通り 2 編の論文 (Soda et al. 2019, 2020) を国際学術雑誌において発表した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 奥平敬元・豊島剛志	4. 巻 128
2. 論文標題 大陸下部地殻における破壊と延性剪断帯の形成	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地学雑誌	6. 最初と最後の頁 747-760
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5026/jgeography.128.747	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Soda Y, Harigane Y, Kajimoto K, Okudaira T	4. 巻 108
2. 論文標題 Crystallographic preferred orientations of plagioclase via grain-boundary sliding in a lower-crustal anorthositic ultramylonite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)	6. 最初と最後の頁 2057-2069
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00531-019-01749-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Soda Y, Matsuda T, Kobayashi Y, Ito M, Harigane Y, Okudaira T	4. 巻 105
2. 論文標題 Reversely zoned plagioclase in lower crustal meta-anorthosites: an indicator of multistage fracturing and metamorphism in the lower crust	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2020-7284	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Soda Y, Okudaira T	4. 巻 30
2. 論文標題 Microstructural evidence for the deep pulverization in a lower crustal meta-anorthosite	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Terra Nova	6. 最初と最後の頁 399-405
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/ter.12355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 重松紀生・大谷具幸・小林健太・奥平敬元・豊島剛志	4. 巻 124
2. 論文標題 陸域断層の内部構造	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 759-775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2018.0004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kuwatani T, Nagao H, Ito SI, Okamoto A, Yoshida K, Okudaira T	4. 巻 98
2. 論文標題 Recovering the past history of natural recording media by Bayesian inversion	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.98.043311	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto A, Shimizu H, Fukuda JI, Muto J, Okudaira T	4. 巻 172
2. 論文標題 Reaction-induced grain boundary cracking and anisotropic fluid flow during prograde devolatilization reactions within subduction zones	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Contributions to Mineralogy and Petrology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00410-017-1393-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okudaira T, Shigematsu N, Harigane Y, Yoshida K	4. 巻 95
2. 論文標題 Grain size reduction due to fracturing and subsequent grain-size-sensitive creep in a lower crustal shear zone in the presence of CO ₂ -rich fluid	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Structural Geology	6. 最初と最後の頁 171-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jsg.2016.11.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Koizumi N, Okudaira T, Ogawa D, Yamashita K, Suda Y	4. 巻 110
2. 論文標題 Geochemical characteristics of hydrous basaltic magmas due to assimilation and fractional crystallization: the Ikoma gabbroic complex, southwest Japan	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Mineralogy and Petrology	6. 最初と最後の頁 639-662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00710-016-0423-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 三田村圭祐・奥平敬元・三田村宗樹	4. 巻 122
2. 論文標題 生駒断層帯周辺における露頭規模での脆性変形構造	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 地質学雑誌	6. 最初と最後の頁 61-74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5575/geosoc.2015.0039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nasheeth A, Okudaira T, Horie K, Hokada T, Satish-Kumar M	4. 巻 87
2. 論文標題 U-Pb SHRIMP ages of detrital zircons from Hiriyur Formation in Chitradurga greenstone belt and its implication to the Neoproterozoic evolution of Dharwar craton, South India	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of the Geological Society of India	6. 最初と最後の頁 43-54
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Okudaira T, Soda Y, Harigane Y
2. 発表標題 Fracturing and the development of ductile shear zones in the lower crust
3. 学会等名 Geophysical Union, Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Okudaira T, Soda Y
2. 発表標題 Formation and development of lower crustal shear zones: A petrological perspective
3. 学会等名 The Second Symposium on Crustal Dynamics (ISCD-2): Toward Integrated View of Island Arc Seismogenesis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soda Y, Matsuda T, Kobayashi S, Ito M, Harigane Y, Okudaira T
2. 発表標題 Would phase separation be a new grain-size reduction process in the lower crustal conditions?
3. 学会等名 American Geophysical Union, Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Soda Y, Okudaira T
2. 発表標題 Fracturing of plagioclase grains: Roles for deformation mechanism and fluid pathway at lower crust
3. 学会等名 The Second Symposium on Crustal Dynamics (ISCD-2): Toward Integrated View of Island Arc Seismogenesis (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 曾田祐介・岩城航平・鍛冶本佳亮・針金由美子・奥平敬元
2. 発表標題 斜長岩マイロナイト中の褶曲と斜長石ファブリック
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Soda Y, Okudaira T
2. 発表標題 Pulverization in a meta-anorthosite of a lower crustal shear zone
3. 学会等名 JpGU Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松田 拓・曾田祐介・小林幸雄・伊藤元雄・針金由美子・奥平敬元
2. 発表標題 斜長石の高温細粒化と組成累帯構造
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Matsuda T, Soda Y, Harigane Y, Okudaira T
2. 発表標題 Microstructures related to grain size reduction and exsolution/phase separation in plagioclase under lower crustal conditions
3. 学会等名 JpGU Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kuwatani T, Nagao H, Okamoto A, Yoshida K, Ito SI, Okudaira T
2. 発表標題 ressure-Temperature-time path inversion from zoned minerals using data assimilation
3. 学会等名 Asia-Oceania Geosciences Society 15th Annual Meeting (AOGS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nasheeth A, Okudaira T, Hokada T, Horie K, Satish-Kumar M, Ueno Y
2. 発表標題 Petrology and geochronology of rocks in and around Chitradurga shear zone: Some insights to the mode and timing of amalgamation of western and eastern Dharwar cratons, South India
3. 学会等名 8th Symposium on Polar Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Okudaira T
2. 発表標題 The role of fracturing on the formation of the lower crustal shear zones
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 重松紀生・藤本光一郎・亀高正男・奥平敬元・森 宏
2. 発表標題 紀伊半島東部の中央構造線の最近の調査結果
3. 学会等名 日本地質学会第124年学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 曾田祐介・松田 拓・針金由美子・重松紀生・奥平敬元
2. 発表標題 地殻下部のはんれい岩に見られる斜長石ファブリック
3. 学会等名 日本地質学会第124年学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 曾田祐介・奥平敬元・水上知行・森下知晃・ウォリス・サイモン
2. 発表標題 かんらん岩の25 ° S OCC深部での変形・変質作用
3. 学会等名 InterRidge-Japan研究集会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 桑谷 立・岡本 敦・吉田健太・奥平敬元
2. 発表標題 ベイズ推論による鉱物組成累帯構造からの温度-圧力-時間履歴推定の試み
3. 学会等名 日本地質学会第123年学術大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 奥平敬元・重松紀生・針金由美子・吉田健太
2. 発表標題 下部地殻剪断帯の発達過程：ノルウェー北部Eidsfjord剪断帯
3. 学会等名 日本地質学会第123年学術大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Okudaira T, Toyoshima T
2. 発表標題 Development of lower crustal shear zones: Examples from Norway, Antarctica, Pakistan and Japan
3. 学会等名 International Symposium on Crustal Dynamics 2016: Unified understanding of geodynamic processes at different time and length scale (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 奥平敬元・重松紀生・針金由美子
2. 発表標題 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
3. 学会等名 地球惑星科学連合2016年大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 奥平敬元
2. 発表標題 下部地殻剪断帯における破壊の役割
3. 学会等名 変成岩などシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 曾田祐介・鍛冶本佳亮・針金由美子・奥平敬元
2. 発表標題 褶曲した斜長岩マイロナイト中の斜長石定向配列
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥平敬元・曾田祐介・豊島剛志
2. 発表標題 下部地殻の変形と延性剪断帯の形成
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 曾田祐介・奥平敬元
2. 発表標題 斜長石の高温細粒化と組成累帯構造: 2. 等温減圧過程での複変成作用による組成累帯構造の形成
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西脇勇望・奥平敬元・石井和彦
2. 発表標題 Marker-in-Cell法による圧縮場での地質構造発達シミュレーション: 大阪平野における断層の姿勢の推定
3. 学会等名 日本地質学会第126年学術大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 Wallis, S.R.・奥平敬元・豊島剛志	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 664
3. 書名 鉱物・宝石の科学事典	

1. 著者名 奥平敬元	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 600
3. 書名 地球大百科事典(上)－地球物理編－	

1. 著者名 奥平敬元	4. 発行年 2019年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 816
3. 書名 地球大百科事典(下)―地質編―	

1. 著者名 Wallis, S.R. and Okudaira, T.	4. 発行年 2016年
2. 出版社 Geological Society, London	5. 総ページ数 522
3. 書名 The Geology of Japan	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Takamoto Okudaira's HP http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/geos/geo2/okudaira.html</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	曾田 佑介 (Soda Yusuke)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	針金 由美子 (Harigane Yumiko)		
研究協力者	重松 紀生 (Shigematsu Norio)		
研究協力者	吉田 健太 (Yoshida Kenta)		
研究協力者	豊島 剛志 (Toyoshima Tsuyoshi)		