

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19540485
 研究課題名（和文） 直下型地震の深部過程としての領家変成帯の変形過程の解明
 研究課題名（英文） Deformation mechanism of rocks of the Ryoke metamorphic belt as deep process of the inland earthquakes
 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・准教授
 研究者番号：20295679

研究成果の概要（和文）：直下型地震の深部過程を明らかにするため、地震発生深度の地質帯（領家変成帯）の岩石を用いて、卓越する変形機構の解明を目的として研究を行なった。これまで、その深度における岩石の変形は石英集合体の転位クリープによって代表されるとされてきたが、詳細な構造岩石学的解析の結果、石英集合体は拡散クリープによって変形することが明らかとなった。拡散クリープは転位クリープに比べ、3桁程度粘性率が低いため、地殻の強度はこれまで考えられていたよりも著しく小さい可能性が高く、地震の発生過程のモデル化や地殻のレオロジーにとって重要な知見を提供した。

研究成果の概要（英文）：To clarify the deep process of inland earthquakes, we studied the deformation mechanism of rocks that had deformed at the middle crustal depth. Based on results of the structural petrological analysis on rocks of the Ryoke metamorphic belt, an ancient metamorphosed accretionary complex, we revealed that the dominant deformation mechanism of quartzose rocks could be diffusion creep or grain-size-sensitive creep instead of dislocation creep. Since viscosity of rocks deformed by diffusion creep would be three orders magnitude smaller than by dislocation creep, crustal strength for the new crustal model proposed by this study would be weaker than that for the classical model with the crust deformed by dislocation creep. The results of the study provided the new insight on studies for seismogenic process and crustal rheology.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・地質学

キーワード：テクトニクス

1. 研究開始当初の背景

日本列島は活動的大陸縁辺域に位置し、定常的に海洋プレートが沈み込んでいる。この海洋プレートの沈み込みにより、日本列島は圧縮場となり、逆断層もしくは横ずれ断層が発達する。その一部は都市直下型地震を引き起こし甚大な被害をもたらすことは周知の事実である。その震源断層は地下10-20 kmに位置しているため、実際の震源断層（岩）を手にとって直に観察することは出来ない。

日本列島において少なくとも2億年程度は、海洋プレートの継続的な沈み込みが行われており、プレートテクトニクス的な枠組みの大きな転換は無く、同じような状況（活動的大陸縁辺域）であったと見なすことが出来る。西南日本内帯には白亜紀（約1億年前）の低圧高温型変成帯である領家変成帯が中央構造線沿いに分布している。領家変成帯は深度10-20 kmにおいて形成されたと考えられているため（奥平ほか，2000），そこに分布する岩石の変形過程は、現在の日本列島の地下10-20 kmで起きている変形過程のアナログと見なすことが出来る。そこで本研究では、直下型地震の震源断層形成場として領家変成帯を捉え直し、その主要な構成要素である堆積岩源変成岩の変形様式の解明を通して、直下型地震の震源断層の実態を明らかにすることを目指した。

申請者はこれまで、変成作用と変形作用の両面から、大陸（島弧）地殻の変形過程の解明を目的として、領家変成帯を主な研究対象としてきた。特に近年は、地殻下部の変形をコントロールするであろう苦鉄質岩における、後退変成作用（吸水反応過程）と変形作用との関係について研究してきた（Imon et al., 2002, 2004）。一方、領家変成帯における主要な構成要素である堆積岩源変成岩においては、変形時相に関しては明らかとなっているが（Okudaira et al., 1993, 1995, 2001），その素過程およびマイロナイト化作用やカタクレサイト化作用との関連は不明である。堆積岩源変成岩は島弧地殻の主要な構成要素であるため、その変形作用の素過程や震源断層との関係は島弧地殻の変形過程において決定的に重要である。

2. 研究の目的

領家変成帯は主に堆積岩源変成岩と花崗岩類から構成されている。断層岩として認識されているマイロナイトやカタクレサイトは、花崗岩類においては容易に見つけ出す

ことが出来るため、マイロナイトやカタクレサイトの研究は主に花崗岩類においてなされてきた（例えばHara et al., 1980; Takagi, 1986）。一方、堆積岩源変成岩ではマイロナイトやカタクレサイトはほとんど見出されていない。これは、マイロナイトやカタクレサイトが狭長なゾーン（剪断帯）として発達し、面的な変形の集中帯であることに起因する。一般に、堆積岩源変成岩には層理面や片理面といった非常に強い異方性を持った面構造が発達するが、花崗岩類は一般には強い異方性を持たない。異方性の弱い花崗岩のような岩石に剪断帯が形成されれば、それを認識するのは容易である。しかし、堆積岩源変成岩において、岩石が持っているもとの面構造と平行に剪断帯が発達した場合は、その認識が困難となる（剪断帯もとの面構造が斜交関係にある場合は、識別はより容易となる）。さらに、堆積岩源変成岩はしばしば岩相の違いによる成層構造をなしており、剪断帯の存在を認識しづらいものとしている。何故なら、剪断帯は母岩の構成鉱物の細粒化によって認識されるため、岩相の違いにより構成鉱物の粒径に差異がある場合、周囲に比べて細粒であるだけでは剪断帯とは認識できない。このように堆積岩源変成岩の面構造と平行に剪断帯が形成された場合、その認識は困難なものとなるが、堆積岩源変成岩が差応力下におかれた場合、面構造と平行に剪断帯が形成される可能性が高い。これは硬い層と軟らかい層が成層している場合、変形は軟らかい層でまかなわれる傾向にあるからである。

直下型地震の発震深度（15 km前後）は高度変成岩（片麻岩）の分布域であり、花崗岩マイロナイトのほとんどがこの深度で形成されたとされている（例えばShimamoto, 1989）。片麻岩はより低度の変成岩（結晶片岩）に比べて、異方性・不均質性が弱く剪断帯の認識がより容易であると期待される。よって本研究ではまず、異方性・不均質性が弱い片麻岩における剪断帯の3次元分布を明らかにし、そこで卓越する変形機構の詳細を解析する。その後、その調査結果を踏まえて、より低変成度地域において、堆積岩源変成岩中の剪断帯の分布様式・変形様式を明らかにする。

3. 研究の方法

領家変成帯における堆積岩源変成岩の卓越する地域は、中部地方では三河地域、近畿

地方では名張-笠置地域、中国地方では岩国-柳井地域である。これら3つの地域において、それぞれに露出している岩石の特異性を生かして、堆積岩源変成岩中の剪断帯における様々なスケールの変形構造の発達様式、そしてそれら剪断帯の分布様式を明らかにしていく。これまであまり省みられることの無かった堆積岩源変成岩中の剪断帯の詳細な解析結果と、これまでの膨大な花崗岩類中の剪断帯の研究成果を総括して、15-20 km 深度の直下型地震の震源域における島弧地殻の変形過程を明らかにしていく。

4. 研究成果

直下型地震の震源は地下 10-20 km に位置しており、この深度において地殻の強度が最も高いためであるとされている。この地殻強度の深度方向の変化は、脆性変形領域で石英質岩の変形機構として摩擦すべりが卓越し、延性変形領域では転位クリープが優勢であるとするモデルに、石英質岩変形実験結果を適用することにより説明されている。しかし、地殻の強度断面において、その深度（地下 10-20 km）は地震学的・地熱学的見積りと調和的であるが、その強度値は一桁高いものとなり、この地殻強度の不一致が「地殻応力問題」と呼ばれ、長年議論されている。この不一致の原因には様々なものが考えられるが、その一つとして、すべての地殻条件において延性変形領域の変形機構が転位クリープであるのか不明であるということが挙げられる。この石英質岩の延性領域の変形機構の解明を目指し、領家変成帯における中変成度地域（直下型地震の震源域）において細粒メタチャートの試料採集を京都府和東地域において行い、その変形機構を静岡大学機器分析センター設置の SEM-EBSD 測定装置を用いて石英の格子定向配列を解析した。その結果、直下型地震の震源域の細粒メタチャートは従来考えられていたような転位クリープではなく、拡散クリープで変形しているということが明らかとなった。地殻の延性変形領域の一部が拡散クリープで変形した場合、その領域では著しい歪軟化（もしくは応力降下）が起きることが予想される。この応力降下が、長年論争の続いてきた「地殻応力問題」を解く可能性があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 11 件）

- ① 奥平敬元・隅田祥光 領家帯に記録された白亜紀イベント。地学雑誌, 119, 2010. (査読有)
- ② Murakami-Kitase A, Okudaira T, Inoue

J Relationship between surface morphology and chemical composition of spheroidal carbonaceous particles within sediment core samples recovered from Osaka Bay, Japan. Environmental Earth Sciences, 59, 1723-1729, 2010. (査読有)

- ③ Seddique AA, Masuda H, Mitamura M, Shinoda K, Okudaira T, Yamanaka T, Itai T, Maruoka T, Uesugi K, Ahmed KM Reply to the comment on “Arsenic release from biotite into a Holocene groundwater aquifer in Bangladesh” by Hossain M. Anwar and Martin Mihaljevi. Applied Geochemistry, 24, 486-490, 2009. (査読有)
- ④ 中川聖子・益田晴恵・奥平敬元・千葉 仁 南海トラフ ODP Site 808 の火山灰層の自生粘土鉱物とその酸素同位体比から推定した生成条件。地球化学, 43, 1-13, 2009. (査読有)
- ⑤ Okudaira T, Beppu Y, Yano R, Tsuyama M, Ishii K Mid-crustal horizontal shear zone in the forearc region of the mid-Cretaceous SW Japan arc, inferred from strain analysis of rocks within the Ryoke metamorphic belt. Journal of Asian Earth Sciences, 35, 34-44, 2009. (査読有)
- ⑥ 西川 治・奥平敬元・吉田昌幸・白石建雄 出羽丘陵新第三系に発達する変形構造。地質学雑誌, 114, 補遺, 2008. (査読有)
- ⑦ Beppu Y, Okudaira T Strain analysis of rocks within a metamorphosed accretionary complex in the Iwakuni-Yanai district, SW Japan. Journal of Geosciences, Osaka City University, 51, 1-8, 2008. (査読有)
- ⑧ Okudaira T, Beppu Y Inhomogeneous deformation of metamorphic tectonites of contrasting lithologies: strain analysis of metapelite and metachert from the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. Journal of Structural Geology, 30, 39-49, 2008. (査読有)
- ⑨ Ishii K, Kanagawa K, Shigematsu N, Okudaira T High ductility of K-feldspar and development of granitic banded ultramylonite in the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. Journal of Structural Geology, 29, 1083-1098, 2007. (査読有)
- ⑩ 西脇 仁・奥平敬元 近畿中央部, 初瀬深成複合岩体の定置過程。地質学雑誌, 113, 223-239, 2007. (査読有)
- ⑪ Kokonyangi JW, Kampunzu AB, Armstrong R, Arima M, Yoshida M, Okudaira T U-Pb SHRIMP dating of detrital zircons from the Nzilo Group

(Kibaran Belt): Implications for the source of sediments and Mesoproterozoic evolution of central Africa. *Journal of Geology*, 115, 99–113, 2007. (査読有)

[学会発表] (計 27 件)

- ① Okudaira T, Ogawa D, Miyazaki T, Michibayashi K: Transition between dislocation creep and diffusion creep in upper greenschist- to lower amphibolite-facies metacherts. American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, December 15, 2009.
- ② Fukuda J, Okudaira T, Michibayashi K: The role of water in neocrystallization of feldspar during shear deformation: water distributions revealed by FT-IR mapping. American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, December 15, 2009.
- ③ Okudaira T, Ogawa D, Michibayashi K: Grain size-sensitive deformation of upper greenschist- to lower amphibolite-facies metacherts from the Ryoike metamorphic belt, SW Japan. International Symposium on Deformation, Rheology and Tectonics 2009, Liverpool (UK), September 11, 2009.
- ④ 福田惇一・奥平敬元: 剪断変形時における長石の反応・細粒化過程への水の役割と輸送機構: 赤外分光法面分析. 日本地質学会第 116 年学術大会, 岡山理科大学, 2009 年 9 月 5 日.
- ⑤ 長橋良隆・小林聡子・吉川清志・奥平敬元・吉川周作・吉田武義: 火山ガラスの化学組成によるテフラ層の給源火山・地域の識別—大阪層群と琵琶湖高島沖コア試料の例—. 日本第四紀学会 2009 年大会, 滋賀県立琵琶湖博物館, 2009 年 8 月 29 日.
- ⑥ 佐藤隆春・古山勝彦・奥平敬元・富田克敏・佐藤良二: Mg 成分に富む斜方輝石と低い含水条件を獲得したサヌカイトマグマ—二上層群春日山安山岩での例—. 地学団体研究会第 63 回総会, 下仁田町文化ホール, 2009 年 8 月 21 日.
- ⑦ 石井和彦・奥平敬元・金川久一・重松紀生: 石英集合体の離散と花崗岩質ウルトラマイロナイト中の細粒多相集合体の形成過程. 地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張国際会議場, 2009 年 5 月 17 日.
- ⑧ 福田惇一・奥平敬元: 領家帯内部剪断帯における変形・反応と水分分布: 大阪府岸和田地域の例. 地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張国際会議場, 2009 年 5 月 17 日.
- ⑨ 奥平敬元・小川大介・道林克禎: 上部緑色片岩相—下部角閃岩相メタチャートの変形機構 (予報). 地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張国際会議場, 2009 年 5 月 17 日.
- ⑩ 奥平敬元: 領家帯: デタッチメントとしての中央構造線をもたらした低圧高温型剪断帯. 地球惑星科学連合 2009 年大会, 幕張国際会議場, 2009 年 5 月 17 日.
- ⑪ 平川恵梨・村上晶子・奥平敬元・吉川周作: SEM/EDS を用いた球状炭化粒子 (SCPs) の表面形態と化学分析 その 2—東京都大田区小池堆積物を持ちいて—. 第 18 回環境地質学シンポジウム, 名古屋大学, 2008 年 11 月 28 日.
- ⑫ 村上晶子・奥平敬元・吉川周作: SEM/EDS を用いた球状炭化粒子 (SCPs) の表面形態と化学分析 その 1—判別分析を用いた粒子識別—. 第 18 回環境地質学シンポジウム, 名古屋大学, 2008 年 11 月 28 日.
- ⑬ 吉田昌幸・西川 治・奥平敬元・白石建雄: 秋田県出羽丘陵鳥田目断層群に関連する新第三系の変形構造. 日本地質学会第 115 年学術大会, 秋田大学, 2008 年 9 月 22 日.
- ⑭ Murakami A, Okudaira T, Yoshikawa S: Reconstruction of air pollution history in western Japan using fly-ash particles in sediment cores. 33rd International Geological Congress, Oslo, Norway, August 10, 2008.
- ⑮ Okudaira T, Beppu Y: Development of the middle crustal horizontal shear zone related to the formation of the Median Tectonic Line in the mid-Cretaceous SW Japan arc: Strain analysis on the Cretaceous Ryoike metamorphic belt. 33rd International Geological Congress, Oslo, Norway, August 9, 2008.
- ⑯ Okudaira T, Beppu Y: Strain path of rocks within the Cretaceous metamorphosed accretionary complex in Japan: implication to tectonics of the forearc region at convergent plate boundaries. Asia-Oceania Geosciences Society 5th Annual Meeting, Busan, South Korea, June 17, 2008.
- ⑰ 奥平敬元・別府裕樹: 付加体起源変成帯における歪み履歴: 島弧—海溝系の発達過程への寄与. 地球惑星科学連合 2008 年大会, 幕張国際会議場, 2008 年 5 月 25 日.
- ⑱ 奥平敬元・別府裕樹・矢野亮祐・津山 滯: プレート収束域変成帯の歪み履歴・経路: 前弧域テクトニクスへの寄与. 変成岩などシンポジウム, 2008 年 3 月 29 日.
- ⑲ 西川 治・伊藤慶彦・白石建雄・奥平敬元: 秋田県出羽丘陵における硬質泥岩の変形機構と変形条件. 日本地質学会第 114 年学術大会, 北海道大学, 2007 年 9 月 10 日.

- ⑳村上晶子・奥平敬元・吉川周作：大阪湾堆積物中の球状粒子の化学分析による人為燃焼の約150年間の歴史的変化。日本地質学会第114年学術大会，北海道大学，2007年9月10日。
- ㉑別府裕樹・奥平敬元：西南日本領家変成帯の層状メタチャートの変形構造。日本地質学会第114年学術大会，北海道大学，2007年9月10日。
- ㉒佐々木陵多・奥平敬元：領家変成帯青蓮寺地域に産するミグマタイトの起源。日本地質学会第114年学術大会，北海道大学，2007年9月10日。
- ㉓長橋良隆・小林聡子・奥平敬元・吉川周作・吉田武義：近畿地方の第四紀テフラ層序に基づく大規模爆発的噴火の頻度。日本地質学会第114年学術大会，北海道大学，2007年9月10日。
- ㉔石井和彦・奥平敬元・金川久一・重松紀生：花崗岩質マイロナイトの歪軟化：大阪泉南地域領家帯の例。地球惑星科学連合2007年大会，幕張国際会議場，2007年5月22日。
- ㉕奥平敬元・別府裕樹：領家変成帯のメタチャートに記録された付加体形成期変形作用。地球惑星科学連合2007年大会，幕張国際会議場，2007年5月22日。
- ㉖石井和彦・奥平敬元・金川久一・重松紀生：花崗岩質マイロナイトの歪軟化：大阪泉南地域領家帯の例。日本地質学会構造地質部会例会，国民宿舎 Bay Lily，白浜，2007年3月17日。
- ㉗奥平敬元・別府裕樹：領家変成帯のメタチャートに記録された付加体形成期変形作用。日本地質学会構造地質部会例会，国民宿舎 Bay Lily，白浜，2007年3月17日。

〔図書〕（計2件）

- ①日本地質学会編（分担執筆）：日本地方地質誌6 中国地方。朝倉書店，576p.，2009年9月15日。
- ②日本地質学会編（編集幹事，分担執筆）：日本地方地質誌5 近畿地方。朝倉書店，472p.，2009年2月25日。

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/geos/geos/2/okudaira.html>

6. 研究組織

(1) 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・准教授

研究者番号：20295679

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし