

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04019

研究課題名(和文)プレート沈み込み帯地震発生帯とスロー地震断層の応力評価

研究課題名(英文)Stress evaluation of earthquake fault and slow slip fault in subduction zone

研究代表者

坂口 有人 (Sakaguchi, Arito)

山口大学・大学院創成科学研究科 教授

研究者番号：80304666

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：断層岩が地震性の高速破壊か、ゆっくりしたスロー地震を起こしたのかを識別するのが困難だった。断層周囲の応力集中による歪みの分布をそこからすべり様式が識別できると考え、カルサイト双晶分析法を改良し、天然の断層が深さによって独特の歪み分布を有することを見出した。また、その過程において、様々な岩石等の材料の応力・歪み分析法が開発され、コンクリート構造物の安全評価技術として特許出願に至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震発生帯が巨大地震やスロー地震といった複雑な挙動を起こすメカニズムを説明するうえで、研究対象となる陸上断層の過去の挙動を知る手段の開発は急務であった。本研究は新しい応力・歪み計を開発して、これに有効であることを示した。

また、同手法はコンクリート構造物にも応用できるため、経年劣化や災害によるダメージを受けた構造物の安全評価にも利用出来る(特許出願済み)。

研究成果の概要(英文)：It had been difficult to distinguish whether the fault caused a seismic rapid slip or a slow slip from the fault rock. We proposed that the slip mode can be identified from the stress concentration condition around the fault. For this subject, we improved the technique of the calcite twin analysis. It was found that strain distribution around the fault depends on the depth.

In the process of this study, we developed new technique to estimate stress/strain condition of rock and related materials. This method can apply to safety evaluation for concrete buildings.

研究分野：構造地質学

キーワード：断層 歪み 応力 カルサイト

1. 研究開始当初の背景

沈み込み帯には、断層が高速で変位する通常の地震だけでなく、ゆっくりと変位するスロー地震が共存する事がわかってきた (Obara, 2002) (図1)。スロー地震は、数年おきに、数mの変位を起こすが、人体に感じるような揺れは伴わない。破壊伝播速度も遅く、震源域が10数km/日で移動するという特徴がある (Obara, 2002)。そしてプレート沈み込み量のかなりの部分を担っており、いわばダークマター、と評する研究者もいる (井手、私信)。スロー地震は巨大地震発生帯の深い側と浅い側の両端で発生しており (Obara, 2002; Sugioka et al., 2012) ときに巨大地震をトリガーすることもある (Ito et al., 2013; Kato et al., 2012)。そのため今やスロー地震の発生はニュース報道の対象となった。

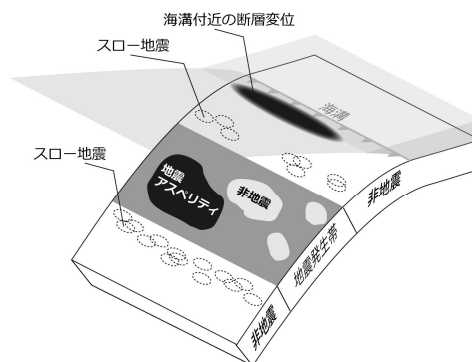


図1. プレート境界の模式図。地震発生深度の上端および下端付近にスロー地震発生帯がある。

断層のすべりメカニズムを理解するためには、摩擦表面である断層岩物質を分析して、その力学特性と状態の情報が欠かせない。プレート境界の断層にアクセスする方法としては、海洋掘削によって直接アクセスする方法と、陸上に隆起している過去の沈み込み帯である付加体を調査する方法がある。そしてそこから通常の震源断層とスロー地震の断層を識別し比較する必要がある。しかしこの識別方法が難しい。

通常地震を起こす震源断層は、断層が高速変位するため局所的に高い摩擦熱が生じる。摩擦溶融した断層岩シュードタキライトは典型的な地震の証拠とされている (Sibson, 1975)。しかしスロー地震のような変位速度の遅い断層では、熱異常の検出は期待できず、スロー地震の断層は特定する決め手は欠いたままであった。

2. 研究の目的

申請者はこれを区別する方法として断層近傍の応力・歪み分布に注目した。例えば地表の活断層は普段は変位していないが、地震時には震源断層の動きに追従して動く。そのため断層を中心として両側の母岩は引きずられた歪みを持つだろう。これが震源深度の断層ならば、普段は固着しているが、地震の直前に亀裂が成長して固着部分を破壊する。そのときに亀裂先端には局所的な高い応力集中が生じるだろう (図2)。さらに地下深部の場合、岩盤は金属やアクリルのように塑性変形するようになる。その場合は亀裂先端に応力が集中すると、同時に塑性変形が進行するために歪みは拡散し応力レベルは低くなり、亀裂はゆっくりとしか進展しない。このように断層周辺の応力・歪み分布から断層の破壊様式と断層のセッティングの識別、すなわち断層のキャラクタライズが可能になると期待される。

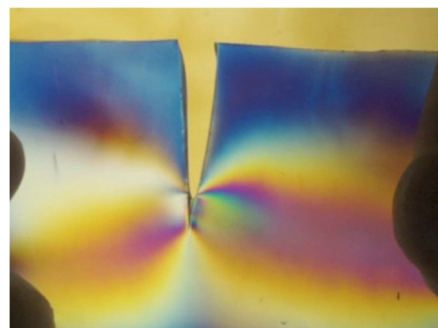


図2. 光学弾性体中の亀裂付近の応力/歪み分布。応力集中度合いは亀裂の進展しやすさと関係する。

3. 研究の方法

断層周辺のカルサイトは剪断応力によって、結晶内部に双晶変形が発達する特性があることが1950年代からわかっていたが (Turner et al., 1954) かつては岩石内部の複雑な応力場を取り扱うのが難しかった。最近の粒状体の個別要素法シミュレーションは、粒状体内部の個々の粒子に生じる応力状態を表すことが可能になった。申請者らは、四万十帯の砂岩を用いて三軸圧縮試験と数値実験を組み合わせ、個々の粒子の応力状態がまちまちでも、その平均値は外力に比例すること、そして強固な鉱物粒子の間に少数のカルサイト粒子が混在する場合は、岩石全体が弾性回復した後でも古応力の復元が可能であることを示した (Sakaguchi et al., 2011) (図3)。ただし三軸圧縮試験は、特定の硬質砂岩で行われたため、弾性率の異なる岩石の歪み・応力挙動がよくわかっていなかった。

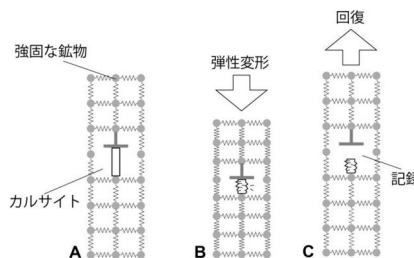


図3. 強固な粒子の集合体にカルサイトが散在する場合、周囲が弾性変形して、その後回復しても変形の記録がカルサイトに残る。

この手法を地表付近、震源域、そしてスロー地震域までの様々な断層に应用するためには、(1) 弾性率の異なる岩石におけるカルサイト挙動を確認し、そのうえで(2) 過去のプレート境界が地上に露出している四国および九州の四万十帯や、現世の活断層において分析する必要がある。

4. 研究成果

4.1. 合成カルサイトによる応力/歪み計の改良

模擬岩石を用いて、弾性率の高い材料と低い材料にカルサイトを混入し、それを力学試験して材料特性と双晶密度の基本的性質を調べた。模擬岩石としては高強度セメントによるモルタル試料を用いた。モルタルは多くの結晶粒子の集合体であり、力学的性質が岩石と似ている。またモルタル試料は制作するときの、セメントと水の比率によって、弾性率や破壊強度が大きく変化する。この特性を利用して、弾性率の異なる様々な模擬岩石を作成し、そこにカルサイト粒子を混ぜ入れて力学試験を行った。その結果、弾性率の異なる試料であっても、双晶密度は試料全体の歪みに比例することがわかった(図4)。

これは合成カルサイトをセメント材料に混入させた実験によるものであるため、この成果はそのままセメント材料の応力・歪み計への応用への道を開くものである。建築物の応力・歪みトレーサーとして合成カルサイトを微小なセンサーとして建築物に埋め込んでおけば、事故や災害や経年劣化による構造物の安全評価に利用できる(特許出願: 坂口・安藤, 特願 2020-118208)。

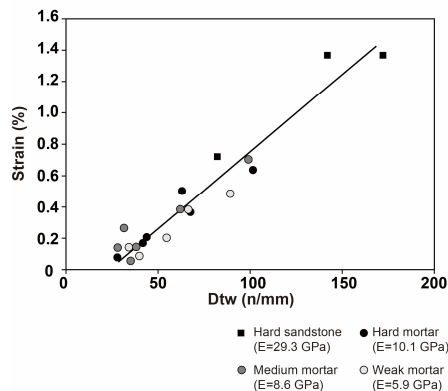


図4. 試料中のカルサイトの平均双晶密度は、弾性率の異なる試料であっても、試料全体の歪みと比例する。

4.2. 天然の断層への応用

本研究で開発された新しい手法を、活断層および過去の震源断層に应用した。国内最大の内陸断層である中央構造線に沿って活断層が発達している。愛媛県湯谷口の川上断層の掘削コア試料のカルサイト双晶密度を分析したところ、断層中心部をピークとして、周辺の母岩に幅約100mにわたって緩やかに双晶密度が高くなることが確認された。これは断層付近ほど大きな歪みが生じ、それが断層からの距離に反比例して線形に減衰したことを示している。これは断層運動による引きずり作用によるものと解釈される。

プレート境界型の巨大地震を繰り返している南海トラフには付加体が発達している。その陸上延長として四万十付加体が関東から沖縄まで西南日本の太平洋側に分布している。そこには過去の震源断層が露出していることがわかっている。四国東部の牟岐メランジュには巨大地震発生深度における震源断層が複数露出している。これらの断層においてカルサイト双晶密度を分析したところ、どちらも断層中心部を鋭いピークとするが、断層から10数m離れると双晶密度は指数関数的に減衰することがわかった。それらの減衰レートは、断層からの距離の-0.5乗に近く、これは弾性体中における亀裂先端の応力集中レベルに一致する。これらの断層が脆性破壊領域において活動したことを示唆する。これらに対して更に地下深部の様子を知る手がかりとしては、変成度の高い九州の四万十帯があげられる。九州四万十帯を二分する延岡衝上断層におけるカルサイトの双晶密度分析結果は、断層中心部はやや高い歪みを経験しているが、断層から離れるにつれて双晶密度は緩やかに減衰する。上記の地表の活断層および震源深度の断層とも明らかに異なる減衰パターンである。これは高温域における塑性変形によって亀裂先端の応力集中が緩和されたものと説明できる。例えば金属やプラスチック材料の緩やかな亀裂進展で広く認められる現象であり、断層破壊がゆっくり進展する場合に認められる。このような地震域のゆっくりとした進展は、スロー地震域の特徴のひとつである。

以上のように、本研究はカルサイトの双晶密度を基にした断層周囲の歪分布が、断層のセッティングに依存して変化することを示し、断層のキャラクタライズ問題の解決に大きく貢献した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Uchida Natsuki, Murayama Masafumi, Matsubara Yuki, Sakaguchi Arito	4. 巻 127
2. 論文標題 Fluid source of seismogenic accretionary body based on calcite isotope ratio, Shimanto complex, Shikoku, southwest Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of the Geological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 701 ~ 708
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5575/geosoc.2021.0031	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Arito Sakaguchi, Kikka Takiguchi, Masato Ichiki
2. 発表標題 Heterogeneous strain energy distribution as indicator for asperity in seismogenic fault
3. 学会等名 Japan Geoscience Union meeting, 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Sogawa, Arito Sakaguchi
2. 発表標題 Comparison of paleostress and paleotemperature analysis at Roof Thrust and Out-of-Sequence Thrust of subduction zone : The Minami Awa Fault and Mizoochi Fault, The Mugi area in the Shimanto Belt
3. 学会等名 Japan Geoscience Union meeting, 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田菜月・村山雅史・坂口有人・松原友輝
2. 発表標題 四国四万十帯カルサイト脈の 13C・ 180からみた沈み込み帯の温度断面における流体の起源
3. 学会等名 日本地質学会第126年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 曾川 裕・坂口有人
2. 発表標題 カルサイト双晶による四国四万十帯牟岐メランジュ南阿波断層・水落断層における古応力解析
3. 学会等名 日本地質学会第126年大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 セメントを主体とする複合材における応力・歪みの履歴推定方法	発明者 坂口有人・安藤航平	権利者 山口大学
産業財産権の種類、番号 特許、2020-118208	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関