

令和元年6月25日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02141

研究課題名(和文)地殻応力永年変動

研究課題名(英文)Secular change of crustal stress

研究代表者

山路 敦(Yamaji, Atsushi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：40212287

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,700,000円

研究成果の概要(和文)：岩脈や鉱脈の応力解析手法を開発し、ソフトウェアを世界に向けて公開した。すでにこれは海外でも利用され始めている。双晶の応力解析法でも、公開準備中である。開発した手法を実際に適用した。鹿児島県の菱刈鉱床は世界有数の金含有量をほこる。その鉱脈から、応力を明らかにしただけでなく、鉱液が通過した亀裂の開口・閉塞の繰り返しを明らかにした。こうしたことは、地下の流体の振る舞いを知る基礎的情報を提供するものであり、金属鉱床・石油鉱床の探査や、将来の地層処分の基礎研究という位置づけにもなる。日本海拡大終了直後の応力を、火成岩脈から明らかにした。また沖縄県では、最近20万年の間に応力転換があったことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地殻応力は活断層の動きを支配する。また、マグマや金属鉱床を形成する熱水など、流体の地下の亀裂を通じた移動にも影響する。したがって、地殻応力の理解が、噴火や地震の災害発生メカニズムの理解を基礎づけ、また、金属鉱床や石油鉱床の探査に役立つ。応力場が頻繁に変化するようでは、活断層とは思われない断層が、突然うごいて地震を起こすこともある。さらにまた、原発の地盤安定性や核廃棄物の地下処分を考えるうえで、10万年またはそれより短い時間スケールで地殻応力が安定か、そうではなければどれくらい変化するのかを知ることが不可欠である。

研究成果の概要(英文)：The author has thrown freeware for the stress inversion of orientation data from dilational fractures open to the public through a webpage of Kyoto University. The author developed the theoretical basis for the stress inversion of calcite twin data, which enabled separation of stresses from polyphased calcite twin data. The new methods were applied to natural data. Hishikari gold veins showed ore mineralization accompanied by the waning of extensional stress on the franks of a Quaternary rift. It was shown that the ore mineralization was accompanied by the repeated formation and break of pressure seals. Igneous dikes in Akita and Hyogo Prefectures indicated weak extensional stress just after the end of the Japan Sea opening. Normal faulting stress regime was determined from quartz veins, indicating extensional stress condition in the forearc region at the time of Japan Sea opening and of the juxtaposition of Southwest Japan with the Philippine Sea Plate.

研究分野：地質学

キーワード：応力 テクトニクス 断層 マグマ 双晶

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

1. 研究開始当初の背景

数百年から百万年の時間スケールの地殻変動を理解することは、社会的に喫緊の問題である。というのも、原発を設置する場所の選定や核廃棄物の地層処分場の選定では、十万年スケールの地盤の安定性が問題とされているからである。その間にもテクトニクスの様相が二転三転しうるなら、この安定性基準は満たされないことになる。また、百万年スケールの応力場変遷は、貴金属や石油の鉱床形成に影響するため、それらの開発において、そうした変遷の理解が不可欠である。地質学的に短期の応力場の変動がいかん、また、なぜおこるかは、理学的にも未解明のテーマである。

それというのも、上記の時間スケールは、地震学的・測地学的な観測期間を遙かに超えている一方で、地質学的観測にとって短すぎるからである。つまり時間の短さのため、その間のテクトニックな変形量が小さく、従来の自然地理学的手法しか使えないからである。

応力に注目したらどうだろうか。変位量が数 cm といった小断層や、開口幅が数 cm といった岩脈や鉱脈ができるごとに、地殻は微小変形する。それらの総和としての歪みが地質図に示せるほど大きくなくとも、それらから示す古応力を認定することはできるだろう。すると、テクトニクスが地質学的には短期間に変化する場合、応力場変遷としてそれが観測にかかるだろう。これが本研究の基本的発想である。この目的に供することができるのは、小断層・岩脈・鉱脈・方解石双晶の方位データである。

本研究を始めた時点では、断層の応力解析手法についてはすでに開発済みで(Yamaji, 2000, *J. Struct. Geol.*; Sato, 2006, *J. Struct. Geol.*)、そのソフトウェアは公開済みであった。残った課題は、理論的背景を解説する論文を公にすることであった。岩脈や鉱脈の応力解析手法については、基本原理は開発済みで(Yamaji et al., 2010, *J. Struct. Geol.*; Yamaji and Sato, 2011, *J. Struct. Geol.*)、公開版のソフトウェアを作成することが課題だった。また、方解石双晶の応力解析手法については手つかずの状態、その原理から考えることが課題だった。

2. 研究の目的

地質学的にみて短期の応力場変遷を解明するための、研究手法開発を本研究の目的とする。また、開発した手法を天然データに適用し、手法の有効性を検証することも目的である。

3. 研究の方法

地質学的には新しい時代、すなわち新第三紀から第四紀の地殻応力変遷を明らかにすることができれば、地殻応力がどのくらい安定していたか、または変化しやすかったかがわかる。そこで、そうした時代の応力を推定する手法開発を、本研究で行った。過去の応力の糸口は、断層・岩脈・鉱脈や顕微鏡スケールの双晶など多用である。断層の応力解析法はすでにほぼ確立しているので、岩脈・鉱脈の応力解析法と双晶の応力解析法について手法開発を行った。また、野外調査を行なって天然データを収集し、手法の有効性を検討した。

しかし、過去の応力が直接観測できるわけではなく、岩盤が変形してできる断層など、上記の構造から間接的に応力を推定することになる。そこで、歪みや変形の地質学的観測について総括した。これは、双晶の応力解析では不可欠であった。

4. 研究成果

変化する応力をとらえるために、分解能の高い応力解析法を開発するのが本研究の主眼である。岩脈や鉱脈の応力解析では、実用的なソフトウェアを開発し(下記の論文)、下記ホームページで世界に向けて公開した。すでにこれは海外でも利用され始めている(例えば Tramparulo et al., 2018, *J. Struct. Geol.*; Stephens et al., 2018, *Solid Earth*)。双晶の応力解析については基礎的研究の成果を論文とで公にした。その後、理論的研究を進め、新手法を開発することができたので、その原理を解説する論文を現在投稿中である。また、公開用ソフトウェアを準備している段階である。

理論面では、種々の応力解析の数学的構造を考えるためのパラメータ空間と、応力・歪みおよび断層データとの対応関係を整理したレビュー論文を公にした(論文)。この理論は双晶の応力解析の理論的基盤であるとともに、このパラメータ空間は岩脈・鉱脈の応力解析にも利用した(論文)。すなわち、断層の応力解析のため塑性力学から 5 次元偏差応力空間の概念を導入し、この空間の単位球の上の半円弧として断層データを表現できること、また、双晶データはこの球面上の点として表現できることを明らかにした。そして、このデータ点のクラスター検出で、双晶を形成した応力を決定できることがわかった(論文)。複数応力時階をへた地域の方解石では、複数の応力が双晶に記録されているだろう。こうした場合、球面上のデータ点のクラスター解析でそれらの応力を分離検出できることがわかった(Yamaji, 2016, *JpGU SCG63P25*)。また、理論的研究の成果については、J-STAGE を通じて邦文で総括論文を公開し、広く国民が利用できるようにした(論文 ~)。

開発した応力解析法を、いくつかの地域で天然データに適用した。鹿児島県の菱刈鉱床は世界有数の金含有量をほこる鉱脈鉱床である。菱刈鉱山の坑道で約千枚の鉱脈の方位を測定し、論文のソフトウェアを使って応力解析を行った(論文)。鉱脈の応力解析では、鉱脈を形成した熱水の水圧が推定できる。鉱脈鉱床形成時には、岩盤の亀裂が開いたり閉塞したりというダイナミックな過程が、解析結果にも表れることがわかった。鉱脈鉱物の晶出で開口割れ目

が閉塞し不透水層ができると、熱水のしだいに圧力が高まって、不透水層を破壊して開口割れ目を形成するという過程の繰り返しが推定されたわけである。こうしたことは、地下の流体の振る舞いを知る基礎的情報を提供するものであり、金属鉱床・石油鉱床の探査や、将来の地層処分基礎研究という位置づけにもなる。また、既存地質情報を総合することで、ここ5百万年の南九州のテクトニクス史と金鉱床の形成との関係を明らかにした。すなわち、鮮新世の初め頃に伸長テクトニクスがはじまり、南九州の広範囲でゆっくりと地殻の伸長変形が進行する中で、開口割れ目に金を含む鉱脈鉱床が形成された。しかし百万年前頃に伸長変形が鹿児島湾のリフトにローカライズすると、その周囲では変形しなくなって、鉱脈の形成が終了したわけである。

かつて紀伊半島南部では紀州鉱山や妙法鉱山で、鉱脈鉱床が稼行されていた。それらは中新世中期の火成活動にともなうものである。この地域に分布する石英脈群に論文の応力解析法を適用し、正断層型応力を検出することができた(山中ほか, 2016, 地質学会年会, R14P6)。このことは、火成活動・熱水活動が熊野地域の褶曲作用に先立っていたことを示し、またさらに、ほぼ同時代の日本海拡大やフィリピン海プレートの衝突を理解するための制約条件を与えることになる。

火成岩脈群の応力解析は、秋田県と兵庫県で行った。東北日本弧では、日本海拡大終了後の応力、すなわち15Ma頃から10Ma頃までの応力状態が、以前の応力解析法では解明しきれなかった(Sato, 1994, *J. Geophys. Res.*)。というのも、この時代は断層活動が不活発だったため、断層の応力解析を適用しにくかったからである。また、1990年代までの岩脈・鉱脈の応力解析では、岩脈の極の方向が集中していないかぎり主応力軸の方向を決定できず、この条件が満たされた場合でも σ_3 軸が決定できるに過ぎなかったからである。本研究で開発した手法を適用した結果、問題の時代は正断層型応力が働いていたことがわかった(論文)。断層活動を活発化させるには弱すぎる伸長応力場で、マグマ圧が高まった場合にのみ、開口割れ目が形成されたわけである。実際、マグマ圧が σ_1 の近くまで高まったことがわかった。すなわち、日本海拡大という大変形が終了した後も、弱引張が続いていたことがわかった。同様の傾向が兵庫県北部でも検出された(Haji et al., 2017, JpGU SIT29-P02)。すなわち、地質図スケールのグラーベン形成終了後も岩脈を形成させるだけの微弱な伸張応力場は継続したことが示された。

沖縄県先島地方では、更新世後期の隆起珊瑚礁を切る小断層からデータを収集した。その解析結果は、最近20万年のあいだの応力転換を示している。これについては、データを若干追加して公表する予定である。

方解石双晶の応力解析新手法はまず、ジャワ島付近の油田の掘削試料に適用された(山路ほか, 2015, 地質学会年会, R14P12)。また、外房の中期中新統中の方解石脈に適用し、正断層型応力のみならず、小断層解析では検出できなかった逆断層型応力も検出することができた(若森ほか, 2017, 地質学会年会, R15P11)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

〔学会発表〕(計41件)

〔図書〕(計0件)

Yamaji, A. and Sato, K., 2019. Stress inversion meets plasticity theory: A review of the theories of fault-slip analysis from the perspective of the deviatoric stress-strain space. *Journal of Structural Geology*, 125, 296–310, doi:10.1016/j.jsg.2019.03.003.

Haji, T., Hosoi, J. and Yamaji, A., 2019. A middle Miocene post-rift stress regime revealed by dikes and mesoscale faults in the Kakunodate area, NE Japan. *Island Arc*, 28, e12304, doi:10.1111/iar.12304.

Faye, G.D., Yamaji, A., Yonezu, K., Tindell, T. and Watanabe, K. (2018) Paleostress and fluid-pressure regimes inferred from the orientations of Hishikari low sulfidation epithermal gold veins in southern Japan. *Journal of Structural Geology*, 110, 131–141, doi:10.1016/j.jsg.2018.03.002.

Yamaji, A., 2016. Genetic algorithm for fitting a mixed Bingham distribution to 3D orientations: a tool for the statistical and paleostress analyses of fracture orientations. *Island Arc*, 25, 72–83, doi:10.1111/iar.12135.

Yamaji, A., 2015a. Generalized Hough transform for the stress inversion of calcite twin data. *Journal of Structural Geology*, 80, 2–15, doi:10.1016/j.jsg.2015.08.001.

Yamaji, A., 2015b. How tightly does calcite e-twin constrain stress? *Journal of Structural Geology*, 72, 83–95, doi:10.1016/j.jsg.2015.01.008.

山路 敦, 2018a. 歪解析と変形解析の数理: 7. 非共軸変形解析のための逆解法. 地質学雑誌, 124, 367–376, doi:10.5575/geosoc.2017.0083.

山路 敦, 2018b. 歪解析と変形解析の数理: 6. 累進変形と運動論的渦度解析. 地質学雑誌, 124, 213–227, doi:10.5575/geosoc.2017.0073.

山路 敦, 2018c. 歪解析と変形解析の数理: 6. 累進変形と運動論的渦度解析. 地質学雑誌,

124, 213–227, doi:10.5575/geosoc.2017.0073.

山路 敦, 2017a. 歪解析と変形解析の数理: 5. 続 Rf/φ 歪み解析. 地質学雑誌, 123, 107–118, doi:10.5575/geosoc.2016.0053.

山路 敦, 2017b. 歪解析と変形解析の数理: 4. 双曲幾何学と Rf/φ 歪み解析. 地質学雑誌, 123, 31–40, doi:10.5575/geosoc.2016.0043.

山路 敦, 2016a. 歪解析と変形解析の数理: 3. 歪み解析・変形解析の基礎. 地質学雑誌, 122, 655–672, doi:10.5575/geosoc.2016.0032.

山路 敦, 2016b. 歪解析と変形解析の数理: 2. 微小変形とその地質学的計測. 地質学雑誌, 122, 551–562, doi:10.5575/geosoc.2016.0025.

山路 敦, 2016c. 歪解析と変形解析の数理: 1. 一様変形. 地質学雑誌, 122, 275–286, doi:10.5575/geosoc.2016.0014.

佐藤活志・大坪 誠・山路 敦, 2017. 応力逆解析手法の発展と応用. 地質学雑誌, 123, 391–402, doi:10.5575/geosoc.2017.0028.

代表者は二重下線, 分担者は一重下線

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

岩脈や鉍脈の応力解析用ソフトウェア GArCmB を開発し, 英語のホームページ (<http://www.kueps.kyoto-u.ac.jp/~web-bs/tsg/software/GArCmB/>)を通じて世界に向けて公開した。

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 大坪 誠

ローマ字氏名: Otsubo Makoto

所属研究機関名: 産業技術総合研究所

部局名: 活断層・火山研究部門

職名: 主任研究員

研究者番号 (8 桁): 70509942

研究分担者氏名: 佐藤活志

ローマ字氏名: Sato Katsushi

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 大学院理学研究科

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 70509942

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。