

2021 March  
Vol.5



地殻ダイナミクス

－ 東北沖地震後の内陸変動の統一的理解 －

# Crustal Dynamics Newsletter



地殻ダイナミクス国際集会  
(京都大学宇治おうばくプラザ)  
2019.3.1-3.3

## Index

|                   |    |
|-------------------|----|
| 国際集会報告 .....      | 02 |
| 各計画研究の主要な成果 ..... | 04 |
| 活動報告 .....        | 16 |



# MEETING | 地殻ダイナミクス 京都国際集会

2019年3月1日~3月3日

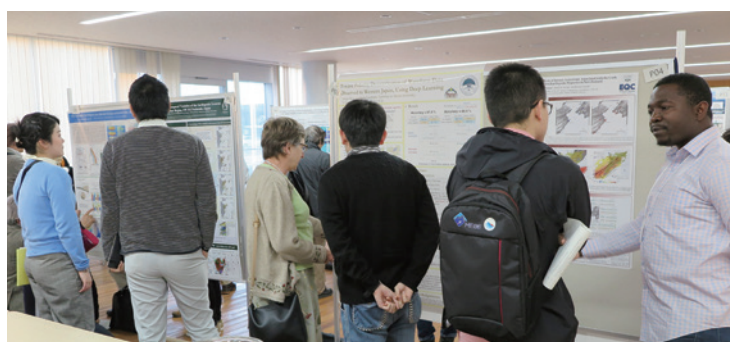
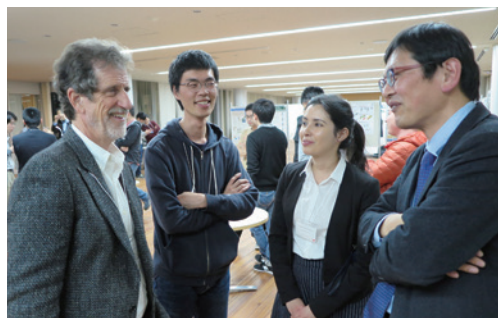
2019年3月1日~3日に、本新学術領域研究の最終国際集会“The Second International Symposium on Crustal Dynamics—Toward Integrated View of Island Arc Seismogenesis—”が行われました。会場となった宇治おうばくプラザはJR京都駅から南へ電車で30分ほど離れた京都大学宇治キャンパスにあります。宇治には黄檗山萬福寺や宇治平等院など歴史を感じさせる建物があり、国際集会に最適なロケーションでした。参加者は123名(学生・院生36名)で、そのうち海外からの参加者は13名でした。43件の口頭発表と62件のポスター発表が行われ、盛大な研究集会となりました。

初日はまず飯尾能久領域代表から、領域研究の全体紹介が行われました。続いて、A01班(応力班)のセッションがあり、地震のメカニズム解を用いて地殻内の応力場を推定する研究について発表されました。招待講演者のEgill Hauksson博士(カリフォルニア工科大学)からは、南カリフォルニア地域において推定した地殻の強度プロファイルと地震発生層の厚さの関係をレオロジーの観点から理解する試みが発表されました。A02班(変形班)のセッションでは弾性歪と非弾性歪それぞれを定

量的に検出した結果やフィッシュトラック法を用いて山地の隆起・侵食速度を推定した結果が発表されました。招待講演者のFrédéric Herman博士(ローザンヌ大学)からは熱ルミネッセンス法を用いて中部山岳や海外の山地の冷却年代を推定する試みが発表されました。夕方には「きはだホール」でポスターセッションがあり、夜には懇親会も行われました。

2日目はまずB01班(構造班)のセッションがあり、鳥取県西部に展開された高密度地震観測網を用いた研究や、断層帯での岩石の変形機構に関する研究が発表されました。高密度地震観測網からは微小地震の非ダブルカップル成分や、流体の上昇を予見させる地殻深部の地震など、内陸地震の発生過程に対して示唆に富む成果が発表されました。午後のB02班(実験班)のセッションでは、マイクロな岩石から地殻スケールのレオロジーまで様々な空間スケールの変形過程について多くの成果が発表されました。招待講演者のChristopher J. Spiers教授(ユトレヒト大学)はこのスケール依存性の解決を目指して野心的な実験結果を発表しました。2日目の夕方にも2時間近くポスターセッションが行われ、初日と同様に活発な議論がなされました。





最終日にはまずB03班(流体班)のセッションがあり、地殻内の流体の挙動に関して、室内実験・物理探査・野外観測・数値計算など多岐に渡る成果が発表されました。招待講演者のRichard H. Sibson教授(オタゴ大学)は断層深部に高压の流体が侵入することの地震発生における重要性を発表しました。午後はC01班(モデル班)のセッションがあり、地震発生サイクルから地震後の地殻変動まで幅広い分野の数値シミュレーションの成果が発表されました。招待講演者のSylvain Barbot博士(南カリフォルニア大学)からは、地震後の地殻変動データから断層面上の摩擦すべりと地殻・上部マントル内の不均質な粘性流動を推定する研究成果について発表がありました。

研究集会の最後にディスカッションが行われました。まず、Kelin Wang博士(カナダ地質調査所)から、我々の取り組みは時間・空間の両面で極めてレンジが広く、また広い分野をカバーしていることが印象的である、という感想を戴きました。次に、総括班評価者の先生方からコメントを戴きました。ごく一部ではありますが、ご紹介します。高橋栄一先生:一人の研究者として本プロジェクトへの参加はとても楽しかった。この研究をさらに続けてよい流れを進めて行くべき。深尾良夫先生:本プロジェクトのコンセプトは魅力的でクリアであり、とてもおもしろい成果が得られた。まだ分からないことは多いが、このような地質・地震学の統合は今後も進めていくべき。松浦充宏先生:プレート境界の強度が内陸の地震断層の強度を決めて、地殻の非弾性変形を規定するのだから、プレート境界の強度こそが地殻ダイナミクスと言えるだろう。嶋本利彦先生:岩石学、地球化学、

地球電磁気など多くの人が関連し、地震-断層-流体という地殻ダイナミクスにとってとても大きな3つを関連付けることに成功した。今後もこのコミュニティを維持していくこと。平原和朗先生:このプロジェクトで得られた結果を高校生でもわかるような簡単な言葉でまとめて、わかりやすく世間に公開するべき。以上に加えて、評価者の先生方からは、多くの宿題も戴きました。領域の最後を締めくくると、とても良い研究集会となりました。

(高田 陽一郎)



### はじめに

地震が何故、どのように発生するのかを理解するためには、地殻内の強度と応力を知ることが極めて重要である。A01班(応力班)では、大地震後の応力場の変化等から地殻の強度を推定し、また強度低下をもたらした原因について検討し、さらに応力場を推定する新しい手法の開発にも取り組んできた。ここでは、主な成果を紹介する。

### 2000年鳥取県西部地震震源域の応力場

2000年鳥取県西部地震震源域において稠密観測データから余震震源及びメカニズム解を高精度に決定し、本震断層モデルを推定した(図1a)。余震は本震断層から約1kmの幅で分布し(図1b)、多くの余震は正の $\Delta CFF$ (断層の滑りやすさの指標)を持つことが分かった(NL Vol. 3 のA01成果図3)。

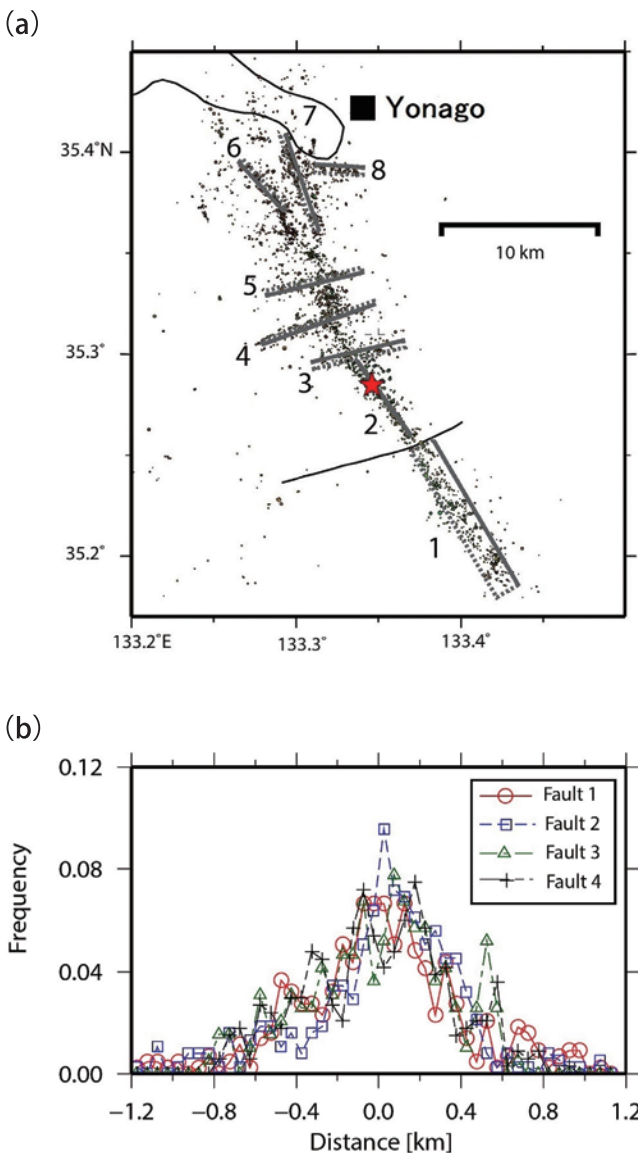


図1 2000年鳥取県西部地震の余震の分布 (Yukutake and Iio (2017) を改変)。

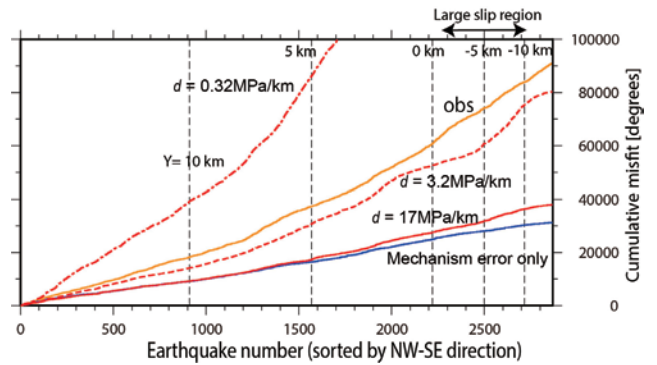


図2 本震断層走向(北西-南東)に沿ったミスフィット角の積算曲線(obs)と、差応力の深さ勾配 d を変化させたモデル(赤線)との比較(Yukutake et al. (2020)を改変)。

余震の主な発生要因として本震の滑りにより生じた静的応力変化により断層周辺に存在する微小断層で破壊が誘発されたと考えられる。ただし、大滑り領域では負の $\Delta CFF$ を持つ余震が多く発生し、その原因については今後さらに検証する必要がある。

さらに、余震域の応力場の空間不均質をメカニズム解のミスフィット角(単一なりファレンス応力を仮定したときの理論的な滑り方向と実際の滑り角とのなす角)に基づいて検証した。ミスフィット角分布はメカニズム解の誤差のみでは説明できず、応力場が空間的に不均質であることが明確になった。またその応力擾乱源として静的応力変化を考えると、静水圧を仮定した時の摩擦係数が0.1程度に相当する差応力レベルで分布が説明できる(図2)。

また、応力場の空間パターンをP波初動から直接求める統計的手法を新たに開発し、余震域で得られたデータを解析した結果、特に注目すべきものとして、本震断層の南端部で断層

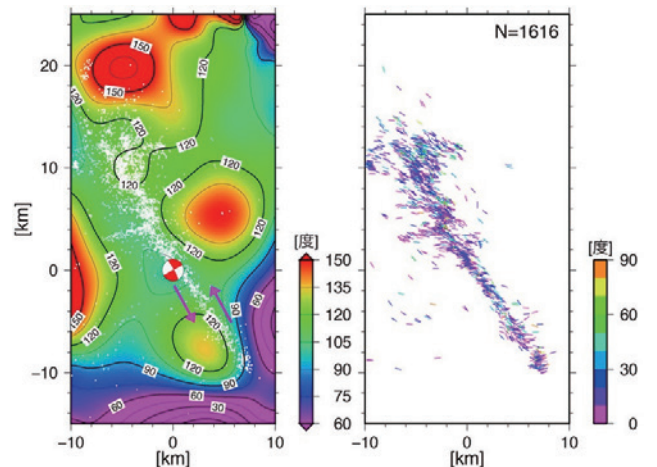


図3 左:2000年鳥取県西部地震余震域の応力場の空間パターン。最大主応力軸の方位角(北から時計回りを示す)。ビーチボールは本震の震央およびそのメカニズム解、白点はP波初動を得た余震の震央分布(Iwata (2018)を改変)。右:左図の応力場とP波初動から求めた余震のメカニズム解におけるP軸の方位角。色は水平面からの傾きを示す。なお、P軸およびT軸の向きの推定誤差が15°以内のものを描いた。

の西側と東側で応力場の回転方向が異なることを見出した(図3左)。推定誤差を考慮に入れても回転方向の差異は有意である。さらに、この推定した応力場とP波初動から、余震のメカニズム解を推定しなおした(図3右)。上で触れた断層南端部の応力場回転に呼応して、P軸の向きがやはり回転していることが見てとれる。

### 2016年鳥取県中部地震震源域の応力場

2000年鳥取県西部地震の合同余震観測データの解析により、余震域南端付近において、断層の両側で最大主応力の向きが異なっていることを見出され、地震すべりによる応力変化のパターンと良く似ていることから、断層南端付近で差応力が小さいことが指摘されていた。本研究では、同じく山陰地方の地震帯で発生した2016年鳥取県中部の地震の余震観測データを解析して、差応力の大きさとその深さ変化を推定した。余震観測データは京大防災研、九州大学、東大地震研の合同余震観測班によるものである。

約1万個の精度良い地震メカニズム解の解析から、断層の両端付近の広い範囲において地震すべりによる変化と調和的な応力場のパターンが見られ、地震前の応力場は一様と仮定すると、断層の南端付近深さ4 kmで約40 MPaの差応力が見積もられた。また、深さ3-6 kmでは、図4に示すように、深さとともに差応力が増加することが推定された。一方、それ以深では、余震分布の下限に向かって地震すべりが小さくなるにもかかわらず、同様な応力場のパターン見られることから、差応力は深さとともに増加しない可能性が指摘された。36 kmの深さにおいて、静水圧を仮定して摩擦係数を見積もると0.3程度の値となった。鳥取県西部地域においても小さな摩擦係数が得られており、地殻構造が比較的均質と考えられる山陰の地震帯において、地震発生域の差応力が従来言われているよりもずっと小さいことが明らかになった。

### 2011年東北沖地震後の内陸地震活動の活発化

2011年東北地方太平洋沖地震の後に、東北日本の内陸で見られた地震活動の活発化は、この地震の発生前の東北日本の応力場の方向の空間変化と関係していることが明らかに

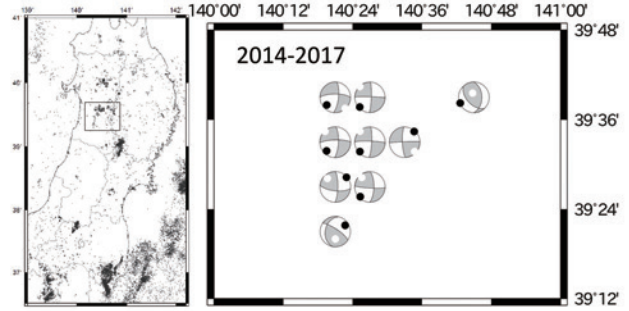


図5 東北地方太平洋沖地震後に秋田県南部で活発化した地震群から推定された応力場。黒丸が最大圧縮方向を示しており、この領域では広域応力場と異なり、北東-南西の圧縮場が卓越していることがわかる。

なった。すなわち、広域的な東西圧縮の応力場とは異なる領域において、本震の影響で局所的に剪断応力が増加したことにより断層滑りが生じやすくなり、地震活動が活発化したと考えれば、多くの地震活動の活発化は説明できる。そのような例として秋田県中部で活発化した地震活動から推定された応力場を図5に示す。

一方、もともと東西圧縮の応力場で、本震発生後に剪断応力が低下したにも拘わらず、地震活動が群発的に活発化した領域も存在する。これらの領域では、群発地震の震源が複数枚の面状に分布しており、しかも、時間とともに、深部から浅部に移動する様子が見られた(図6)。しかも、地震活動や震源過程を特徴づける複数のパラメータが、いずれも同期して変化していることがわかった。このことはこれらの群発地震が、地殻内の流体の上昇により引き起こされていることを示している。

### おわりに

日本列島の地震発生域では、静水圧を仮定した時の摩擦係数が0.1~0.3程度以下と極めて小さいことが、本研究で明らかになってきた。このことは、日本列島で地震活動が活発なのは、剪断応力が高いというよりも強度が低いからであることを示唆しており、その強度低下の理由としては、間隙流体圧が高いということが一番考えやすい。今後、このような観点から地震発生ポテンシャルを評価することが重要と考えられる。

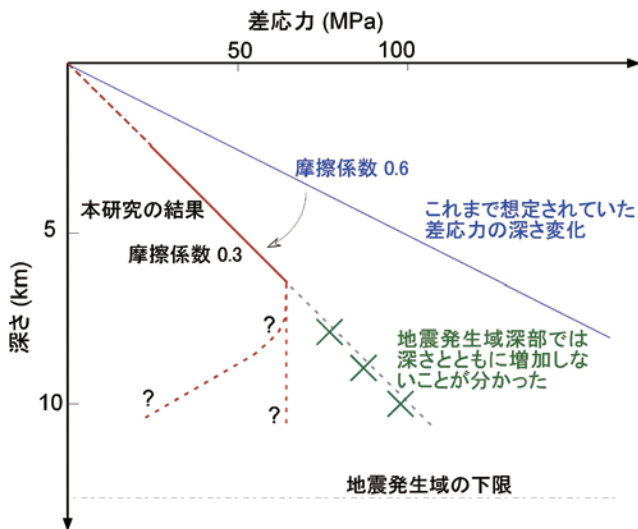


図4 鳥取県中部地震の震源域周辺の差応力の深さ変化。

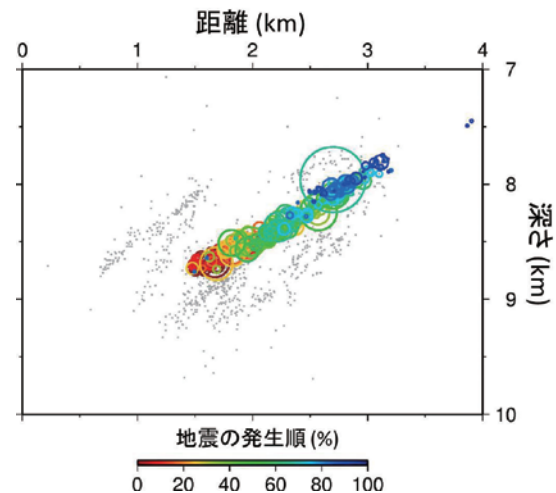


図6 東北沖地震後に山形-福島県境周辺で活発化した群発地震活動に見られる震源の移動。震源位置を北西-南東方向の断面図に投影して示す(Yoshida and Hasegawa, 2018)。

# 異なる時空間スケールにおける日本列島の 変形場の解明(変形班):主な成果

## はじめに

A02班(変形班)は、測地学、地震学、地質学、地形学等の様々な観測や調査結果に基づいて、多様な時空間スケールにおける日本列島の変形場の把握を試みた。以下では、本研究の主な成果として、(1)地殻歪速度パラドックスの解決、(2)地殻内の非弾性変形の抽出、(3)地質学的時間スケールにおける歪速度の見直し、(4)山岳熱史解析に基づく東北日本の隆起史の4つについて紹介する。

## 地殻歪速度パラドックスの解決

日本列島では、1980年代以降、測地学的な地殻歪速度が、地質・地形学的な値より1桁大きいという指摘がなされ、日本列島のテクトニクスや地震ハザードを考える上での重要な未解決問題とされてきた。この問題に対し、池田(1996、活断層研究)は、測地学的な観測は主としてプレート境界の固着の影響による弾性歪を反映し将来巨大地震によって解消されると指摘した。この仮説は、日本海溝沿いでの巨大地震発生の可能性を指摘していたが、2011年東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震)の発生まで、その可能性が真剣に顧みられることは無かった。本研究では2011年の東北沖地震発生により池田(1996)の仮説が裏付けられたことを確認し、地殻歪速度パラドックスは基本的に解決したと結論付けた。一方、未解決の問題も依然として残る。一例として、東北地方の太平洋沿岸は以前から急速に沈降していたが、2011年の地震時に最大1m以上沈降した。しかし、長期的には隆起傾向が見られる。

この上下方向の運動の解釈については複数の仮説が提示されており未解決である。また、日本列島内部の活断層周辺の変形速度は測地データと地質・地形データで2-3倍の差があり、この原因も検討が必要である。

## 地殻内非弾性変形の検出

東北沖地震とそれに続く余効変動により、過去長く続いた東西短縮変形に代わり、日本列島は一時的に東西伸張変形下にある。この変化は、日本列島スケールの巨大な岩石変形実験と見なすことができる。本研究では、短縮と伸張という逆向きの変形、さらに地震時における瞬間的な変形と地震間または地震後の定常的な変形という、向きや時間スケールの異なる変形条件下における変形応答の比較を通して、日本列島の多様な変形特性を明らかにした。

まず、日本海沿岸のいわゆる「歪集中帯」において、地震前と地震時との変形パターンの比較から、2011年以前にこの地域で見られていた顕著な東西短縮変形が弾性変形によるのではないことを見出した。さらに、地震前後のパターンの比較から、東西歪速度分布を移動平均フィルターで処理した長波長成分が短縮から伸張へと逆転しているのに対し、短波長成分では同じ場所に短縮変形が卓越しており、この短波長の短縮変形は、プレート境界の固着等に影響されず永年的に継続する非弾性変形によるものと特定された(図1)。この短波長の歪速度(0.04~0.10 ppm/年)は、地層の短縮変形量から推定された過去1~2 Ma程度の平均的な歪速度と大きさ、位置と

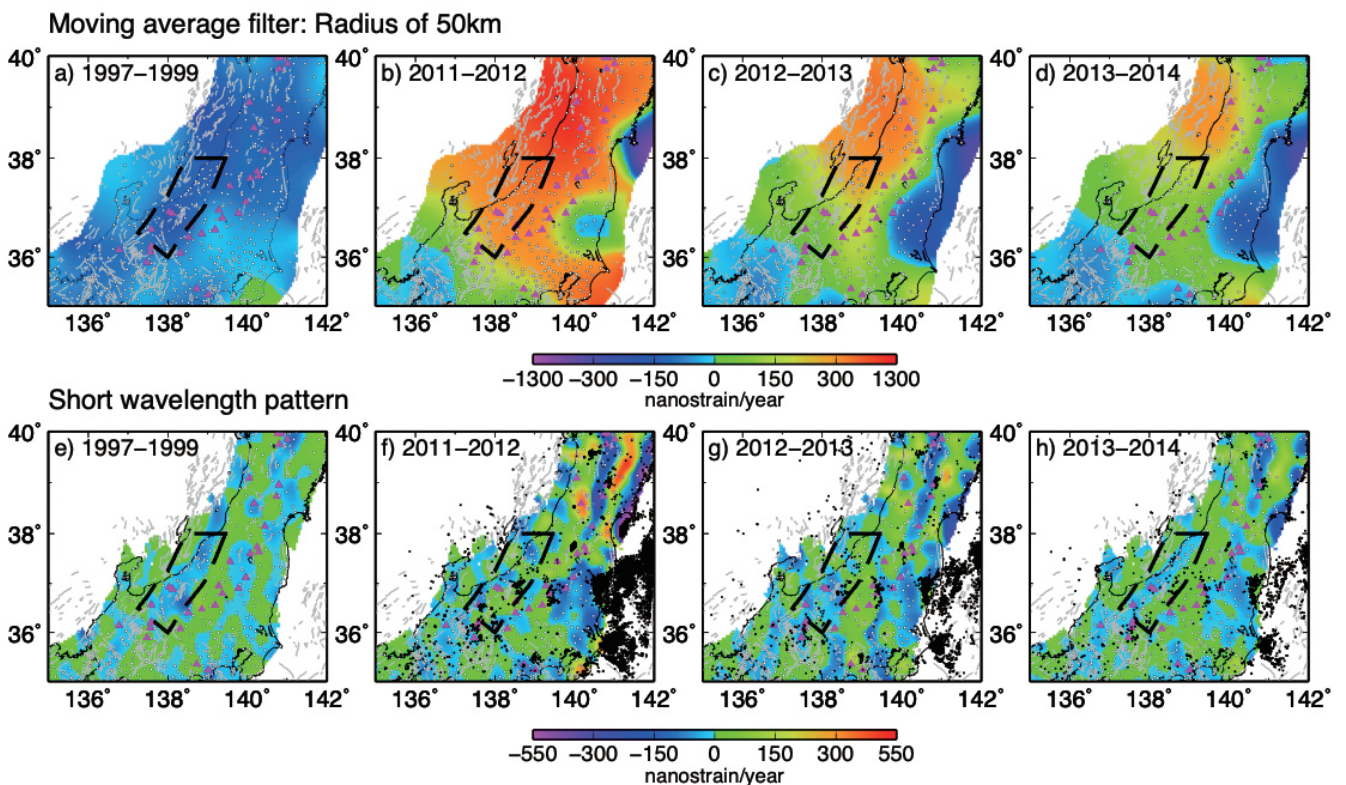


図1 GPSデータに基づく長波長(上)と短波長の東西歪速度分布。短波長の歪速度分布は非弾性変形を反映する(Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016, EPSL)。

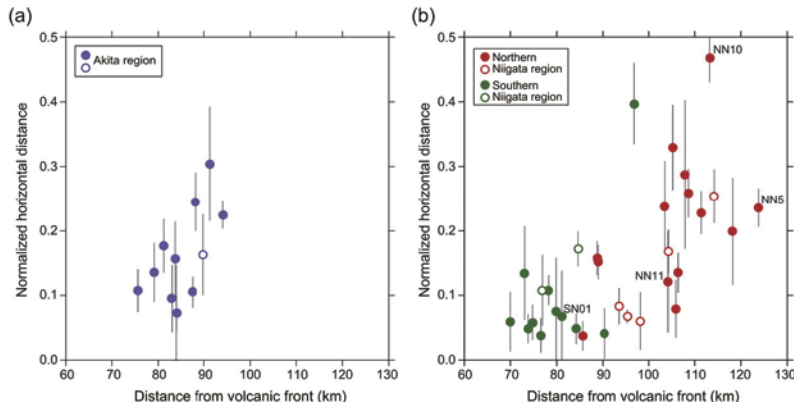


図2 秋田地域(左)と新潟地域(右)における褶曲軸の地形からの位置のずれ。火山フロント側ほど地形が新しい(Otsubo and Miyakawa, 2016, Quater. Int.)。

もに整合的であることから、現世の測地観測データから累積性を持つ長期的な変形を分離したものと解釈できる。このように、地質・地形データと対応が取れる形で測地学的な観測データを短期的な弾性歪と長期的な非弾性歪に分離した成果は世界的にも初めてである。

そのほか、跡津川断層では、干渉合成開口レーダーと稠密GNSS観測結果を組み合わせることで地震間地殻変動の面的な分布を求めることに成功し、断層周辺の局所的な変形パターンが東北沖地震前後で変化していないことを見出した。山陰地方では、20世紀以降に大規模な内陸地震が頻発している地域に沿って剪断歪の集中が見られることが明らかとなった。

### 地質学的時間スケールにおける歪速度の見直し

本研究では、新潟県および秋田県の日本海沿岸部において、逆断層運動に伴う背斜軸と地形的な高まりとの位置関係を調べた。これによると断層運動が経年的に西から東へと移動していることから、従来は単純に時間的な一様性が仮定されていた第四紀の地殻変形でも活動域が時空間的に変化している可能性が明らかになった(図2)。この結果は、活断層周辺の変形速度が、従来地質・地形学的に推定されていた値よりも一時的に増加する可能性があることを示す。

一方、跡津川断層の周辺では、地形・地質から推定された平均変位速度よりも測地学的な変位速度が2~3倍程度大きい。本研究では、跡津川断層周辺において、詳細な露頭観察から小断層を多数特定し、断層外変形が地殻変形に対して寄与する割合を定量的に見積り、測地学的変位速度と地質・地形学的変位速度の食い違いに対して断層外の塑性変形が有

意な貢献をする可能性を指摘した。

さらに、西南日本の下に沈み込んだフィリピン海プレートの形状に注目し、沈み込む際には平らなプレートが屈曲した様子から西南日本の地殻の東西短縮変形速度を見積もることを試み、中部地方では $4\sim 7 \times 10^{-8}$  /年の短縮速度が推定される一方、四国の下の短縮速度はその1割以下と小さく見積もられ、変形速度の地域性が示唆された。

### 山岳熱史解析に基づく東北日本の隆起史

本研究では、日本列島の長期的な上下変動についての情報を得るため、地球熱学的手法による山岳の隆起・削剥史の復元を試みた。特に、従来データの少なかった東北地方を対象として、島弧を横断する方向でサンプリングと分析を行った。分析では、閉鎖温度の異なるアパタイト・フィッシュトラック法、アパタイト (U-Th)/He法、ジルコン (U-Th)/He法を組み合わせることにより隆起・削剥史を復元し、また、山地毎の比較を行った。その結果、前弧側に位置する阿武隈山地では削剥速度が0.05 mm/年以下と遅いのに対し、奥羽脊梁山脈および背弧側の朝日山地では過去2~3 Maに1 mm/年以上の急速な隆起が生じたことが明らかとなった(図3)。また、本研究では、日本列島の各地で得られた熱年代データをデータベースとして整理し、列島規模での隆起・削剥史解明へ向けた重要なステップとなった。

以上のように、本研究は、日本列島の地殻変形に対して多様なアプローチを駆使して取り組み、従来の認識を改める多くの成果を得ることができた。

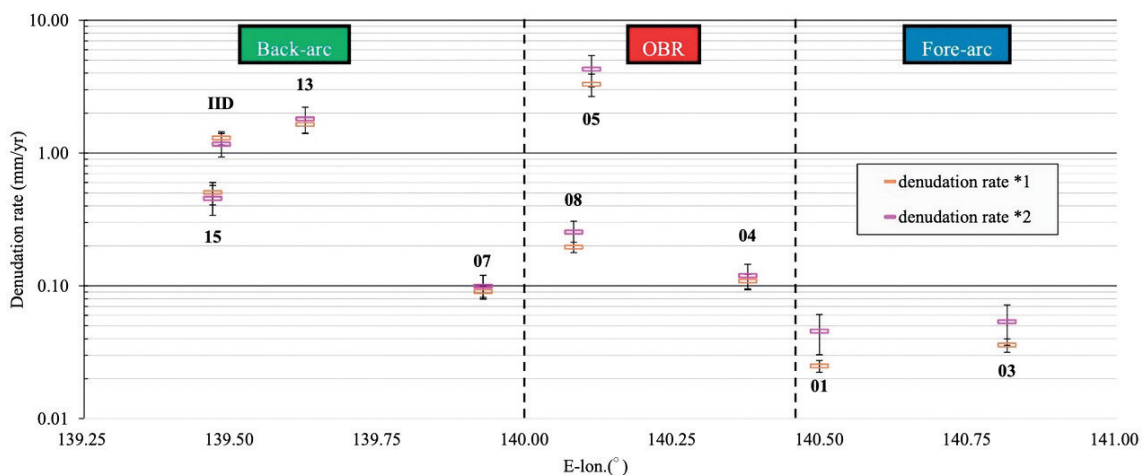


図3 熱年代データの逆解析で求めた東北地方南部における削剥速度分布(Fukuda et al., 2019, J. Asia Earth Sci.)。

# 観察・観測による断層帯の発達過程とミクロからマクロまでの地殻構造の解明(構造班): 主な成果

## はじめに

B01班(構造班)では、断層帯のマクロ(数10 kmスケール)からミクロ(顕微鏡スケール)までの観測・観察に基づき、断層の構造、岩石の変形、化学反応過程・物質移動等を解析し、断層に沿う地震発生サイクルの中で断層帯における低速・高速変形の物理的、化学的過程・機構の実体解明を目指して来た。ここでは前回(ニューズレターVol.4)報告した、2000年鳥取県西部地震震源域の0.1満点地震観測以外のフィールド研究の成果を紹介する。

## 断層帯の発展と歪の局所化: 中央構造線を例として

中央構造線断層帯は、はじめに白亜紀後期に領家帯花崗岩類に領家南縁剪断帯が形成され、そこに歪が局所化し、最終的に三波川変成岩類と領家帯花崗岩類を境する断層(狭義の中央構造線)に発展した。中央構造線断層帯では主として岩石の上昇による温度低下に伴い、マイロナイト(延性断層岩)形成から脆性領域でのカタクレーサイト形成に変形様式が変化した。さらに地表付近において断層ガウジが形成されている。

三重県西部の中央構造線における栗野・田引露頭周囲の地質構造を示す(図1)。構造は大きくマイロナイトを含む左横ずれの構造と、右横ずれのカタクレーサイトを含む構造に分かれる。切断関係から後者の構造は前者の構造より新しい。領家帯を含む内帯岩石と三波川帯変成岩の岩相境界としての中央構造線は後者に含まれる。左横ずれの構造中の変形の特徴は、北部から南部へと変化する。マイロナイト分布域北限付近では石英 c軸ファブリックがY集中パターンを示すなどより高温変形の特徴を示すが、その南側では、石英 c軸ファブリックがタイプI クロスガードルやカタクレーサイトの変形重複など、より低温変形の特徴を示す。この低温マイロナイトの南限付近には、石英 c軸のランダムファブリックで特徴づけられるウルトラマイロナイトと、黒色カタクレーサイトの、厚さ 10 m 程度の互層領域が見られる。この領域は左横ずれマイロナイトの最終的な変形集中域として大きな変位をまかなっていたと考えられる。マイロナイトを切断する構造は、より三波川帯側に右横ずれのカタクレーサイトが分布し、さらに岩相境界の南側に最新すべり面が見られる。右横ずれカタクレーサイトは強い面構造が発達し、領家帯側では大量の緑泥石が含まれ、三波川帯側では緑泥石は含まれない。領家帯側では緑泥石温度計から300°C付近の変形が示唆され、また三波川帯側では白雲母の塑性変形が見られる。したがって、右横ずれのカタクレーサイトは脆性領域最深部で変形したものと考えられ

る。三波川帯中の最新すべり面付近では、造構応力場の変化に対応した運動方向の変化が見られる。最新すべり面は幅数 cm 程度のスメクタイトに富む層で、正断層性の運動を起こした。

上述の栗野・田引露頭から約10 km西方に位置する赤岩谷ルートでは、延性断層岩は南部のトータル岩起源のプロトマイロナイトと北部の花崗岩起源のマイロナイトに区分される(図2)。これは、カリ長石が斜長石よりも延性的であるため、カリ長石を大量に含む花崗岩でより延性変形が進行したためと解釈される。花崗岩起源のマイロナイトは、さらに南部の再結晶石英粒子が著しく伸長するS-タイプ組織を示す部分と、北部のそれらが比較的等粒状で粒子境界がローブ状を示すP-タイプの組織を示す部分に分けることができる。

花崗岩マイロナイトについて、2長石温度計を用いて変形時温度が推定された。その結果、P-タイプの組織を示す花崗岩マイロナイトでは変形時温度は400-500°Cの範囲に及ぶが、S-タイプ組織を示す花崗岩マイロナイトのそれは350-400°Cで、変形は温度の低下とともにS-タイプ組織を示す部分に局所化したと考えられる。しかし、断層帯がさらに冷却された時、その変形の集中帯では変形が停止し、最終的に中央構造線の北側に分布する厚さわずか50 m以内のウルトラマイロナイトで変形がまかなわれたと推測される。その後、この部分がカタクレーサイト化を被り、中央構造線断層帯に発展した。ウルトラマイロナイトを構成する石英には、Y集中c軸ファブリック

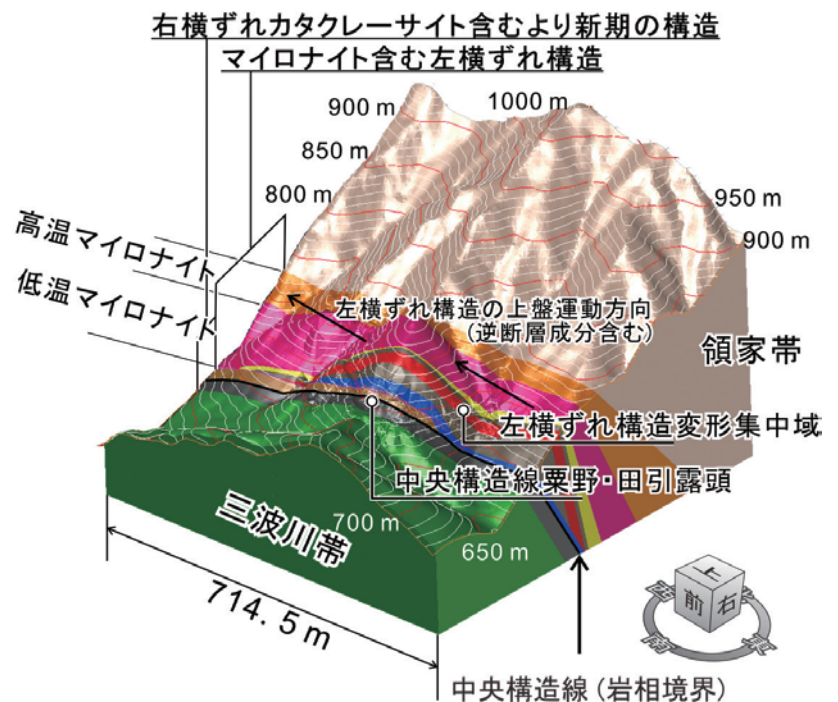


図1 栗野・田引露頭付近の中央構造線の断層帯内部構造。構造は大きく、左横ずれ構造とより新期の構造に分かれる。



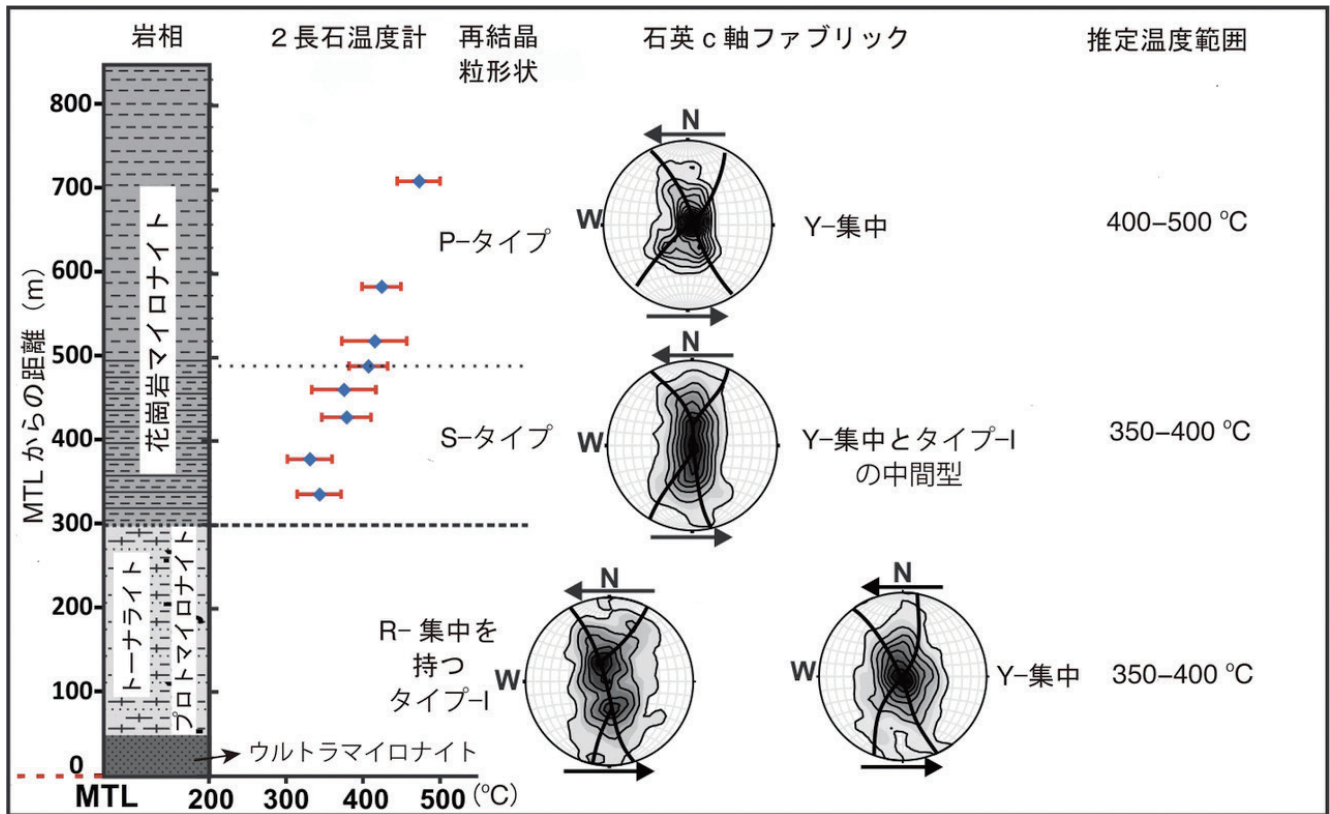


図2 三重県赤岩谷ルートにおける中央構造線断層帯中の微細構造と2長石温度計から推定された変形時温度。赤線は推定された温度範囲を示す。Bui (2019, 北海道大学博士論文)より。MTL:中央構造線。

クではなく、低温変形を示すタイプ-Iクロスガードルとランダムc軸ファブリック(上述)を示すものが見つかっている。変形帯の乗り移りが生じた理由として、現在の中央構造線に隣接するトナライトに割れ目が形成され、流体が浸透して石英の加水軟化が促進されたほか、粒子境界移動等の粒径依存型のクリープが促進されたことが考えられる。

以上、中央構造線では様々な地殻深度で断層運動を被った岩石が観察される。内陸地震発生を考える上では、左横ずれ構造に見られる、脆性塑性遷移への温度低下過程における変形集中の理解が重要と考えられる。

**下部地殻における破壊と延性剪断帯の形成**

下部地殻の延性剪断帯の形成・発達過程が内陸地震の発生過程において重要であると指摘されているが、その詳細は未だ不明である。延性剪断帯の形成は変形の局所化の結果であり、その形成過程は下部地殻岩石に記録されているはずである。そこで、下部地殻岩石が大規模に露出しているノルウェー北部、ベステラーレン諸島に産する斜長石を主体とする岩石(斜長岩)を対象として、主要構成鉱物の結晶方位解析や化学組成を用いた熱力学的解析を行った(図3)。その結果、剪断帯の形成には破壊が重要であることが明らかとなった。岩石の破壊は少なくとも2回行われ、その温度圧力条件は650°C 0.95 GPa、600°C 0.7 GPaと見積もられた(それぞれ深さ35 km、25 kmに相当する)。これら破壊は鉱物の細粒化や、破壊による空隙率・透水性の上昇により浸透した地殻流体による細粒変成鉱物の形成を伴い、主要な変形機構が粒径非依存型クリープ(転位クリープ)から粒径依存型クリープ(拡散クリープもしくは粒界すべり)へと遷移したことが示唆された。

この変形機構の遷移が局所的な歪軟化をもたらした結果、狭長な延性剪断帯が形成されたと考えられる。破壊は地殻における脆性塑性遷移領域より深部においては一般に抑制されるが、地殻下部における破壊現象は岩石に明瞭に記録されており、さらにそれが延性剪断帯の形成をもたらすことは重要な知見である。延性剪断帯を構成する細粒鉱物は正常粒成長により粗粒化し、やがて変形機構が転位クリープへと遷移すると考えられるが、内陸地震の発生間隔(数千年—数万年)程度では、この変形機構の遷移は起きない可能性が高い。

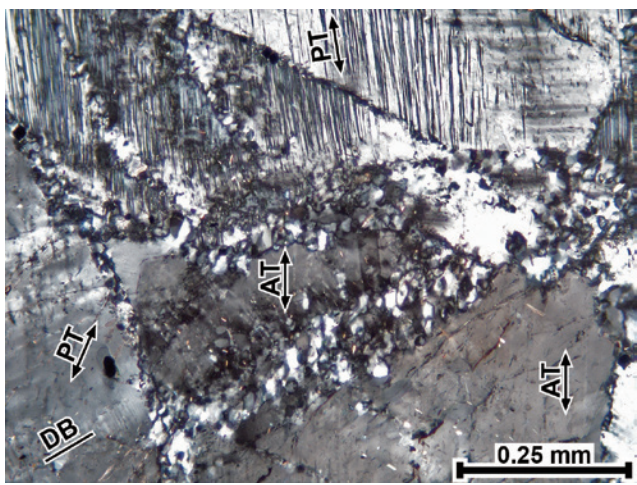


図3 ノルウェー北部、ベステラーレン諸島に産する斜長岩中に発達する斜長石の破壊組織(偏光顕微鏡写真、クロスニコル)。ATやPTは変形双晶(アルバイト式双晶、ペリクリン双晶)、DBは変形バンドを示す。粗粒な斜長石には細粒斜長石で充填された領域が発達しており、これらは破壊による細粒化や変成再結晶の結果形成されたものである。

## はじめに

本計画班では島弧-海溝系の応力-歪場の理解に不可欠な岩石変形物性を明らかにするために、断層物質や地殻・マントル物質の摩擦試験や変形実験、断層帯・沈み込み帯岩石の解析や塩水を含む流体との相互作用の解明、レオロジー理論モデルの構築や、東北沖地震後の内陸変動モデリングなど多方面からの研究を行なった。本稿ではこれらの研究のうち内陸地殻の断層強度と下部地殻のレオロジーについての成果を紹介する。

## 断層帯の摩擦強度の不均質性と弱化過程

上部地殻の強度を規定する断層の摩擦強度は、断層帯を流体が通り粘土鉱物などの板状含水鉱物が生成することによって小さくなる可能性が指摘されてきた。現実の地殻条件でどの程度の強度低下が起り得るのか定量的に評価するために、長い活動履歴をもち成熟した断層帯とみなされる中央構造線の断層岩を用いて摩擦実験を行なった。実験には本ニュースレーターで B01 (構造) 班が記載している紀伊半島の2地域から採取された断層ガウジおよび断層岩試料を用いた。

地殻の比較的浅所の変形を記録している三波川帯変成岩起源の断層露頭で見られる断層帯には横ずれから正断層運動に転じるまでの4つの変形ステージに対応する滑り面が同定されており、それぞれの滑り面を構成する断層ガウジについて、推定される生成温度圧力に近い条件で摩擦試験を行った (図1)。実験には産総研のガス圧式変形試験機を用いた。摩擦係数は温度と雲母粘土鉱物の種類や量比に応じて変化し、ステージ1に対応する温度250°Cの実験では 0.5程度の比較的高い値が得られたが、ステージ2と3の実験 (150°C) では 0.25-0.51、ステージ4の実験 (100°C) では0.19-0.34であ

り、低温で生成する膨潤粘土 (スメクタイト) に富む断層ガウジが特に小さな摩擦係数を示した。

中央構造線の北側 (領家帯) のB01班の調査ルートでは、さらに高温高压条件で形成されたカタクレサイトやマイロナイトが分布し、緑泥石や白雲母が主要な含水鉱物となる。そこで、これらの断層岩を粉碎して脆性-塑性遷移域にあたる中部地殻の条件 (温度 300°C、法線応力 300 MPa) で大変位 (~50 mm) の摩擦実験を行なった。実験にはユトレヒト大学 (オランダ) の熱水式回転摩擦試験機を用いた。緑泥石は単独では0.3程度の低い摩擦係数と安定滑り挙動を示すが、中央構造線のカタクレサイトは緑泥石に富む (約14 wt%) 試料でも、通常の岩石と同程度の摩擦係数 (0.6-0.7) をもち、速度弱くないし中立の摩擦挙動を示した。また定速滑り実験では、滑り速度 1 μm/秒と 300 μm/秒の間で剪断組織からランダム組織への転移がみられた (図2)。粉碎前のカタクレサイトは磨耗粒子をもつランダム組織の特徴があり、過去の中央構造線も比較的速い滑り速度で運動したと推定される。

白雲母に富むカタクレサイトの母岩であるウルトラマイロナイトは、B01班による石英ファブリックの解析から 350-400°C で転位クリープによって変形していた推定されている。石英の転位クリープ流動則については多くの実験的研究があるが、実験室条件からの外挿による地殻応力推定には大きな不確実性がある。そこで図2bでは石英のクリープ素過程から理論的に構築した流動則をウルトラマイロナイト形成時の応力推定に用いた。上述の摩擦実験の結果を横ずれ断層に適用し、350°Cから400°Cの間 (深さ15 km 付近) で脆性-延性遷移が起きる条件を考えると、地殻中部の間隙圧比は0.4 (静水圧) から0.8程度までであり、地殻応力の最大値は100 MPa以上になると推定される。

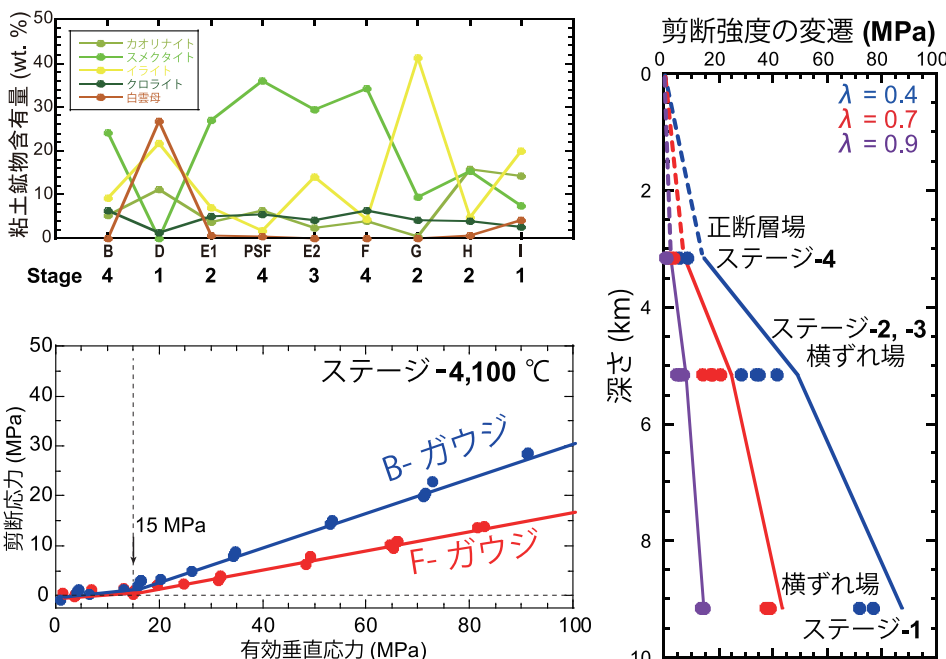


図1 中央構造線断層帯の各滑り面を構成するガウジ中の粘土鉱物のモード組成 (左上)、低温で生成したスメクタイトに富むガウジ B と F について、間隙圧を変化させて行った摩擦実験の例 (左下)、および断層剪断強度の変遷 (右)。ここでは深さ  $d$  (km) の温度を  $21+25 \times (d-0.1)$  °C とした場合の結果を示している。 $\lambda$  は間隙圧比 (= 間隙圧 / 静水圧)。

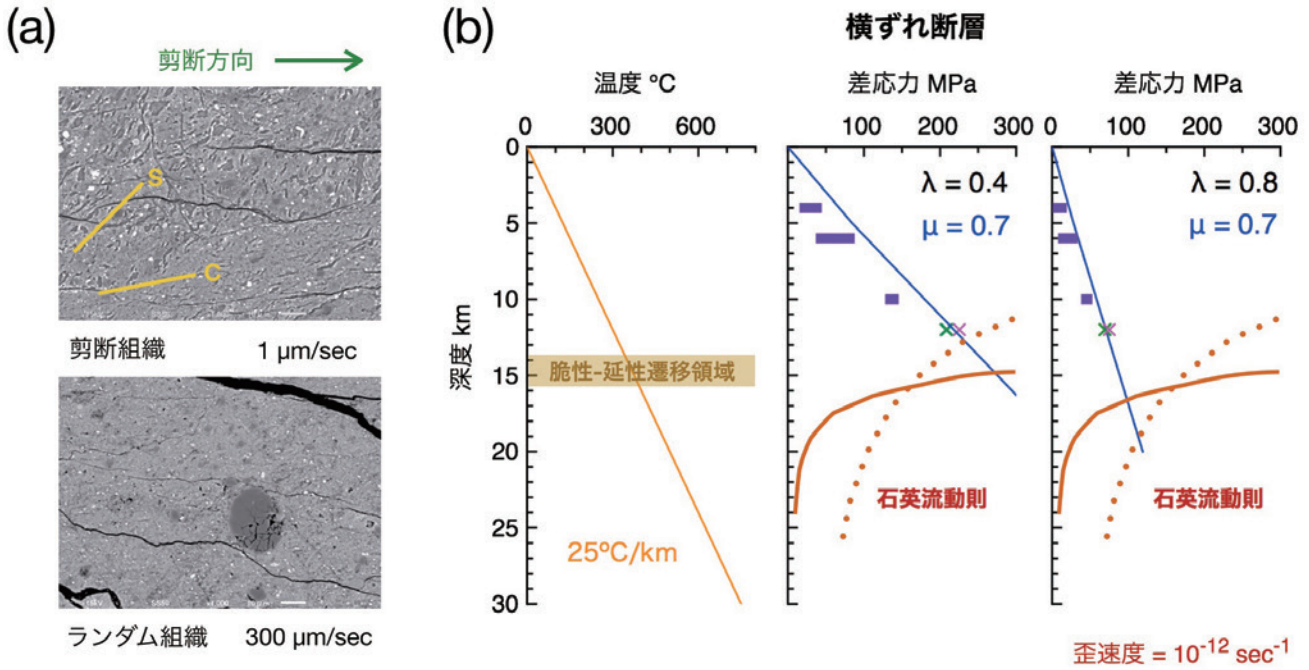


図2 (a) 緑泥石に富むカクレーサイトを用いた摩擦実験後の走査型電子顕微鏡像。S:面構造。C:剪断面。スケールは 10 μm。(b) 実験から得られた摩擦係数を用いて推定した横ずれ断層の強度分布。紫は図1の断層ガウジのデータ範囲、緑とピンクの×印はそれぞれ緑泥石および白雲母に富むカクレーサイト。青線は摩擦係数  $\mu$  が 0.7 の場合。赤線は  $\alpha$  石英の体拡散、赤点線はパイプ拡散が律速する転位クリープの流動応力 (Fukuda and Shimizu, 2017, JGR)。 $\lambda$  は間隙圧比 (= 間隙圧 / 静岩圧)。

### 下部地殻のレオロジーにおける水の効果

断層の深部延長にある剪断帯の塑性強度に対する水の効果を調べるため、下部地殻を代表する鉱物である斜長石の細粒人工多結晶体を出発物質にして、高封圧 (0.8–1.4 GPa) 下の变形試験を行った (図3)。実験にはGriggs型固体圧試験機を用い、变形実験中に試料に水が浸透するようにした。このようにしてできたウェットな斜長石多結晶体の降伏応力は、ドライのものに比べて1桁低く、含水量の増加と共に降伏応力が低下する傾向がみられた。先行研究でガス圧試験機を用いて定式化された流動則に比べても1桁程度低く、水軟化における圧力効果が大きいことが示唆された。また試料を变形させない場合に比べ、变形させた場合のほうが水の浸透速度が速

かった。下部地殻でも同様に、剪断帯が水の浸透によって弱体化し、変形が進むことでさらに水の流入をもたらすというプロセスが起こり、歪集中帯の形成につながると考えられる。

### おわりに

以上のように、高温高压実験によって内陸の断層浅部や深部剪断帯におけるH<sub>2</sub>O流体の影響による弱化過程が具体的に明らかになってきたが、地殻中部条件では摩擦係数そのものの低下は確認できなかった。本ニュースレターでA01 (応力) 班が鳥取県の震源域で予測しているように地殻中部の絶対応力が小さいとすれば、地震時に間隙圧が上昇し、断層強度が低下していたことが考えられる。

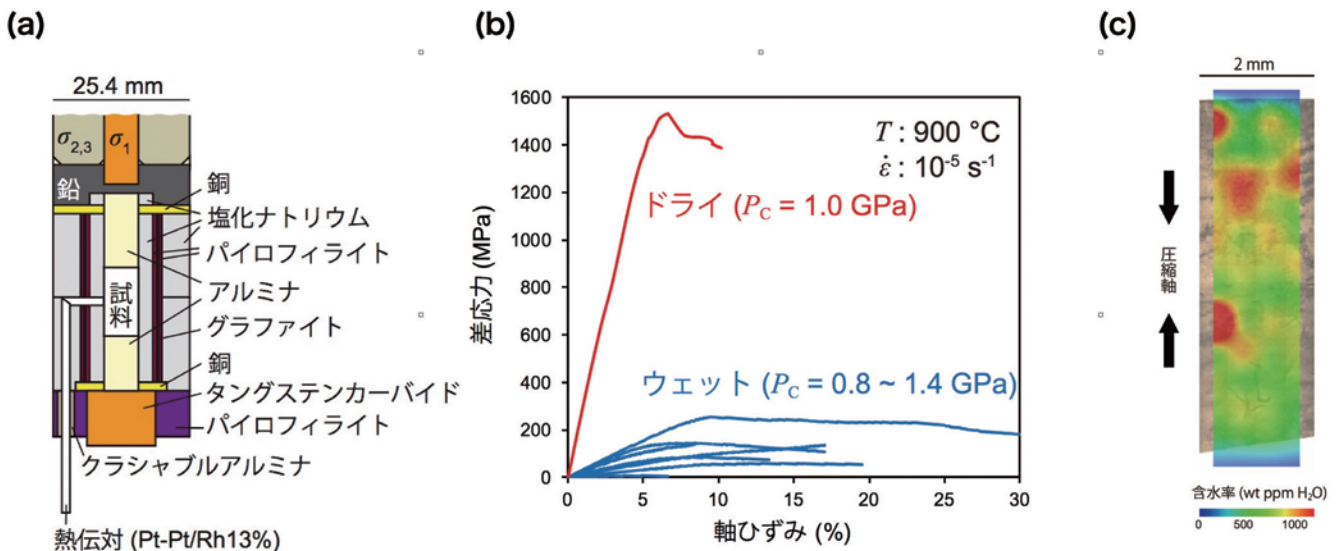


図3 斜長石の細粒人工多結晶体の变形実験。(a) 試料アセンブリ。(b) 応力-歪曲線。P<sub>c</sub>:封圧。(c) 变形試料への水の浸透を示す顕微赤外線。透過顕微鏡像の上に含水量マップを重ね合わせている。

## はじめに

計画研究B03は、日本列島下の地殻とマンツルの流体分布・移動と性質、およびそれらの地震・火山・地殻変動現象とのかかわりを解明することを目的としている。B03地殻流体サブグループでは、沈み込んだスラブから脱水反応によって生成された流体(スラブ由来流体)が、マンツルや地殻を経て地表付近まで上昇する様子を、地球物理学、地球化学、数値シミュレーションの手法などを組み合わせて明らかにしてきた。例えば、有馬型塩水とよばれる海水の約2倍の塩濃度をもつ湧水は、沈み込むプレートの温度-圧力構造、脱水反応、酸素-水素同位体比分配の統合数値シミュレーションや、Sr-Nd-Pb同位体比および希土類元素組成解析に基づき、スラブ由来流体が地表付近まであまり反応を行わずに上昇してきた流体に対応することが分かってきた。また、そのような深部由来流体の分布、上昇過程の研究から、断層系や地震との関連性も議論されている。B03の流体計測サブグループでは、断層帯での深部流体のフラックスを、流量や水圧の物理的な測定および化学・同位体組成等の測定を通して推定した。

一方、有馬型塩水は、その定義からも非火山地域(主に前弧

域)に分布が限られるため、日本列島全体での深部流体の性質、分布、および地殻ダイナミクスとの関わりを議論するには不十分である。B03の地殻流体サブグループでは、日本列島下の電気伝導度構造観測、含水岩石物性実験(流体を割れ目や粒界に含む岩石の地震波速度と電気伝導度の同時測定)、火山岩や温泉水の地球化学、流体-岩石反応を考慮したマンツル対流シミュレーションを行い、非火山域/火山域を問わず、日本列島全体での流体について研究を進めてきた。本稿では、これらのうちのいくつかの主要な研究を紹介する。

## 火山岩から推定する日本列島下のスラブ由来流体

Sr-Nd-Pb組成に基づくスラブ由来流体の分布について、図1は解析に用いた火山岩の分布(左)と、その組成(右)を、クラスタ解析による6種に色分けして示したものである。日本列島の火山岩は、主にマンツルの組成が東西で異なるため、図のおよそ東半分(緑や橙)と、西半分(青)とに大別される。また、西半分には赤や黄色で示されるホットスポットやウエットプルームに由来する火山も見られる。これらの、マンツル組成や起源の違いを差し引くことで、沈み込んだスラブからマンツルに供給

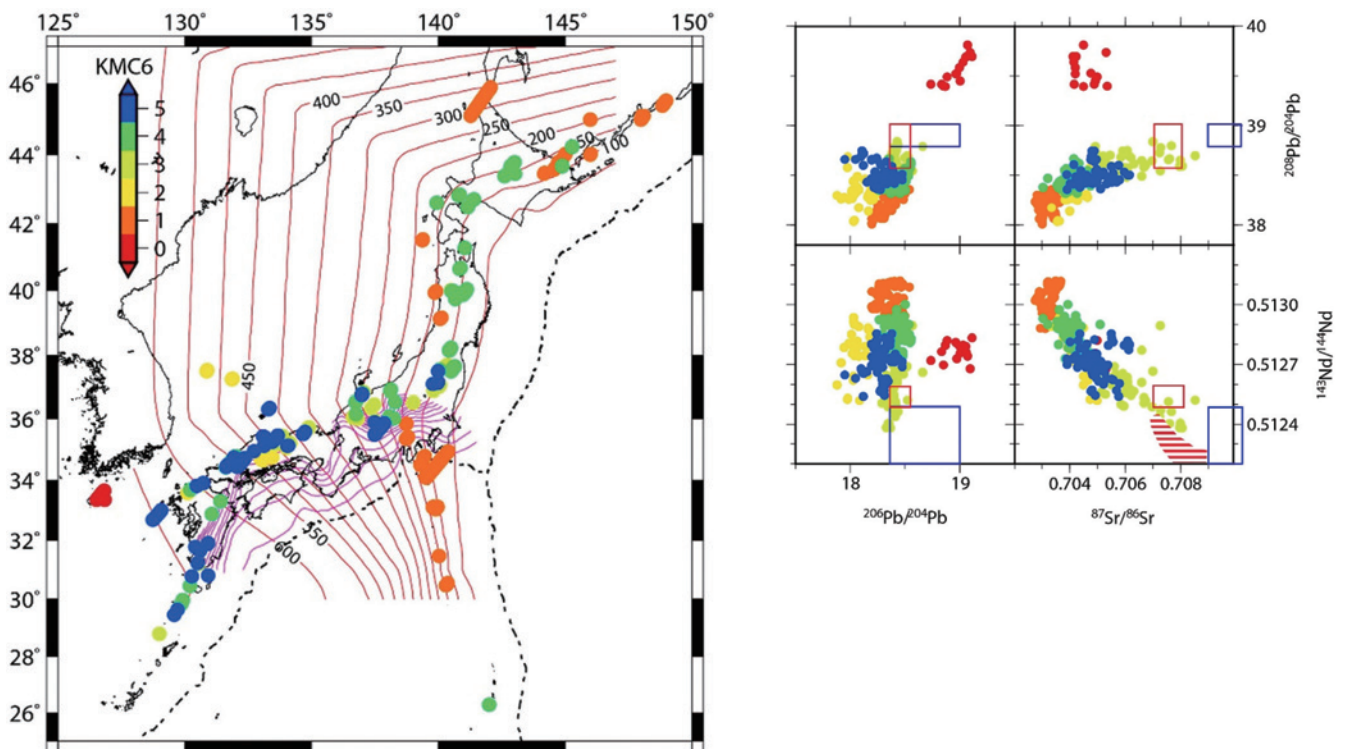


図1 同位体組成に基づく日本列島火山岩のクラスタ解析 (Nakamura et al., 2019, Gondwana Res.)。解析に用いた火山岩の分布(左)と、その組成(右)を、クラスタ解析による6種に色分けして示したものである。

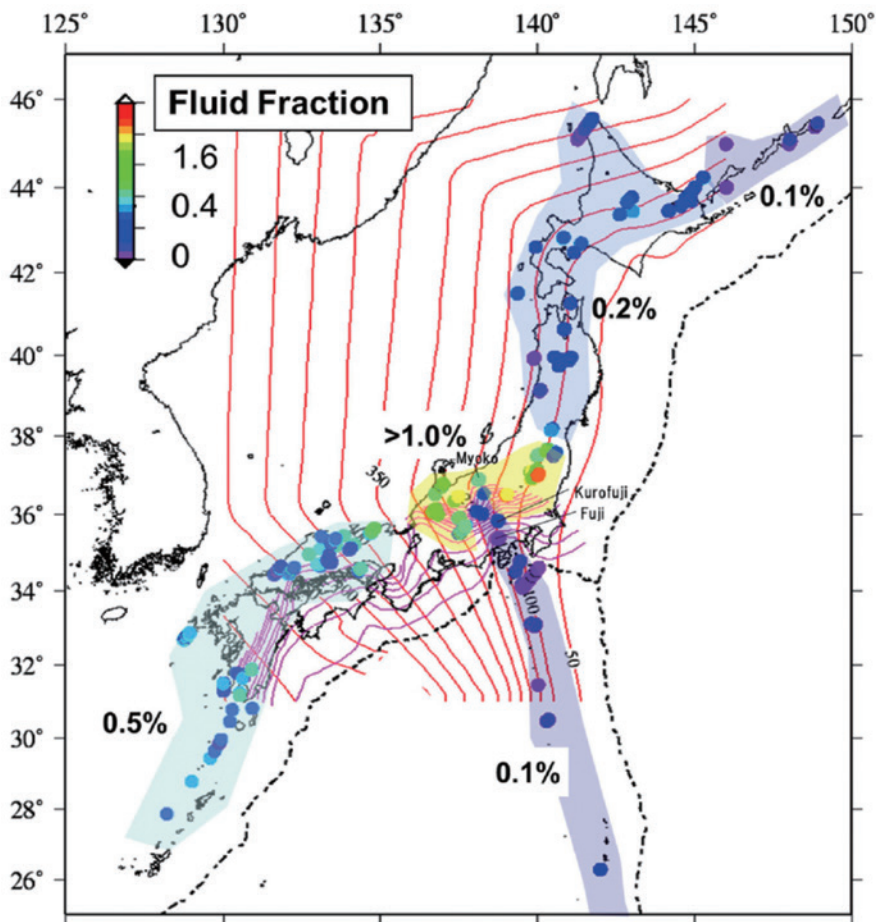
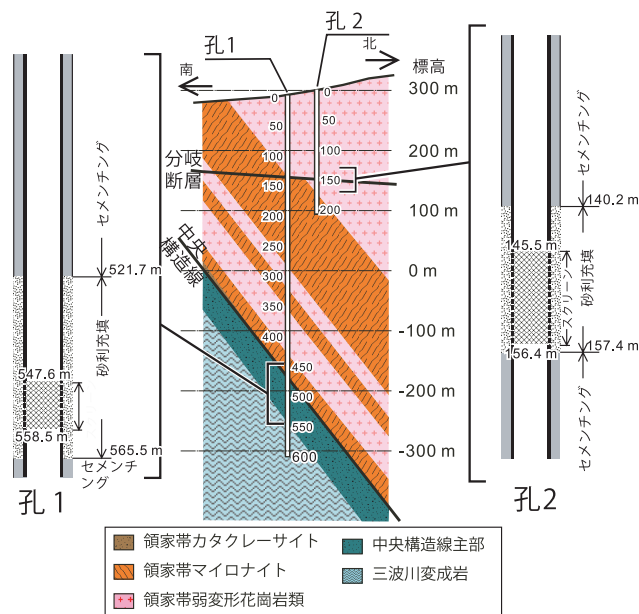


図2 スラブ由来流量(マントルウエッジに供給される重量%)の分布(Nakamura et al., 2019, Gondwana Res.)。2つのスラブからの流体供給のため、中部日本～東北南部(黄色部分)で量が多い。

された流量を定量できる(図2)。太平洋とフィリピン海のプレートの違い、および沈み込み角度・速度の違いを反映して、島弧セグメントごとに流量が異なることが分かる。特に、中部日本～東北南部(黄色で塗られる地域)では、沈み込む太平洋とフィリピン海の両方から流体が供給され、日本列島の中でも最も流体の多い地域といえる。この多量の流体供給が、新潟-中部山岳-神戸に至る地域を弱化させ、歪集中帯を生じる原因になっている可能性がある。

### 中央構造線断層帯における原位置透水試験

三重県内の中央構造線断層帯の原位置の透水係数を、松阪飯高観測点の深度600 mと200 mの2つの井戸の水理試験と長期水位観測で求めた。井戸の帯水層を含む周囲の地質構造についてはB01班によって明らかとなっている(図3)。断層帯を挟む孔1では、花崗岩質母岩を通る孔2の観測よりも1桁ほど小さい透水係数が得られた。先行研究では、地表断層露頭から採取された岩石を用いた室内実験により、対応する断層帯の透水構造が推定されていた。原位置での透水係数は封圧50 MPaでの室内実験で得られた透水係数と類似した値となり、断層帯の複雑な構造を反映していることがわかった。



|    | 計測深さ (m)    | 透水係数 (m <sup>2</sup> )                         |
|----|-------------|--|
| 孔1 | 521.7～565.5 | $5.3 \times 10^{-17} \sim 5.0 \times 10^{-16}$ |
| 孔2 | 140.2～157.4 | $4.4 \times 10^{-16} \sim 1.5 \times 10^{-15}$ |

図3 松阪飯高観測点周辺の地質構造と、2本の井戸の構造、および原位置での透水係数。Matsumoto and Shigematsu (2018, EPS)を一部改変。

# 島弧地殻における変形・断層すべり過程のモデル構築(モデル班): 主な成果

## はじめに

C01班(モデル班)では、(1) 東北沖地震による島弧・海溝系における広域変形過程のモデル構築、(2) 特定の領域の高精度変形過程のモデル構築、(3) 断層レオロジーを考慮したすべり過程のモデル構築を、他班と連携して実施し、島弧内陸変動の解明を目指す。本稿では後期の主要な研究成果を紹介する。

## カイコウラ地震の動的破壊シミュレーション

2016年Kaikoura(カイコウラ)地震は、ニュージーランドの南島で発生したマグニチュード7.9の巨大地震である。この地震は、北島の東沖に位置するヒクラング沈み込み帯と、南島の西海岸に存在するアルパイン断層をつなぐ、マルボロ断層系で発生した。カイコウラ地震は、現在までに発生した地震の中で、もっとも複雑な破壊パターンが観測されたものの一つである。これまでの干渉合成開口レーダー(InSAR)をはじめとした地震学・測地学的観測や地質学的な地表踏査などによって、少なくとも10以上の断層セグメントが連動して活動し、150 km以上に渡って破壊が伝播したことが詳細に分かってきた。

本研究では、スパコンを用いた数値シミュレーションによって、3次元の断層形状が破壊の動的な伝播と停止に、どのような役割を果たしたのかを調べた。破壊の停止は、地震の規模を決める要素として大変に重要であるが、これまで実際の地震に

おいて、どのような条件で実際に破壊が停止しているのかは、よく分かっていなかった。我々のシミュレーションによると、カイコウラ地震の破壊過程は、断層面の方位と広域応力場の関係で大局的には決まっており、内部摩擦角で決まる適切な方位を向いている断層面では破壊が促進されるのに対し、不適合な方位の断層面では破壊が停止していたことが、世界で初めて明らかにされた(図1)。

本研究で用いた物理モデルは、広域応力場も断層形状も、実際の地球物理学的観測と地質学的観察による、実データに基づいて与えられていることが重要である。今回の結果は、複雑な破壊現象であっても、モデルが観測によって高確度で拘束されていれば、計算によって現象がそれなりに良く再現、予測できることを示している。まさに、地殻ダイナミクスの標榜する異分野融合によって得られた成果である。

## 西南日本のブロック断層モデル

プレート運動は地震発生の原動力であり、日本列島で現在進行している地殻変動を広域テクトニクスの観点から見ることは地震発生の背景場を理解するために重要である。近年では、陸上のGNSS観測網に加えて、海底におけるGNSS-音響測距結合方式地殻変動観測によって、海溝型巨大地震の震源域の直上での観測結果が得られるようになった。観測された地殻変動は、主に海洋プレートと大陸プレートの境界面の固着とすべりによって説明が試みられてきたが、西日本では、熊本地震の震源域を含む大分から熊本にかけての領域や新潟―神戸ひずみ集中帯、本領域における研究で見出された山陰ひずみ集中帯などで顕著な歪速度の集中域が見出されており(図2)、プレート境界面の固着を推定する場合にも内陸部のひずみ集中帯の影響を適切に考慮する必要がある。そこで本研究では、陸上および海底の地殻変動データを統合した水平・上下変位速度をデータとし、歪速度分布、微小地震分布、活断層分布を参考に西日本を計14の地殻ブロックに分割して、ブロックの剛体運動とブロック境界に設定した断層での固着度(すべり欠損速度)を推定した。その結果を図3に示す。大陸プレートと海洋プレートの相対運動のうち1/3は、南海トラフ以外の陸域のブロック境界で解消されていることが明らかになった。これらの陸域のブロック境界で主要なものとして、中央構造線と山陰ひずみ集中帯が挙げられ、それぞれ年間約5 mmと10 mmの速度で右横ずれ運動していると推定された。これらの推定結果は、西日本におけるフィリピン海プレートの斜め沈み込みによる前弧スリバーは二つのブロックに分かれていて、それらの境界が中央構造線と山陰ひずみ集中帯であると解釈できる。

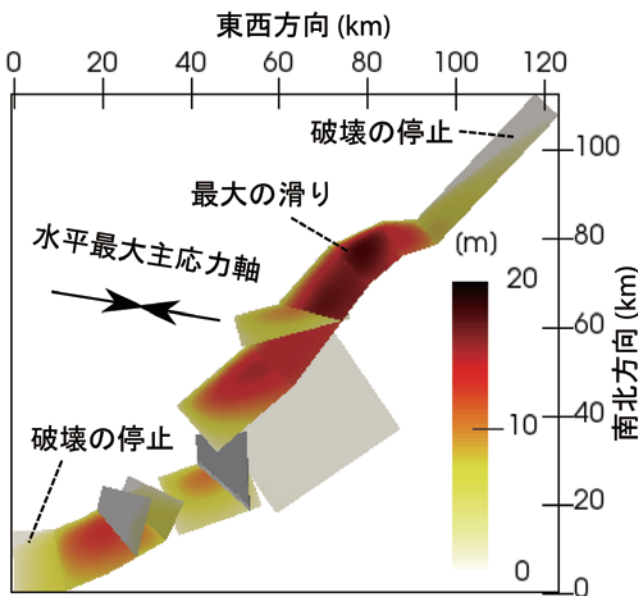


図1 2016年M7.9カイコウラ地震の動的破壊シミュレーションで得られた断層面上の地震時滑り分布(Ando and Kaneko, 2018, GRL)。InSAR逆解析で求められた滑り分布(Humling et al., 2018)の大局的な特徴を再現。

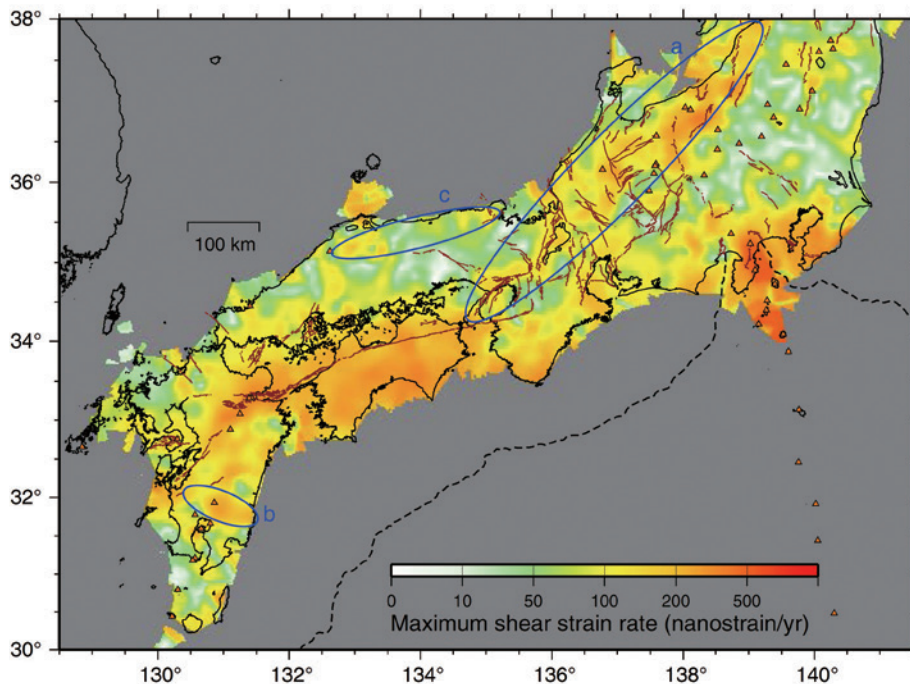


図2 GNSS観測網のデータにより推定された最大剪断歪速度。主とする観測期間は、2005–2009年。Nishimura et al. (2018, Geosphere)より。

### 東北沖日本弧における絶対応力場のモデリング

10万年間のプレート定常沈み込みを与えて長期応力場のモデル化を行った(図4)。その後、600年間の固着と巨大地震時すべりを与え、2011年東北沖地震前後における絶対応力場を解析した。

前弧海域下の上盤内では、「地形・密度構造から重力が作る引張力」及び「定常沈み込みが作る曲げ応力」により、浅部が引張・深部が圧縮の応力場が形成された。東北沖地震前はプレート間固着によって圧縮場の差応力が増加することで逆断層型地震が多発し、逆に東北沖地震後は地震時に引張場の差応力が増加したことによって正断層型地震が多発していると考えられる。複数のモデル結果と観測との比較を通じて、東北沖地震後のプレート境界(海溝から40–150 kmの範囲)の摩擦力は5–11 MPa程度と推定され、非常に弱い事が示唆された。

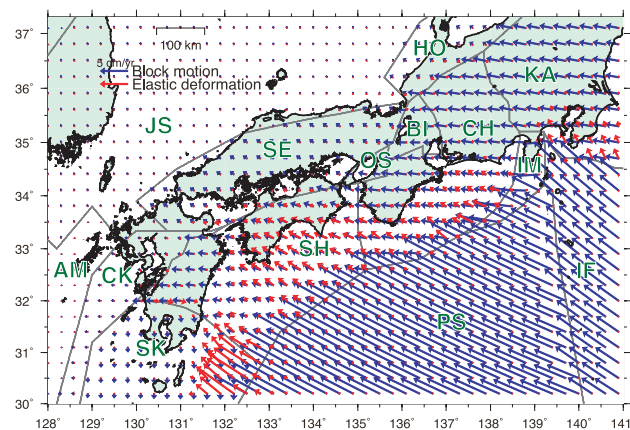


図3 推定されたブロック運動(青矢印)とブロック間の固着による弾性変形(赤矢印)。Nishimura et al. (2018, Geosphere)より。

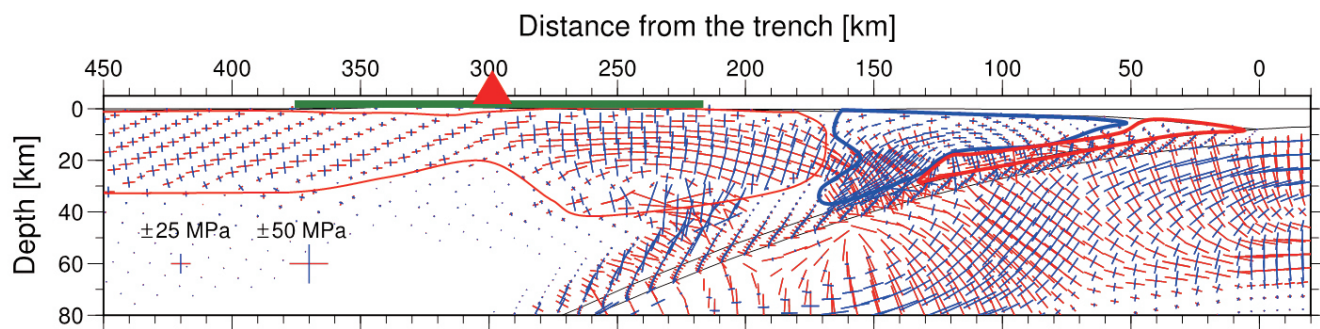


図4 10万年間のプレート定常沈み込みにより再現された東北日本沈み込み帯・島弧における偏差応力の分布(篠島ほか, 2018)。赤線、青線はそれぞれ最大及び最小偏差主応力軸を示す。上盤で青線、赤線で囲まれている部分は、それぞれ引張応力場、圧縮応力場の領域を示す。緑線の範囲が陸域、赤三角は火山フロントの位置を示す。

# ACTIVITY

## 国際活動支援班活動報告

国際活動支援班では2019年3月の京都大学宇治キャンパスでの国際集会にあわせて多くの海外研究者を招聘しました。集会后にはオタゴ大学(ニュージーランド)のRichard H. Sibson 名誉教授が5日間にわたって地震と断層力学に関する集中講義をされるなど、招聘研究者による特別講義やセミナーが防災研究所と理学部において行われ、一般学生とも広く交流する機会となりました。2019年度もひきつづき、研究成果のとりまとめと発展のために、海外研究者の招聘や計画研究班メンバーおよびポスドク研究員の海外派遣を行いました。9月にはローザンヌ大学から Georgina King 教授ら、ライプニッツ応用地球物理学研究所から塚本すみ子博士を招聘し、京都大学等の教員・研究員・大学院生多数も加わり、北アルプス黒部地域の隆起-削剥史の解明に向けた日欧合同学術調査を行いました(写真)。



北アルプス黒部地域の日欧合同学術調査

# ACTIVITY

## 2018-2020年度の主な活動

- 2018年5月21日……………日本地球惑星科学連合2018年大会にて「地殻ダイナミクス夜間小集会」を開催(千葉市幕張メッセ国際会議場)
- 2018年5月22日～23日……………日本地球惑星科学連合2018年大会にて「S-CG57 変動帯ダイナミクス」のセッションを開催(千葉市幕張メッセ国際会議場)
- 2018年7月15日～16日……………地殻ダイナミクス研究集会—最終成果に向けて—開催(京都大学阿武山観測所)
- 2018年9月4日……………B01・B02融合研究集会「地質と実験の融合とその先に向けて」開催(北海道大学)
- 2018年10月13日……………地震防災講演会「中国地方の地震と断層～山陰地震帯の特徴」(一般向け講演会)開催(松江市くにびきメッセ 国際会議場)
- 2018年10月14日……………鳥取県西部地震18年地震防災講演会「0.1満点観測で見えるもの」(一般向け講演会)開催(米子コンベンションセンター・ビッグシップ国際会議室)
- 2019年1月12日～13日……………融合研究集会「絶対応力の解明」開催(京都大学宇治おうばくプラザ)
- 2019年3月1日～3日……………地殻ダイナミクス国際集会「The Second International Symposium on Crustal Dynamics (ISCD-2)-Toward integrated view of island arc seismogenesis-」開催(京都大学 宇治おうばくプラザ)
- 2019年4月1日……………新学術領域研究「地殻ダイナミクス」成果とりまとめ科研費による総括班発足
- 2019年5月27日～28日……………日本地球惑星科学連合2019年大会にて「S-CG61 変動帯ダイナミクス」のセッションを開催(千葉市幕張メッセ国際会議場)
- 2020年2月1日……………地学雑誌特集号「地殻ダイナミクス(Part II)—地質学と地球物理学の融合に向けて—」(129巻4号)を出版
- 2020年7月12日～19日……………JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtualにて「S-CG63 変動帯ダイナミクス」のセッションを開催
- 2021年2月1日……………国際誌 Eearth, Planet and Space より特集号 "Crustal dynamics: toward integrated view of island arc seismogenesis" をオープンアクセスで出版

### 地殻ダイナミクス Newsletter Vol.5

領域代表：飯尾能久 企画：高田陽一郎、芝崎文一郎、武藤潤 構成：清水以知子(広報総括)  
発行元：新学術領域『地殻ダイナミクス』事務局  
〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所 地震予知研究センター内  
TEL：0774-38-4200 FAX：0774-38-4239

デザイン：(株)四季デザイン  
www.shiki-design.com

2021年3月11日発行