

(1) 実施機関名：

京都大学防災研究所

(2) 研究課題(または観測項目)名：

日本列島変動の基本場解明：地殻とマントルにおける物性、温度、応力、流動 - 変形

(3) 最も関連の深い建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

(4) その他関連する建議の項目：

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

イ. 海洋プレート内部の地震

(5) 優先度の高い地震・火山噴火との関連：

東北地方太平洋沖地震

南海トラフの巨大地震

首都直下地震

桜島火山噴火

(6) 本課題の 5 か年の到達目標：

地殻とマントルにおける変動現象の基本場(物質場、温度場、応力場、流動 - 変形場と、その複合場としての地震発生場および流体 - マグマ生成・上昇場)の理解を深化させ、同時に、それらを比較・統合することで、地震発生場と流体 マグマ発生・噴火場を統一的に理解することを目的とする。

(7) 本課題の 5 か年計画の概要：

日本列島の物質場(特に、地殻流体の分布と量) 温度場(地下温度分布、マントルポテンシャル温度) 応力場(絶対応力とその分布) 流動 変形場(島弧地殻の粘弾性変形を含む)の定量的理解を、地震波・電気伝導度に関する実験的および観測データの統合数値解析、火山岩・熱水・鉱脈の地球化学組成解析、稠密地震観測結果の地震学的解析、および地殻変形データのインバージョン解析により進める。それらの結果を統合して、地震発生場と流体 マグマ発生・噴火場を統一的に理解することを目的とする。H26~H27年度においては、特に有馬型塩水の採取、火山微量元素組成の定量的解析手法の開発、含水岩石の地震波速度および電気伝導度の実験的測定に用いる試料作製、微小地震データの整備、日本列島規模での流動変形場の数値フォワードモデルの構築を目指す。H28~H30年度に

おいては、採取試料の化学・同位体分析とその定量的解析、含水岩石の地震波速度および電気伝導度の実験的測定、微小地震データ解析による広域応力場の推定、数値フォワードモデルのパラメータスタディを行い、物質構造、温度場、応力場、変形場の関係と、統合モデルの構築を目指す。

(8) 平成 26 年度の成果の概要 :

日本列島の物質場・温度場、応力場、流動 変形場に関する下記研究を進めた。いずれもほぼ計画通りに進行したといえる。

物質場・温度場 :

日本列島下の流体の起源や分布を知る手がかりとして、構造線沿いに湧出する深部由来流体の調査、分析、解析を行った。今年度は特に有馬温泉に産する有馬型塩水の起源について、下記の成果が得られた。有馬型塩水は、非火山地域(マグマの関与やマグマ生成の場のない地域)であるにも関わらず、火山性流体とほぼ同じ高い酸素 水素同位体比をもつ、高塩濃度の流体と定義される。これらの塩水は、しばしば高いヘリウム同位体比を示し、構造線沿いに見られる特徴があり、沈み込むスラブ由来である可能性が指摘されている。そのタイプロカリティーである有馬温泉において、複数の泉源からの試料の主成分組成、微量溶存イオン濃度、同位体組成(酸素、水素、ヘリウム、Sr-Nd-Pb)を系統的に測定した。特に、Sr-Nd-Pb 同位体比は、有馬温泉水にとってだけでなく、日本の温泉水にとって(我々の知る限り)最初のデータとして注目される(図1)。さらに、沈み込むスラブの温度-圧力経路と、その脱水反応に由来する流体の酸素 水素同位体比の理論予測モデルを構築し、予測値と観測値を比較した(図2)。その結果、有馬地域の塩水は、沈み込むフィリピン海プレートから直接的にもたらされ、構造線沿いにより組成を変えずに上昇した可能性が高いことが分かった。西南日本の前弧域に、温かいフィリピン海プレートから流体が供給されている初めての直接的証拠といえる。また、日本列島を含むグローバルな火山岩の Sr-Nd-Pb 同位体比のコンパイルとその統計解析に基づき、沈み込み帯の脱水・加水過程が、全地球規模のマントル不均質に影響を与えていることが議論された。

応力場 :

内陸域において発生した微小地震の発震機構解を整備し、広域応力場の空間分布を列島規模で推定した(図3)。得られた応力場とテクトニクスとの関係や活断層との関係についての議論を行った。その結果、現在の応力場は日本列島の第四紀以降のテクトニクスと整合的であること、ほとんどの活断層は現在の応力場に対して動きやすい方向に形成されていることが明らかになった。

また、応力場と物質場の両方に関わる以下の実験的研究を進めた。クラックとそれを満たす流体量の変化に伴うバルク岩石の弾性波速度及び電気伝導度の2つの物性の変化を解明するため、封圧、間隙流体圧を制御して、含水岩石(花崗岩)の地震波速度と電気伝導度を測定した。これらの物性の理解は、地震波速度・電気伝導度構造統合インヴァージョンにより、日本列島の地下の物性や応力状態を解明するための基礎となると期待される。

1) 間隙流体圧システムの改良

今年度は、間隙流体圧システムの改良を行い、有効圧(封圧 間隙流体圧)が最高 150 MPa の測定を実現した。これまでの装置は、電気的絶縁のためにプラスチックの部品を使用しており、理論上では有効圧 50MPa が限界であった。今回の改良ではプラスチック部品を極力減らし、ステンレスに置き換えることでシステムを強化した。有効圧 150MPa で地震波速度、電気伝導度の同時測定可能なラボは現在国内外問わず存在しないものと考えている。

2) 加熱による岩石のクラック量の制御

平成 27 年度から、加熱により人工的にクラック量を変えた試料を用いることを計画している。その準備として、加熱によるクラック量の変化を調べた。花崗岩試料を加熱し最高温度で 2 時間保ち、室温まで冷却した後、弾性波速度測定を行い、クラック密度パラメータを求めた(図4)。再現性は非常に良く、クラック密度パラメータが最高温度とともに直線的に増加することが分かった。また、東京都産業技術研究センター城南支所で X 線 CT 観察を行い、非加熱試料と比べて加熱試料の粒界が大き

く開いている様子を確認した(図5)。

3) 有効圧増加に伴う地震波速度・電気伝導度の変化

非加熱試料および600 MPaまで加熱した試料を用いて、地震波速度・電気伝導度の同時測定を行った(図6)。ここでは、間隙流体圧を大気圧に保っているため、封圧を有効圧そのものである。非加熱試料、加熱試料とも、封圧増加に伴って地震波速度は増加し、電気伝導度は低下している。これは封圧増加に伴いクラックが閉鎖することによるものである。クラック量が大きいため、加熱試料の地震波速度、電気伝導度は大きな変化を示しているが、低圧での電気伝導度減少率は小さい。高封圧において地震波速度は岩石固有の値に近づくが、電気伝導度は依然として岩石固有の値よりも高く、流体が連結していることを示している。これはクラックの閉じ残りが、連結した伝導経路を形成しているためと考えている。電気伝導度をクラック密度パラメータの関数として図7に示す。なお、電気伝導度は流体の電気伝導度で規格化している。まだ、データは十分ではないが、クラック量の少ないところで電気伝導度が急増し、その後緩やかに増加していく様子を捉えることができた。この関係の物理モデルを構築することが、地震波速度・電気伝導度構造統合インバージョンを進める上で重要であると考えている。対象領域の岩相を仮定すれば、地震波速度からクラック密度パラメータを推定することができる。この図を用いれば、クラック密度パラメータから電気伝導度を推定することが可能であり、それを観測された電気伝導度と比較すれば、対象領域の流体電気伝導度も推定できる。この流体電気伝導度が非現実的な値ならば、仮定した岩相に修正を加えていけばよいだろう。これを繰り返すことによって、従来仮定してきた岩相、流体電気伝導度も制約できるものと考えている。そのため、条件を変えた実験を行うことによって、この関係を理解していきたい。なお、1)に記述した装置の改造は計画になかったものであるが、研究自体はほぼ計画通りに進んだ。

流動 - 変形場：

粘弾性の応答関数(Fukahata & Matsu'ura, 2005, 2006)を用いて、海洋プレートの沈み込みに伴う島弧の変形運動について考察し、新たな知見を得た。これまで、断層面をはさむ変位の食い違いベクトルの大きさや向きが空間的に変化することが断層運動に伴う変形の本質的原因であると考えてきた。例えば、直線の横ずれ断層が無限遠まで伸びているとき(図8(a))、その断層に沿うような大きさの変位の食い違いはブロック的運動を引き起こすのみで、断層をはさむ双方のブロックに何ら変形(ひずみ)は生じない。しかし、非現実的な例ではあるが、円形の断層面が深部まで続いている場合(図8(b))、その円形の断層に沿うような大きさの変位の食い違いは、断層内部の円柱とその周囲との間に相対的回転運動を引き起こすものの、変形は生じないことに気付いた。こうしてみると、直線状の断層(図8(a))は、実は図8(b)で曲率がゼロの特殊な場合にあたりと理解される。要するに、曲率の空間変化が断層運動に伴う変形の本質的原因であることが分かった。

これまで、沈み込み帯のプレート境界形状として、簡単のためにリソスフェア内で曲率一定の面をしばしば使ってきたが、これは極めて特殊な例であったことになる。前述のとおり、曲率一定の面に沿う変位の食い違いは、断層面をはさむ双方のブロックに直接的な変形は引き起こさずに回転運動のみを生じさせる。しかし、沈み込み帯では、回転運動に伴う垂直変位が重力平衡状態を乱すので、重力による二次的な変形が生じる。曲率一定のプレート境界形状の例では、この重力による二次的な変形の効果だけを見ていたことになる。例えば、左下に沈み込むスラブを考えると、重力がない場合、プレート境界に沿う変位の食い違いにより、スラブを含む海洋プレートは時計と反対回りに、陸側プレートは時計回りに、全体的に回転することとなる。重力により両ブロックとも遠方では垂直変位がゼロの状態に戻されるため、プレート境界近傍では共に上に凸のたわみ変形を生じることとなる。島弧地殻の変形速度はプレート境界の曲率に比例することが示されていたが(図9)、これは両ブロックの回転速度が曲率に比例するためであると合理的に説明できる。以上のように、シミュレーションで得られた計算結果、更には海洋プレートの沈み込みに伴う島弧地殻の変形メカニズムについてより正しく理解できるようになった。

(9)平成26年度の成果に関連の深いもので、平成26年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：

- Agurto-Detzel, H., A. Rietbrock, K. Bataille, M. Miller, H. Iwamori, K. Priestley, 2014, Seismicity distribution in the vicinity of the Chile Triple Junction, Aysén Region, southern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 51, 1-11.
- Ikemoto, A. and H. Iwamori, 2014, Numerical modeling of trace element transportation in subduction zones: implications for geofluid processes. *Earth Planet and Space*, 66, 26, doi:10.1186/1880-5981-66-26.
- Kusuda, C., H. Iwamori, H. Nakamura, K. Kazahaya, and N. Morikawa, 2014, Arima hot spring waters as a deep-seated brine from subducting slab. *Earth, Planets and Space*, 66:119.
- Nakamura, H., Y. Fujita, S. Nakai, T. Yokoyama and H. Iwamori, 2014, Rare Earth Elements and Sr-Nd-Pb isotopic analyses of the Arima hot spring waters, southwest Japan: Implications for origin of the Arima-type brine. *J. Geol. Geosci.*, 3:161, doi: 10.4172/2329-6755.1000161
- Uno M., H. Iwamori, H. Nakamura, T. Yokoyama, T. Ishikawa, and M. Tanimizu, 2014, Elemental transport upon hydration of basic schists during regional metamorphism: geochemical evidence from the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. *Geochem. J.*, 29-49.
- Nakamura, H., T. Oikawa, N. Geshi and A. Matsumoto, 2014, Migration of a volcanic front inferred from K⁴⁰/Ar ages of late Miocene to Pliocene volcanic rocks in central Japan, Island Arc, DOI: 10.1111/iar.12073
- Iwamori, H. and H. Nakamura, 2014, Isotopic heterogeneity of oceanic, arc and continental basalts and its implications for mantle dynamics. *Gondwana Res.*, doi:10.1016/j.gr.2014.09.003
- Ueki, K. and H. Iwamori, 2014, Thermodynamic calculations of the polybaric melting phase relations of spinel lherzolite. *Geochem. Geophys. Geosys.*, 15, DOI: 10.1002/2014GC005546
- Fukahata, Y., Y. Yagi, and L. Rivera, 2014, Theoretical relationship between back-projection imaging and classical linear inverse solutions, *Geophys. J. Int.*, 196, 552-559.
- Shikakura, Y., Y. Fukahata, and K. Hirahara, 2014, Long-term changes in the Coulomb failure function on inland active faults in southwest Japan due to east-west compression and interplate earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 119, 502-518.
- Funning, G., Y. Fukahata, Y. Yagi, and B. Parsons, 2014, A method for the joint inversion of geodetic and seismic waveform data using ABIC: application to the 1997 Manyi, Tibet earthquake, *Geophys. J. Int.*, 196, 1564-1579.
- Hashima, A., Y. Fukahata, C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, 2014, Quasi-static strain and stress fields due to a moment tensor in elastic-viscoelastic layered half-space, *Pure Apply. Geophys.*, 171, 1669-1693.
- Watanabe, T. and A. Higuchi, 2014, A new apparatus for measuring elastic wave velocity and electrical conductivity of fluid-saturated rocks at various confining and pore-fluid pressures, *Geofluids*, 14, 372-378, doi:10.1111/gfl.12050
- Yukutake, Y., T. Takeda, and A. Yoshida, 2015, The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 411, 188-198, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.005>.

(10) 平成 27 年度実施計画の概要 :

物質場・温度場 : 中部日本と東北日本をつなぐ遷移地域である東北南部の火山について調査・サンプリング・分析を開始する。熱水については、火山岩のシステムティクスとスラブ由来流体の共同が比較的良くわかっている中部日本について、火山のない前弧域 (愛知県・静岡県の南部) の塩水の調査・サンプリング・分析を進める。

応力場 : 2011 年東北地方太平洋沖地震後の列島規模の応力場を推定するために観測データの整備及びメカニズム解の決定を行う。また 2000 年鳥取県西部地震域での稠密地震観測データの整備を行い、震源断層周辺の詳細な応力場の空間分布を明らかにする。一部、当初の 5 か年計画よりもはやく進展してきた内容もあり、今後は東北地方太平洋沖地震前後の応力場の時間変化や内陸大地震周辺の応力場の詳細な分布に焦点を当てて研究を進める予定である。また、含水花崗岩試料 (非加熱および加熱) の

地震波速度と電気伝導度を封圧を変えながら測定し、クラック密度パラメータと電気伝導度との関係を調べる。空隙の物理モデルを作って、実験から得られる電気伝導度とクラック密度パラメータの関係の理解を目指す。また、当初の5か年計画にはないが、クラックと異なる形状の空隙をもつ砂岩について有効圧変化に伴う地震波速度、電気伝導度の変化を調べ、主としてクラックを空隙としてもつ岩石の理解を深めたい。

流動 - 変形場：今年度の成果を受け、粘弾性の応答関数 (Fukahata & Matsu'ura, 2005, 2006) を用いて地表面だけでなく地殻全体の変形が、プレートの沈み込みによってどのように引き起こされるかを、東北地方太平洋沖地震の粘性緩和の評価も含め、定量的に議論する。

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

京都大学防災研究所 (飯尾 能久、深畑 幸俊)

他機関との共同研究の有無：有

富山大学 (渡辺 了)

神奈川県温泉研究所 (行武 洋平)

東京工業大学・海洋研究開発機構 (中村 仁美、岩森 光)

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：京都大学防災研究所

電話：0774-38-3348

e-mail：

URL：

(13) この研究課題 (または観測項目) の連絡担当者

氏名：飯尾能久

所属：京都大学防災研究所地震予知研究センター

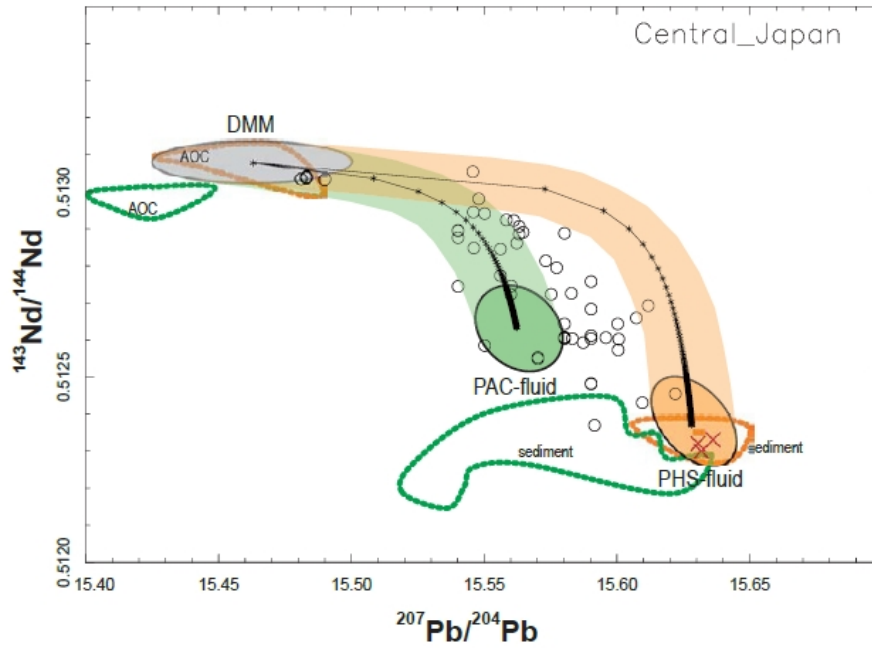


図 1

有馬温泉水（赤 X 印）の鉛 - ネオジウム同位体比組成。背景は、中部日本火山岩の組成（丸印）および関連する端成分組成を示す（詳細は、Nakamura et al., 2014, JGG を参照）。

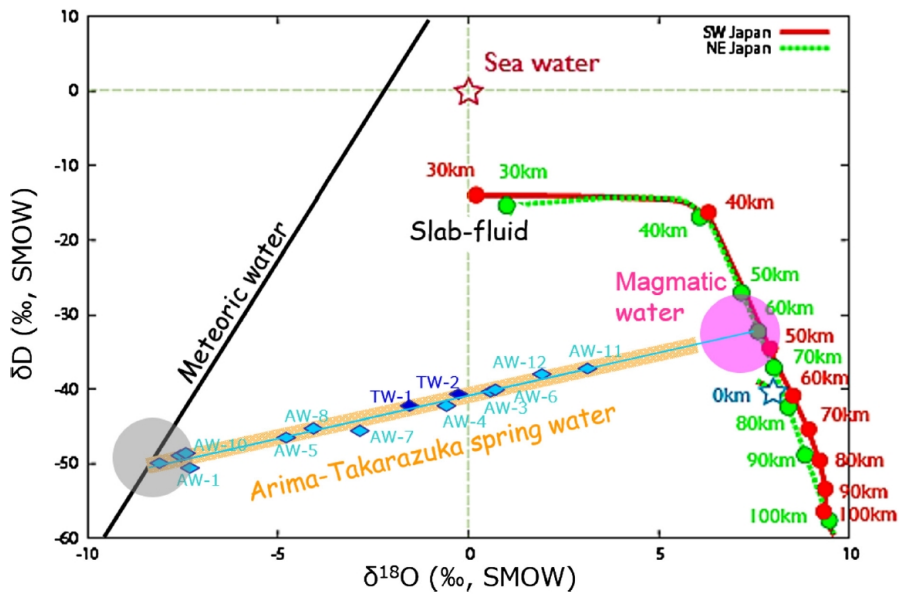


図 2

有馬 - 宝塚温泉水（青・水色ひし形）の酸素 - 水素同位体比、および沈み込むスラブに由来する流体の同位体進化曲線（赤：西南日本下のフィリピン海スラブ、緑：東北日本下の太平洋スラブ：Kusuda et al., 2014, EPS）。数字ラベルは、流体が放出されるスラブ表面深度を表す。

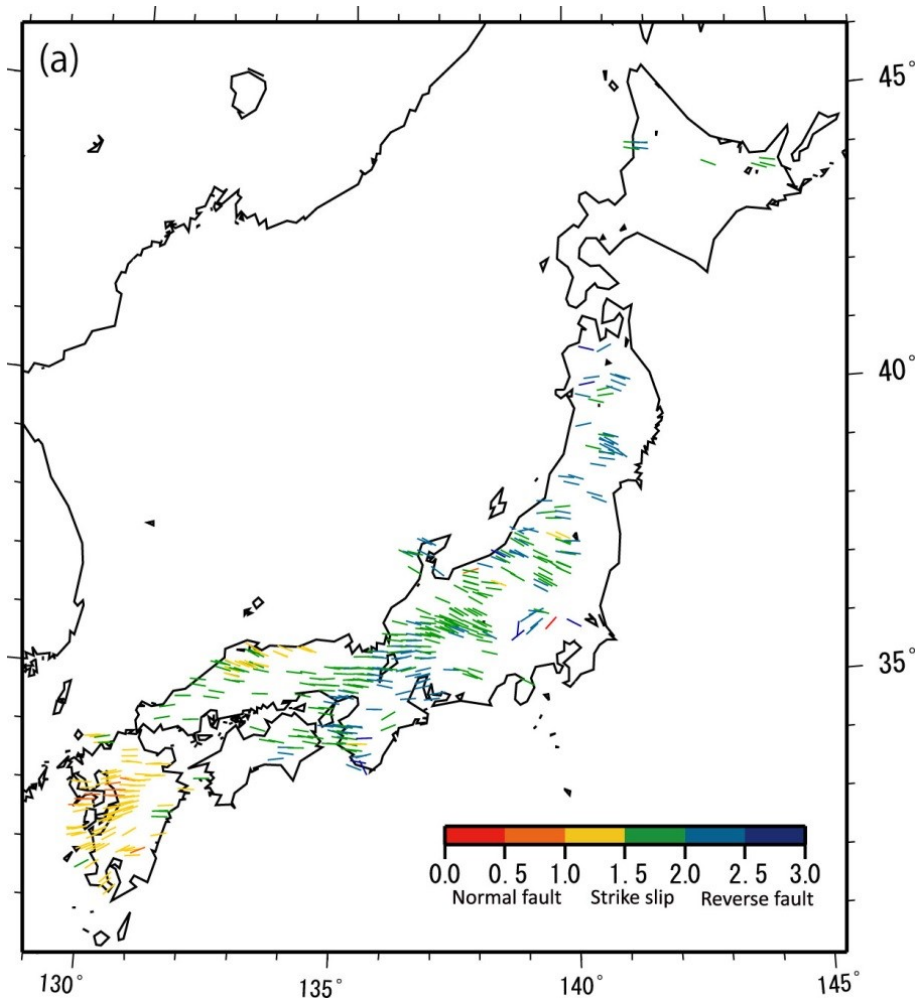


図 3

列島規模で推定された応力場の空間分布。棒の方向及び色はそれぞれ水平最大圧縮応力軸方向及び応力場のタイプを示す (Yukutake et al., 2015, EPSL の Fig4)

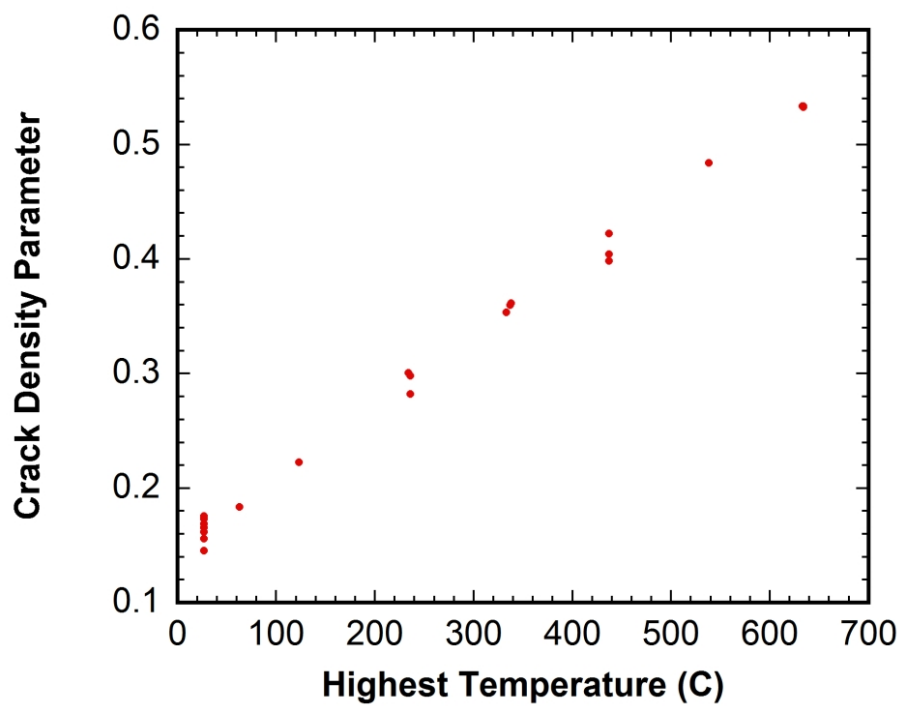


図 4

加熱処理した花崗岩試料のクラック密度パラメータと最高温度の関係。

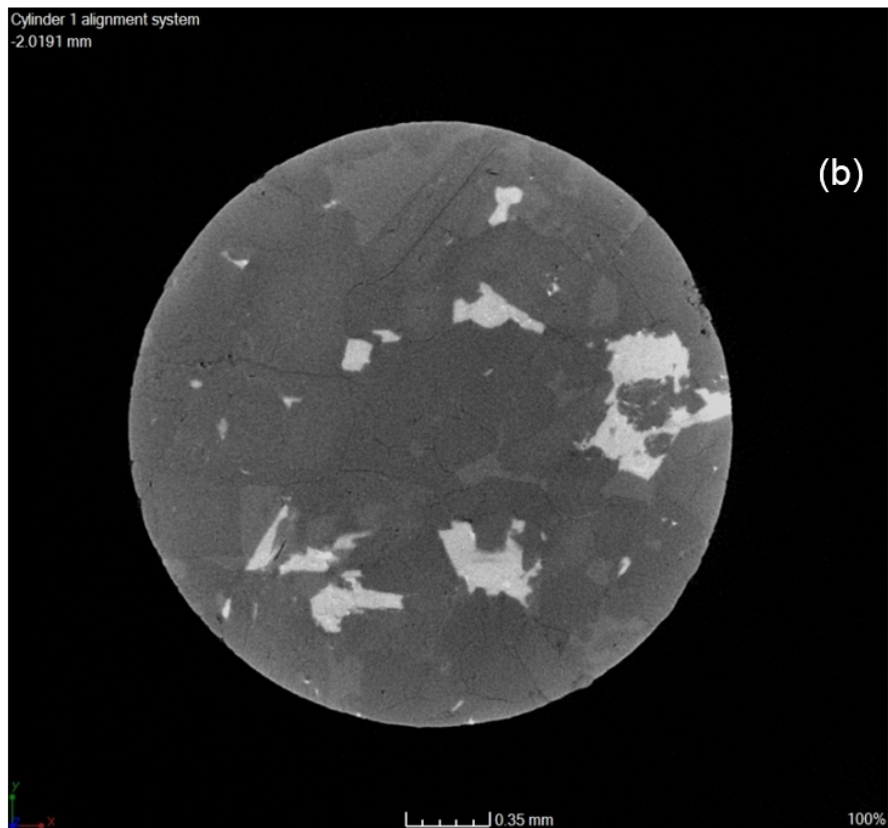
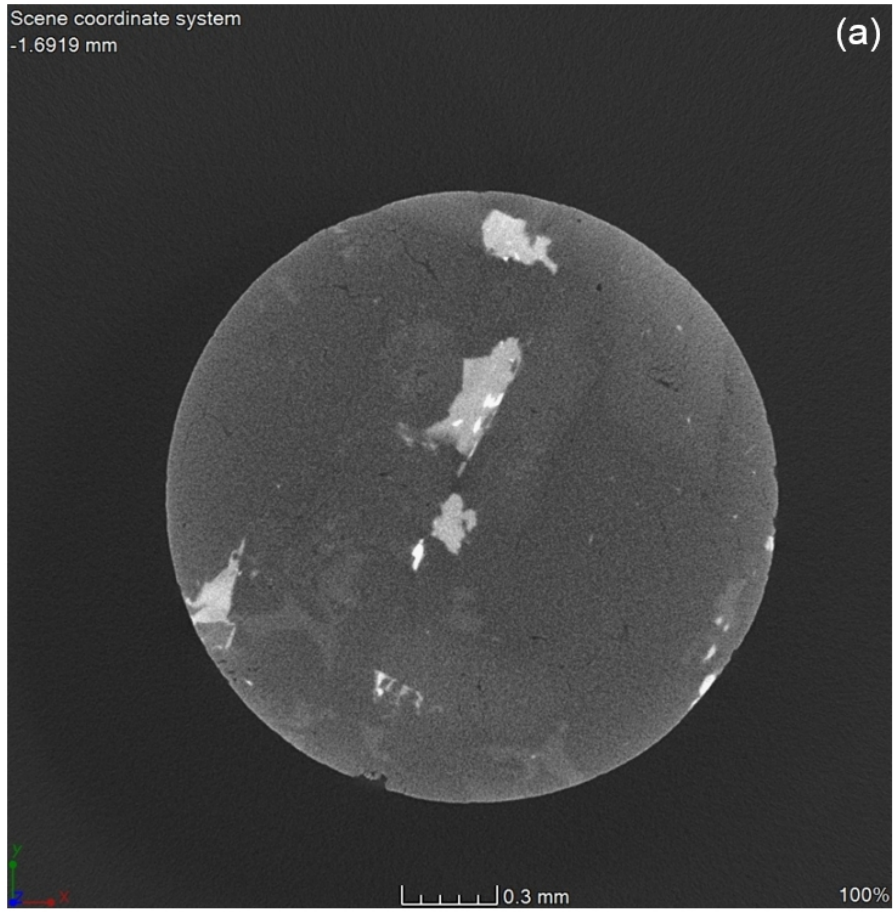


図 5

X 線 CT で観察した (a) 非加熱試料と (b) 加熱試料 (最高温度は 500) 。加熱試料の方が粒界クラックが明瞭に見えている。

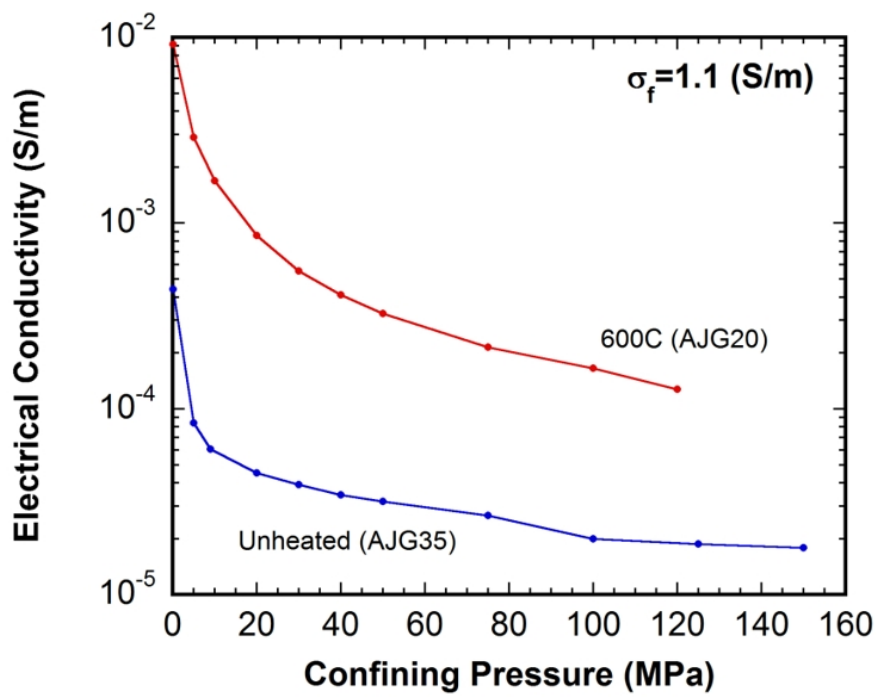
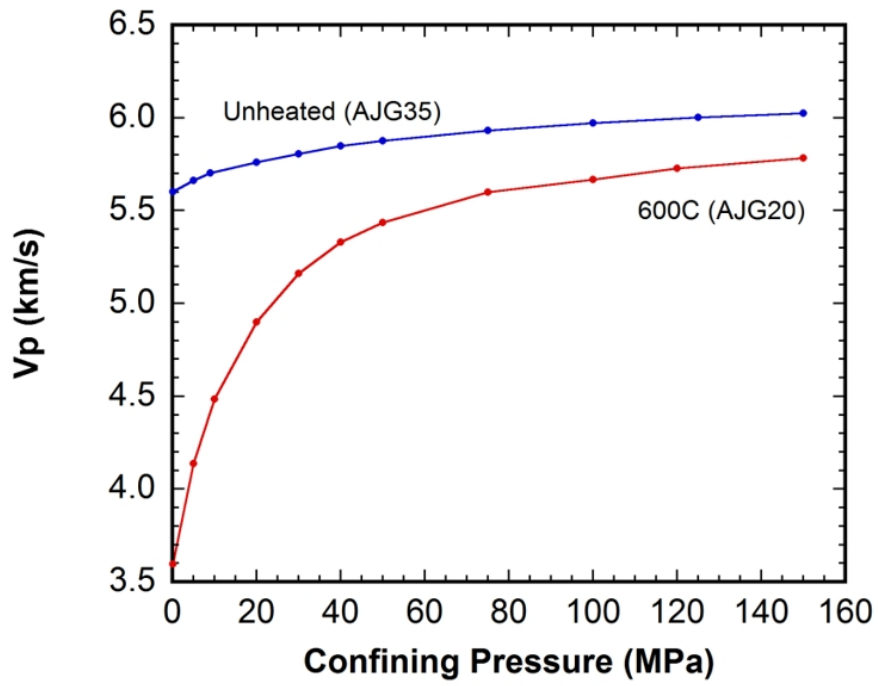


図6 含水花崗岩の地震波速度と電気伝導度。非加熱試料および加熱試料(最高温度は600)。

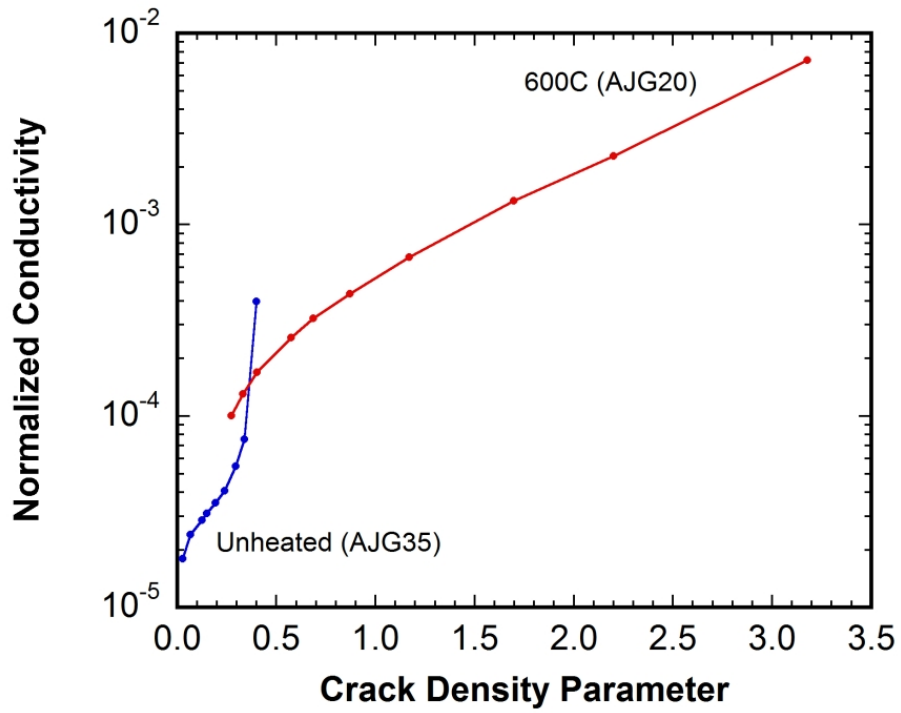


図7
含水花崗岩試料の電気伝導度とクラック密度パラメータの関係。

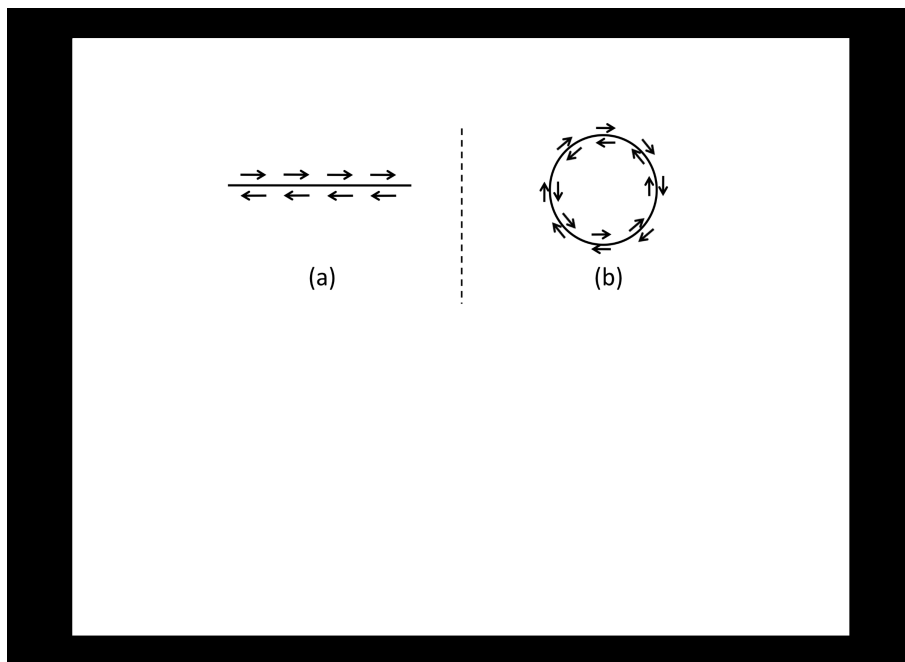


図8
(a) 無限に伸びる直線の断層に沿う一様な変位の食い違い。(b) 円形の断層面に沿う一様な大きさの変位の食い違い。共にブロック運動を生じるが、変形は生じない。

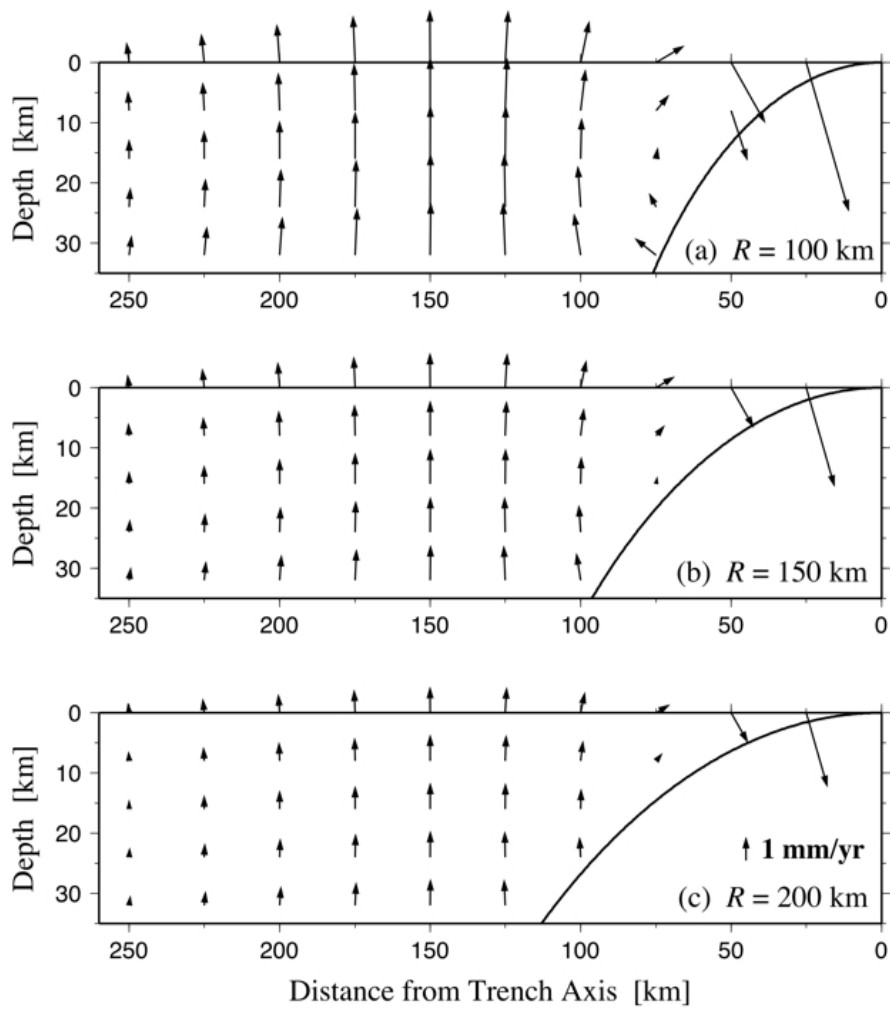


図9

一定の曲率半径 R を持つプレート境界に沿って海洋プレートが沈み込むときの島弧地殻の変形速度場。変形速度はほぼ厳密に曲率に比例（曲率半径に反比例）している。リソスフェアの厚さは 35 km、海洋プレートの沈み込み速度は 50 mm/yr としている。図は垂直方向に 2 倍に拡大されている。