

( 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：

日本列島の地震 - 火山噴火の基本場解明：地殻とマントルにおける応力、流体-マグマ、温度・流動 - 変形場

( 3 ) 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

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
  - オ. 構造共通モデルの構築

( 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

- (5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化
  - ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震
  - イ. 内陸地震
  - ウ. 火山噴火を支配するマグマ供給系・熱水系の構造の解明

5 研究を推進するための体制の整備

(2) 総合的研究

- ア. 南海トラフ沿いの巨大地震
- イ. 首都直下地震
- ウ. 千島海溝沿いの巨大地震
- エ. 桜島大規模火山噴火
- オ. 高リスク小規模火山噴火

( 5 ) 総合的研究との関連：

南海トラフ沿いの巨大地震

首都直下地震

千島海溝沿いの巨大地震

桜島大規模火山噴火

高リスク小規模火山噴火

( 6 ) 平成 30 年度までの関連する研究成果 ( または観測実績 ) の概要 :

課題番号 1905 「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」において、応力場、物性場、温度場、変形場を、観測的・理論的・実験的に解明する研究を推進中である。いずれの категория においても、研究期間中に手法を確立し、応用を進めた。その結果として、日本列島スケールでの流体・マグマ生成場の把握 ( Nakamura et al., 2019, Gondwana Res. ) や応力場推定 ( Yukutake et al., 2015, EPSL )、開いた粒界をもつ岩石試料の地震波速度・電気伝導度の同時測定 ( Watabane and Higuchi, 2015, PEPS )、中部 - 東北日本遷移帯でのスラブと流体分布 ( Nakamura et al., 2018, Tectonophysics )、東北日本の沈み込み・マントル対流・温度分布・流体?マグマ分布の標準モデル構築 ( Horiuchi and Iwamori, 2016, JGR )、島弧 - 海溝 - 外縁隆起帯という沈み込み帯の大地形生成の本質的物理解のメカニズムの解明 ( Fukahata and Matsu'ura, 2016, GJI )、熊本地震に伴う変形場の解析 ( Fukahata and Hashimoto, 2016, EPS ) など、重要な成果があがった。これらの実績に基づき、本研究では諸場の理解を深化させると同時に、以下の新たな手法を開発・応用して、格段の進展を図る: Misfit 角に注目した応力場解析、異なるスケールのクラックを含む岩石-流体物性実験、沈み込むプレートの不均質 ( 特に海山 ) に注目したテクトニクスと流体-火成活動調査・分析、流動-変形場の 3 次元モデル化などである。さらに、上記研究でえられる結果を総合し、日本列島の変動現象の統合的理解に貢献することを旨とする。

( 7 ) 本課題の 5 か年の到達目標 :

日本列島は、地球最大のプレートである太平洋プレートと、それに接するフィリピン海、オホーツク、および巨大な大陸プレートであるユーラシアの合計 4 つのプレートがせめぎ合う世界最大の変動帯である。日本列島における地震・火山噴火として現れる変動現象を正確に把握して予測につなげるには、これらのプレート間の物質・力学相互作用を含めて、日本列島全体を俯瞰する広域的な場の理解が必要である。このために、地質学・地球物理学・地球化学の手法を統合し、地殻・マントルにおける

\*応力場

\*岩相 水 マグマの分布と物性

\*温度・流動 - 変形場

を列島規模の大構造および重要地域での詳細研究により、定量化することを大きな目的とする。

基本場とその性質の理解に基づいてこそ、初めて異常が定義・検出でき、またなぜ異常が発生するのか ( 例えば破壊、流体やマグマの発生 上昇 噴火といった時空間での局所的突発現象が発生するのか ) その機構に定量的制約が課せられる。「場の不均質」が現れやすい島弧 - 島弧会合部・遷移部は注目対象領域の一つである。またマグマの生成・移動を取り入れたシミュレーションにより、島弧スケールの基本場と個々の火山がどのように結びつくか ( 例えば、なぜカルデラ火山のような熱や物質の集中が起こるか ) などの研究に道を拓こうとするものである。

上記の多様な場は、従来異なる手法によって研究が進められてきたが、島弧変動現象を物理化学過程としてみた場合、一連の必須要素である。このために、機関の枠を越えた多様な分野から最適なメンバーでそれぞれの場の理解を深化させる: 地震メカニズム解と応力場解析 ( 行竹、飯尾 )、異なるスケールの空隙・クラックが存在する岩石-流体の  $V_p$ - $V_s$ -電気伝導度測定 ( 渡辺 )、岩石・流体試料の組成分析・多変量解析に基づく地殻内流体・マグマの分布と循環把握 ( 中村、岩森 )、粘弾性体あるいは固液 2 相流体の理論・数値シミュレーションによる温度場と流動-変形場推定 ( 深畑、岩森 ) を行う。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・噴火場を統合的に理解することを目的とする。これらの基本場の理解に立脚して、温度場、流体?マグマ分布、流動変形を介した地震発生と火山活動の相互作用の理解を目指す。

( 8 ) 本課題の 5 か年計画の概要 :

下記 3 項目の研究を実施することにより、日本列島変動の基本場 ( 地殻とマントルにおける物性、温度、応力、流動 - 変形 ) の解明を目指す。

#### \* 応力場：地殻応力場不均質性の定量的評価及び地震活動の理解

近年応力逆解析法を用いて地震メカニズム解データから地殻応力場の推定が行われ、震源断層近傍の詳細な応力場の空間変化や（例えば、Yukutake et al., 2006; Yoshida et al., 2014）、列島規模での広域応力場の分布（例えば、Terakawa and Matsuura, 2010; Yukutake et al., 2015）が得られてきた。一方、応力場の推定においては、通常、（１）地震は断層面上の最大せん断応力方向に滑る、（２）解析領域内では応力場は均質であるという２つの仮定を置く必要がある。しかし、（２）の仮定について実際の地殻内は断層強度と応力場の双方が不均質であるという結果が報告されている（Rivera and Kanamori, 2002）ほか、応力場が非常に不均質であった場合応力逆解析法の結果にバイアスがかかる可能性も指摘されている（Smith and Dieterich, 2010）。この課題では、仮定した応力場に対する各メカニズム解の Misfit 角に着目し、実際に観測された地震メカニズム解データが均質な応力場でどの程度説明可能かどうか Misfit 角を基に定量的に評価し、応力場の不均質性についての制約を試みる。メカニズム解の決定誤差が重要になってくるため、2000年鳥取県西部地震震源域で行われた多点稠密地震観測のデータを用いて高精度にメカニズム解を推定し、その結果に基づいて解析を行う予定である。本研究で地震後の震源断層周辺の応力場の不均質性が明らかになれば、応力の絶対値への議論も可能であり、また応力逆解析法の妥当性の評価にもつながる。さらに地震発生及び火山現象と地殻内流体との関係の理解を目指し、火山地熱域及びその周辺で発生する群発地震活動や深部低周波地震について高精度な震源分布や発生域の応力場を明らかにし、その時間空間特性及び周辺地殻構造やテクトニクスとの関係を明らかにする。

#### \* 岩相・水・マグマの分布と物性

地殻やマントルに存在する流体（水を主成分とする）は、地震活動・火山活動において重要な役割を果たしている。その根は、沈み込むプレート（スラブ）にある。従来、沈み込むスラブと、それに由来する流体、流体の移動とマントル・地殻岩石との反応によって生じるマグマの分布は、スラブが均質であることを仮定して解析が進められてきた。しかし近年、沈み込むスラブ物質の不均質（たとえば、海山、断裂帯など）の存在が、沈み込まれる側の地震や火山活動に大きな影響を及ぼしうることが分かってきた（e.g., Nishizawa et al., 2017）。沈み込むスラブの不均質と沈み込まれる側（島弧側）での流体、マグマ活動の関係性を解明するため、火山岩および深部由来流体の採取・分析と、得られたデータのインバージョン解析（機械学習の手法の導入）により、溶融度、スラブ由来流体量、スラブ由来流体の起源物質組成を定量的に求め、日本列島に供給される流体やマグマ生成の基本場解明を目指す。特に、沈み込むスラブ不均質の指標となりうる元素や同位体、および隣り合う火山の違い（例えば、箱根カルデラ火山と富士成層火山）、構造線・火山周辺の地下水、および島弧 - 島弧遷移帯（例えば、中部日本弧 - 東北日本弧; Nakamura et al., 2017）に注目しつつ、研究対象地域を1か所選定し、流体-マグマ研究を進める。並行して、物性実験と地球物理学的観測から流体やマグマの分布・性質特定を目指す。地震波速度、電気伝導度をもとに、地殻やマントルにおける流体の分布を推定するのが、本研究項目の目的である。流体を含む岩石の弾性波速度や電気伝導度に関するモデルは、これまでも多数提案されてきている。しかし、高圧下で実際にどのような空隙が存在しているのかについての理解が不足していた。本研究では、岩石試料として、花崗岩、花崗閃緑岩、閃緑岩、ハンレイ岩、カンラン岩等を使用し、弾性波速度・電気伝導度測定から、圧力増加に伴う空隙の閉鎖、連結度の変化を調べる。また、X線CT観察により、どのような空隙がどのような割合で存在しているか、空隙の全体像を調べるとともに、イオンミリングで表面研磨した岩石試料のSEM観察により、高圧でも閉じないアスペクト比の大きな空隙の実体、および異なるスケールの空隙・クラックの物性に及ぼす効果を明らかにする。高圧実験と空隙構造観察を組み合わせることにより、高圧下での空隙構造を理解し、流体を含む岩石の弾性波速度・電気伝導度に関する統一的なモデルを構築する。このモデルを観測データに応用することにより、地殻・マントルの流体分布を推定する。

#### \* 温度・流動・変形場

島弧スケールの温度場は、マグマ生成を含む化学反応や、岩石物性（特に密度と粘性率）を規定する最重要要素といえる。温度場は、プレート沈み込みとそれに伴うマントルウエッジ対流、およびマグマ

や流体の移動の相互作用によって生み出される。本研究項目では、対流 - 流体発生と移動の数値モデル ( e.g., Horiuchi and Iwamori, 2016; Nakao et al., 2016 ) を発展させ、マグマ生成・移動も再現するより現実的なモデル構築とそれに基づく観測の解釈、および予測を目指す。このモデル化が進めば、将来的には、沈み込むプレートから火山噴火に至るまでの一連のプロセスとその連動の様子を定量的に把握することにつながり、個々の火山と沈み込み帯場の関係性の理解が、飛躍的に進むと期待される。これらの温度場・流動場の理解に根差し、島弧の変形場の理解を目指す。島弧変形場の最も基本的な力学源は、海洋プレートの沈み込みに伴う海陸プレート間の力学的相互作用 ( プレート境界面に変位の食い違いを与えることによって表現できる ) である。最近になって、なぜ島弧 海溝 外縁隆起帯という地形的な凹凸が世界中の沈み込み帯で普遍的に形成されるのか、このモデルに基づきその根本的な物理メカニズムが明らかとなった ( Fukahata & Matsu'ura, 2016)。しかし、沈み込むスラブの形状が島弧の走向方向に変化していることから明らかなように、現実の現象をより正確に理解するためには、島弧の縦断方向だけでなくその走向方向の変化も無視できない。さらには、津軽海峡や豊後水道などいわゆる島弧 島弧会合部では、顕著な負の重力異常が島弧側に大きく入り込むといった現象が世界中で一般的に見られる。そこで、本研究では、島弧の走向方向の変化や島弧 - 島弧会合部に焦点を当てて、2 次元的モデルから 3 次元的モデルへと物理的な理解を深化させることを目指す。加えて、日本列島のテクトニクスを理解するためには、他の島弧と比較することが重要である。そこで、いわゆる比較沈み込み学についても、地形や重力異常分布、応力状態、火山分布などとの比較を基に研究を進める。

#### 年次計画

平成 3 1 年度：2000 年鳥取県西部域において実施された多点稠密地震観測データのとりまとめ、メカニズム解の決定を実施。センチメートルスケールのクラック ( 以降 cm-crack ) を含む岩石試料 ( 花崗岩、直径 26mm, 長さ 30mm ) および含まない岩石試料 ( 花崗岩, 花崗閃緑岩, カンラン岩 ) について、含水状態での弾性波速度および電気伝導度を封圧下で測定し、空隙の閉鎖にともなう物性の変化を調べる。また、X 線 CT および SEM により空隙構造の観察を行い、空隙の連結の様子および高圧下でも閉鎖しない空隙を調べる。深部流体の分布が期待される大きな構造線沿い、特に ISTL - MTL 沿いの湧水組成既存データを精査し、分布の概要を調べる。沈み込んだ海山の影響が明らかなカムチャッカ火山の試料を用い、特徴的成分やその検出方法を探る。島弧粘弾性変形場の 3 次元モデル構築のため、まず 2 次元モデルにおいて歪みの振る舞いについて理解を深める。マントル対流モデルに溶融・メルト組成再現を行うための定式化を行う。

平成 3 2 年度：引き続き鳥取県西部域におけるメカニズム解の整備を進めるとともに、Misfit 角を用いた断層周辺の応力場不均質に関する解析を進める。前年度に引き続き、cm-crack を含む岩石試料 ( 花崗岩 ) および含まない岩石試料 ( 花崗岩, 花崗閃緑岩, カンラン岩 ) について、含水状態での弾性波速度および電気伝導度を封圧下で測定し、空隙の閉鎖にともなう物性の変化を調べる。また、X 線 CT および SEM により空隙構造の観察を行い、空隙の連結の様子および高圧下でも閉鎖しない空隙を調べる。前年の解析に基づき、ISTL - MTL 沿い深部流体のサンプリングを行う。沈み込んだ海山が島弧火山岩に及ぼす影響を、特徴的成分に注目しながら化学インバージョンする方法を構築する。同時に、日本の火山で特徴的成分がみられるか、既存データから抽出を試みる。プレート境界形状が海溝の走向方向に変化する場合について計算を実行し、理解を深める。斜め沈み込みの場合に振る舞いがどう変化するかも調べる。他の沈み込み帯についても研究を進める。マントル対流モデルに溶融・メルト組成再現の定式化を組み込む。水に加え、CO<sub>2</sub> を組み込むための定式化を進める。

平成 3 3 年度：鳥取県西部域において断層周辺の応力場不均質を定量的に推定するとともに、本震前の応力場の情報、特にその絶対値についての制約を試みる。cm-crack をやや多く含む岩石試料 ( 花崗岩 ) について、含水状態での弾性波速度および電気伝導度を封圧下で測定し、空隙の閉鎖にともなう物性の変化を調べる。また、X 線 CT および SEM により空隙構造の観察を行い、空隙の連結の様子および高圧下でも閉鎖しない空隙を調べる。ISTL - MTL 沿い深部流体のサンプリングを継続するとともに、主要・微量・同位体分析を開始する。海山の影響が推定される日本の火山岩のサンプリングを

進める。島弧?島弧会合部のように、プレート境界の走向が変化する場合に、海洋プレートの沈み込みによる島弧の変形場がどのようになるのか理解を深める。斜め沈み込みの場合に振る舞いがどう変化するかも調べる。比較沈み込み学についても引き続き研究を進める。水、CO<sub>2</sub>を含み、マグマ組成を再現するモデルを構築・実行する。

平成34年度：鳥取県西部域で実施した解析をほかの内陸域の地震活動に適用し、応力場不均質性に関する普遍性を調べる。cm-crackを多く含む岩石試料(花崗岩)について、封圧下での物性測定および空隙構造の観察を行うとともに、粒界クラックおよびcmスケールのクラックを含む岩石の電気伝導度に関するモデルを検討する。深部流体の調査・組成分析を進め、予察的な統計解析により、深部流体のソース・過程の抽出を試みる。海山の影響を抽出するため、火山岩組成の分析(主要・微量・同位体)を進める。並行して組成インバージョンを開始する。地形や重力異常分布、応力状態、火山分布の普遍的特徴と特殊性を、観測データを基に明らかにし、その結果をまとめる。水、CO<sub>2</sub>を含み、マグマ組成を再現するモデルを構築・実行する。

平成35年度：これまでの結果に基づいて地殻応力場の不均質性と強度及び絶対応力値に関する議論を進める。前年度に引き続き、cm-crackを多く含む岩石試料(花崗岩)について、封圧下での物性測定および空隙構造の観察を行うとともに、粒界クラックおよびcmスケールのクラックを含む岩石の電気伝導度に関するモデルを構築する。深部流体の調査・組成分析を進め、深部流体、海山からの影響を定量的に結び、流体・マグマ循環を統合する。日本列島を含むいくつかの島弧について、3次元の変形理論モデルを適用し、地形および重力異常などの原因を考察する。水、CO<sub>2</sub>を含み、マグマ組成を再現するモデルの結果をまとめ、沈み込み帯の流体・物質循環を統合する。5年間の応力、物性、流体・マグマ生成、数値モデルの結果・知見を総合し、日本列島の基本場を明らかにする。

(9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

深畑幸俊(京都大学)、飯尾能久(京都大学)、行竹洋平(神奈川県温泉地学研究所)、渡辺了(富山大学)、岩森光(東京大学、東京工業大学)、中村仁美(産業技術総合研究所、東京工業大学)  
他機関との共同研究の有無：無

(10) 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：0774-38-4226  
e-mail：fukahata@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp  
URL：http://www1.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/fukahata/

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：深畑幸俊  
所属：京都大学防災研究所