

領域略称名：地殻ダイナミクス
領域番号：2608

令和元年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る事後評価報告書

「新学術領域研究（研究領域提案型）
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－」

（領域設定期間）

平成26年度～平成30年度

令和元年6月

領域代表者（京都大学・防災研究所・教授・飯尾 能久）

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	4
2. 研究領域の設定目的の達成度	6
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	9
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	10
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	12
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	15
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	20
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	22
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	26
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	27
11. 総括班評価者による評価	28

研究組織 (総：総括班，支：国際活動支援班，計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究，公：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関・部局・職	構成員数
X00 総	26109001 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-	平成26年度 ～ 平成30年度	飯尾 能久	京都大学・防災研究所・教授	13
Y00 支	15K21755 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- (国際活動支援班)	平成27年度 ～ 平成30年度	飯尾 能久	京都大学・防災研究所・教授	10
A01 計	26109002 内陸地殻の強度と応力の解明	平成26年度 ～ 平成30年度	松澤 暢	東北大学・大学院理学研究科・教授	7
A02 計	26109003 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	平成26年度 ～ 平成30年度	鷺谷 威	名古屋大学・減災連携研究センター・教授	7
B01 計	26109004 観察・観測による断層帯の発達過程とマイクロからマクロまでの地殻構造の解明	平成26年度 ～ 平成30年度	竹下 徹	北海道大学・大学院理学研究院・教授	13
B02 計	26109005 岩石変形実験による地殻の力学物性の解明：流体の影響	平成26年度 ～ 平成30年度	清水以知子	京都大学・大学院理学研究科・准教授	7
B03 計	26109006 地殻流体の実態と島弧ダイナミクスに対する役割の解明	平成26年度 ～ 平成30年度	飯尾 能久	京都大学・防災研究所・教授	10
C01 計	26109007 島弧地殻における変形・断層すべり過程のモデル構築	平成26年度 ～ 平成30年度	芝崎文一郎	国立研究開発法人建築研究所・国際地震工学センター・上席研究員	8
統括・支援・計画研究 計 8 件					
A02 公	15H01137 段丘面の長波長変形に着目した第四紀後期のひずみ速度の解明	平成27年度 ～ 平成28年度	廣内 大助	信州大学・教育学部・教授	1
B01 公	15H01139 引張割れ目方位解析による地殻応力・流体圧比決定手法の開発	平成27年度 ～ 平成28年度	佐藤 活志	京都大学・大学院理学研究科・助教	1
B01 公	15H01143 断層破砕帯の鉱物化シミュレーションと断層強度モニタリング手法の開発	平成27年度 ～ 平成28年度	辻 健	九州大学・カーボンニュートラルエネルギー国際研究所・准教授	1
B02 公	15H01136 岩石～水反応による地殻応力発生機構とその時間発展の解明	平成27年度 ～ 平成28年度	宇野 正起	東北大学・大学院環境科学研究科・助教	1
B02 公	15H01145 雲母・粘土鉱物の最大摩擦係数の物理	平成27年度 ～ 平成28年度	佐久間 博	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主任研究員	1
B03 公	15H01134 深部低周波地震は地殻への水の供給と関係しているのか？	平成27年度 ～ 平成28年度	高橋 浩晃	北海道大学・大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター・准教授	1
B03 公	15H01135 散乱波の波形の時間変化を用いた地殻流体の挙動の解明	平成27年度 ～ 平成28年度	小菅 正裕	弘前大学・大学院理工学研究科・教授	1
B03 公	15H01146 多元素同位体指標を用いた西南日本前弧の海底泥火山流体の起源の解明	平成27年度 ～ 平成28年度	西尾 嘉朗	高知大学・農学海洋科学部・准教授	1

B03 公	15H01147 人工電磁探査を用いた沈み込み後の地殻流体の実態解明	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	笠谷 貴史	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・主任技術研究員	1
C01 公	15H01140 東北地方太平洋沖地震の地震前・地震時・地震後の固着状態とすべり分布の推定	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	吉岡 祥一	神戸大学・都市安全研究センター・教授	1
C01 公	15H01144 断層面の不均一性と地震発生過程に関する実験的研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	山口 哲生	九州大学・大学院工学研究院・准教授	1
C01 公	15H01148 余効すべり過程の理論解析と数値モデリングに基づく摩擦特性の推定	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	有吉 慶介	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・研究員	1
A01 公	17H05309 東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動の推移に関する研究	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	内田 直希	東北大学・大学院理学研究科・准教授	1
A02 公	17H05312 海山アスペリティ／海山クリープ仮説の地質学的検証	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	山口 飛鳥	東京大学・大気海洋研究所・准教授	1
A02 公	17H05315 浅層反射法地震探査を用いた 2014 年神城断層地震時のネットでの変位量分布	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	松多 信尚	岡山大学・大学院教育学研究科・教授	1
A02 公	17H05316 巨大地震の後に山体下のマグマ溜まりが上昇も下降もすることを説明する実験	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	並木 敦子	広島大学・大学院総合科学研究科・准教授	1
B01 公	17H05319 圧力溶解変形の予測に向けた粒間水の性質の解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	西山 直毅	筑波大学・生命環境系・研究員	1
B02 公	17H05310 岩石一流体反応の力学応答と流路発展から探る沈み込み帯の透水性と流路連結度	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	宇野 正起	東北大学・大学院環境科学研究科・助教	1
B02 公	17H05311 中速度領域における摩擦への温度効果と地震発生直前のプロセス解明	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	澤井みち代	千葉大学・大学院理学研究科・特任助教	1
B02 公	17H05318 断層進化過程の解明に向けた階層型デジタル岩石物理化学モデルの開発	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	辻 健	九州大学・大学院工学研究院・教授	1
B02 公	17H05320 真実接触面における雲母・粘土鉱物の摩擦の物理	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	佐久間 博	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主任研究員	1
B03 公	17H05314 沈み込み帯マントルウェッジ捕獲岩中の塩水包有物に溶存するイオンの定量分析	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	川本 竜彦	静岡大学・理学部地球科学科・教授	1
C01 公	17H05321 海溝型巨大地震の最大規模推定に資する地質構造の強度推定	平成 29 年度 ～ 平成 30 年度	宮川 歩夢	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員	1
公募研究 計 23 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募研究領域の着想に至った経緯、応募時までの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

① どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか

東北地方太平洋沖地震(以下、東北沖地震と略記)の後、我が国の科学技術への信頼が揺らいでいる。災害軽減にほとんど貢献できなかったことに加えて、事後に生起している現象を的確に説明できないことなどがその理由であろう。東北沖地震は、稠密な観測網下で起こった世界初の超巨大地震であり、全世界の科学者の注目を集め、既に星の数ほどの論文が出版されているが、未だ多くの謎に包まれている。その原因は、我々が実は、島弧地殻の基本的な特性や状態を把握していなかったためであると考えられる。本研究領域においては、日本列島の内陸地殻において、これまで不明だった応力と歪の関係や媒質特性の時空間分布を明らかにすることにより、東北沖地震後に生起している諸現象を統一的に理解する。このことは、世界に先駆けて謎を解くことであり、我が国の学術水準の一層の向上・強化につながるとともに、揺らいでいる科学技術への信頼を少しでも取り戻すことになると期待される。

② 研究の学術的背景

東北沖地震の後、日本列島の内陸地殻は、不思議な振る舞いをするようになった。地震活動が活発でなかった地域で変な地震が起こったり、火山地域で大規模な沈降が生じたりした。GNSSなどで計測されている測地的(短期的)歪速度は、地層の変形などから推定される地質学的(長期的)歪速度より一桁大きいため、超巨大地震によってその差がキャンセルされるという推定があったが、東北沖地震によってもその差は埋まらなかった。地震時に大きく沈降した海岸は、ゆっくりと隆起しているものの沈降したままになっている。これらの現象を正しく理解することは、今後の推移を予測する上で非常に重要であるが、大きな壁にぶつかっている。その理由として、そもそも我々が、日本列島のような島弧地殻のダイナミクスを根本的には理解していなかったことが上げられる。

媒質の変形を記述する基本的な式は、応力と歪や歪速度との関係式である。媒質が弾性体とみなせる場合は、 $\text{応力} = \text{弾性定数} \times (\text{弾性歪})$ となり、非弾性変形する場合は、応力はさらに粘性係数や歪速度にも依存する(図 1 参照)。したがって、日本列島の内陸地殻において、 $\text{応力} \cdot \text{歪} \cdot \text{歪速度}$ と弾性定数や粘性係数等の媒質特性との関係およびその時空間分布を知ることにより、内陸の変形を統一的に理解することが可能となる。このことを、地殻ダイナミクスの解明と本研究領域では呼ぶことにする。重要な点は、 $\text{歪} = \text{弾性歪} + \text{非弾性歪}$ であるが、地震発生域では断層滑り以外の非弾性歪(非弾性変形)が無視されることが多かったことである。

本領域の関係者はこれまで、島弧地殻のダイナミクスに関して世界をリードする重要な成果を多数挙げてきた。しかしながら、島弧地殻のダイナミクスを解明する上で、非常に重要な問題がほぼ手つかずのまま残されてきた。一つは、応力の絶対値(絶対応力)の問題であり、もう一つは、非弾性変形とそれに関係する媒質の応答特性の問題である。

絶対応力は地殻の変形を考える上で非常に重要なパラメータであり、非弾性変形は基本的に応力の変化ではなく絶対値に依存する。しかし、地殻深部の絶対応力の推定は非常に難しい。地震波形データや地殻変動データが応力の絶対値ではなく変化分だけに依存すること、地震の発震機構データを用いる手法では主応力の方位と相対値しか推定出来ないこと、地表から応力を直接測定可能なのは通常は深さ数 km までであることなどがその原因である。そのため、より深部での絶対応力は岩石の摩擦実験から類推されていたが、サンアンドレアス断層において、絶対応力は岩石摩擦強度よりはるかに小さいと主張する研究があらわれた。この実験結果と観測結果との相違は「地殻応力問題」とよばれ、1970 年代から米国を中心に大きな学際的論争を巻き起こしているが、今もなお未解決な問題のままである。

最近になり、超小型・軽量で超稠密な観測網を展開することが可能な通称・満点地震計が開発され、絶対応力の推定に光が見えてきた。地震の発震機構データを用いる手法では、直接測定が不可能な地殻深部においても、主応力の方位を推定可能である。満点地震計を用いた超稠密な地震観測に

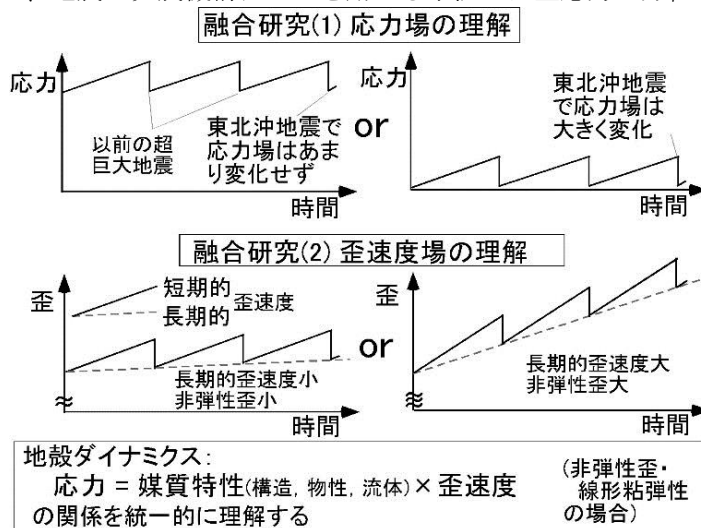


図 1 島弧地殻内の応力場および歪速度場の理解

より、大地震の前後における主応力の方位の変化を極めて精度良く求めれば、(容易に計算出来る)大地震による応力変化と比較することにより絶対応力を推定できると考えた。

非弾性変形については、これまで GNSS 等による測地観測でも一部捉えられはしたものの、きちんとした推定はほとんどなされてこなかった。更に、地震発生層など比較的低温領域で非弾性変形を可能にするメカニズムについても良く知られていなかったが、近年になり岩石の溶解・沈殿による変形(圧力溶解クリープ)の研究が進み、この問題についても手がかりが見えてきた。

③ 基本的な研究戦略

本研究領域の目的は、日本列島の内陸地殻において、応力と歪・歪速度と弾性定数や粘性係数等の媒質特性との関係およびその時空間分布を明らかにし、東北沖地震後に日本列島の内陸地殻で生起している諸現象を統一的に理解することである。そのための基本的な研究戦略は、**(a)応力・歪・歪速度を観測データに基づき推定、(b)流体を含む媒質の応答特性とその時空間変化を観察・観測・実験等により推定、(c)これらの知見に基づき数値モデルを構築して観測データを再現し、モデルの検証を行う**というものである。(a)-(c)に対応して、以下の研究項目と計画研究を置く。

研究項目 A：応力・歪・歪速度の推定：これらは媒質の変形を記述する基本的なパラメータであり、その絶対値と時空間変化を精度良く推定することが第一に必要である。

研究項目 B：媒質特性の推定：応力と歪・歪速度とを関係づけるのは弾性定数や粘性係数等の媒質特性であり、その時空間変化を明らかにすることは、島弧内陸における変動を統一的に理解するために必要である。断層帯の特性は、地殻の強度や変形に大きく影響するので、その構造等を解明することは大変重要である。

研究項目 C：数値モデル化：応力・歪・歪速度と媒質特性の時空間変化の関係を数値モデル化することにより、個別に得られた知見を検証し、島弧内陸における変動を統一的に理解することが可能となる。

具体的には、個別研究で得られる知見を融合させて、下記の2つの課題の解明を行う。

融合研究(1) 応力場の理解

地震学的手法により応力の絶対値や間隙水圧等を推定 (A01)、地質学的な観察と観測により断層帯の構造や変形特性を推定 (B01)、岩石変形実験より断層岩の変形特性を推定 (B02)、観測データ等に基づき推定された地殻流体の分布、地殻流体の観測等 (B03) に基づき媒質の特性を推定 (B)、これらの知見に基づいて数値モデルを構築して、観測された応力場を再現する (C01)。

融合研究(2) 歪速度場の理解

測地学的・地質・地形学的手法により短期・長期的な歪・歪速度場を推定 (A02)、岩石変形実験により下部地殻・上部マントルの変形特性を推定 (B02)、観測データ等に基づく数値シミュレーションにより地殻流体の分布と温度構造を推定 (B03)、温度等を考慮した変形シミュレーションにより、観測された歪・歪速度場を再現する (C01)。

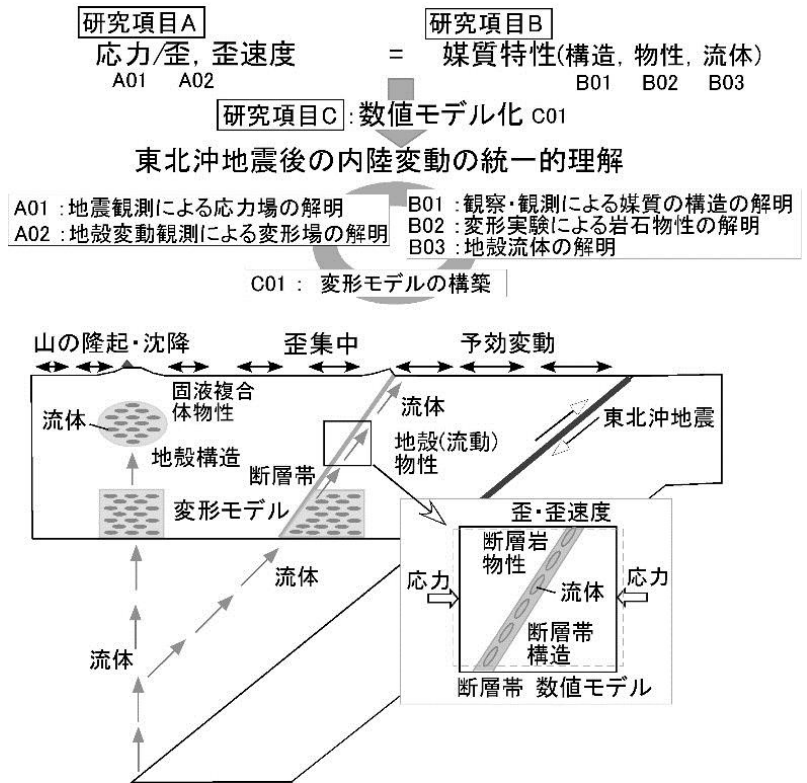


図2 本領域の研究戦略

2. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らしての達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

(1) 応力場の理解

・何をどこまで明らかにしようとしたか？

地震学的な手法により差応力の大きさと間隙水圧を推定し、地質学的・実験岩石学的な手法等により推定された断層岩の変形特性などの媒質の特性に基づき、数値モデルを構築して、応力場を理解する。

・成果の概要

(1-1) 内陸大地震の余震域における差応力の推定

2008 年岩手・宮城内陸地震、2000 年鳥取県西部地震、2016 年鳥取県中部地震、2016 年熊本地震の各震源域において、地震学的手法（大地震の前後における応力場の変化等を用いる）により差応力の大きさを推定した。その結果、従来考えられていた値の半分から 1/10 程度の値が得られた。これらの内陸地震は、歪速度が周囲に比べて桁違いに大きな地域（歪集中帯）で発生したものであるが、逆に、歪集中帯以外では差応力はずっと大きく、従来考えられていた値と同程度である可能性が示された。

内陸における小さな差応力の成因および歪速度との関係に関して、(2-3)で詳しく述べるように、列島規模の視点から、水が密接に関与している可能性が初めて定量的に示された。歪速度の大きな地域では、沈み込んだ海洋プレートから島弧下のマントルへの脱水が活発なことが地殻流体班による分析から明らかにされ、モデル班の数値シミュレーションにより水の多い地域では歪速度が大きくなることが再現された。また、累積変位の大きな内陸の大断層における地質調査により、粘土鉱物の形成や圧力溶解の進行など水の関与した断層帯の弱化を示す知見が得られた。これまで歪速度の大きな領域（歪集中帯）の成因として、マントルからの水が地殻の下部を弱化させることが知られていたが、本領域研究により、地震発生域に相当する地殻の上部も弱化させる可能性が示された。

これまで、内陸の大地震は、強い（強度の大きな）岩盤に大きな力（差応力）が加わるために発生すると考えられてきたが、むしろ、「ぐじゅぐじゅと」変形している弱い岩盤中に存在する弱い断層において、差応力が局所的に少しだけ大きくなることにより発生するものが主であることが明らかになった。これは、「固いものを力任せに壊す」というような、従来の地震現象に対する見方に根本的な疑問を投げかける重要な発見である。

(1-2) 間隙水圧の推定

間隙水圧（断層面に働く水圧）の上昇に伴う強度の低下が地震発生に直接寄与することを、本領域の研究協力者の寺川寿子名古屋大准教授が 2012 年に世界で初めて、バーゼルの高圧注水実験で誘発された地震のデータの解析から定量的に示すことに成功した（本領域の研究期間中にさらに改良を行い、これらの研究等により 2018 年に猿橋賞を受賞）。さらに、東北沖地震の発生後に、深部からの高圧の流体の上昇により発生したと考えられる群発地震活動が多数観測され、その中の山形-福島県境群発地震では、間隙水圧の上昇により一時的に低下した断層の強度が流体の拡散により時間とともに回復して行く過程を捉えることに成功した。地震発生と間隙流体の関係はこれまで推定の域を出ていなかったが、これらの研究成果は、間隙水圧の実体を初めて観測的に明らかにした例として極めて重要である。

一方、鳥取県西部や鳥取県中部などの内陸大地震域では、本研究領域等で構築した世界最高レベルの稠密地震観測網によっても、東北沖地震後に見出されたような間隙水圧の時間変化を捉えることができなかった。また、地震発生域が非常に浅い地域における精度の高い地震波速度と電気比抵抗のデータを、地殻流体班が室内実験結果に基づいて解釈したところ、地震発生域の一部の亀裂（小断層）にのみ流体が存在し、高い間隙流体圧は生じていない可能性が高いことが推定された。この地域でもすべりにくい小断層がすべっていることから、断層の強度の低下に関しては、高い間隙水圧という物理的な効果だけでなく、(1-1)で示唆されたように、水による断層の弱化という化学的な効果も重要である可能性が示された。近年、シェールガスや地熱開発における注水により、予期せぬ大きな地震が発生して各国で社会問題となっている。韓国でも、僅かだと推定される間隙水圧の増加がどのようなメカニズムで M5.5 という大きな地震を引き起こしたか、世界中から第一線の研究者が集まり検討を行ったがその原因を明らかにすることは出来なかった。本領域による研究は、高い間隙水圧無しで断層の強度が大きく低下する可能性を観測データに基づいて初めて示したものであり、大地震発生における流体の役割に関して、これまで注目されていなかった新たな道を指し示したものと評価できる。

(1-3) 地質調査・すべり実験による断層の強度の推定

上記の地震学的な手法で推定された小さな差応力を理解するために、地表に露われた断層帯の野外調査と室内分析および摩擦実験を組み合わせ、断層強度の推定が行われた。鳥取県西部においては、地震発生域に相当する温度における花崗岩中の石英の塑性変形を用いた地質学的な手法により、地震学的な手法と調和的な差

応力の値が推定された。これまで、無水鉱物の摩擦係数が大きいことが知られていたため、(1-1)で述べたように累積変位が大きく断層が成熟し、含水鉱物の生成による弱化が見出された中央構造線から得られた試料を用いて、断層帯形成時の温度・圧力を再現した摩擦実験を行った。地殻浅部の断層ガウジでは、これまで知られていたように粘土鉱物による摩擦係数の低下がみられ、高間隙水圧でなくとも地震観測でみられた低い差応力を説明できる場合があることが示唆された。緑泥石の地殻中部条件での摩擦物性についても初めて実験を行い、0.3程度の低い摩擦係数を得たが、中央構造線のより深部にある断層岩から得られた天然試料は、従来から一般的に知られていると同様の大きな摩擦係数(0.6~0.7)を示した。脆性-塑性遷移領域の直下においては、石英の再結晶粒径から差応力を推定する手法および転位クリープ流動則に関する詳細な理論的な検討により、従来より精度の高い差応力の推定結果(温度300-350°Cにおいて100-200 MPa程度)が得られた。内陸の地震発生帯の下限付近の絶対応力に関して、断層強度の低下のみで地震観測結果を直接的に説明することは出来ず、天然と実験室でのすべり速度の違いなど今後検討すべき課題が残ったが、これまで行われてこなかった詳細な検討により新たなデータを提示することが出来た。

(1-4) 数値モデルによる応力場の理解

観測された応力場の理解のために、日本海溝-東北日本弧にいたる深部の絶対応力場と海溝型超巨大地震の発生による応力変動のモデル化を行い、正断層的な応力場となる領域の時空間分布をよく再現することが出来た。また、地震学的に推定された応力場を活用して、2016年熊本地震や2016年カイクウラ地震の動的破壊過程のシミュレーションを行い、複雑な破壊過程を再現することに成功した。

(1-5) 応力場に関する予期せぬ成果

応力場の研究に付随して、当初は予期していなかった画期的な成果がいくつか得られた。鳥取県西部地域において、間隙水圧を推定するために、1000台の地震計からなる超稠密地震観測網(断層深部形状検出システム)を構築した。地震は、断層面を挟んで両側のブロックが互いに平行にずれ動くことにより発生するというのが常識である。しかし、その常識に反して、解析を行ったM2クラスの余震の多くにおいて、断層面がずれるだけでなく、ずれと同時に直交方向に開くことが推定された。これは、1000点という超稠密地震観測網によって初めて明確に確認されたものである。また、同地域では、非常に詳細な地質調査により1500枚にも及ぶ小断層を検知し、その小断層の方位分布が、地震観測から推定された余震の断層面の方位分布と非常に良く一致することが見出された。そして、その卓越方向が最大圧縮応力の方位に近いことから、断層面が開きやすく、流体を通しやすい可能性が示唆された。これらの知見は、いずれも、内陸大地震の断層近傍において、流体を通しやすい地殻構造を形成することによる内陸大地震の発生と流体移動の関係を示唆しており、今後の新たな研究の展開を切り開いたものと言える。

・応力場に関する達成度の評価

地震学的な手法により、これまで全く良く分かっていなかった差応力の大きさとその地域的な依存性を解明出来たことから、達成度は高いと評価出来る。特に、歪速度の大きな地域で差応力が小さくなるという関係の発見は重要な成果である。断層強度の低下と関連した水の役割については、間隙水圧の上昇という物理的な効果だけでなく、その化学的な効果が無視出来ない可能性が示された。さらに、鳥取県西部において、その地域に展開した1000点の超稠密地震観測網により、多くの地震は断層面が単にずれ動くだけでなく開口成分を持つことを明確に示したことに加え、詳細な地質調査により検出された小断層の方位が地震観測から推定された余震の断層面の方位分布と非常に良く一致することを見出した。その一方、室内実験から得られた摩擦係数は、地殻浅部については地震学的な推定と調和的な小さい値が得られたものの、地震発生域の深部(脆性・塑性遷移領域)での強度低下を裏付けることはできなかった。しかし、新たな視点やデータを提示出来たことは評価に値すると考えられる。

(2)歪速度場の理解

・何をどこまで明らかにしようとしたか？

日本列島のどこで・どのように歪が蓄積-解放され、地震や地殻変動を引き起こすのかを解明するため、地殻の弾性変形(非累積的変形)と非弾性変形(累積的変形)を測地・地質・地形学的な手法により識別・定量化すると同時に、温度・流体分布や岩石物性の研究成果を数値モデルにより統合することで変動の原因を明らかにし、定量的予測につなげる。

・成果の概要

(2-1)歪速度パラドックスと地質学的な変形速度の再検討

日本列島では測地学的に得られた歪速度(10^{-7} /年)が地質学的な方法で推定された歪速度(10^{-8} /年)より1桁大きいという問題(歪速度パラドックスと呼ばれる)が指摘されていた。東北沖地震に関する観測データの分析を通して、東北地方太平洋側など歪集中帯以外では、測地学的な歪速度の多くがプレート境界の固着による弾性歪を反映しているという仮説の妥当性を確認した。また、明治以来の100年間の三角測量結果に1894年庄内

地震の影響によるスケール誤差があることを示した。

歪速度における 1 桁の食い違いは解消したが、断層周辺における異なる時間スケールの変形速度には依然として 2~3 倍程度の食い違いが残る。こうした食い違いの要因として、変形場の移動や断層外変形の寄与といった地質学的な手法も合わせて検討を行い、これらが歪速度の過小評価の要因となることを見出した。

また、日本列島の歪速度を評価するために、過去数百万年の間に沈み込んだフィリピン海プレートの変形から地殻の東西短縮速度を見積もる新たな方法を開発した。

(2-2) 地殻における非弾性変形と歪集中帯の変形機構

新潟から神戸に至る歪集中帯の存在は以前から知られていたが、その変形機構はほとんど理解されていなかった。本研究では、歪集中帯のローカルな短縮変形が東北沖地震前後を通じて持続していることを見出し、歪速度の空間波長に注目することで測地データから非弾性変形を抽出することに成功した。その結果、歪集中帯の短縮変形が主として地殻内の非弾性変形によるものであること、非弾性変形や地理的な分布が地質学的時間スケールでの歪速度分布と整合することが明らかになった。詳細な変形分布は、地殻の弾性的な不均質構造の影響も反映する。こうした非弾性変形の存在は、断層のタイプを問わず他の活断層でも確認された。さらに、こうした非弾性変形が応力場によって駆動され、内陸地震発生に至る応力蓄積において支配的な役割を果たすことをモデル計算で確認した。

(2-3) 歪集中帯の原因と内陸地震の発生予測

岩石物性は、水、温度、既存の地質構造（断層面など）の分布により大きく変化するため、これらの要因を制約しつつ歪集中帯が形成される原因を探った。日本列島下の水の分布については、火山岩の組成に基づき、沈み込んだ海洋プレートからマントルに供給された流体量を特定したところ、太平洋とフィリピン海プレートの違い、及び沈み込み角度・速度の違いを反映して、日本列島沿いに流体量が変化することが示された。特に中部日本～東北南部では太平洋とフィリピン海プレートの両方から流体が供給され、日本列島の中で最も流体の供給が多いことが分かった。これにより、新潟～中部山岳～神戸に至る地域を弱体化させ、歪集中や山地形成の原因になったことが定量的に示された。また、日本列島の GNSS データを解析して西南日本のブロック断層モデルを構築し、内陸における主要なブロック運動を明らかにした。その結果、2016 年熊本地震、2016 年鳥取県中部地震、2018 年大阪北部地震は、いずれも解析で得られていたブロック境界付近の歪集中帯で発生していたことが分かった。さらに、地震学、測地学、岩石レオロジーの研究成果を活用し、温度構造、水の分布、既存の地質構造を考慮した東北、中部、山陰の各地方における歪・応力集中過程、山地形成のモデル化を行い、良い再現性を得た。これらの結果は内陸地震発生長期評価・予測を大きく向上させる予想以上の成果である。

(2-4) 東北沖地震に伴う地殻変動の原因と予測

東北日本における地下深部の対流、熱・水輸送、岩石-流体反応の数値シミュレーションに基づき、日本海溝-東北日本弧-日本海にいたる広域および深部を含む岩石物性-構造モデルを構築し、東北沖地震後の余効変動（現在もなお続く地殻変動）のモデル化、さらには 600 年周期と考えられる超巨大地震サイクル間における地殻変動をモデル化した。その結果、東北沖地震後の余効変動において、太平洋沿岸は隆起する一方、脊梁山脈は沈降する原因は、地下深部の物性構造、特に火山列の地下に柔らかい（低粘性）領域が存在するためであることが分かった。太平洋岸沿いでの隆起は東北沖地震サイクルの中盤で沈降に変わり、地震発生の 100 年前は沈降速度が増加することが分かった。また、東北沖地震後の海域及び陸域の地殻変動観測データを解析し、東北沖地震後にゆっくりとした断層すべりが地震時すべりの周辺に発生したことを示した。そして、脆性塑性遷移を考慮した内陸活断層の地震サイクルモデルに、海溝型超巨大地震サイクルによる応力擾乱を境界条件として与えた数値計算により、内陸地震発生のタイミングが海溝型超巨大地震サイクルの後半に集中することを明らかにした。これらの成果は、地震学、測地学、地殻流体、岩石レオロジーに関する知見を総合して得られた成果で、海溝型超巨大地震サイクルにおける島弧内陸における変動の理解が格段に進んだ。

・歪速度場に関する達成度の評価

以上のように、東北沖地震に関連する測地データの解析や地質学的な変形速度の再検討などによる歪速度パラドックスの解決、新潟神戸歪集中帯以外の歪集中帯の発見、歪集中帯が形成される原因の解明、歪集中帯における弾性変形と非弾性変形の分離、東北沖地震後の地殻・応力変動の基本過程の理解の大幅な前進などから、当初の目的を達成したと評価できる。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

熊本地震への対応

2016年4月に発生した熊本地震(M7.3)は、東北沖地震と同様に、活動の推移を予測することの困難さを改めて示した。この地域では、松本聡(B01)の所属する九州大学地震火山観測研究センターが長年にわたって臨時観測網を展開しており、地震活動が広域にわたって活発なため、地震前のデータが質・量ともに豊富であるという大きな特徴を持っている。本領域では、総括班の下に熊本地震融合研究グループをおき、班を越えた融合研究体制を構築し、融合研究集会を頻繁に開催するとともに、建議に基づく「地震・火山災害軽減のための観測研究プロジェクト」とも共同して研究を進めてきた。各班が協力することにより、地震前のデータから推定された応力場によって本震のすべり方向の空間変化をうまく説明出来ること、得られた応力場を用いた動的破壊成長モデルを構築して破壊過程の再現に成功したこと、地震すべりを起こした断層付近においては差応力が周辺に比べてやや大きく最大 100MPa 程度であることなど、差応力の大きさや今後の活動予測に資する重要な知見を得ることが出来た。また、地質地形調査から約 9 万年前後で断層のすべり方向が大きく変化したことや強震動で阿蘇山体の透水性が増加したことで説明可能な河川の流量の増加を見出すなど興味深い結果を多数得ることが出来た。

他の大地震への対応

熊本地震に加えて、研究期間中には、2016年10月に鳥取県中部の地震(M6.6)、2018年4月に島根県西部の地震(M6.1)、2018年6月に大阪府北部の地震(M6.1)と、西南日本の内陸で大地震が連発した。本領域では、2017年度に鳥取県西部地域において、1000点の地震観測点から成る断層深部形状検出システムを用いた観測が計画されていた。このシステムは、本領域において新規に開発されたものであり、前年の2016年秋に福島県浜通りで試験的な観測を行う予定だった。4月の熊本地震の発生により、急遽熊本地域に変更したが、さらに10月の鳥取県中部の地震の発生により、鳥取県中部地域でも試験観測を行うこととなった。地震発生の次の日から設置を始め、69点から成る観測網を迅速に構築することが出来た。鳥取県西部地域での本観測の終了直後の2018年4月に島根県西部の地震が発生したため、撤収したばかりのシステムの一部50台を島根県西部へ移設し、約3ヶ月間の余震観測を行った。さらに、2018年6月に大阪府北部の地震が発生し、撤収したシステムから約100台を緊急に設置した。また通常の満点システムによるものであるが、2016年11月にニュージーランド南島でカイコウラ地震(M7.7)が発生した。この地域も、本領域の関係者が科研費プロジェクトにより約8年前から満点システムを用いた観測網を展開しており、本領域では国際活動支援班の経費を活用して、共同研究を進めた。

以上のように、断層深部形状検出システムは、鳥取県西部地域以外にも4カ所で活躍することとなった。このシステムは、非常に簡単に設置出来るように設計されているため、各大地震の発生直後に速やかに観測網を構築し、発生直後から高精度の大量の地震データを取得することが出来た。大地震発生直後には、深部からの高压の流体が地震発生域に上がってくるという予測があったため、速やかな観測網の構築は非常に重要である。地元の自治体や住民の方々の献身的な支援もいただき、観測は順調に進み、地震活動の時間変化が見えないことなど、これまで知られていなかった様々な重要な知見を得ることが出来た。また、観測でお世話になっている自治体の防災関係者と、解析結果を共有することにより、地元の方々に何が起きているかを理解頂くことも可能となった。

結果的に、研究期間中に本領域で設置した地震観測点は総計1592カ所となり、海域を含めた日本全体の高感度の定常地震観測点の総数を上回っている。予期せぬ事態への対応分だけでも431カ所にも及び、A01, B01, B03など各班が協力することにより、大地震発生直後の極めて重要なデータを記録することが出来た。通常よく聞かれるのは、定常観測点の空白域を埋めるように臨時観測点を強化するというようなことであるが、本領域では、定常観測点とは桁違いにとどまらず、二桁違いの臨時点を設置した異次元の観測体制により、問題の解決を計った。また、追加配分が処置されたことにより限られた労力を有効活用することが出来た。

熱水式回転摩擦試験機の開発

B02班では地殻中部条件に相当する高温高压条件での摩擦実験装置の設計開発を進め、当初計画の通り2年目に本体プレスや機械部を東大地震研究所に設置、3年目に压力容器を開発するとともに、厚生労働省に設置認可を申請した。本試験機で用いるような熱水压力容器にたいして、数ヶ月で認可がおりるのが通常であるが、今回は圧力500MPaという世界でも前例のない超高压仕様の熱水容器となるため、認可に1年以上を要し、本実験が行えない状態が続いた。そこで、同種の試験機を所有する海外共同研究機関（オランダ、ユトレヒト大学）にポストドク研究員を派遣し、圧力300MPaまでの条件で摩擦実験を行なった。その成果の一部はすでに国際誌に報告済みである(Okamoto et al., 2019)。B02班では最終年度の繰越しを行っており、新規開発した熱水摩擦試験機を稼働させるとともに、さらに実験を遂行する予定である。

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

測地学的観測機器の導入について、それらの効果を定量的に示すこと

本領域で対象とした内陸の断層帯では変形の波長が十数 km と短く、平均間隔が 20km 程度の既存観測網 (GEONET) では十分な情報が得られない。本研究で新規購入した機材は断層帯周辺における観測網の高密度化 (観測点間隔 5~10km) を目的として新設した連続観測点で使用しており、機材購入は必要不可欠であった。2014 年長野県北部地震や 2016 年鳥取県中部地震では、本研究で新規に設置した観測点が地震前後での顕著な変形パターンの変化や詳細な地震時地殻変動の検出に大きく貢献した。一方、跡津川断層周辺では、高密度の GNSS 観測データで干渉合成開口レーダー (InSAR) 解析のキャリブレーションを行い、日本列島内陸部では初めて地震間地殻変動の検出に成功した。

電磁気学的観測機器の導入について、それらの効果を定量的に示すこと

既存の東京工業大学所有の広帯域 MT 観測装置 10 式のうち 3 式が老朽化しているため、東北大学に新たに 2 式の広帯域 MT 機材を導入した。既存の機材と新規機材を用いて、平成 26 年度に 52 点の東北地方の観測データを新たに取得した。もし新規の 2 式がなかった場合、観測点は 43 点に留まったと考えられる。そこで 52 点と 43 点の観測点分布それぞれでデータを解析した場合の比抵抗モデルの比較を行ったところ、2 式を導入できたことで解析領域の中心部分の高伝導構造が非常に明瞭になっていることが分かった。導入した機材は、当初計画書では東北地方の観測のみに用いると記述したが、慢性的な機材不足の為に、紀伊半島の観測でも出動させており、その意味でも導入した機材が本計画で不可欠である証左となっている。

断層深部形状検出システムの導入について、それらの効果を定量的に示すこと

本システムによって、地震の検知能力が従来の 10 倍程度向上した。また、発震機構の推定精度が数度以下となったため、データ数の増加と合わせて、応力場の推定精度が格段に向上した。さらに、(1-5)で紹介したようにさらに、今まで断層帯において知られていなかった非ダブルカップル成分を持つ地震 (断層面がずれるだけでなく、ずれと同時に直交方向に開く地震) を検知することが出来た。図 3 に一例を示すように、通常ダブルカップル地震の P 波初動極性分布から外れた部分 (黄色の丸で囲んだ部分) を明確に捉えることが出来た。これは、地震発生と流体の関係を示唆する重要な知見である。図に示すように 500 点以下の観測点ではこの外れを検知することは困難である。

<中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

本研究領域の目的達成のためには、観測、実験、理論の融合研究が中心的な骨組みであり、今後研究領域内の各計画研究の緊密な連携や有機的な繋がりが進むことが必要であること

研究領域内の有機的な連携や各計画研究との連携を強化するために、年 1 回 3-4 日間の全体集会以外に、融合研究集会等を頻繁に開催した。国内および国際学会においても、本領域のメンバーが主となって特別セッション等を開催するとともに、夜間集会等も行って、議論を深めた。2017 年度と 2018 年度においては、2 日間の融合集会を 4 回、1 日のみを 5 回開催している。2 日間の融合集会では、主要な課題に関して、観測、野外調査、実験、理論の様々な立場からつっこんだ議論を行った。例えば、2017 年 7 月 15,16 日の集会では、携帯電話が届きにくい辺鄙な山の中の下界から半ば遮断された環境において缶詰めになってつっこんだ議論を行った。

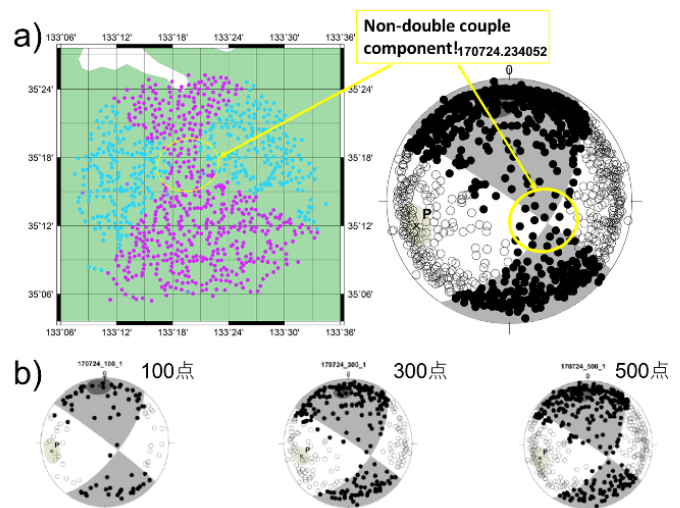


図 3. 深部断層形状検出システムによって観測された 2017 年 7 月 24 日の地震記録から読み取られた P 波初動極性分布。a) 地図上 (左) と震源球 (右) に投影した P 波初動極性分布。図中のピンク、黒点は初動が押し、青、白丸は引きを示す。右図の灰色・白色で塗りつぶされた部分はダブルカップル地震の場合の理論的に期待される極性が押し、引きであることを示す。ここから外れた部分が非ダブルカップル成分の影響を表す。b) a) で示した観測点からランダムに 100, 300, 500 点を選んで震源球上に表示したもの。

計画研究 A02 における散乱構造解析の位置づけ

直接することが困難な地殻下部における変形の様子を調べるため、変形のプロキシとして地震波散乱構造（コード Q）に注目し、新潟の歪集中帯を対象とした解析を実施した。その結果、この地域では上部地殻の不均質（軟らかい堆積層）と下部地殻の延性変形によって変形集中が生じていると考えられ、中部地方（跡津川断層および濃尾断層周辺）とは変形機構が異なることが示唆された（Dojo and Hiramatsu, 2017）。散乱構造と変形には一定の関連が認められるが、その解釈には任意性があり、今後さらに検討を続ける必要がある。

研究項目 B02 におけるマントル物性の探求と内陸地震発生モデルとの関係が不明確

島弧の変形はマントルでの粘弾性変形やプレート間固着に影響される。たとえば東北沖地震の余効変動解析では、局所的な沈降がマントルレオロジーの効果や余効すべりとマントルの非線形流動との相互作用から説明されている（Muto et al., 2016）。本研究では岩石変形実験に基づくマントル物性の探求が、東北沖地震後の内陸地震の発生場の理解をモデル化する上で重要である。本研究では、水の存在下でマントルウェッジが著しく弱化する（Hirauchi et al., 2016）ことを実験的に示すとともに、天然の超塩基性岩に発達する断層岩の解析から、マントル岩における脆性-延性遷移温度に制約を与えた（Ueda et al., *in revision*）。これらのマントル物性の探求は内陸地震の発生場をモデル化する上で重要となる島弧の応力レベルや歪速度場などを規定し、内陸地震発生モデルへの境界条件を与えるものである。

研究項目 B02 の研究課題と全体の研究課題との整合性など、有機的な繋がりを一層促進するための工夫が求められること

本新学術領域では島弧-海溝系をひとつの力学システムと捉え、入力としての「応力」と出力としての「歪（変形）」を主に A01・A02 班などの観測によって捉えるとともに、システムの力学応答を決める構造や物性を B01・B02・B03 の各班が独立に探求し、総括的な理解を目指すことを掲げてきた。B02（変形実験班）では、媒質の応力と歪の関係を規定する力学物性を明らかにすることを課題としており、全体計画の中で明確に位置づけられている。特に島弧地殻の地震発生帯の応力の問題は本新学術領域の中の大きな研究課題の1つであり、B02 班では中央構造線の天然試料を用いた室内摩擦試験を集中的に行ない、上部～中部地殻にいたる断層強度断面を作成した。この研究は B01 班による構造・物質調査との連携によって成し得た成果である。また前述のように、島弧下のマントル物性の研究は、C01 班や B03 班による余効変動や流体循環のモデリングの議論をうけて相互に発展してきた。

研究項目 C01 の内陸地震生成場のモデルに観測結果をどのように組み込むのかが不明確

下記の道筋で研究のとりまとめを行った。まず、地温勾配、地震活動の下限、地震波速度異常、減衰構造などの観測量から温度構造や水の分布を推定し、媒質特性を規定するパラメータ（非線形粘弾性や断層の摩擦係数）の設定を行った。次に、観測されている広域応力場の主応力軸の方向を再現するような境界条件を与え、テクトニック応力を増大させた。これにより、内陸地震生成場のモデル化を行い、歪集中過程や不均質応力場の再現を行った。そして再現された歪場や応力場と観測結果と比較することで、モデルの改善を図った。

間隙水圧の推定のためには研究項目 A01、B02 および B03 の計画研究が緊密に協力して進めること必要であり、連携の強化が求められること

A01 と C01 班との共同研究により、東北地方内陸において東北沖地震の約1ヶ月半後に発生した群発地震に関して、高圧の流体の下部地殻からの上昇を取り入れた地震発生シミュレーションにより、深部から浅部への震源の移動などの観測結果を再現して、間隙水圧の時空間変化を推定することに成功した。A01 班と B01 班の共同研究により、鳥取県西部地震および鳥取県中部の地震の余震域において、高間隙水圧を示唆するような地震活動の時間変化が見られないことが示された。鳥取県西部地震の余震域において、A01、B01 および B02 班の共同研究により、地質調査により検知された小断層の方位分布が、地震観測から推定された余震の断層面の方位分布と非常に良く一致し、本震の断層の近傍では流体を通しやすい可能性があることが示されるとともに、採取した断層岩の分析と摩擦係数を測定して間隙水圧を推定するための検討が行われた。A01 と B03 班の共同研究により、地震活動が非常に浅い領域において、既存の詳細な地震波速度構造および比抵抗構造データを B03 班による実験と理論的検討結果に基づいて解釈することにより、連結度の高い亀裂（小断層）の一部にしか流体は存在しないことが明らかになり、高間隙水圧となっていない可能性が高いことが推定された。このように、各計画研究が緊密に連携することにより、間隙水圧に関する重要な知見を得ることが出来た。

5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）〔研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理する〕

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

計画研究 A01:「内陸地殻の強度と応力の解明」

本計画研究では、内陸地殻で発生する地震の発生過程を理解するうえで重要な情報である強度と応力を明らかにするために、異なる地震環境にある複数の地域で稠密地震観測を実施し、高精度の発震機構解の分布を求め、新しい手法も開発して差応力の推定を行った。

P 波初動から直接応力場の空間パターンを求める統計的手法を新たに開発し、2000 年鳥取県西部地震の余震域で得られたデータに適用して高信頼度の応力の空間分布を求めることに成功した（Iwata, 2018）。

2011 年東北地方太平洋沖地震の後に東北日本の内陸で東西圧縮以外の地震が活発化した地域があるのは、そこで本震の前から異常な応力場となっていてその応力場が本震によって促進されたためであることがわかった（Yoshida et al., 2018a）。一方、もともと東西圧縮の応力場で本震発生後にせん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。これらの地域では地震活動の拡大・移動が起こっており（Okada et al., 2015）、震源が複数枚の面状に分布している（Yoshida et al., 2018b）、地震活動や震源過程を特徴づける複数のパラメータが同期して時間変化している（Yoshida et al., 2016a, 2017; Yoshida and Hasegawa, 2018）ことがわかった。以上の結果はこれらの群発地震が地殻内の流体の移動により引き起こされたことを示している。また地形と応力場との相関（Yoshida et al., 2015a）や大地震の後の応力場の回転（Yoshida et al., 2014, 2015b, 2016b）から東北地方の地震発生域の差応力は数十 MPa 程度と推定された。

2000 年鳥取県西部地震震源域での稠密観測データの解析により、余震は本震断層から約 1km の幅で分布しメカニズム解が多様で、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推定された（Yukutake and Iio, 2017）。さらに、余震域のメカニズム解の Misfit 角の分布はメカニズム解の誤差のみでは説明できず、応力場は不均質となっていること、またその応力擾乱源として本震による静的応力変化を考えると、摩擦係数 0.1 程度に相当する差応力レベルで分布が説明できることが分かった。

一方、2016 年鳥取県中部地震の合同余震観測データの解析により、断層の南端付近深さ 4km で約 40MPa の差応力が見積もられ、また深さ 3-6km では深さとともに差応力が増加しており、これは間隙圧が静水圧の場合には 0.3 程度の摩擦係数で説明可能であることがわかった。

計画研究 A02:「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」

日本列島では測地学的な歪速度 (10^{-7} /年) が地質学的な歪速度 (10^{-8} /年) より 1 桁大きいというパラドックスが指摘されていたが、2011 年東北沖地震に関する観測データの分析を通して、測地学的な歪速度の多くがプレート境界の固着による弾性歪を反映したものであるという池田（1996）の仮説が基本的に正しかったことが確認された。また、明治以来の 100 年間の三角測量で東北地方に東西短縮が見られなかったことを 1894 年庄内地震の影響による明治時代の測量結果のスケール誤差の影響で説明した（Sagiya et al., 2018）。

一方、地質学的な変形速度について多面的な検討を行った。新潟および秋田地域では褶曲軸と地形的な稜線の位置関係から地殻変形場が時間的に移動する可能性を考察し、断層活動の場が $10^3 \sim 10^4$ 年のスケールで移動していることが分かり（Otsubo and Miyakawa, 2016）、歪速度の過小評価の要因となる。跡津川断層周辺では、主断層外の中小断層分布を詳細に調査するとともにその広域変形に対する寄与を定量的に見積もり、主断層外の変形が測地学的な変位速度と地質学的な変位速度の食い違いを説明する可能性を見出した。

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する新手法で東西短縮速度を見積もり、中部日本において 5.6×10^{-8} /年と、測地学的な値と地質学的な値の中間的な値を得た（Fukahata, 2019）。

2011 年東北沖地震前後における新潟―神戸歪集中帯の地殻変動パターンの比較から、この地域における東西短縮の短波長成分が地震前後で持続しており、これが地殻応力によって駆動される非弾性変形であることを明らかにした（Meneses-Gutierrez and Sagiya, 2016）。この非弾性変形は歪速度 ($4 \sim 10 \times 10^{-8}$ /年) と空間分布から地質学的に推定された長期の変形速度と整合的である。さらに、稠密 GNSS 観測データを用いて、地殻内非弾性変形と地殻浅部の軟らかい堆積層による弾性的な不均質による影響を分離した。この解析を通して、地殻の力学応答が、加える応力変化の時間スケールによって異なる可能性を指摘した（Meneses-Gutierrez et al., 2018）。こうした永続的な局所変形は長野県北部や跡津川断層周辺、山陰地方でも確認され、島弧内の変形や内陸地震発生において重要な役割を担っていると考えられる。こうした永続的な局所変形は長野県北部や跡津川断層周辺、山陰地方でも確認され、島弧内の変形や内陸地震発生において重要な役割を担っていると考えられる。こうした変形集中のメカニズムとして、変形の累積に伴って断層周辺に応力集中が生じるとともに断層直下に低粘性領域が生じ、応力集中が加速するモデルを提案した（Zhang and Sagiya, 2018）。

本研究では、日本列島全体について熱年代のデータベースを構築するとともに、従来データの少なかった東北日本で熱年代学的なサンプリングと試料分析を行った。その結果、前弧側の熱年代が 50Ma 以上と大変古いのに対し、奥羽脊梁山脈は 1~3Ma、日本海側でも 3~5Ma と若い年代が得られ、隆起・削剥史に顕著な地域性のあることが明らかとなった (Sueoka et al., 2017)。また、奥羽脊梁山脈周辺の熱年代の詳細な分布を検討したところ、山麓から山頂にかけて年代が若返っており、**山脈両側の断層運動によるポップアップ型の隆起よりもマグマ貫入によるドーム状の隆起の方がより整合的**であると推定した。

計画研究 B01: 「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」

本計画研究では、日本列島内の地殻ダイナミクスを理解するために重要である断層帯の発達過程を、地質観察および地震観測の両面から明らかにするという融合研究に重点を置いた。特に、2000 年鳥取県西部地震の震源域において世界に例を見ない sub-km の亀裂分布分解能の地震観測を 2017 年 3 月から 2018 年 4 月まで **1000 台の地震計を展開して実施**し (0.1 満点観測) 断層モデルを構築した。その結果、小さな地震の断層面が複雑な形状を示すことや、**流体の存在を示唆する非ダブルカップル成分の大きな地震が生じている**ことを明らかにした。また、**現在地表に露出する破碎岩や断層粘土を伴う 1500 条の断層を認定**した。これらの地質観察結果と地震観測の比較に基づき、**断層の方位分布・分布幅は余震の亀裂方位・分布幅と極めて良い一致**を示し、現在の地震活動は中新世以来形成された断層 (古傷) の再活動で生じていることが明らかとなった。

地表に露出する過去に形成された上部・下部地殻断層帯の**発展が解析され、冷却に伴う歪の局所化過程** (Shigematsu et al., 2017; Czertowicz et al., 2019) や**下部地殻の地震性の破壊と岩石—流体反応による岩石の軟化**が示された (Okudaira et al., 2015, 2017)。

以上の成果のほか、追加予算等で実施された熊本や大阪北部地震の地震観測で詳細な応力場を推定するなど大きな成果があった (Kato et al., 2016, 2019; Matsumoto et al., 2018)。

計画研究 B02: 「岩石変形実験による地殻の力学物性の解明：流体の影響」

本計画研究では島弧—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、**熱水式回転摩擦試験機を設計開発**し、東京大学地震研究所に設置した。本試験機は熱水条件下での大変位・超低速~中速すべりを実現する試験機として世界最高の設計圧力 (500 MPa) を有する。

内陸地殻の断層帯や沈み込みプレート境界衝上断層の強度は、地殻の絶対応力を規定する。本課題では断層帯における H₂O 流体の影響に注目し、**流体存在下で生成される含水鉱物の摩擦特性についての基礎データを取得**し、**緑泥石については広い温度圧力条件下で低い摩擦係数 (~0.3) と安定滑り挙動を示すことを明らかにした** (Okamoto et al., 2019)。マントルカンラン岩のガウジの実験では、滑石生成反応の進行により剪断強度が著しく低下することを示した (Hirauchi et al., 2016)。現実の断層帯には様々な割合で粘土鉱物や白雲母・緑泥石などの含水鉱物が含まれる。そこで B01 班と共同して、天然の断層帯から採取した試料を用いて、推定される断層帯の形成温度圧力下で摩擦実験を行った。成熟した断層である中央構造線の試料を用い、地殻中部の地下約 12 km (温度 300°C、圧力 300 MPa) の地殻中部条件をリアルに再現しての実験は世界でも類をみない研究である。これらの実験結果と天然の変形組織観察から得られた情報を総合すると、**地殻断層の浅部は弱化しているが、中部地殻の脆性-延性遷移帯では 100 MPa オーダーの差応力を支持**していたと推定される。これは石英の流動則 (Fukuda and Shimizu, 2017) や再結晶粒径による評価と調和的である。

下部地殻の延性変形で重要となる斜長石については、H₂O 流体の浸透とともに粘性が著しく低下することを実験的に明らかにした。粘性構造が東北沖地震の余効変動に与える影響についても、C01 班などと共同で数値モデリングによって解析した (Muto et al., 2016)。

公募研究 公募研究では、断層破碎帯の鉱物化シミュレーションに基づき、鉱物化が断層強度や弾性波速度に与える影響が明らかにされた (Tsuji et al., 2019)。また雲母粘土鉱物の摩擦係数が低い理由を原子レベルから明らかにするために MD 計算シミュレーションを行ない、**真実接触面のすべりとマクロのすべり**を関係づけた (Sakuma et al., 2018)。

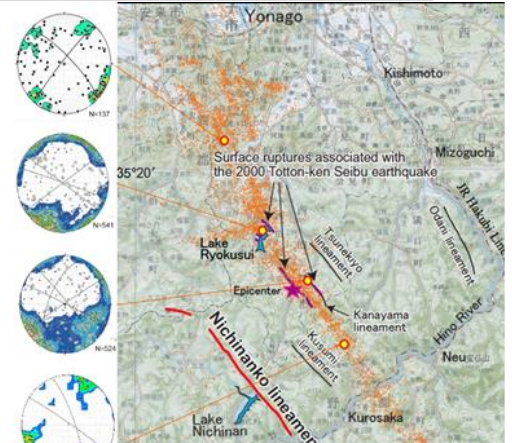


図 4 2000 年鳥取県西部地震余震域 (橙色の点群部分) 周辺の地表に露出する多数の断層の姿勢 (シュミットネット、下半球投影)。杉山ほか (2004) に加筆。

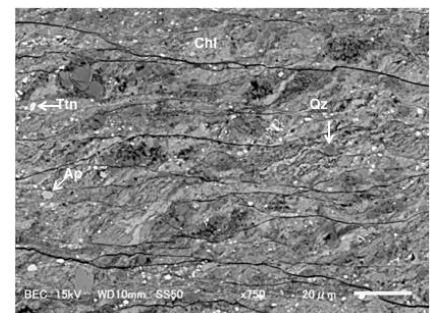


図 5 中央構造線ぞいのカタクレーサイトをもちいた剪断摩擦実験後の試料の電子顕微鏡写真。リーデルシア一面が発達している。

計画研究 B03: 「地殻流体の実態と島弧ダイナミクスに対する役割の解明」

日本列島下の流体分布・移動と性質、およびそれらの地震・火山・地殻変動との関わりを解明することを目的とし、(1) 岩石一流体系の地震波速度—電気伝導度に関する実験および観測研究により地殻流体の分布を推定し、(2) 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が地表付近まで上昇の様子を、地球物理—地球化学観測と数値シミュレーションにより明らかにした。

(1) については、インタクトな岩石としての焼結多結晶体の地震波速度測定 (Tsubokawa & Ishikawa, 2017a;2017b)、クラック密度と間隙水圧を制御した岩石一流体系の地震波速度・電気伝導度同時測定 (Watanabe & Higuchi, 2015) を行い、観測される最大数十%程度の地震波速度と数桁におよぶ電気伝導度の空間変化 (Ichiki et al., 2015) が、流体連結度の違いにより説明されることを明らかにした。

(2) については、日本列島下のマントルに供給されるスラブ由来流体量とマントル組成の広域マッピングに成功し、例えば中部地方の歪集中帯は太平洋とフィリピン海スラブの両者からの流体供給により岩石強度弱화가起こっている可能性を指摘した (Nakamura et al., 2018 ; 2019)。また、それらの深部流体が、有馬型塩水に代表される高塩濃度・高³He/⁴He 流体であることを地球化学観測・数値シミュレーションにより明らかにし、それらが有馬地域および紀伊半島中央構造線沿いに分布すること示した (Nakamura et al., 2016;2015;2014; Morikawa et al., 2016; Kusuda et al., 2014)。さらに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。特に、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。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 (Matsumoto and Shigematsu, 2018)。

これらを統合すべく島弧スケールのシミュレーションを行い、東北日本下の温度・粘性構造—マントル対流—流体の発生・移動—マグマ生成を整合的に解くことに初めて成功し、温度—粘性—流体分布の基本構造モデルを提供した (Horiuchi and Iwamori, 2016)。また、~600 年周期の超巨大巨大地震サイクルにおける脊梁山脈隆起と海岸沿い沈降の加速とがこの基本構造に由来していること、さらにこのモデル予測に基づき、現在沈降が進む北海道沖が超巨大地震サイクル終盤にあたる可能性が高いことを指摘した (Sasajima et al., 2019)。

計画研究 C01: 「島弧地殻における変形・断層すべり過程のモデル構築」

東北日本における島弧海溝系の広域変動のモデル化：不均質レオロジー構造を考慮した東北沖地震後の島弧内陸の変形過程、広域余効変動、東北沖地震発生前の約 100 年間における前弧の沈降過程、及び絶対応力場のモデル化を行い、東北日本における広域変動の総合的理解を進めた。

不均質粘性構造モデルを用いて、2011 年東北沖地震後約 5 年間の海陸の地殻変動観測データに基づく余効すべり分布の推定を行い、余効すべり分布は地震時すべりと空間的に相補的であることを示した (Inuma et al., 2016)。

島弧内陸における地震発生場のモデル化：日本列島の GNSS データの整理による島弧内陸域の歪集中帯と内陸地震活動の関係を調べ、歪速度が大きい領域で内陸地震が発生することを示した。また、西南日本のブロック断層モデルを構築し、内陸における主要な断層運動を明らかにした (Nishimura et al., 2018)。さらに、東北奥羽脊梁山脈、山陰、中部日本などの各地域の歪集中過程や地形形成が、温度異常や水の存在による低粘性領域、既存の地質構造による低摩擦領域に支配されていることを明らかにした (Shibazaki et al., 2016)。

断層レオロジーを考慮した地震発生過程のモデル化：2016 年カイコウラ地震の動的破壊過程のシミュレーションを行い、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らず、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たことを明らかにした (図 6, Ando and Kaneko, 2018)。岩塩を用いた実験により脆性塑性遷移において有効応力則が成り立つこととその物理メカニズムを明らかにした。摩擦抵抗は真実接触面積に比例するが、真実接触面積は固体内の偏差応力に依存し、封圧と間隙水圧を同時に上げても固体内の偏差応力は不変であるために、有効応力の法則が成り立つ (Noda and Takahashi, 2016)。脆性塑性遷移を考慮した地震サイクルモデルに、海溝型巨大地震サイクルによる内陸活断層への応力擾乱を境界条件として与えた数値計算を行い、内陸地震発生タイミングが海溝型超巨大地震サイクルの後半に集中することを明らかにした。

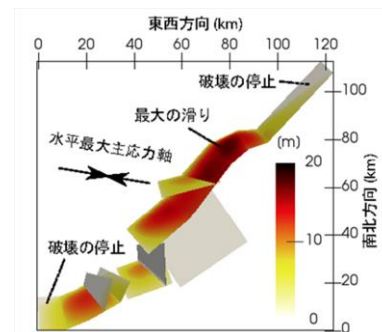


図 6 カイコウラ地震の動的破壊のシミュレーション

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したもののについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください）。
- 一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

成果の詳細リストは地殻ダイナミクスホームページ(<http://cd.dpri.kyoto-u.ac.jp/>)を参照。

発表論文 総数 536 件(査読有り 507 件、査読無し 29 件) Springer のオープンアクセスジャーナル Earth, Planets and Space 誌の本研究課題の特集号 Crustal Dynamics: Unified Understanding of Geodynamics Processes at Different Time and Length Scales (論文数 21 件)は <https://www.springeropen.com/collections/cd> からダウンロード可能である。また、同誌において本研究課題の2回目の特集号 Crustal Dynamics: Toward Integrated View of Island Arc Seismogenesis (募集締め切り 2019 年 6 月)を編集集中である。地学雑誌(東京地学協会発行の査読誌)の本研究課題の特集号を編集集中で、現在 8 件が受理済である。

研究項目 A: 応力・歪・歪速度の推定

A01: 計画研究 計 68 件 (査読有り 66 件、査読無し 2 件)

- ▲地震学的データを用いた応力インバージョン, *[岩田貴樹](#), [吉田圭佑](#), [深畑幸俊](#), 地学雑誌, 査読有, 印刷中, 2019.
- ▲Sendai-Okura earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake in the stress shadow of NE Japan: Detailed fault structure and hypocenter migration, *[Yoshida, K.](#), and [Hasegawa, A.](#), Tectonophysics, 2018.
- ▲A Bayesian approach to estimating a spatial stress pattern from P-wave first-motions, *[Iwata, T.](#), J. Geophys. Res., 2018.
- ◎▲Heterogeneities in stress and strength in Tohoku and its relationship with earthquake sequences triggered by the 2011 M9 Tohoku-Oki earthquake, *[Yoshida, K.](#), [Hasegawa, A.](#), [Yoshida, T.](#), and [Matsuzawa, T.](#), Pure Appl. Geophys., 査読有, 176, 1335-1355, 2018.
- ◎▲Complex microseismic activity and depth-dependent stress field changes in Wakayama, southwestern Japan, *[Maeda, S.](#), [Matsuzawa, T.](#), [Toda, S.](#), [Yoshida, K.](#), and [Katao, H.](#), Earth, Planets Space, 査読有, 70, 2018.
- ▲Hypocenter migration and seismicity pattern change in the Yamagata-Fukushima border, NE Japan, caused by fluid movement and pore pressure variation, *[Yoshida, K.](#), and [Hasegawa, A.](#), J. Geophys. Res., 査読有, 123, 5000-5017, 2018.
- ▲Temporal changes in stress drop, frictional strength, and earthquake size distribution in the 2011 Yamagata-Fukushima, NE Japan, earthquake swarm, caused by fluid migration, *[Yoshida, K.](#), [Saito, T.](#), [Urata, Y.](#), [Asano, Y.](#), and [Hasegawa, A.](#), J. Geophys. Res., 査読有, 122, 10,379-310,397, 2017.
- ▲Receiver function images of the distorted Philippine Sea slab contact with the continental crust: Implications for generation of the 1891 Nobi earthquake (Mj 8.0), *[Iidaka, T.](#), [Igarashi, T.](#), [Hashima, A.](#), [Kato, A.](#), [Iwasaki, T.](#), and The Research Group for the Joint Seismic Observations at the Nobi Area, Tectonophysics, 査読有, 717, 41-50, 2017.
- ▲Why do aftershocks occur? Relationship between mainshock rupture and aftershock sequence based on highly resolved hypocenter and focal mechanism distributions, *[Yukutake, Y.](#), and [Iio, Y.](#), Earth, Planets Space, 査読有, 69, 2017.
- ◎▲Temporal variation of frictional strength in an earthquake swarm in NE Japan caused by fluid migration, *[Yoshida, K.](#), [Hasegawa, A.](#), and [Yoshida, T.](#), J. Geophys. Res., 査読有, 121, 5953-5965, 2016.
- ◎Changes in the stress field after the 2008 M7.2 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake in northeastern Japan, *[Yoshida, K.](#), [Hasegawa, A.](#), [Okada, T.](#), and [Iinuma, T.](#), J. Geophys. Res., 査読有, 119, 9016-9030, 2014.

A02: 計画研究 計 123 件 (査読有り 112 件、査読無し 11 件)

- ▲Thermal history analysis of granitic rocks in an arc-trench system based on apatite fission-track thermochronology: A case study of the Northeast Japan Arc, *[Fukuda S.](#), [Sueoka S.](#), [N. Hasebe, A. Tamura, S. Arai, and T. Tagami](#), Journal of Asian Earth Sciences: X, in press, <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2019.100005>, 査読有, 2019.
- ◎▲Estimate of the contraction rate of central Japan through the deformation of the Philippine Sea slab, *[Fukahata, Y.](#), Progress in Earth and Planetary Science, 査読あり, 6:4, <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0251-0>, 2019.
- ◎▲Triangulation scale error caused by the 1894 Shonai earthquake: a possible cause of erroneous interpretation of seismic potential along the Japan Trench, *[Sagiya, T.](#), [N. Matta, Y. Ohta](#), Earth, Planets and Space, 70:120, doi:10.1186/s40623-018-0890-9, 査読有, 2018.
- ◎▲Crustal deformation process in the Mid-Niigata region of the Niigata-Kobe Tectonic Zone as observed by dense GPS network before, during, and after the Tohoku-oki earthquake, *[Meneses-Gutierrez, A.](#), [T. Sagiya, S. Sekine](#), Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, doi:10.1029/2018JB015567, 査読有, 2018.

- ◎ ▲ Intraplate strike-slip faulting, stress accumulation and shear localization of a crust-upper mantle system with nonlinear viscoelastic material, *Zhang, X., T. Sagiya, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 査読有, 123, doi:10.1029/2018JB016421, 2018.
- ▲ Interseismic crustal deformation in and around the Atotsugawa fault system, central Japan, detected by InSAR and GNSS, *Takada, Y., T. Sagiya, T. Nishimura, Earth, Planets and Space, 査読有, 70, doi:10.1186/s40623-018-0801-0, 2018.
- ▲ First report of (U-Th)/He thermochronometric data across Northeast Japan Arc: Implications for the long-term inelastic deformation. *Sueoka, S., T. Tagami, B. P. Kohn, Earth Planet. Space, 査読有 69:79, 1-18, 2017.
- ◎ ▲ Persistent inelastic deformation in central Japan revealed by GPS observation before and after the Tohoku-oki earthquake, *Meneses-Gutierrez, A. and T. Sagiya, Earth and Planetary Science Letters, 査読有, 450, 366-371, doi:10.1016/j.epsl.2016.06.055, 2016.
- ▲ Landward migration of active folding based on topographic development of folds along the eastern margin of the Japan Sea, northeast Japan. *Otsubo, M., and A. Miyakawa, Quaternary International. 査読有, 2016.

研究項目 B : 媒質特性の推定

B01 : 計画研究 計 92 件 (査読有り 92 件)

- ▲ Source fault model of the 2018 Mw 5.6 northern Osaka earthquake, Japan, inferred from the aftershock sequence, *Kato, A., and Ueda, T., Earth, Planets Space, 査読有, 71, 2019.
- ▲ The architecture of long-lived fault zones: insights from microstructure and quartz lattice-preferred orientations in mylonites of the Median Tectonic Line, SW Japan, *Czertowicz, T. A., Takeshita, T., Arai, S., Yamamoto, T., Ando, J.-I., Shigematsu, N., and Fujimoto, K.-I., Progress in Earth and Planetary Science, 査読有, 6, 2019.
- ▲ Prestate of Stress and Fault Behavior During the 2016 Kumamoto Earthquake (M7.3), *Matsumoto, S., Yamashita, Y., Nakamoto, M., Miyazaki, M., Sakai, S., Iio, Y., Shimizu, H., Goto, K., Okada, T., Ohzono, M., Terakawa, T., Kosuga, M., Yoshimi, M., and Asano, Y., Geophys. Res. Lett., 査読有, 45, 637-645, 2018.
- ◎ ▲ In-situ permeability of fault zones estimated by hydraulic tests and continuous groundwater-pressure observations, *Matsumoto, N., and Shigematsu, N., Earth, Planets Space, 査読有, 70, 2018.
- ◎ ▲ Evolution of the Median Tectonic Line fault zone, SW Japan, during exhumation, *Shigematsu, N., Kametaka, M., Inada, N., Miyawaki, M., Miyakawa, A., Kameda, J., Togo, T., and Fujimoto, K., Tectonophysics, 査読有, 696-697, 52-69, 2017.
- ◎ ▲ Inelastic strain rate in the seismogenic layer of Kyushu Island, Japan, *Matsumoto, S., Nishimura, T., and Ohkura, T., Earth, Planets Space, 査読有, 68, 2016.
- ◎ ▲ Near-trench slip potential of megaquakes evaluated from fault properties and conditions, *Hirono, T., Tsuda, K., Tanikawa, W., Ampuero, J. P., Shibazaki, B., Kinoshita, M., and Mori, J. J., Sci. Rep., 査読有, 6, 28184, 2016.
- ▲ High-temperature fracturing and subsequent grain-size-sensitive creep in lower crustal gabbros: Evidence for coseismic loading followed by creep during decaying stress in the lower crust?, *Okudaira, T., Jeřábek, P., Stünitz, H., and Fusses, F., Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 査読有, 120, 3119-3141, 2015.

B02 : 計画研究 計 49 件 (査読有り 49 件)

- ▲ Frictional properties of simulated chlorite gouge at hydrothermal conditions: Implications for subduction megathrusts, Okamoto, A.S., *Verberne, B.A., Niemeijer, A.R., Takahashi, M., Shimizu, I., Ueda, T., and Spier, C.J., J. Geophys. Res., 査読有, in press.
- ▲ Strain localization and fabric development in polycrystalline anorthite + melt by water diffusion in an axial deformation experiment, *Fukuda, J.-i., Muto, J., and Nagahama, H., Earth, Planets Space, 査読有, 70, 2018.
- ▲ ◎断層の強度に関する論争と学際的アプローチの必要性, *高橋美紀, 廣瀬丈洋, 飯尾能久, 査読有, 124, 725-739, 2018.
- ▲ Depth dependence of the frictional behavior of montmorillonite fault gouge: Implications for seismicity along a décollement zone, *Mizutani, T., Hirauchi, K.-i., Lin, W., and Sawai, M., Geophys. Res. Lett., 査読有, 44, 5383-5390, 2017.
- ▲ Theoretical derivation of flow laws for quartz dislocation creep: Comparisons with experimental creep data and extrapolation to natural conditions using water fugacity corrections, *Fukuda, J.-i., and Shimizu, I., J. Geophys. Res., 査読有, 122, 5956-5971, 2017.
- ▲ Method for correction of differential stress calculations from experiments using the solid salt assembly in a Griggs-type deformation apparatus, *Kido, M., Muto, J., and Nagahama, H., Tectonophysics, 査読有, 672-673, 170-176, 2016.
- ◎ ▲ Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Muto, J., Shibazaki, B., Iinuma, T., Ito, Y., Ohta, Y., Miura, S., and Nakai, Y., Geophys. Res. Lett., 2016.
- ▲ Reaction-induced rheological weakening enables oceanic plate subduction, *Hirauchi, K., Fukushima, K., Kido, M., Muto, J., and Okamoto, A., Nat. Commun., 査読有, 7, 12550, 2016.

B03 : 計画研究 計 91 件 (査読有り 84 件、査読無し 7 件)

- ▲ Geochemical mapping of slab-derived fluid and source mantle along Japan arcs, *Nakamura, H., Iwamori, H., Nakagawa, M., Shibata, T., Kimura, J.-I., Miyazaki, T., Chang, Q., Vaglarov, B. S., Takahashi, T., and Hirahara, Y., Gondwana

Res., 査読有, 70, 36-49, 2019.

- ◎ Roles of Hydrous Lithospheric Mantle in Deep Water Transportation and Subduction Dynamics, *Nakao, A., Iwamori, H., Nakakuki, T., Suzuki, Y. J., and Nakamura, H., Geophys. Res. Lett., 45, 5336-5343, 2018.
- ◎ ▲ Distribution of slab-derived fluids around the edge of the Philippine Sea Plate from Central to Northeast Japan, *Nakamura, H., Iwamori, H., Ishizuka, O., and Nishizawa, T., Tectonophysics, 査読有, 723, 297-308, 2018.
- ◎ Effects of water transportation on subduction dynamics: Roles of viscosity and density reduction, *Nakao, A., Iwamori, H., and Nakakuki, T., Earth Planet. Sci. Lett., 査読有, 454, 178-191, 2016.
- ◎ ▲ A consistent model for fluid distribution, viscosity distribution, and flow-thermal structure in subduction zone, *Horiuchi, S.-s., and Iwamori, H., J. Geophys. Res., 2016.
- Simultaneous measurements of elastic wave velocities and electrical conductivity in a brine-saturated granitic rock under confining pressures and their implication for interpretation of geophysical observations, *Watanabe, T., and Higuchi, A., Prog Earth Planet Sci., 査読有, 2, 2015.
- ▲ Electrical image of subduction zone beneath northeastern Japan, *Ichiki, M., Ogawa, Y., Kaida, T., Koyama, T., Uyeshima, M., Demachi, T., Hirahara, S., Honkura, Y., Kanda, W., Kono, T., Matsushima, M., Nakayama, T., Suzuki, S., and Toh, H., J. Geophys. Res., 査読有, 120, 7937-7965, 2015.
- Arima hot spring waters as a deep-seated brine from subducting slab, *Kusuda, C., Iwamori, H., Nakamura, H., Kazahaya, K., and Morikawa, N., Earth, Planets Space, 査読有, 66, 119, 2014.

研究項目 C : 数値モデル化

C01 : 計画研究 計 45 件 (査読有り 43 件、査読無し 2 件)

- ◎ ▲ Mechanism of subsidence of the Northeast Japan forearc during the late period of a gigantic earthquake cycle, *Sasajima, R., Shibazaki, B., Iwamori, H., Nishimura, T., & Nakai, Y., Scientific reports, 9, 2019.
- ▲ Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, Nishimura, T., Yokota, Y., Tadokoro, K., and Ochi, T., Geosphere, 査読有, 14, 535-551, 2018.
- ▲ Dynamic Rupture Simulation Reproduces Spontaneous Multifault Rupture and Arrest During the 2016 Mw7.9 Kaikoura Earthquake, *Ando, R., and Kaneko, Y., Geophys. Res. Lett., 査読有, 45, 12,875-812,883, 2018.
- ◎ ▲ Dynamic rupture propagation on geometrically complex fault with along-strike variation of fault maturity: insights from the 2014 Northern Nagano earthquake, *Ando, R., Imanishi, K., Panayotopoulos, Y., and Kobayashi, T., Earth, Planets Space, 査読有, 69, 2017
- ▲ San-in shear zone in southwest Japan, revealed by GNSS observations, *Nishimura, T., and Takada, Y., Earth, Planets Space, 査読有, 69, 2017.
- ◎ ▲ Earthquake sequence simulations with measured properties for JFAST core samples, *Noda, H., Sawai, M., and Shibazaki, B., Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 査読有, 375, 20160003, 2017.
- ▲ Implementation into earthquake sequence simulations of a rate- and state-dependent friction law incorporating pressure solution creep, *Noda, H., Geophys. J. Int., 査読有, 206, 2016.
- ◎ ▲ The effective stress law at a brittle-plastic transition with a halite gouge layer, *Noda, H., and Takahashi, M., Geophys. Res. Lett., 査読有, 43, 1966-1972, 2016
- ◎ ▲ Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake, *Iinuma, T., Hino, R., Uchida, N., Nakamura, W., Kido, M., Osada, Y., and Miura, S., Nat. Commun., 査読有, 7, 13506, 2016.
- ◎ ▲ Heterogeneous stress state of island arc crust in northeastern Japan affected by hot mantle fingers, *Shibazaki, B., Okada, T., Muto, J., Matsumoto, T., Yoshida, T., and Yoshida, K., J. Geophys. Res., 査読有, 121, 3099-3117, 2016.

公募研究 計 121 件 (査読有り 114 件、査読無し 7 件)

- ▲ Evidence for multiple stages of serpentinization from the mantle through the crust in the Redwood City Serpentinite mélange along the San Andreas Fault in California, *Uno, M., and Kirby, S., Lithos, 査読有, in press, 2019.
- ▲ Evolution of hydraulic and elastic properties of reservoir rocks due to mineral precipitation in CO₂ geological storage, *Tsuji, T., Ikeda, T., and Jiang, F., Comput. Geosci., 査読有, 126, 84-95, 2019.
- ▲ Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip, *Nakajima, J., and Uchida, N., Nature Geoscience, 査読有, 11, 351-356, 2018.
- ▲ What is the origin of macroscopic friction?, *Sakuma, H., Kawai, K., Katayama, I., and Suehara, S., Science Advances, 査読有, 4, eaav2268, 2018.
- ▲ Volcanic activities triggered or inhibited by resonance of volcanic edifices to large earthquakes, *Namiki, A., Rivalta, E., Woith, H., Willey, T., Parolai, S., and Walter, T. R. Geology, 47, 67-70, 2018.
- ▲ Fluid inclusions in jadeitite and jadeite-rich rock from serpentinite melanges in northern Hispaniola: Trapped ambient fluids in a cold subduction channel, *Kawamoto, T., Hertwig, A., Schertl, H.-P., and Maresch, W. V., Lithos, 査読有, 308-309, 227-241, 2018.
- ▲ Seismogenesis of dual subduction beneath Kanto, central Japan controlled by fluid release, *Ji, Y., Yoshioka, S., Manea, V.C. and Manea, M., Seismogenesis of dual subduction beneath Kanto, central Japan controlled by fluid release. Scientific reports, 7, 16864, 2017.

▲ A computerized method to estimate friction coefficient from orientation distribution of meso-scale faults, Sato, K., J. Struct. Geol., 査読有, 89, 44-53, 2016.

Electrical conductivity of NaCl-H₂O fluid in the crust, *Sakuma, H., and Ichiki, M., J. Geophys. Res., 査読有, 121, 577-594, 2016.

著書など 30件

*Tagami, T., Application of fission track thermochronology to analyze fault zone activity, in Fission track thermochronology and its application to geology, edited by M. G. Malusa and P. G. Fitzgerald, p. 221-233, Springer International Publishing, 2019

*Kaneko, Y., Takeshita, T., Watanabe, Y., Shegematsu, N., Fujimoto, K., Alteration reaction and mass transfer via fluids with progress of fracturing along the Median Tectonic Line, Mie Prefecture, southwest Japan. In Ito, Y. ed., "Evolutionary Models of Convergent Margins - Origin of Their Diversity", ISBN 978-953-51-5130-2, InTech, 117-138, 2017

ホームページ・新聞等 (ホームページ1件、新聞215件、雑誌14件、テレビ111件、その他15件)

ホームページ 地殻ダイナミクスホームページ, <http://cd.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

新聞 215件

飯尾能久, 満点計画、読売新聞, 2019年1月16日

西村卓也, クローズアップ2018 ー大阪・震度6弱 都市防災、もろさ露呈 交通・水道に大打撃、毎日新聞、2018年6月19日

向吉秀樹, 2018年島根県西部地震、朝日新聞, 2018年4月9日

飯沼卓史, 大震災震源域の周辺で滑り, 三陸沖北部の地震早める?, 東京新聞, 2016年11月17日

廣野哲朗, 阪大など 断層滑り量岩石で予測 南海トラフ 30~50メートルと試算, 毎日新聞, 2016年6月21日,

廣内大助, 熊本地震, 新聞, 朝日新聞朝刊, 2016年5月19日

松澤暢, 宮城沖地震37年 37.1年間隔 今は「不明」, 河北新報, 2015年6月12日

飯尾能久, 県西部地震震源域 1080カ所に地震計, 毎日新聞, 鳥取・島根版, 26面, 2015年3月24日,

雑誌 14件

松澤暢, なぜ M9 地震はおきたのか?, 東北地方太平洋沖地震の真相に迫る, Newton, 2016年6月号, pp76-89.

深畑幸俊, Science and technology, Preparing for the Big One, The Economist, 2016年4月23日, p68.

テレビ 111件

飯尾能久, 震源周辺に臨時地震計設置 専門家グループ 地震の詳細調査へ, 7時のニュース, NHK, 2018年6月19日, 19時.

向吉秀樹, 2018年島根県西部地震に関する地質学的背景について解説, NHK 松江放送局しまねっとNEWS610, しまねっと8:45, 2018年4月12日

市來雅啓, NHK スペシャル, 列島誕生 ジオ・ジャパン 第2集 奇跡の島は山国となった, NHK, 2017年7月30日, 21:00~21:49, (本領域の成果の紀伊半島のMT観測の様子とその電気伝導度構造の地質学的な解釈の紹介).

西村卓也, NHK スペシャル「緊急報告 熊本地震活断層の脅威」, NHK 総合, 2016年4月16日, 21:00-21:50

飯尾能久, 西部地震被災地で防災学ぶ, NHK, 2015年6月19日, 夕方のニュース

飯尾能久, 朝のニュース, 鳥取県西部地震余震域で地震計の設置開始, NHK テレビ, 2015年3月23日,

主催シンポジウム等の状況

国際シンポジウム 計2件

The Second International Symposium on Crustal Dynamics (ISCD-2) -Toward integrated view of island arc seismogenesis- (京都府宇治市)。2019年3月1日~3月3日。口頭発表43件、ポスター発表62件。参加者123名、うち海外からの招聘研究者13名。

Crustal Dynamics 2016: Unified Understanding of Geodynamics Processes at Different Time and Length Scales (岐阜県高山市)。2016年7月19日~7月22日。口頭発表46件、ポスター発表82件。参加者142名。うち海外からの参加者31名(招聘研究者14名)。

本研究課題が主催・共催した国際学会の特別セッション、国際ワークショップ等 計7件

10th ACES (APEC Cooperation for Earthquake Science) International Workshop – Toward Comprehensive Understanding of Earthquake Physics-, 2018年9月25日~28日、兵庫県南あわじ市。共催。

Asia Oceania Geosciences Society 2018 “Bridging Scales at Mobile Belts: Fault Rheology and Earthquake Physics”, 2018年6月8日, 米国ホノルル市、主催。

IAG-IASPEI2017, “Crustal dynamics: Multidisciplinary approach to seismogenesis”, 2017年7月30日~8月4日, 兵庫県神戸市, 主催。

JpGU-AGU Joint Meeting 2017, “Dynamics in mobile belts”, 2017年5月23日~24日, 千葉県千葉市、主催。

Asia Oceania Geosciences Society 2016, “Fault Rheology and Earthquake Mechanics”, 2016年8月5日, 中国北京市、主催。

Asia Oceania Geosciences Society 2014, “Crustal Dynamics: Toward Comprehensive Understanding of Inland Deformation”, 2014年7月29日, 北海道札幌市、主催。

地殻ダイナミクス全体研究発表会 計3件

2017年度全体集会 2017年9月24日～27日、鳥取県米子市、口頭発表49件、ポスター発表50件。参加者107名(うち、学生・院生42名)。

2015年度全体会議 2015年9月27日～30日、宮城県栗原市、口頭発表39件、ポスター発表45件。参加者102名(うち学生・院生38名)。

キックオフ会議 2014年10月19日～21日、京都府宇治市、口頭発表34件、ポスター発表14件。参加者83名(うち学生・院生13名)。

本研究課題が主催・共催した国内学会の特別セッション、ワークショップ等 計10件

日本地球惑星科学連合 2018年大会「変動帯ダイナミクス」, 2018年5月22日～23日、千葉県千葉市、主催。

日本地球惑星科学連合 2016年大会「変動帯ダイナミクス」, 2016年5月22日～26日、千葉県千葉市、主催。

日本地球惑星科学連合 2015年大会「変動帯ダイナミクス」, 2015年5月24日～28日、千葉県千葉市、主催。

本研究課題が主催した融合研究集会 計16件

地殻ダイナミクス研究集会「絶対応力の解明」, 2019年1月12日～13日、京都府宇治市、主催。

地殻ダイナミクス「B01班を中心とする融合研究集会」, 2018年1月11日～12日、東京都文京区、主催。

地殻ダイナミクス「熊本地震融合研究集会」, 2017年1月5日、京都府京都市、主催。

2016年熊本地震および関連地震に関する地質学 ～測地学時間スケールの包括的な地殻変動の理解, 2016年9月5日、京都府宇治市、主催。

地殻ダイナミクス「B01班を中心とする融合研究集会」, 2015年3月15日、鳥取県米子市、主催。

アウトリーチ活動 広報誌5件、一般講演会167件、授業26件、サイエンスカフェ6件、プレスリリース4件

広報誌 5件

地殻ダイナミクスニュースレターVol.1(2016年4月1日発行)、Vol.2(2017年4月1日発行)、Vol.3(2018年4月1日発行)、Vol.4(2019年4月1日発行)、Vol.5(2020年4月1日発行)、発行部数は各600部

一般講演会 174件

本研究課題が主催した一般講演会 一般の方も観測に協力した0.1満点観測を実施した鳥取県・島根県の共催で、4回の一般講演会を開催した(計23講演、うち本研究課題の講演19件)

「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—」共催:鳥取県、2018年10月14日、鳥取県米子市、5講演、100名

「中国地方の地震と断層～山陰地震帯の特徴」共催:島根県、2018年10月13日、島根県松江市、6講演、100名

「鳥取県中部地震1年地震防災講演会」共催:鳥取県、2017年9月23日、鳥取県米子市、6講演、100名

「鳥取県西部地震15年地震防災講演会」共催:鳥取県、2015年3月14日、鳥取県米子市、6講演、200名

その他の一般講演会 155件

松澤暢, 東北地方太平洋沖地震と、その後の研究で分かっていた最新の地震研究成果と今後の可能性, 防災推進国民大会 2017, 仙台国際センター(宮城), 2017年11月27日, 60名

西村卓也, 地殻変動からみた南海トラフ巨大地震と熊本地震, 茨木市消防局, 茨木市立男女共生センターローズ WAM, 2016年10月3日, 200名

飯尾能久, 地震被害の軽減に向けた研究者たちのメッセージ-阪神・淡路大震災20年:地震関連科学の到達点と新たな決意-, 2015年1月24日, 内陸地震の発生過程に関する研究, 100名。

飯尾能久, 内陸地震はなぜ起こるの?, 高槻市大学交流センター事業 夏休み子ども大学, 2014年8月23日, 40名

小・中・高向け授業 26件

飯尾能久, 内陸地震はどうして起こるのか?, 東別院小学校出前授業, 2019年1月21日、亀岡市, 15名

加藤愛太郎, 地震学入門, 静岡県立掛川西高等学校・進路課, 静岡県立掛川西高等学校, 2016年9月7日, 40名

松澤暢, 地震の予測はどこまで可能か, 秋田県立秋田高校, 2015年6月11日, 88名。

サイエンスカフェ 6件

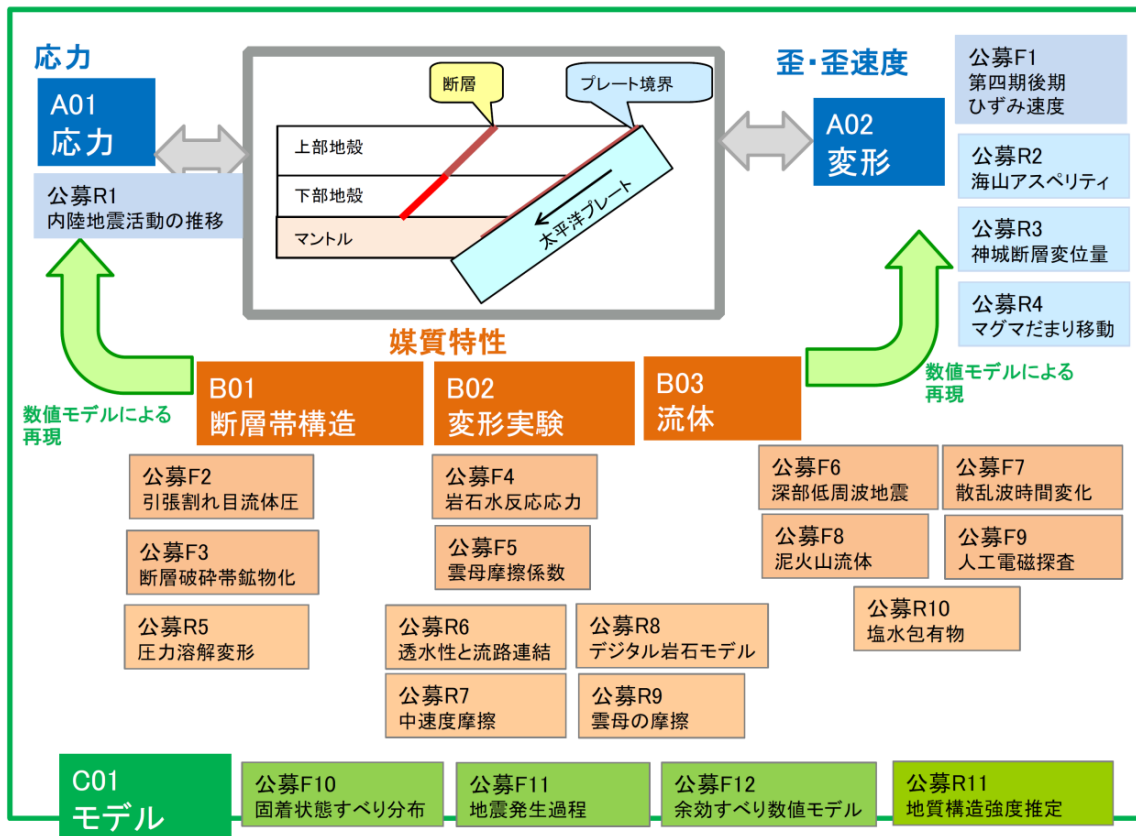
飯尾能久, 地震学×減災学対話 2014-2015 第3回, 2015年1月31日, 断層直下のやわらかいところ, 50名

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2 ページ以内）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

本領域では、4・5 ページに示した基本的な研究戦略に沿って、3つの研究項目、A：応力・歪・歪速度の推定、B：媒質特性の推定、C：数値モデル化と対応する6つの計画研究、A01 応力、A02 変形、B01 断層構造、B02 変形実験、B03 流体、C01 モデルを設けている。各計画研究は、領域全体の研究戦略において明確に位置づけられており、下記の図に示すように、領域の構成自体が、研究目的を達成するために、関係する研究組織間の連携を図るように形作られている。また、A02、B01、B03 など、研究手法ではなく研究対象に基づいて組織された計画研究は、各班そのものが異なった研究手法を持つサブグループからなっており、組織内でも幅広い融合・連携研究が行われている。

以下においては、公募研究を含めて、2つの融合研究を中心に、より具体的に、研究組織間の連携状況について述べる。



応力場の理解

A01 が、地震学的な手法により大地震の余震域で差応力の大きさの推定を行っており、この結果の検証のために、応力場の時空間的な変化を解明する必要から、公募 R1 の内陸地震活動の推移と連携した。応力場の時間変化については、流体の効果が重要であり、B01 の断層運動と流体に関する地質的な調査研究、B03 の間隙水圧の研究や、公募 F2, F6～F8, R6, R8 による流体の挙動の時間変化の研究とも連携を行った。関連する媒質特性の解明においては、内陸断層および沈み込みプレート境界断層の強度分布モデルの解明が重要であり、地質的(B01)および実験的(B02)な断層強度の解明、B02 の公募 F3, F5, R5, R7, R9 の断層破碎帯の強度モデルや摩擦強度等の研究と連携して進めた。これらの知見に基づいて数値モデルを構築して、観測された間隙水圧の時間変化等を再現した (C01)。上部地殻の断層強度の解明においては、B02 が、B01 や A02 と共同して対象地域を選定し、共同して野外調査や天然断層試料採取を行なうなど連携して進めた。

歪速度場の理解

A02 により、新潟地域において、歪速度の短波長成分が非弾性変形の寄与であること、それが地質学的に推定されている歪速度の値と整合的であることが見出された。公募 F1 の新潟盆地の段丘の変形研究や同じ歪集中帯の調査である R3 との連携が非常に有効であった。列島規模の歪速度場については、A02 により、測地学的手法による東北沖地震後の余効変動による歪場や垂直変動の解析、加えて、地質学的な手法により脊梁山脈の

隆起速度の推定が進められた。公募 R2, R4 による基礎的な研究とも連携を行った。B02 により、岩石変形実験の知見を基に下部地殻・上部マントルの変形特性が、B03 により、地震波速度構造や電磁気学的構造等の観測情報から地殻流体の分布の推定が進められた。以上の結果を総合して、C01 では、B02 及び B03 により推定された媒質の不均質レオロジー特性を考慮し、公募 F9~12, R10, R11 による知見を参考にして、変形(余効変動)や応力場のモデル化を進め、歪速度場を再現した。

地球物理学と地質学の融合研究

この問題については、以前から重要性が指摘されているが、本領域では 2 例ほど先進的な連携研究を行った。1 点目は、跡津川断層付近における歪速度の研究である。A02 により、測地的な歪速度が地質的な歪速度より数倍大きいことが推定され、この不一致の原因が問題となっているが、B02、B01 により、活断層の存在が知られていない地域において多数の中・小規模断層が見出され、主断層以外の場所での上部地殻の非弾性変形による可能性が示された。2 点目は鳥取県西部地域における A01、B01 による連携研究である。2000 年鳥取県西部地震の余震域で地質調査により 1500 枚にも及ぶ小断層が検知され、その断層の方位分布が、地震観測から推定された余震の断層面の方位分布と極めて良く一致することが見出された。

地殻流体

地殻流体は、媒質特性に大きな影響を持ち、応力場と歪速度場の両方に大きく関係している。本領域では、B03 を中心に、地殻流体分布の静的なマッピングからフラックスや間隙水圧の推定へと進めており、流体分布マッピンググループとフラックス計測グループの情報交換や合同議論を頻繁に行った。また、公募研究による流体相および固体-流体混相の物性の知見を取り入れ(公募 F3,F4,R5,R6, R8)、解析を進めている。これらの知見は B02、C01 における物性評価や島弧スケール変形(特に余効変動)モデル化に用いられた。また、2014 年長野県北部の地震や 2016 年熊本地震後の流体の緊急観測結果については、A01、A02、B01 による地震・地殻変動等の知見について情報交換を行ない、適切な流体移動モデルを作成した。

公募研究リスト 前期

- F1(A02) 段丘面の長波長変形に着目した第四紀後期のひずみ速度の解明 (廣内大助)
- F2(B01) 引張割れ目方位解析による地殻応力・流体圧比決定手法の開発 (佐藤 活志)
- F3(B01) 断層破碎帯の鉱物化シミュレーションと断層強度モニタリング手法の開発 (辻 健)
- F4(B02) 岩石-水反応による地殻応力発生機構とその時間発展の解明 (宇野正起)
- F5(B02) 雲母・粘土鉱物の最大摩擦係数の物理 (佐久間 博)
- F6(B03) 深部低周波地震は地殻への水の供給と関係しているのか? (高橋 浩晃)
- F7(B03) 散乱波の波形の時間変化を用いた地殻流体の挙動の解明 (小菅正裕)
- F8(B03) 多元素同位体指標を用いた西南日本前弧の海底泥火山流体の起源の解明 (西尾嘉朗)
- F9(B03) 人工電磁探査を用いた沈み込み後の地殻流体の実態解明 (笠谷貴史)
- F10(C01) 東北地方太平洋沖地震の地震前・地震時・地震後の固着状態とすべり分布の推定 (吉岡祥一)
- F11(C01) 断層面の不均一性と地震発生過程に関する実験的研究 (山口哲生)
- F12(C01) 余効すべり過程の理論解析と数値モデリングに基づく摩擦特性の推定 (有吉慶介)

公募研究リスト 後期

- R1(A01) 東北地方太平洋沖地震後の内陸地震活動の推移に関する研究 (内田 直希)
- R2(A02) 海山アスペリティ/海山クリープ仮説の地質学的検証 (山口 飛鳥)
- R3(A02) 浅層反射法地震探査を用いた 2014 年神城断層地震時のネットでの変位量分布 (松多 信尚)
- R4(A02) 巨大地震の後に山体下のマグマ溜まりが上昇も下降もすることを説明する実験 (並木 敦子)
- R5(B01) 圧力溶解変形の予測に向けた粒間水の性質の解明 (西山 直毅)
- R6(B02) 岩石-流体反応の力学応答と流路発展から探る沈み込み帯の透水性と流路連結度 (宇野 正起)
- R7(B02) 中速度領域における摩擦への温度効果と地震発生直前のプロセス解明 (澤井みち代)
- R8(B02) 断層進化過程の解明に向けた階層型デジタル岩石物理化学モデルの開発 (辻 健)
- R9(B02) 真実接触面における雲母・粘土鉱物の摩擦の物理 (佐久間 博)
- R10(B03) 沈み込み帯マントルウェッジ捕獲岩中の塩水包有物に溶存するイオンの定量分析 (川本 竜彦)
- R11(C01) 海溝型巨大地震の最大規模推定に資する地質構造の強度推定 (宮川 歩夢)

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

A01 では東北地方と山陰地方で、それぞれ 80 観測点分のロガーと地震計を導入したが、これだけでは不足するため、既設の臨時観測点の一部について撤収を延期し、また、一部については最適な場所に再配置するなどして対応した。これらの観測点から得られたデータは B01 や B03 とも共有され、地殻応力のみならず、詳細な破壊過程や流体の分布の推定にも有効活用された。A01 で得られた応力の情報は C01 に伝えられ、最適なモデルの構築に役立てられた。

A02 で購入した GNSS 観測装置は、それぞれ糸魚川-静岡構造線断層帯、山陰地方、奥羽脊梁地域の連続観測点に設置され、順調にデータ取得が行われた。これらは、各大学の既存の観測網を稠密化するために設置され、詳細な地殻変動の議論に活用された。糸魚川-静岡構造線断層帯周辺では 2014 年長野県北部地震前後の地殻変動パターンの変化を、山陰地方では 2016 年鳥取県中部地震の地震時地殻変動を検出するのに重要な役割を果たし、地殻変形の理解に重要な貢献をした。

B01 では、平成 26 年度には 5 種類、6 台の備品を購入し、それぞれ断層すべり面の粗さ、鉱物の格子欠陥濃度や微量成分濃度の空間分布、試料中の水の存在形態および分布、脆弱試料の非破壊急速凍結、地震活動の解析の研究に有効に使用されている。平成 27-28 年度には断層深部形状検出システムの開発・製作に多額の研究費を使用した。本システムは計画通りの仕様を満足し、低消費電力で多点オンライン観測をするという画期的なシステムとなった。平成 29 年度以降、本システムを採用した 1000 台の地震計は有効に活用され、鳥取県西部地震震源域の稠密地震観測に重要な役割を果たした。

B02 では代表・分担・連携（協力）研究者の有する現有の実験装置を改良して用いるなどして、設備を最大限有効利用している。東北大では既存のガス圧変形試験機を改造する形で、ねじり機構による大変位剪断機構を実現した。連携研究拠点の海洋技術開発センター高知コア研究所からは山口大学に高速摩擦試験機を移設し、新たな実験室を整備した。熱水回転摩擦試験機は分担・連携研究者の意見をふまえて設計製作し、共同利用施設として利便性の高い東京大学地震研究所に設置した。試料解析に用いる電子顕微鏡（後方電子散乱像解析装置付き）や顕微赤外分光装置も現有設備を用いているため、長時間のマッピング作業においても機器使用料は発生していない。研究期間内に 3 名のポスドク研究員を雇用し、若手の育成にも努めた。

B03 では、電磁気観測における 2 式の広帯域 MT 機材の購入、観測点の用地交渉・設置・撤収の費用、MT 装置の修理費用、地殻流体の観測（東北および西南日本における深部由来流体の水・ガスサンプル取得、揚水試験等、2014 年長野県北部の地震・2016 年熊本地震後の緊急調査等を含む）、流体計測に関わる費用（野外質量分析装置作成のための消耗品を含む）、物性測定実験に関わる観察装置や実験消耗品、それらに関わるパートタイム支援雇用費、謝金等、概ね当初計画通りの支出内容となっている。また、（1）電磁気観測については、既存の広帯域 MT 観測装置 10 式と合わせて東北地方および近畿地方の観測にフル稼働させている、（2）地殻流体の分析には、すべて既存の分析装置（例えば、ICP-MS、液体クロマトグラフィー、質量分析計など）を用いている、など、設備の有効活用が図られている。

C01 では、データ解析、有限要素法解析、地震発生サイクルの計算、プログラム開発のために、ワークステーションを各機関で購入し、有効に活用した。東京大学ではワークステーションを平成 26 年度、27 年度に分けて購入したが、一体運用して動的破壊過程の高速並列計算を実施した。平成 29 年度、30 年度は、博士研究員を雇用し、B03（流体班）や A01（応力班）と連携することで他班の研究成果を有効活用し、東北沖地震サイクルにおける島弧の変形や応力変動に関する融合モデルを構築した。

総括班広報に関して、本領域のホームページ公開にあたっては、京都大学の提供する安価なサーバーに Web サイトをおくとともに、業者に委託した基本デザイン以外のコンテンツ（写真撮影を含む）、英文ページ用の翻訳と、日々の更新を総括班メンバーと専任の秘書が行なうことで経費をできるだけ軽減している。またニュースレターもホームページと同じ業者に委託することでデザイン料を節約した。また、本領域が主催する国際集会のホームページについては、総括班メンバーが自作することにより経費の節約を行うとともに、国際集会や全体集会などの研究集会の開催に当たっては、地方公共団体などによる開催支援経費を獲得して、会場費などの節約に努めた。

・研究費の使用状況（（１），（２），（３）を合わせて３ページ以内）

（１）主要な物品明細（計画研究において購入した主要な物品（設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。）について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。）

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価（円）	金額（円）	設置(使用)研究機関
26	活断層集中域稠密地震観測装置	(株) 近計システム社製 EDR-X7000 他	1	34,214,400	34,214,400	京都大学
	顕微レーザーラマン高速イメージング装置	レニショー(株)	1	14,990,400	14,990,400	横浜国立大学
	GNSS 受信機	ライカジオシステムズ GR10	6	1,465,200	8,791,200	京都大学
	走査型プローブ顕微鏡一式	株式会社島津製作所製・SPM-9700	1	8,080,020	8,080,020	北海道大学
	GNSS 受信機	ライカジオシステムズ GR10	5	1,479,600	7,398,000	東北大学
27	稠密地震観測用データロガー他一式	近計システム社製 ロガー EDR-X7000 (30台) 他一式	1	20,995,200	20,995,200	京都大学
	ADU-07e 2 個 他 5 点一式	(独) Metronix 社製	1	10,999,800	10,999,800	東北大学
28	稠密地震観測用データロガー 800 台製作	(株) 近計システム	1	38,199,600	38,199,600	九州大学
	回転式断層摩擦物性解析装置	カナデン・特注品	1	23,466,256	23,466,256	東京大学
	回転式断層摩擦試験用圧力容器	プレテック・HTPV-3050-RT V	1	21,870,000	21,870,000	東京大学
	稠密地震観測用データロガー 200 台製作	(株) 近計システム	1	9,882,000	9,882,000	九州大学
29	高温高压変形実験装置 トーション機構	プレテック・HTPD-1222-TSCS	1	13,300,000	13,300,000	東北大学

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成26年度】

・旅費

1. C01 班 米国地球物理学連合 2014 年秋季大会（米国、サンフランシスコ）3 名 992,750 円 研究成果発表のため

・人件費・謝金

1. B03 班 非常勤研究支援員雇用 1,171,080 円 流体試料データ解析のため
2. A01 班 非常勤職員雇用 452,134 円 地震観測データ読み取り・資料整理のため

・その他

1. B03 班 広帯域 MT 観測作業業務委託 7,830,000 円 宮城県石巻北地区の比抵抗構造の推定を行うため
2. A01 班 臨時観測点候補地調査業務委託 2,908,310 円 臨時地震観測点の設置場所の調査を行うため
3. A02 班 鳥取県内 GPS アンテナ設置工事 1,925,467 円 GPS 観測のため

【平成27年度】

・旅費

1. C01 班 国際測地学・地球物理学連合 2015 年総会（チェコ、プラハ）3 名 855,102 円 研究成果発表及び議論のため

・人件費・謝金

1. B02 班 学術研究支援員雇用（1 名） 2,821,509 円 石英再結晶組織の電子顕微鏡解析のため
2. A01 班 非常勤職員雇用 2,762,553 円 地震観測データ読み取り・資料整理のため
3. B03 班 非常勤研究支援員雇用（2 名） 2,581,312 円 流体試料データ解析のため

・その他

1. B01 班 深部断層形状検出システムの開発一式 10,897,200 円 鳥取県西部地震震源域での地震観測に使用する超高密度多点地震観測装置の開発のため
2. B03 班 広帯域 MT 観測作業業務委託 7,938,000 円 紀伊半島周辺の比抵抗構造の推定を行うため
3. A01 班 臨時観測点設置補助業務委託 4,428,216 円 臨時地震観測点の設置を行うため
4. A02 班 鉍物分離パイロット処理 702,000 円 熱年代分析のため

【平成28年度】

・旅費

1. C01 班 米国地球物理学連合 2016 年秋季大会（米国、サンフランシスコ）4 名（学生 2 名を含む） 1,238,589 円 研究成果発表及び議論のため

・人件費・謝金

1. B02 班 ポスドク研究員雇用（2 名） 5,027,141 円 電子顕微鏡解析と顕微赤外分光法解析のため
2. B03 班 非常勤研究支援員雇用（2 名） 2,516,503 円 流体試料データ解析のため
3. A01 班 非常勤職員雇用 1,313,983 円 地震観測データ読み取り・資料整理のため

・その他

1. B03 班 広帯域 MT 観測作業業務委託 8,208,000 円 紀伊半島周辺の比抵抗構造の推定を行うため
2. A01 班 地震観測データ自動処理業務委託 5,767,200 円 地震観測データの検出等の自動処理を行うため
3. A01 班 臨時観測点保守業務委託 2,890,710 円 地震観測点の保守をおこなうため
4. A02 班 試料分析委託 636,687 円 熱年代分析のため

【平成29年度】

・旅費

1. C01 班 米国地球物理学連合 2017 年秋季大会（米国、ニューオーリンズ）7 名（学生 3 名を含む） 2,237,1630 円 研究成果発表及び議論のため
2. A01 班 米国地震学会 2017 年春季大会（米国、デンバー）と欧州地球科学連合 2017 年総会（オーストリア、

ウィーン) 1名 611,168円 研究成果発表及び議論のため

・人件費・謝金

1. B02班 ポスドク研究員雇用(2名) 6,664,453円 電子顕微鏡解析と摩擦実験試料解析のため
2. C01班 ポスドク研究員雇用(1名) 4,375,950円 東北沖地震サイクルにおける島弧の変形と応力変動の融合モデル構築のため
3. B01班 学術研究支援員雇用(1名) 4,257,616円 下部地殻剪断帯の変形微細組織解析のため
4. A01班 非常勤職員雇用 2,075,557円 地震観測データ読み取り・資料整理のため
5. A02班 非常勤職員雇用(1名) 629,561円 地殻変動データ整理のため

・その他

1. B01班 断層深部形状検出システム保守業務 8,644,320円 鳥取県西部地震震源域での超多点稠密観測の稼働状況監視、不良の場合の対応、データ処理業務のため
2. A01班 地震観測データ自動処理・手動検測業務委託 3,466,800円 地震観測データの検出などの自動及び手動で処理を行うため
3. A01班 臨時観測点保守業務委託 2,996,361円 地震観測点の保守をおこなうため

【平成30年度】

・旅費

1. C01班 米国地球物理学連合2018年秋季大会(米国、ワシントン)4名(学生2名を含む) 1,355,023円 研究成果発表及び議論のため
2. A01班 アジア・オセアニア地球科学学会第15回大会(米国、ホノルル)3名 756,052円 研究成果発表及び議論のため
3. A02班 アジア・オセアニア地球科学学会第15回大会(米国、ホノルル)2名 749,407円 研究成果発表及び議論のため

・人件費・謝金

1. C01班 ポスドク研究員雇用(1名) 4,939,194円 東北沖地震サイクルにおける島弧の変形と応力変動の融合モデル構築のため
2. B01班 学術研究支援員(1名)の雇用 4,257,616円 下部地殻剪断帯の変形微細組織解析のため

・その他

1. A01班 臨時観測点保守および撤去業務委託 7,383,705円 臨時地震観測点の保守及び撤去のため

(3) 最終年度(平成30年度)の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

計画研究 B02 班では圧力 300 MPa の新規の熱水式回転摩擦試験機の設計開発を進めていたが、ユトレヒト大学(オランダ)と共同研究で 300 MPa の摩擦特性の実験データが得られる一方、より高圧条件での実験の必要性が明らかになった。そこで目標圧力をさらに高圧(500 MPa)に設定して圧力容器を設計開発したが、このことにより当初計画より遅延が生じたため、最終年度後に経費を繰越しして実験を継続する。

計画研究 B03 班では、地殻流体のフラックスの推定のための観測においてトラブルが生じたため、関連する経費の繰り越しを行った。

国際活動支援班においても、含水鉱物の摩擦についての補足データ取得と新規開発試験機に関する技術的検討、および固体圧式変形試験機で得られたデータの応力精度の検討のため、ユトレヒト大学およびオルレアン大学(フランス)との共同研究を継続する。

融合研究の余効変動の数値モデリングの結果、東北沖プレート境界深部(～100 km)で顕著な余効すべりが進行していることが推定された。そこで国際活動支援班では、この部分の蛇紋岩等のレオロジー特性を検証するためパリ師範学校(フランス)とも新たに国際共同研究を行なう。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

地震のイメージの変更

内陸の地震発生域における差応力の大きさが、歪集中帯においては、従来知られている値の半分から 1/10 程度であると推定されたことは、当該学問分野に大きなインパクトを与えた。このことは、アメリカ西海岸のサンアンドレアス断層における論争からその可能性が予想できたはずだが影響は大きかったようである。それは、地震を起こす原動力という、地震現象において最も基本的なパラメータについて、これまで信じられてきたことが必ずしも正しくなかったことに対する驚きや反省があると思われる。この背景には、「固い岩盤が大きな力で壊される」というような、世間一般でよく語られる地震のイメージがあると思われる。阪神淡路大震災の後の地震予知研究に対する大きな批判の一つに、「ガラスに力を加えたときに、どれだけ加えると割れるのかは予測出来ない。地震も同じではないか？」というものがあつた。ガラスのような均質な固い物質の破壊現象の予測が難しいことはよく知られているためである。地震は、岩盤中の既存の弱面である断層がずれるものであり、そもそも上記のイメージは違っているのだが、本領域による「ぐじゅぐじゅと変形している弱い岩盤中の弱い断層において、差応力が強度よりも局所的に少しだけ大きくなるため発生するもの」という見方は従来のイメージとはさらに異なったものである。この見方が正しい場合には、地震の発生予測の可能性も示唆される。地すべりは地震現象と類似した側面をもっているが、現在、その発生時の予測は実用レベルに達している。上記の見方は、地震が、ガラスの破壊現象よりは地すべりに近い可能性を示しており、将来的には、災害軽減に役立つような発生予測も可能となるかもしれない。その意味で、この研究成果は関連分野や広く世間一般にも波及効果は大きいと思われる。

内陸の非弾性変形

本領域により、内陸のプレートにおいても、非地震性の非弾性変形が起こっていることが明瞭に示された。プレートテクトニクスは基本的には「剛体プレート」という、一定の力で保持された弾性板を仮定しているが、プレート境界近くの変動帯においてはその仮定が正しくないことが疑問の余地無く示された訳であり、当該学問分野に大きなインパクトを与えた。非弾性変形については、その存在はなんとなく想定されていたと思われるが、実データに基づいてそれを明瞭に示すことがこれまで出来ていなかった。東北地方太平洋沖地震の発生により、見た目は東西に延びている日本列島の地殻内において、東西方向の圧縮力による短縮が局所的に起こっていたことは、大きな驚きを持って迎えられた。大学においては、連続体力学(の一部)が「弾性論」として講義されているケースも多く、弾性を基本に考えることが広く行われている。内陸のプレート内の非弾性変形の検知は、関連分野にも大きなインパクトを与えたものと想像される。

間隙水圧の実体

東北沖地震の発生後に、深部からの高圧の流体の上昇によりすべりにくいはずの断層がすべりやすくなったために発生したと考えられる群発地震活動が多数観測され、その中には、一時的に低下した断層の強度が時間とともに回復した事例が発見された。地震発生と間隙流体の関係はこれまで推定の域を出ていなかったが、この事例は、間隙水圧の実体を初めて観測でとらえた例として極めて貴重なものであり、当該学問分野に大きなインパクトを与えた。地熱地帯における注水時において、間隙水圧の時空間変化によると考えられる地震活動が観測され、本領域の関係者により、地震データのエレガントな解析からそのことが示されていた。東北沖地震後の群発地震の例は、注水実験で起こったことが、より空間スケールの大きな自然地震でも起こっていることが示されたものであり、地下深部の流体の実体の解明という大きな課題の解決に向けて、地震や地質学だけでなく、広く関連分野にインパクトを与えたものと思われる。

東北地方太平洋沖地震後の列島変動

東北日本における現実的な岩石物性-構造モデルを構築し、東北沖地震後および地震間の地殻変動をモデル化することにより、地震時に沈降した太平洋沿岸は、その後の余効変動により急激に隆起し、およそ 600 年程度と推定されている次の地震までの期間の中盤で最高点に達した後沈降に転じ、地震発生 100 年前は沈降速度が増加することなどが分かった。これらの成果は、地震学、測地学、地殻流体、岩石レオロジーに関する知見を総合して得られた成果で、海溝型超巨大地震サイクルにおける島弧内陸における変動の理解が格段に進んだことにより、当該学問分野に大きなインパクトを与えた。東北地方の太平洋沿岸の漁港では、地震時の沈降により使えなくなった岸壁をかさ上げする工事が緊急に行われたところがあるが、その後の急激な隆起により、再び使いにくくなり、今度はかさ上げた岸壁を削る工事が行われた場所もある。本領域の成果が間に合わなかったのは非常に残念であるが、生起している現象を正しく理解することにより、今後の推移を予測することが可能となったことは、世間一般への波及効果も大きいと考えられる。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

本領域では、地殻ダイナミクスの将来を担う若手研究者を対象として、海外派遣・学会参加支援と若手向け独自企画の2本柱で育成に努めてきた。

1) 若手研究者の海外派遣および学会参加支援

若手研究者の海外でのネットワーク形成の促進を目指し、国際活動支援班により、3名のポスドクを雇用した。1名は国際公募により北海道大学（ニュージーランドオタゴ大より）で採用し、もう一名は仏オルレアン大学（東京大学より）へ2年間派遣した。またこれまでのべ7名の大学院生を国際活動支援班により、ニュージーランド、オーストラリア、カナダに派遣し、海外での研究発表や共同研究を経験させることができた。また、これまでの国内集会・国際集会では、毎回40名程度の学生・ポスドクに旅費支援を行うことで、本領域への活発な参加を促した。以上の取り組みにより、領域全体で博士の学位を取得した学生は12名にのぼる。

2) 若手向けの企画による院生・ポスドクの育成

これまでの国内・国際集会では若手研究者を対象としたポスター賞の設定や若手向けの夜間集会を開催し若手育成に取り組んできた。国内集会では若手向けの夜間集会を開催し、総括班評価者および領域研究者が講師となり、領域に関連する重要な知識を若手にわかりやすく説明することを目的とした。これまで2回の夜間集会では、地殻応力や岩石のレオロジーなどの領域に深く関わる重要なテーマを取り上げることで、毎回、学生からの多くの質問が出て活発な議論がかわされた。3年目に開かれた国際集会では、学生を対象としたポスター賞を設定することで、海外著名研究者および領域研究者によって若手（大学院生・ポスドク）研究者を育成した。この際に構築した海外研究者とのつながりは、上記の長期海外派遣先を決める際に役立っており、若手の海外ネットワーク形成にも貢献した。

若手研究者の昇進・就職状況

領域に参画した若手研究者2名が教授に就任、3名が准教授に就任、8名が常勤の研究職、そして19名が非常勤の研究職を得た。具体的には以下のような常勤職への就任状況である。

- ・吉田 圭佑（A01 分担研究者）：東北大学 助教 ← 防災科学技術研究所 研究員（任期あり）
- ・藤内 智士（B01 分担研究者）：高知大学 助教（任期なし）← 助教（任期あり）
- ・武藤 潤（B02 分担研究者）：東北大学 准教授 ← 助教
- ・大橋 聖和（B02 分担研究者）：山口大学 講師 ← 日本学術振興会 PD（千葉大学）
- ・安藤 亮輔（C01 分担研究者）：東京大学 准教授 ← 産業技術総合研究所 研究員
- ・野田 博之（C01 分担研究者）：京都大学 准教授 ← JAMSTEC 研究員
- ・飯沼 卓史（C01 分担研究者）：JAMSTEC 研究員 ← 東北大学災害科学国際研究所 助教（任期あり）
- ・大園 真子（C01 分担研究者）：北海道大学 講師 ← 山形大学 講師
- ・中島 淳一（B03 研究協力者）：東京工業大学 教授 ← 東北大学 准教授
- ・末岡 茂（A02 研究協力者）：日本原子力研究機構 研究員 ← 技術員
- ・宇野 正起（第1期、第2期公募研究者）：東北大学 助教（任期なし）← 助教（任期あり）
- ・宮川 歩夢（第2期公募研究者）：産業技術総合研究所 研究員（任期なし）← 研究員（任期あり）
- ・辻 健（第1期、第2期公募研究者）：九州大学 教授 ← 准教授

若手研究者の関連学協会における受賞歴

上記の取り組みなどを通じた若手育成により、大学院生・ポスドクを含めた若手研究者が、この領域に関連する学協会において、以下のような研究奨励賞を含む計21賞を受賞した。

- ・平内健一（B02）、柵山雅則賞、日本地質学会、沈み込み帯と蛇紋岩のレオロジー、2017年9月16日
- ・野田博之（C01）、柵山雅則賞、日本地質学会、断層と地震発生の力学、2016年9月10日
- ・辻 健（第1期、第2期公募研究者）、小澤儀明賞、日本地質学会、地震探査データ解析の高精度化によるプレート境界断層の形態と応力分布に関する研究、2015年6月29日
- ・辻 健（第1期、第2期公募研究者）、文部科学大臣表彰 若手科学者賞、文部科学省、地震探査データの解析に基づくプレート境界地震断層の研究、2016年4月20日
- ・佐久間 博（第1期、第2期公募研究者）、日本粘土学会奨励賞、日本粘土学会、X線表面散乱と分子シミュレーションによる粘土-水界面の描像、2015年9月4日
- ・内田直希（第2期公募研究者）、第2回地球惑星科学振興西田賞、日本地球惑星科学連合、小繰返し地震解析の広範な地震学への応用に関する研究、2017年4月

11. 総括班評価者による評価（2 ページ以内）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

本研究領域の5名の総括班評価者（深尾良夫；海洋研究開発機構、松浦充宏；統計数理研究所、嶋本利彦；中国地震局地質研究所、高橋栄一；中国科学院广州地球化学研究所、平原和朗；理化学研究所）が、それぞれの専門分野に応じて計画研究毎の評価を行った（A01及びA02；深尾・松浦・平原、B01、B02及びB03；嶋本・高橋、C01；松浦・平原）。以下に計画研究毎の評価を踏まえた研究領域全体に対する評価コメントを示す。

2011年東北沖地震（プレート間超巨大地震）の発生後、日本列島の地殻活動は大きく変容した。この変容が何を意味するかという問いに深い意義を見出し、その解明を目指したのが本学術領域研究である。東北沖地震後の地殻活動を理解するために設定した領域全体の目的は、島弧地殻がどのような応力・歪・歪速度状態にあり、巨大地震の発生に伴ってどう変化したのかを、地球物理観測、地質調査、室内実験、及びモデル計算を通じて解明することである。

(1) 応力場の理解

地震の震源メカニズム解データから地殻応力の向きを知ることができるが、大きさは分からない。しかし、大地震前後の応力の向きの変化が観測できれば、それを地震時の応力変化によるものと見做して、地殻応力の大きさを推定することができる。計画研究A01では、このような地震学的手法を用いて2011年東北沖地震で地震活動が誘発された様々な地域の地殻応力レベルの推定を精力的に行った。その結果、誘発された地震活動の特性は時間的にも空間的にも系統的に変化していることを見出し、従来の手法は単純すぎることを定量的に示した。特に、山形-福島県境群発地震のケースでは、間隙流体圧の上昇により一時的に低下した断層強度が流体拡散により時間と共に回復して行く過程を捉えることに成功している。これらの研究成果は間隙流体圧が地震発生に及ぼす効果を初めて観測的に明らかにした点で極めて重要であり、当該学問分野に大きなインパクトを与えるものと評価できる。

計画研究A01では、西南日本で発生したM7級の複数の内陸地震の余震群に対しても従来の地震学的手法を適用して地殻応力レベルの推定を行い、従来考えられていたレベルよりも有意に低いことを明らかにしている。低い応力レベルは断層の強度が低いことを示唆しているが、それが断層の摩擦係数が小さいためなのか、それとも間隙流体圧が高く断層が動き易い状態になっているかを地震発生の視点から区別することは容易ではない。上述の東北地方の群発地震活動では間隙流体圧の関与を強く示唆する観測結果が得られたが、西南日本の内陸地震では超稠密観測網によっても間隙流体圧が関与する現象は観測されず摩擦係数が小さいことが示唆される。計画研究B02における摩擦実験においても、断層物質の摩擦強度は多様であることが示された。断層の摩擦係数と間隙流体圧の影響を分離する問題は、流体が地震発生に及ぼす効果を定量化する上で本質的に重要だが、本領域研究により問題解明の重要な足掛かりが得られた。計画研究B03では、本領域の先駆けとなった「新学術領域・地殻流体」の成果を発展させ、焼結多結晶体および天然岩石の弾性波測定・電気比抵抗測定を行い、地震波速度の観測幅（数十%）と電気比抵抗の観測幅（数桁）の両方を流体連結度の違いから説明するモデルの構築に成功した。このモデルとMT観測結果や計画研究B02の高圧実験結果と総合して、断層強度を有意に低下させる流体の役割を初めて明らかにした。

計画研究B01では、鳥取県西部地域に1000台の地震計からなる超稠密地震観測網（断層深部形状検出システム）を構築したが、この観測網によって従来は決めることのできなかつた微小地震の高精度震源位置や震源メカニズム解が得られるようになった。本領域研究で最も大きな予算を伴った項目であるが、観測された微小地震の多くが有意な開口成分を持つことを明らかにし、それが断層帯への流体移動を容易にしている可能性を示すなど、費やした経費と労力を補って余りある成果が得られている。また、地震発生域の直上における詳細な地質調査によって1500に及ぶ小断層の方位とすべり方向を決め、それらが余震の震源メカニズム解と驚くほど良く対応していることを示すなど、微小地震と断層を結びつける極めて重要な成果を得ている。

(2) 歪み速度場の理解

計画研究A02では、測地学的歪速度が地質学的歪速度より1桁大きいというパラドックスに対して、2011年東北沖地震に伴う地殻変動データの解析を通じて、測地学的歪速度の多くがプレート境界の固着による弾性歪を反映しているという仮説の妥当性を検証した。また、歪み速度場の空間波長に注目して歪集中帯の弾性変形と非弾性変形を分離する秀逸な方法を着想し、東北沖地震後に見伸張場に転じたように見えた歪集中帯の非弾性短縮変形が東北沖地震前後を通じて持続していること、その非弾性変形の手速度や地理的な分布が地質学的時間スケールでの歪速度分布と整合することを明らかにした。これは、歪集中帯の形成機構を理解する上で極めて重要な発見である。

計画研究B03では、新潟-神戸ひずみ集中帯の下部地殻に、沈み込むフィリピン海プレート及び太平洋プレー

ト双方から脱水により供給される流体量が極めて多いことを火山岩の成分分析から明らかにしている。これは歪み集中帯の起源を沈み込むプレートの脱水量と結び付けて定量的に示した画期的成果である。また、計画研究 C01 では、東北奥羽脊梁山脈、山陰、中部日本などの各地域の歪集中過程や地形形成の過程を重力下の地殻の粘弾性変形としてモデリングし、それらが温度異常や水の存在による低粘性領域、既存の地質構造による低摩擦領域に支配されていることを明らかにした。

本領域研究で設定した目的は島弧地殻の応力場と歪み速度場の理解である。後者に関しては、当初の目的を十分に達成したと評価できる。一方、前者に関しては、島弧に働く応力が歪速度の大きな地域では従来考えられていたレベルより有意に低いなど、画期的な成果を得た。この低応力には低い摩擦強度か高い間隙流体圧が関与している筈で、両者を分離するための観測事実が得られたのは、今後の研究に向けた大きな貢献である。