

領域略称名：地殻ダイナミクス
領域番号：2608

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「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

平成28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

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	3
2. 研究の進展状況	5
3. 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	8
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	10
5. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公开发表等）	13
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	18
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	20
8. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	21
9. 総括班評価者による評価	22
10. 今後の研究領域の推進方策	24

研究組織 (総括：総括班，支援：国際活動支援班，計画：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究，公募：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 総括	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	16
Y00 支援	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 計画	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	9
A02 計画	26109003 異なる時空間スケールにおける日本列島の变形場の解明	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	13
B01 計画	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 計画	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	東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教	9
B03 計画	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	14
C01 計画	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・首席研究員	9
計画研究 計 8 件					
A02 公募	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	3
B01 公募	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 公募	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 公募	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	2
B02 公募	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・主任研究員	4
B03 公募	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 公募	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 公募	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	2
B03 公募	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 公募	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 公募	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 公募	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
公募研究 計 12 件					

研究領域全体に係る事項

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学的(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、 $\text{応力} = \text{弾性定数} \times (\text{弾性})\text{歪}$ 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「地殻力問題」とよばれ、1970年代から米国を中心に大き

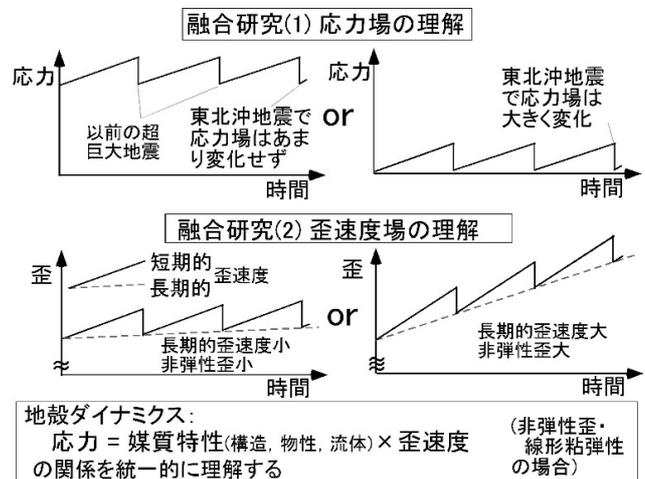


図1 島弧地殻内の応力場および歪速度場の理解

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、主応力の方角を推定可能である。満点地震計を用いた超稠密な地震観測により、大地震の前後における主応力の方角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

地震学的な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・地形学的な手法により短期・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)。

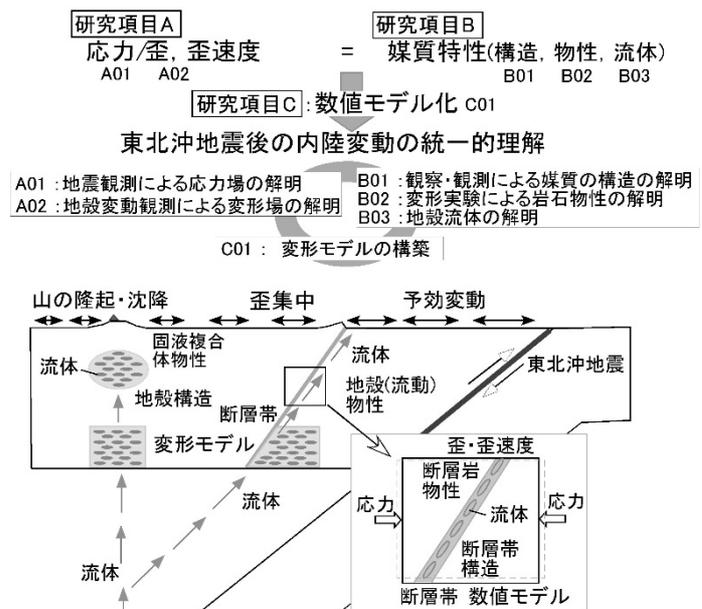


図2 本領域の研究戦略

2. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究ごとに整理する〕（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、現在までにどこまで研究が進展しているのか記述してください。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、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究ごとに記述してください。

計画研究 A01：「内陸地殻の強度と応力の解明」

地殻内の強度と差応力の情報は地震発生過程を理解する上で必要不可欠である。発震機構解データから大地震の前後で応力テンソルインバージョンを行えば、原理的に差応力の推定ができるものの、もともとの応力場が極めて不均質であった場合、このような手法によって得られる差応力は過小評価されているとの指摘もあり、未だ論争が続いている。この過小評価の危険性を回避するためには、多点高密度の臨時観測網を展開して、震源決定と発震機構解の決定を高精度で行い、さらに背景の応力場が不均質であるとの前提で応力テンソルインバージョンの結果を解釈すればよい。このような地殻の強度と差応力およびその不均質性を解明することが本計画研究の主たる目的である。

予定通り、最初の2年間で総計160点もの臨時地震観測点の設置を完了し、現在、データの蓄積と予備的解析を行っている。一方、既存のデータを用いて、東北地方で発生した3つの大地震の前後の応力場の変化からは、いずれも30MPa程度以下の差応力が推定された。また、東北地方の標高と発震機構解に相関があることを発見し、それを用いて定量的に差応力を推定したところ、15-25MPaという値が得られた。様々な誤差を考慮しても、東北地方の地震発生域の差応力は50MPaを越えないと推定され、従来言われていたよりも桁違いに小さいと考えられる。

日本列島全域について応力テンソルインバージョンを行い、その結果と活断層の方位とを比較したところ、ほとんどの活断層は現在の応力場に対して最適な配置をしているものの、花折断層のように現在の応力場では地震を起こしにくい活断層も存在している。このような断層も高い間隙圧等により強度が低下すれば地震を起こすことは可能である。実際、2011年東北地方太平洋沖地震の後、間隙圧の上昇により発生したと考えられる地震活動が多数観測され、その中には、強度が時間とともに変化していた事例も見つかり、間隙流体の移動による強度の時空間変化が地震発生において無視できないことが明らかとなった。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、間隙流体圧の実体を初めて観測でとらえた例として貴重なものである。

以上のように、本研究はこれまでのところ順調に進展しており、後年度は臨時点のデータが加わることにより、さらに詳細な結果が得られるものと期待される。

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」

本計画研究では、日本列島の地殻変形に関する諸問題、すなわち、地殻変形に関する測地データと地質データの食い違い、弾性歪と非弾性歪の分離、地殻変形を考えるための包括的な枠組みの提示などを目的として、測地観測、地質調査、熱史分析、地震観測、数値モデル等の手法を用いた研究を実施している。

これまでに、列島内部の変形集中帯を対象とした稠密なGNSS観測網が展開され、データが蓄積されており、今後観測を継続することで、詳細な地殻歪分布とその変形メカニズムが明らかになると期待される。また、観測が困難な地域についても、干渉合成開口レーダーと稠密なGNSS観測データを組み合わせることで、面的な地殻変動分布を得るための手法を開発した。

測地データと地質データの間の歪速度の食い違いについては、東北地方脊梁部においては2011年東北沖地震の発生によって、従来言われていた1桁の食い違いがプレート境界の固着に起因する弾性変形の寄与で説明可能である一方、西南日本などでは、数倍程度の差が依然として存在することが分かった。こうした変形速度の差について、活断層の活動開始時期の違いや断層帯中における断層面外の永久変形の寄与に注目した調査を実施し、これらの要因が地質学的な変形速度推定に影響を及ぼす可能性を見出した。

一方、測地データの解析からは、2011年東北沖地震の前後の地殻歪速度分布の比較から、東北沖地震の余効変動の影響で東西伸張変形が生じている中で、日本海東縁歪集中帯では短波長の東西短縮変形が継続していることを見出し、地震発生域における非弾性変形の存在を明らかにした。この非弾性歪は、地層の褶曲の解析等の地質学的手法で推定されていた永久変形の分布と、位置や変形速度が整合的であり、現世の測地学的なデータから永年的な変形の抽出に成功したと評価できる。

また、東北地方の山岳熱史解析や歪集中帯における散乱構造解析からも地殻変形様式の解明につながる知見が得られている。

以上のように、本研究はこれまでのところ順調に遂行されており、一部では当初予定した以上の重要な成果も得られていると評価できる。

計画研究 B01:「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」

日本列島の地殻ダイナミクスは、弱線である断層の強度に大きく支配される。本計画研究では、断層帯のマクロ（数 10 km スケール）からマイクロ（顕微鏡スケール）までの地質観察に基づき、断層の構造、岩石の変形、化学反応過程・物質移動等を解析することにより、繰り返し地震を起こす断層帯における低速・高速変形の物理的、化学的過程・機構の実体解明を試みる。具体的には(1)三重県東部中央構造線、(2)鳥取県西部地震余震域の小断層、および(3)ノルウェー、南極、北海道日高山地等に産する下部地殻断層について以下のような問題を設定して研究を展開している。(1)は極めて成熟した大規模断層と捉えられ、本断層が長期間をかけて成熟して来た過程・機構および成熟に伴う軟化過程・機構を、地質調査、薄片観察、各種化学分析に基づき解明する。実際に地質調査を行うことにより断層セグメント・ジョグ構造・亀裂形成史が明らかになりつつあるほか、薄片観察により低速・高速変形を示す断層岩組織が発見された。(2)の小規模な断層は比較的最近形成された未成熟の断層と捉えられる。現在までに、余震域に沿った 4km の範囲において約 1000 本の小断層を確認し、これらの方位分布が余震と調和的であることを見出したほか、地震の発震機構解と調和的な古応力場を得た。(3)については、通常は流動変形が卓越すると考えられている下部地殻で破壊が確認され、破壊直後に水が流入し岩石が軟化していることや、シュードタキライト（地震の化石）とウルトラマイロナイトが繰り返し形成されていることが認められた。これらは、震源断層下部における地震破壊の伝播や余効変動と関係している可能性がある。地震観測では、地震断層およびその周辺の応力状態から、断層の発達過程を知る上で重要な断層の強度を推定する。そのため、現在までに断層深部形状観測システムの開発を完了し、大量生産への道筋をつけた。既存の発震機構解のデータを用いて、中央構造線の九州延長部において応力場とせん断帯の関係のモデル化を進めた。さらには断層近傍の応力場擾乱を基に、震源域における応力集中や絶対応力を推定する手法を新たに開発した。

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-歪場を統一的に理解するために不可欠な岩石変形物性（降伏応力・摩擦係数・粘性係数）を高温高压実験から明らかにする。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と考えられる。そこで本課題では、断層帯の不均質性と H₂O 流体の物理化学的効果を考慮しつつ、断層強度を温度・岩圧・間隙水圧・すべり速度などの関数として求める。また熱水条件下の岩石-水相互作用から断層帯の水理学的構造をモデル化する。これらの知見を総合して、地殻浅部の脆性領域から下部地殻の延性領域に至る断層帯・剪断帯の強度断面モデルを作成する。さらに、プレート境界断層深部における摩擦構成則や下部地殻・マントルウェッジにおける媒質の粘弾性挙動を調べ、2011 年東北沖地震後の余効変動の再現・予測モデルに必要なパラメータを提供することを試みる。

上部地殻の変形については、領域の他の班とも連携して野外調査と試料採取を行ない、断層形成条件を再現して摩擦実験を実施している。測地学的な歪速度の大きい跡津川断層周辺の調査では、主断層からはなれた小断層による非弾性変形の重要性を明らかにした。成熟した断層とみられる紀伊半島の中央構造線では、比較的新しい滑り面を構成するガウジにおいて膨潤粘土の量比に応じた小さい摩擦係数が得られた。断層のより深部領域における摩擦物性を解明するため、新しい熱水式回転摩擦試験機の設計を進めている。下部地殻・マントル物質の変形については、高温高压条件で精度よい力学データを得るために現有の実験装置の改良や校正試験を行ないつつ、変形実験を開始した。下部地殻の主要構成鉱物である斜長石の粘性やマントルウェッジを構成するカンラン岩ガウジの剪断強度が、H₂O 流体存在下で著しく低下することが示唆された。沈み込み帯プレート境界断層の深部における剪断強度については、石英の流動則と再結晶粒径差応力計の 2 つの方法によって評価し比較した。

以上のように、室内実験については基盤整備から行なっているため、本格的な研究はこれからであるが、計画当初の目的・方法にそって着実に研究を進めている。野外調査や天然試料の解析では予想外の進展もあった。推定した粘性構造を考慮した東北日本の余効変動モデルにより、火山周辺で見られた局所的沈降を再現することに成功するなど、観測やモデリングとの融合研究も既に進んでいる。

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」

地震-火山活動、地殻変動など、地殻のダイナミクスの理解に重要と考えられる「地殻流体の分布や流量」を明らかにすることが、本計画研究の目的である。新学術領域「地殻流体」での知見を進展させ、(1)岩石物性測定、(2)地磁気地電流 (MT) 観測、(3)地殻流体インバージョン、(4)深部由来流体計測の 4 項目を実施し、流体分布や流量の定量的制約を試みる。現在までに、(1)流体を含まない岩石とクラック密度を変化させた含水岩石試料の作成、弾性波・電気伝導度測定、およびメルト物性の定式

化、(2)東北地方の MT 観測・解析、および近畿地方での MT 測定の開始、(3)地殻流体・岩質インバージョンのアルゴリズムとプログラムの構築、(4)有馬温泉の既存データによる深部由来流体の解析、2014 年長野県北部の地震・2016 年熊本地震後の温泉や湧出流体の緊急観測、深部由来流体計測のための野外質量分析装置の開発、同装置設置のためのサイト候補井戸の揚水試験・水およびガスの採取・分析を行った。

天然岩石試料に加え、主要造岩鉱物と極細粒多結晶体の人工試料、および細粒花崗岩の加熱によりクラック量の異なる岩石試料を作製し、無水での弾性波速度測定、あるいは含水状態での弾性波速度と電気伝導度同時測定により、物性（特に流体量との関係）を調べた。その結果、物性を支配する空隙構造とその影響を明らかにし、クラック開閉による物性変化をモデル化した。さらに、メルトの密度と体積弾性率を、高温高圧実験と熱力学定式化に基づき、温度、圧力、組成の関数として求めた。これらの物性理解に基づき、地震波・電磁気データに基づく地殻流体・岩質インバージョン手法を構築した。また、東北地方（岩手宮城内陸地震域、宮城県北部地域、岩手県・秋田県北部域）における MT 観測とその解析を行い、比抵抗構造や震源分布との対応関係を明らかにした。並行して、紀伊半島南部において広帯域データをグリッド状に 20 点で取得した。

深部由来流体の流量の定量化のモデルケースとして有馬温泉の既存の分析値を解析した。台湾南部の泥火山流体について、深部由来流体フラックスの定量に着手した。2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震(M6.7)直後に湧出した温泉・ガスの緊急調査を繰り返し行い、地震発生によるエピソード的な断層帯の状態変化に呼応した流体の移動を捉えた。東北地方の深部由来流体フラックス分布を推定するために、Br-Cl-I の関係を用いてスラブ源水・海水・続成水の混合関係を明らかにする手法を開発した。深部由来流体の判別の鍵となる ^3He を計測可能な野外質量分析装置の製作については、一部パーツを除き順調に開発を終了した。同分析装置の西南日本における計測サイト候補の 3 地点の井戸について、揚水試験、温度等の検層、水・ガス採取を行なった。このうち、和歌山県田辺市の本宮観測点の観測井戸では採取したガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は周辺の温泉と同様に高く深部由来流体によるものであると考えられ、同分析装置を設置する有力な候補であることが判明した。2016 年熊本地震後の熊本県内の温泉水・ガスの緊急観測を実施した。

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」

本計画研究では、先ず、(1) 日本列島域における高精度の観測情報を基に媒質のレオロジー構造を推定し、東北沖地震発生サイクルに伴う変動や、余効変動の推移を予測する。次に、(2)特定の領域を対象に、高精度の変形と応力場のモデル化を行い、さらに、(3) 地質学・実験岩石力学的知見を取り入れた内陸活断層におけるすべり過程のモデル化を行う。(1)-(3)の研究を通して、応力場もしくは歪速度場の理解に向けた融合研究を行うが、これまでにモデル化に必要な観測データの解析、基本モデルの構築、室内実験研究により得られた知見に基づくモデル化を進めた。(1)に関しては、高密度の地温勾配の分布を基に、日本列島弧における不均質粘性構造モデルを構築した。有限要素法モデルによる東北沖地震後の余効変動のモデル化を行い、観測から明らかにされている東北地方火山フロントにおける歪異常（収縮歪域）を再現した。また、不均質粘弾性媒質を考慮した有限要素法モデルにより、東北沖地震発生間の固着をモデル化し、地震間における地殻変動を再現した。さらに、A02 と連携して、2層成層構造モデルにより巨大地震後の粘性緩和による変動の推移を予測した。巨大地震後の粘性緩和による変動においては、内陸の水平変位速度が、時間と共にその運動方向を逆転させる。つまり、現在は海域でのみ陸向きの変位が観測されているが、いずれ太平洋沿岸部さらには東北内陸まで陸向きにその運動方向を変化させると予測される。(2)に関しては、東北日本弧を対象にして、不均質な熱構造を考慮した島弧地殻における変形、応力場、地形形成のモデル化を行い、応力場が hot finger 状の低粘性領域に支配されていることを示した。また、新潟-神戸歪集中帯の変形過程のモデル構築のために、地震前・地震時・地震後の GNSS 観測データの収集・解析を行った。また、越後平野の地震時の歪過剰はこの地域の厚い堆積層による低弾性定数が主原因であることを定量的に明らかにした。(3)に関しては、既存の知見を基に、脆性塑性遷移や圧力溶解クリープの断層構成則を取り入れた地震サイクルのモデル化を行い、断層強度や応力場の時間発展のシミュレーションを行った。その結果、脆性塑性遷移領域において有効応力則が成り立つことを実験的に検証した。この成果は、C01 メンバーの着想を B02 の持つ実験設備を用いて実現した融合研究によるもので、本新学術の枠組みを有効に利用した、計画作成当初には予期されていなかった成果である。さらに、断層の 3 次元的幾何形状を考慮した 2014 年長野県北部の地震や 2016 年熊本地震の動的破壊成長モデルを構築した。

3. 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（2 ページ以内）

審査結果の所見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およびコメント

既存の観測網や設備も存在する中で、一部の機器や装備の導入の根拠・必要性がはっきりしないため、計画を精査し、必要性を明確にすること。測地的観測機器、電磁気学的観測機器、断層深部形状の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。

測地的観測機器について

本領域で対象としている内陸の断層帯では、変形の波長が十数 km と短く、平均間隔が 20km 程度の既存観測網では必要な情報が得られない。本研究で新規購入した機材は、断層帯周辺において既存観測網（GEONET）の高密度化を目的として新設された連続観測点で使用されており、観測点新設のために機材購入は必要不可欠であった。2014 年長野県北部地震では、有意な地殻変動を検出した既存観測点は 1 点のみであったが、キャンペーン観測によって 6 カ所で精密な変位を得ることができ、高密度観測の重要性が示された。また、跡津川断層で行った干渉合成開口レーダー（InSAR）の解析においても、以前の研究で得られた高密度の GNSS 観測データを利用することで、InSAR データの補正が初めて可能となった。こうした事例により、GNSS 機材の必要性は十分に認められる。

電磁気学的観測機器について

本領域では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図に示した。2 式を導入できたことで図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る。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。

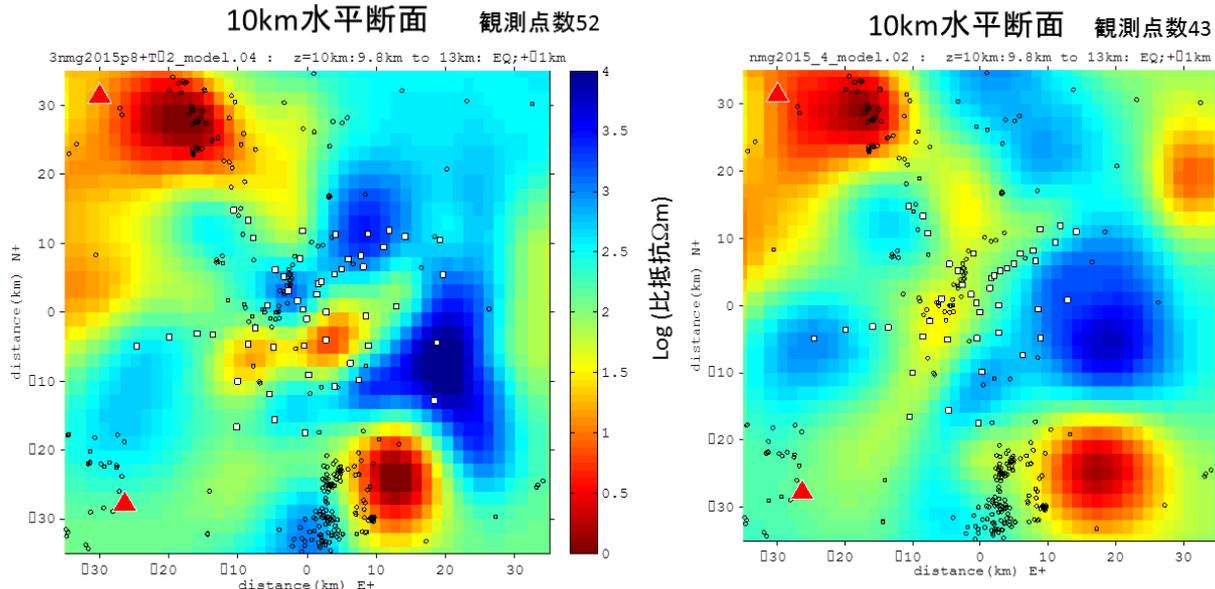


図 (左)既存機材に新規購入機材も含めて観測したデータから求めた東北地方北上地域の比抵抗平面図(深さ 10 km)。色は対数スケールの比抵抗値。白い四角が観測点位置。(右) 機材が 2 台少ない場合を仮定して計画した観測点分布のデータから求めた比抵抗平面図。左図と比べて中央付近の構造が異なっているのが分かる。

断層深部形状検出システム

計画研究 B01 では、来年度から 2000 年鳥取県西部地震余震域に 1000 台の地震計（断層深部形状検出システム）を設置することを計画している。断層帯の発達過程を調べるうえで現在の地震断層の強度を知ることが重要である。特にその空間的な変化は断層成熟度を反映している可能性がある。地球物理学的アプローチとしてこれを検出するのに必要な要件は、1) 地震観測に適した環境、2) 高い地震の活動度、3) 余震活動の多様性が挙げられる。鳥取県西部地震余震域は、北西部と南東部の余

震分布の幅が異なっているなど、余震活動が多様であり、フィールドとして最適である。また、設置環境も良好である。地震断層の強度を知るためには、高精度の発震機構解を大量に求める必要がある。この地域ですでに A01 班が 80 点の稠密な地震観測点を展開している。しかしながら、M-1 クラスの地震は SN が悪く、図 1 の例を見てもわかる通り、初動の押し引きがはっきりしないことから解の精度が悪い。このような地震についても、断層深部形状検出システムではこの約 10 倍読み取り値が得られることから、高い精度で決定できると考えられる。特に、地震断層の深部および浅部は下部地殻や地表断層との関連を考える上で重要であるが、図 2 に示すように、1000 点設置することにより、発震機構解の推定の誤差が半分程度に抑制される。この精度は、地殻の強度に関連する、媒質中の間隙流体圧推定に直接影響する。図 3 に示すように、鳥取県西部地震の震源域では亀裂の方向分布が得られている。この分布から流体圧を求めることができるが、100 点程度の観測点では過剰間隙水圧（静岩圧－静水圧）に約 50%の誤差がある。これを 1000 点にすることによって 10%程度まで抑制することが可能である。これは断層の強度－深度断面を構成する上で決定的に重要であり、地震やクリープによる地殻強度弱化的モデル選択に指標を与えることができる。さらに、余震域に発生する M-1 クラスの小さな地震は現在の観測網で毎日数個検出されている。このため、同システムを導入することによって、さらに検知能力が向上し、少なくとも 1000 個以上の精度の高い発震機構解が 1 年間で得られる。これによって地震断層の強度を把握することが可能であると考えられる。本システムは、昨年度までに開発を完了している。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の稼働のめどがついている。今後、2016 年熊本地震震源域における試験観測を経て、来年度に世界でもまれに見る精度での観測を遂行する。したがって、世界に先駆けた十分な成果が挙げられると期待できる。

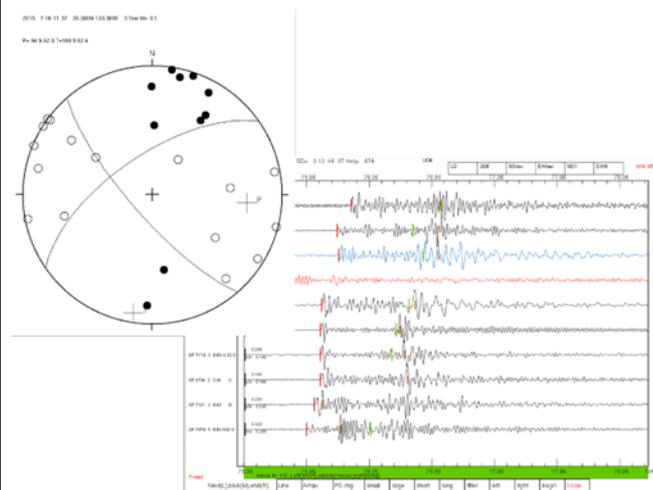


図1 鳥取県西部地震震源域で現在展開されている観測網で得た、M-1クラスの地震の波形例(右下)と初動極性から求めたメカニズム解(左上)。波形では初動極性(図中の赤い縦線の部分)が明瞭な点が少ないために、解が精度よく求まらない。

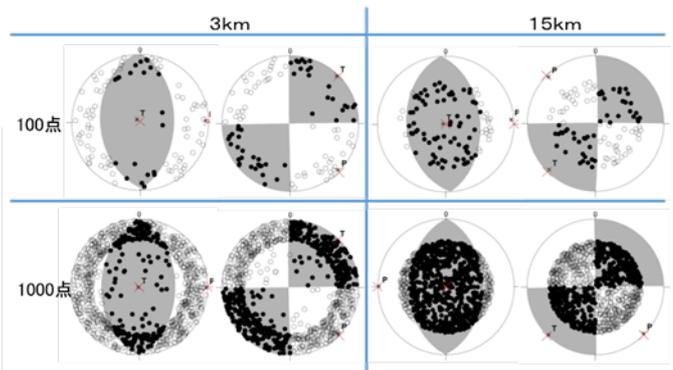


図2 鳥取県西部地震震源域に展開された観測点(想定)による逆断層・横ずれ断層推定解の結果。100点および1000点展開の場合で震源深さ3、15kmを比較している。×は与えたパラメータ。100点のほうが推定のずれが大きい

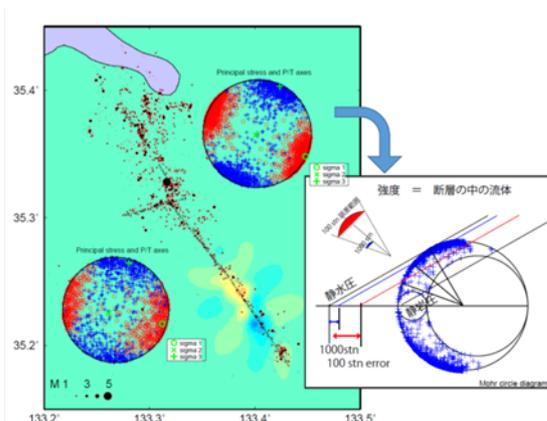


図3 鳥取県西部地震震源域で現在得られている断層北部・南部の発震機構解(亀裂の方向)分布と検出された応力場不均質(左図)。これらの亀裂の方向分布から、強度を示す間隙流体圧が推定できる(右図)。1000点展開の場合での推定誤差は流体圧推定を大きく改善する。

4. 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。

研究項目 A：応力・歪・歪速度の推定

A01-(1) 福島県浜通り地震（Mj7.0）の余震の発震機構解から推定された応力場（Yoshida et al., 2015）：2011 年福島県浜通り地震（Mj7.0）の余震の発震機構解から推定された応力場は断層面の周りで回転しており、これから本震前の差応力は 2-30MPa と推定された(図 1)。

A01-(2) 東北地方の標高と発震機構解から推定された応力場（Yoshida et al.,2015）：東北地方において、最大圧縮力軸方向が背弧側と前弧側で異なることや標高と発震機構解に相関があることを発見し、様々な誤差を考慮しても地震発生域の差応力は最大でも 50MPa よりは小さいと推定された。

A01-(3) 日本列島全域について応力場と活断層の関係（Yukutake et al., 2015）：日本列島全域について応力テンソルインバージョンを行い、その結果と活断層とを比較したところ、ほとんどの活断層は現在の応力場に対して最適な配置をしているものの、花折断層のように現在の応力場では地震を起こしにくい活断層も存在している。このような断層は高い間隙圧等により強度が低下しなければ地震を起こせない可能性がある。

A02-(1) 歪集中帯で検出された地震発生域の非弾性変形（鷲谷威・A. Menese-Gutierrez, 2016 投稿中）：歪集中帯における 2011 年東北沖地震前後の歪速度分布の解析から、非弾性変形を分離することに成功した。

A02-(2) 歪集中帯において見いだされた断層活動時期の移動（Otsubo, M., and Miyakawa, A., 2016）：新潟および秋田の歪集中帯について、地形と断層の位置関係から断層活動時期が陸側へ移動していることを明らかにした。

A02-(3) 稠密 GNSS 観測による 2014 年長野県北部地震に伴う詳細な地殻変動(Sagiya, et al., 2015)：稠密 GNSS 観測により、2014 年長野県北部地震に伴う詳細な地殻変動を検出した。

公募 1 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）：新潟の段丘面について、隆起速度は背斜で 0.8mm/yr と非常に大きな値を示すが、向斜部では 0.1~0.2mm/yr と小さく、褶曲山地の隆起速度、地質構造と変位速度分布との関係が明らかとなった。

研究項目 B：媒質特性の推定

B01-(1) 中央構造線における詳細な地質調査結果（竹下・荒井, 2016, JpGU, 重松・亀田, 2015, 新学術全体集会）：三重県東部の中央構造線について、セグメント・リレーゾーンの組み合わせを複数認めたほか、断層コアを形成するカタクレサイト（破碎岩）は最終的に圧力溶解で優勢に変形する片状カタクレサイトに発展していくことを示した。さらに、断層ダメージゾーンを構成するプロトマイクロナイト中に Y 集中石英 c 軸ファブリックが優勢に発達する事実を発見した。中央構造線露頭（栗野・田引露頭）で温度低下の過程で 4 つの変形ステージに形成された異なるガウジを認識し、それぞれのステージの運動像を明らかにした。

B01-(2) 鳥取県西部地域における小断層解析(内田・他, 2016, 連合大会, 向吉・他,2016, 連合大会)：鳥取県西部地震の余震域で観察された約 1000 本の断層について方位解析を行い、断層姿勢が余震域北

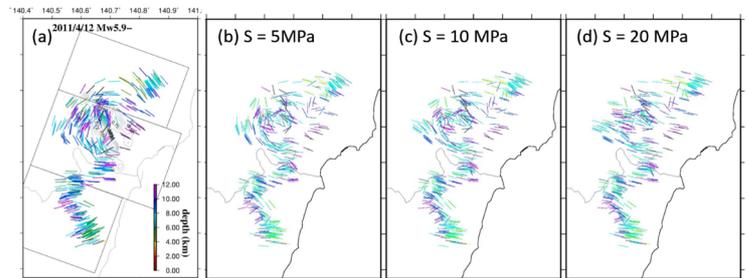


図 1 福島県浜通り地震の余震から推定した応力場の σ_3 軸の方向. (a) 推定値. (b),(c),(d) 差応力を 5, 10, 20MPa としたときの計算値.

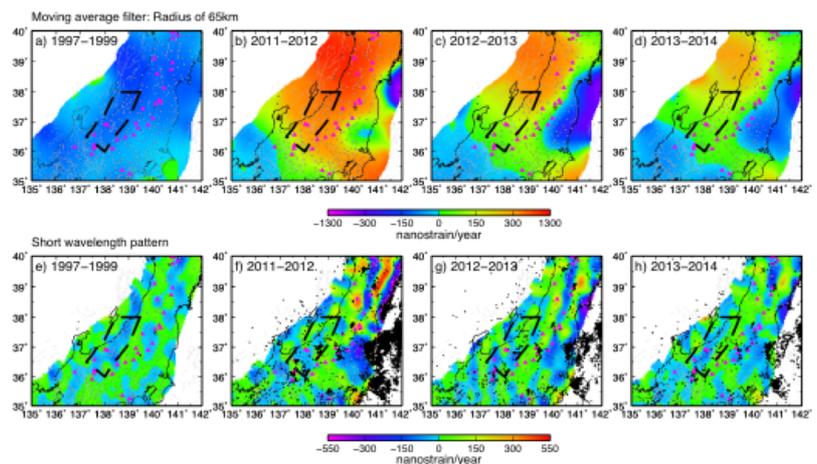


図 2 東北沖地震前後の東西歪速度分布の長波長成分（上）と短波長成分（下）

西部、中央部、南東部で微妙に異なっており、地震観測から求められた亀裂分布の方向と概ね一致することを明らかにした。

B01-(3) 下部地殻における地震破壊と弱化 (Okudaira et al., 2015, 豊島・他, 2015, 新学術全体集会): ノルウェーの下部地殻に発達するせん断帯を研究対象にして、下部地殻条件でも鉱物の細粒化を伴う破壊が生じていること、破壊の後に変成反応に促進された粒径依存型の拡散クリープが起こっていることを示した (図 3)。南極の下部地殻せん断帯では、シュードタキライト (地震の化石) とウルトラマイロナイトが繰り返し形成されているほか、本来、石英中では低温で活性化すべき底面すべりが優勢に活動し、Z集中石英c軸ファブリックが形成されていることを明らかにした。

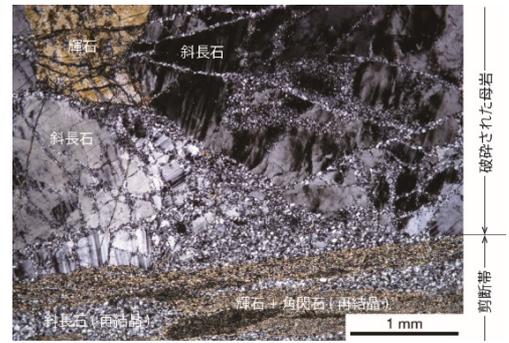


図3 ノルウェー下部地殻破砕岩試料

B01-(4) 地震観測による断層強度の推定 (Matsumoto et al., 2015): 断層強度と応力場の関係を見出す手法開発を行い 2013 年淡路島の地震に適用し、地震前に断層で応力集中があったこと、この断層が非常に高い間隙流体圧の環境であったことを示した。

B02-(1) 歪集中帯に分布する小断層 (大橋ほか, 2016, JpGU) [A02 との融合研究]: 現在も活動的な断層地帯として、新潟-神戸歪集中帯に位置する跡津川断層系周辺地域を踏査し、活断層の存在が知られていない地域において多数の中・小規模断層を見出した。応力インバージョンの結果は現在の応力配置に調和的な向きを示しており、主断層以外の場所での上部地殻の非弾性変形による歪速度場への寄与が無視できないことが示唆された。

B02-(2) 粘性構造を考慮した東北地震後の余効変動モデル (Muto et al., 2016) [C01・A02 との融合研究]: 東北日本の熱構造と、レオロジー構成則の文献値を用いて島弧-海溝系の不均質粘性構造を推定し、余効変動の有限要素法シミュレーションを行なった。計算結果は第四期火山周辺の局所的伸長と沈降をよく説明する。

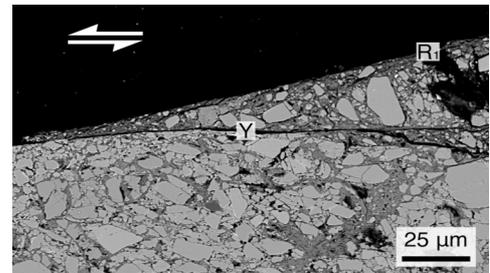


図4. 実験回収試料のSEM像。Y面やR1面に沿ってタルクが生成している。

B02-(3) マントル物質の加水軟化 (Hirauchi et al., 2016, JpGU): 封圧 1GPa 温度 500°C で水を加えたカンラン岩ガウジの摩擦すべり試験を行ない、顕著な歪軟化を見いだした。回収試料にはタルクが生成しており (図 4)、加水反応がスラブ-マントル境界の剪断強度に大きな影響を与えることが示唆された。

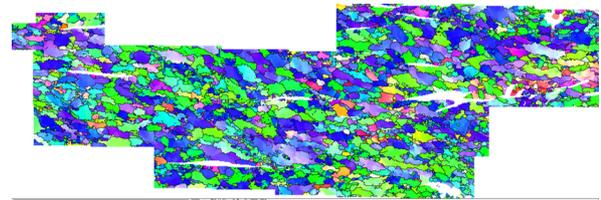
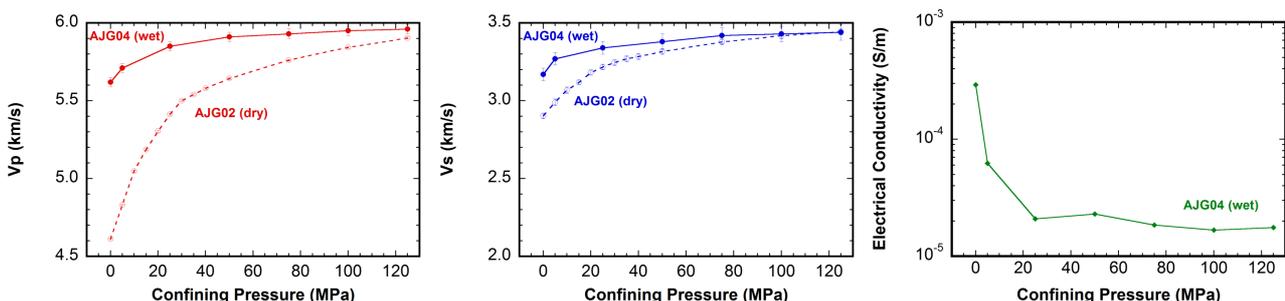


図5. SEM-EBSD による三波川変成帯 (汗見川地域) の石英結晶方位マップ。

B02-(4) 沈み込みプレート境界断層深部の流動応力 (Shimizu & Ueda, 2015, AGU): 過去の沈み込み帯プレート境界物質である高压変成岩試料の石英組織を SEM-EBSD 法で精密に解析した (図 5)。動的再結晶粒径の理論モデルから

300 °Cにおける差応力は 100 MPa を超えると見積もられた。

B03-(1) 弾性波速度および電気伝導度の同時測定と封圧依存性 (Watanabe and Higuchi, 2015): 花崗岩の V_p, V_s および電気伝導度の同時測定を行い、封圧増加にともなってクラックが閉じ物性は収斂する傾向にあるが、電気伝導度は無水岩石での値よりも有為が高く、クラックが完全には閉じずに連結していることが分かった。これらのデータからクラックの分布、連結に関するモデル化を行った。



B03-(2) 2014年長野県北部地震によって湧出した深部由来流体の緊急観測・解析(Tanaka et al.,2016 JpGU): 2014年長野県北部地震の直後、震央より約5km北側の活断層際で流体が湧出し、2015年3月下旬に湧出が停止した。このデータに基づいて地震時の流体フラックスを推定した。活断層破碎帯の地震時の浸透率は、地震間の破碎帯物質の浸透率に比べて4~5桁ほど大きくなると推定され、地震発生によるエピソードな断層帯の状態変化に呼応して流体の移動が主に起こることを示した。

公募2 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): 鉱物脈などの引張割れ目の方位分布を確率分布モデルのパセンタイル点を比較することで、客観的に駆動流体圧比を比較することが可能となり、底付け付加時の沈み込みプレート境界断層では、駆動流体圧比は周囲に比べて2倍程度高かったことが示唆された。

公募3 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): マイクロフォーカスX-CTを利用して、中央構造線や延岡衝上断層で取得した岩石コア試料の間隙形状やフラクチャー形状を抽出した。そのデジタル岩石試料に対して、間隙流体シミュレーションや弾性波動シミュレーションを適用するための手法開発、鉱物化を引き起こすためのモデルの開発を実施し、鉱物化が断層強度や弾性波速度に与える影響を調べた。

公募4 雲母・粘土鉱物の最大摩擦係数の物理(Kawai et al., 2015, Sakuma and Suehara, 2015): 雲母・粘土鉱物の低摩擦係数を支配する要因を明らかにするため、白雲母単結晶と粉末の摩擦試験を実施し、白雲母単結晶の(001)面でのすべりでは摩擦係数が大きく低下すること、ガウジ粒子が定配向し(001)面でのすべりが卓越するとガウジの摩擦係数が低下することを明らかにした。また、(001)面での低摩擦係数は従来考えられていた層間結合エネルギーでは説明できず、新たなすべりメカニズムを考慮する必要があることがわかった。

公募5 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・他, 2016, JpGU): 地殻での岩石-水反応で生じる応力・歪の支配要因を明らかにするために、反応中の応力・歪を直接測定可能な実験システムを開発し、世界で初めて、吸水反応による反応誘起応力・歪の系統的なデータを取得した。その結果、反応誘起応力・歪は、反応速度と変形速度の競合によって支配されることが示唆され、これらのバランスによって沈み込み帯における流体分布が変化することが予想された。

研究項目C：数値モデル化

C01-(1) 東北日本弧の変形、応力場、地形形成のモデル化(Shibazaki et al., 2016) [C01, B02, A01, A02 との融合研究]: 東北日本弧を対象にして、不均質な熱構造を考慮した島弧地殻における変形、応力場、地形形成のモデル化を行い、応力場が hot finger 状の低粘性領域に支配されていることを示した(図7)。

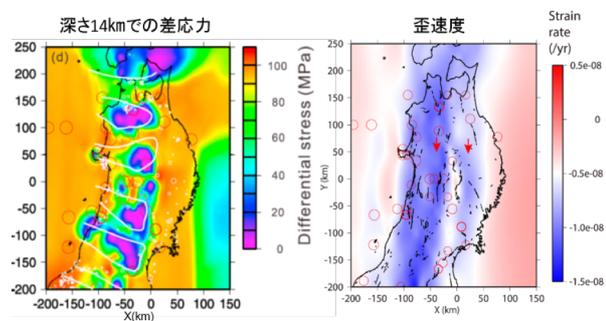


図7. 東北日本弧の応力、歪速度場のモデル化。

C01-(2) 新潟神戸歪集中帯(越後平野)の東北沖地震時の歪過剰のモデル化(Nishimura et al., 2016): 越後平野の地震前・地震時・地震後のGNSS観測データの収集・解析を行い、変動分布の詳細を明らかにした。越後平野の地震時の歪過剰はこの地域の厚い堆積層による低弾性定数が主原因であることを定量的に明らかにした。

越後平野の地震時の歪過剰はこの地域の厚い堆積層による低弾性定数が主原因であることを定量的に明らかにした。

C01-(3) 脆性・塑性遷移における有効応力則(Noda and Takahashi, 2016) [C01, B02 との融合研究]: 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、封圧と間隙流体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。

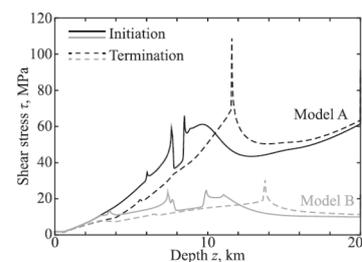


図8. せん断応力の深さ分布。Model AとBは、過剰間隙水圧を考慮しない場合と考慮した場合。

C01-(4) 圧力溶解クリープを考慮した地震発生サイクルモデル(Noda, 2016): 既存の実験的研究の成果を基に、石英・粘土混合物における圧力溶解を素過程として含む摩擦の微物理モデルに基づいた断層構成則を定式化し、地震サイクルシミュレーションに導入し、断層の応力状態やすべりの挙動を調べた(図8)。

5. 研究成果の公表の状況（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。

論文（査読有 200 篇、査読無 2 篇）

・計画研究 A01(査読有 26 篇)

▲Heterogeneous stress field in the source area of the 2003 M6.4 Northern Miyagi Prefecture, NE Japan, earthquake, *Yoshida, K., Hasegawa, A., and Okada, T., *Geophys. J. Int.*, 査読有, 206, 408-419, 2016.

Ambient noise tomography in the Naruko/Onikobe volcanic area, NE Japan: implications for geofluids and seismic activity, *Tamura, J., and Okada, T., *Earth, Planets Space*, 査読有, 68, 2016.

A variety of aftershock decays in the rate- and state-friction model due to the effect of secondary aftershocks: implications derived from an analysis of real aftershock sequences, *Iwata, T., *Pure Appl. Geophys.*, 査読有, 173, 21-33, 2016.

Spatially heterogeneous stress field in the source area of the 2011 Mw 6.6 Fukushima-Hamadori earthquake, NE Japan, probably caused by static stress change, *Yoshida, K., Hasegawa, A., and Okada, T., *Geophys. J. Int.*, 査読有, 201, 1062-1071, 2015.

Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations, *Yoshida, K., Hasegawa, A., and Okada, T., *Tectonophysics*, 査読有, 647-648, 63-72, 2015.

The applicability of frictional reactivation theory to active faults in Japan based on slip tendency analysis, *Yukutake, Y., Takeda, T., and Yoshida, A., *Earth Planet. Sci. Lett.*, 査読有, 411, 188-198, 2015.

◎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.

・計画研究 A02(査読有 44 篇、査読無 1 篇)

◎Stress accumulation process in and around the Atotsugawa fault, central Japan, estimated from focal mechanism analysis, *Takada, Y., Katsumata, K., Katao, H., Kosuga, M., Iio, Y., and Sagiya, T., *Tectonophysics*, 査読有, 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 Miyakawa, A., *Quat. Int.*, 査読有, 397, 563-572, 2016.

Deformation of island-arc lithosphere due to steady plate subduction, *Fukahata, Y., and Matsu'ura, M., *Geophys. J. Int.*, 査読有, 204, 825-840, 2015.

On volume-source representations based on the representation theorem, *Ichihara, M., Kusakabe, T., Kame, N., and Kumagai, H., *Earth, Planets Space*, 査読有, 68, 2016.

Effect of a change in the state of stress on the likelihood of inland fault failure during the Mw 6.6 Iwaki earthquake resulting from the Mw 9.0 2011 Tohoku earthquake, Japan, *Miyakawa, A., and Otsubo, M., *Tectonophysics*, 査読有, 661, 112-120, 2015.

Paradoxical vertical crustal movement along the Pacific coast of northeast Japan, *Sagiya, T., *IAG Symp.*, 査読有, 2015.

New approach to resolve the amount of Quaternary uplift and associated denudation of the mountain ranges in the Japanese Islands, *Sueoka, S., Tsutsumi, H., and Tagami, T., *Geoscience Frontiers*, 査読有, 7, 197-210, 2016.

2014年長野県北部の地震（神城断層地震）における地表地震断層の出現と新たな問題, *廣内大助, 2014年神城断層地震変動地形研究グループ, *地震工学会誌*, 査読有, 25, 7-12, 2015.

Stress state in the upper crust around the source region of the 1891 Nobi earthquake through shear wave polarization anisotropy, *Hiramatsu, Y., and Iidaka, T., *Earth, Planets Space*, 査読有, 67, 2015.

低温領域の熱年代学の発展と日本の山地の隆起・削剥史研究への応用, *末岡茂, 堤浩之, 田上高広, *地球科学*, 査読有, 69, 47-70, 2015.

・計画研究 B01(査読有 36 篇)

- Complete ⁴⁰Ar resetting in an ultracataclasite by reactivation of a fossil seismogenic fault along the subducting plate interface in the Mugi Mélange of the Shimanto accretionary complex, southwest Japan, *Tonai, S., Ito, S., Hashimoto, Y., Tamura, H. and Tomioka, N., *J. Struct. Geol.*, 査読有, 89, 19-29, 2016.
- Accelerated nucleation of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.2 Earthquake, *Kato, A., Fukuda, J., Kumazawa, T., and Nakagawa, S., *Sci. Rep.*, 査読有, 6, 24792, 2016.
- ▲ Spatial heterogeneities in tectonic stress in Kyushu, Japan and their relation to a major shear zone, *Matsumoto, S., Nakao, S., Ohkura, T., Miyazaki, M., Shimizu, H., Abe, Y., Inoue, H., Nakamoto, M., Yoshikawa, S., and Yamashita, Y., *Earth, Planets Space*, 査読有, 67, 2015.
- Extensive normal faulting during exhumation revealed by the spatial variation of phengite K-Ar ages in the Sambagawa metamorphic rocks, central Shikoku, SW Japan, *Takeshita, T., Yagi, K., Gouzu, C., Hyodo, H., and Itaya, T., *Isl. Arc*, 査読有, 24, 245-262, 2015.
- ▲ 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 Füsseis, F., *J. Geophys. Res.*, 査読有, 120, 3119-3141, 2015.
- ▲ Determining changes in the state of stress associated with an earthquake via combined focal mechanism and moment tensor analysis: Application to the 2013 Awaji Island earthquake, Japan, *Matsumoto, S., Katao, H., and Iio, Y., *Tectonophysics*, 査読有, 649, 58-67, 2015.
- Pelagic smectite as an important factor in tsunamigenic slip along the Japan Trench, *Kameda, J., Shimizu, M., Ujiie, K., Hirose, T., Ikari, M., Mori, J., Oohashi, K., and Kimura, G., *Geology*, 査読有, 43, 155-158, 2015.
- Detection of a hidden Boso slow slip event immediately after the 2011Mw9.0 Tohoku-Oki earthquake, Japan, *Kato, A., Igarashi, T., and Obara, K., *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 41, 5868-5874, 2014.

・計画研究 B02(査読有 19 篇, 査読無1 篇)

- Supercritical geothermal reservoir revealed by a granite-porphry system, *Tsuchiya, N., Yamada, R., and Uno, M., *Geothermics*, 査読有, 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.*, 査読有, 2016.
- ▲ 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.
- ▲ Fractal particle size distribution of pulverized fault rocks as a function of distance from the fault core, *Muto, J., Nakatani, T., Nishikawa, O., and Nagahama, H., *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 42, 3811-3819, 2015.
- Dynamic weakening of smectite-bearing faults at intermediate velocities: Implications for subduction zone earthquakes, *Oohashi, K., Hirose, T., Takahashi, M., and Tanikawa, W., *J. Geophys. Res.*, 査読有, 2015.
- Effect of stress state on slow rupture propagation in synthetic fault gouges, *Hirauchi, K.-i., and Muto, J., *Earth, Planets Space*, 査読有, 67, 2015.
- Strain-induced amorphization of graphite in fault zones of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan, * Nakamura, Y., Oohashi, K., Toyoshima, T., Satish-Kumar, M., and Akai, J., *J. Struct. Geol.*, 査読有, 72, 142-161, 2015.

・計画研究 B03(査読有 35 篇)

- Widespread distribution of ascending fluids transporting mantle helium in the fore-arc region and their upwelling processes: Noble gas and major element composition of deep groundwater in the Kii Peninsula, southwest Japan, *Morikawa, N., Kazahaya, K., Takahashi, M., Inamura, A., Takahashi, H. A., Yasuhara, M., Ohwada, M., Sato, T., Nakama, A., Handa, H., Sumino, H., and Nagao, K., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 査読有, 182, 173-196, 2016.
- Density and seismic velocity of hydrous melts under crustal and upper mantle conditions, *Ueki, K., and Iwamori, H., *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2016.
- Laboratory measurements of Vp and Vs in a porosity-developed crustal rock: Experimental investigation into the effects of porosity at deep crustal pressures, *Saito, S., Ishikawa, M., Arima, M., and Tatsumi, Y., *Tectonophysics*, 査読有, 677-678, 218-226, 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.*, 査読有, 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.

▲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.

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.

・計画研究 C01(査読有 14 篇)

◎▲Heterogeneous stress state of island arc crust in northeastern Japan affected by hot mantle fingers, *Shibasaki, B., Okada, T., Muto, J., Matsumoto, T., Yoshida, T., and Yoshida, K., *J. Geophys. Res.*, 査読有, 121, 3099-3117, 2016.

▲Excess strain in the Echigo Plain sedimentary basin, NE Japan: Evidence from coseismic deformation of the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Nishimura, T., Suito, H., Kobayashi, T., Dong, Q., and Shibayama, T., *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.

▲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.

◎▲Rheological structure beneath NE Japan inferred from coseismic strain anomalies associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0), *Yabe, Y., Muto, J., Ohzono, M., Ohta, Y., and Iinuma, T., *IAG Symp.*, 査読有, 2015.

An intraplate slow earthquake observed by a dense GPS network in Hokkaido, northernmost Japan, *Ohzono, M., Takahashi, H., and Ichiyangi, M., *Geophys. J. Int.*, 査読有, 200, 144-148, 2014.

▲A friction to flow constitutive law and its application to a 2-D modeling of earthquakes, * Shimamoto, T., and Noda, H., *J. Geophys. Res.*, 査読有, 119, 8089-8106, 2014.

▲Under what circumstances does a seismogenic patch produce aseismic transients in the later interseismic period?, *Noda, H., and Hori, T., *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 41, 7477-7484, 2014.

Short-term slow slip events along the Ryukyu Trench, southwestern Japan, observed by continuous GNSS, *Nishimura, T., *Prog Earth Planet Sci.*, 査読有, 1, 22, 2014.

Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake, * Sun, T., Wang, K., Iinuma, T., Hino, R., He, J., Fujimoto, H., Kido, M., Osada, Y., Miura, S., Ohta, Y., and Hu, Y., *Nature*, 査読有, 514, 84-87, 2014.

・公募研究(査読有 26 篇)

Frictional characteristics of single and polycrystalline muscovite and influence of fluid chemistry, Kawai, K., Sakuma, H., Katayama, I., and Tamura, K., *J. Geophys. Res.*, 査読有, 120, 6209-6218, 2015.

Interlayer bonding energy of Mg-Chlorite: a density functional theory study, *Sakuma, H., *Journal of Computer Chemistry, Japan*, 査読有, 14, 152-154, 2015.

著書・報告書など(査読無 8 篇)

Atlas of Structural Geology - 1st Edition, (Mukherjee, S. eds.), Toyoshima, T., Shimizu, I. et al., Elsevier, 査読無, 2015.

招待講演(51 件)、基調講演(1 件)

・計画研究 A01 (招待講演 4 件)

Matsuzawa, T., Reasons why we seismologists failed to foresee the M9 earthquake, The 4th International Symposium and Seminar on Global Nuclear Human Resource Development for Safety, Security and Safeguards - Nuclear Safety in Post-Fukushima Era -, Academy for Global Nuclear Safety and Security Agent, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2015 年 2 月 18 日

・計画研究 A02 (招待講演 9 件)

田上高広, 熱年代学を用いた山岳の隆起/侵食史復元, 日本地質学会第 122 年学術大会, 2015 年 9 月 12 日

Sagiya, T., Crustal deformation and interplate coupling associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake based on a viscoelastic model of earthquake deformation cycle, AGU 2014 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2014 年 12 月 15 日

・ 計画研究 B01 (招待講演 5 件)

Shigematsu, N. et al., and DFDP-2 Science Team: Tectonic stress and fault rock fabrics in the vicinity of the Alpine Fault inferred from DFDP-2 borehole televiewer imagery. 2015 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2015年12月14日

Kato, A., 2015, Slow slip transients and large earthquakes, The International Statistical Seismology (StatSei) workshop 9, Potsdam, Germany, 2015年06月16日.

・ 計画研究 B02 (招待講演 1 件)

清水以知子, 沈み込み帯における蛇紋岩の脆性—延性転移: 間隙水圧の役割, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 2015 年 5 月 25 日.

・ 計画研究 B03 (招待講演 10 件, 基調講演 1 件)

飯尾能久, 島弧地殻の変形と内陸地震発生過程, 日本地質学会第 122 回学術大会, 2015 年 9 月 13 日

Tanaka, H. and GeoFluid Group Japan, Fluid flux passing through fault zones – one step to understand Wholefluid budget in the subduction zone, 2014 AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2014 年 12 月 16 日

・ 計画研究 C01 (招待講演 4 件)

Noda, H., Earthquake sequence simulations using measured mechanical properties for JFAST core samples and blueschist, Theo Murphy international scientific discussion meeting on "Faulting, friction and weakening: from slow to fast motion", The Royal Society, Kavli Royal Society Centre, Chicheley Hall, Newport Pagnell, U.K. 2016 年 4 月 26 日.

・ 公募研究 (招待講演 18 件)

Yamaguchi, T., Geometry, topology, and fracture in model cross-linked polymers, EMN meeting on hydrogel materials, OAHOST, Singapore, 2016年5月11日.

新聞・TV・ラジオ, 雑誌報道 (新聞 64 件、TV 35 件、ラジオ 4 件、雑誌 9 件、その他の媒体 4 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, 76-89.

西村卓也, 震度 7 が連鎖した, AERA, 2016年5月2日-9日合併号

西村卓也, NHK スペシャル「最新報告 “連鎖”大地震 終わらない危機」, NHK 総合, 2016年5月14日

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

西村卓也, NHK スペシャル「巨大地震 MEGA DISASTER II 日本に迫る脅威 地震列島見えてきた新たなリスク」, NHK 総合, 2016年4月4日

松本則夫, 地下水変化は地震予知のサイン・・・? 進む研究, News every, 日本テレビ, 2016 年 3 月 10 日

高田陽一郎, 巨大地震以降国内各地の火山で活動が活発化, NHK ニュース, 2016 年 3 月 10 日.

佐久間博, 市来雅啓, 地震発生域には塩水が存在 - NIMS と東北大が地下深部での電気伝導度を解明, マイナビニュース, <http://news.mynavi.jp/news/2016/01/21/220/>, 2016年1月21日

飯尾能久, 内陸地震解明へ 1000 個の目, 鳥取県西部中心 高密度に地震計, 朝日新聞, 2015 年 3 月 5 日, 西日本版, 1 面

西村卓也, NHK ニュース 7, NHK 総合, 2015 年 1 月 15 日

一般向けのアウトリーチ活動 (広報誌 2 件、一般向け講演会 49 件、小・中・高向け授業・実験・実習 13 件、サイエンスカフェ 3 件、プレスリリース 1 件)

地殻ダイナミクスニュースレター Vol.1, 2015 年 4 月 1 日発行, 発行部数 600 部

地殻ダイナミクスニュースレター Vol.2, 2016 年 4 月 1 日発行, 発行部数 600 部

小川康雄, 2016年度大田区民大学(東工大提携講座)「私たちの社会や生活を支える科学技術インフラ」, 2016年6月1日, 電磁波で見る火山と地震, 120名

飯尾能久, 神戸大学 R C U S S オープンゼミナール, 2016年5月14日, 内陸地震の発生過程の解明, 70名
岩森光, 第4回 海と命と地球をめぐる公開講演会, 神奈川県立生命の星・地球博物館, 2016年2月27日, 日本列島の変動とダイナミクス, 210名

飯尾能久, ふしぎ発見! 鳥取砂丘(鳥取砂丘調査研究報告会), 2016年1月23日, 鳥取砂丘の直下にもある山陰海岸沿いの地震帯—ジオパークの背景について—, 90名.

西村卓也, 関西G空間フォーラム in 兵庫, 2015年12月10日, 西日本の地殻変動のいま～阪神・淡路大震災から 20 年の地殻変動研究の進展～, 150名

加藤愛太郎, 名古屋市守山区守山生涯学習センター主催講座: 大自然の脅威から命を守る, 2015年10月30日, 地震と火山噴火の謎に迫る-地震科学の基礎から最先端, 名古屋市守山区, 30名
松澤暢, ~栗駒山麓ジオパーク構想推進~日本地震学会講演会, 2015年7月18日, 平成20年岩手・宮城内陸地震-研究から分かってきたこと・まだ分からないこと-, 130名.
飯尾能久, 鳥取県西部地震15年 地震防災講演会, 2015年3月14日, 見えてきた地下の様子-稠密観測から-, 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, 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, 内陸地震はなぜ起こるの?, 40名

受賞(8件)

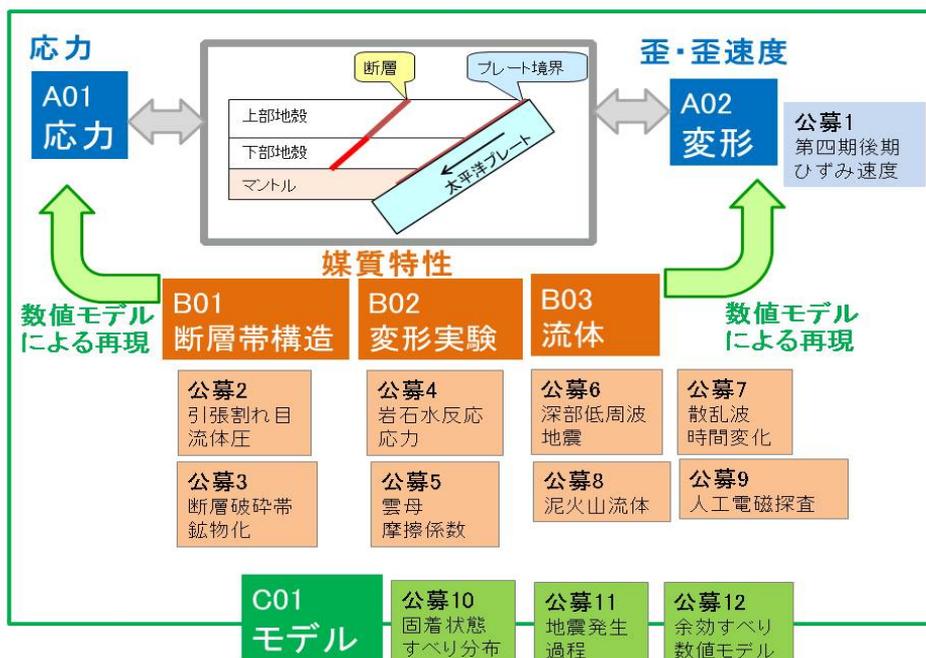
加藤愛太郎, 寺川寿子, 山中佳子, 前田裕太, 堀川信一郎, 松廣健二郎, 奥田隆, 日本火山学会論文賞, Preparatory and precursory processes leading up to the 2014 phreatic eruption of mount Ontake, Japan, 2016年5月24日.
辻健, 文部科学大臣表彰 若手科学者賞, 文部科学省, 地震探査データの解析に基づくプレート境界地震断層の研究, 2016年4月12日.
西村卓也, 平成27年度日本地震学会論文賞 (Short-term slow slip events along the Ryukyu trench, south-western Japan, observed by continuous GNSS, Prog Earth Planet Sci.), 受賞決定2016年3月22日.
Yamaguchi, T., Stick-slip motions of polymer gels having multiple artificial asperities, Best Presentation Award, Malaysian International Tribology Conference (Malaysia), 2015年11月16日.
佐久間博, 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.
辻健, 第132回学術講演会優秀発表賞, 日本物理探査学会, 地中貯留されたCO₂ のモニタリングに向けたデジタル岩石物理の導入, 2015年7月19日.
辻健, 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.
武藤潤, 2014年度日本地質学会研究奨励賞, 日本地質学会, 武藤 潤・大園真子, 2012, 東日本太平洋沖地震後の余効変動解析へ向けた東北日本弧レオロジー断面. 地質学雑誌, 118, 323-333, 2014年9月13日

6. 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、研究組織間の連携状況について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、東北地方の大地震の余震域等で絶対応力の大きさの推定を行っているが、この結果の検証のために、大地震による応力場の空間的な変化とその時間変化を解明する必要がある。応力場の空間的な変化に関しては、B01 の断層深部形状システムによる大量の精度良いデータが役立つ。時間変化については、流体の効果である可能性があり、B01 の断層運動と流体に関する地質的な調査研究、B03 の流体フラックスの研究や、公募2、6～8による流体の挙動の時間変化の研究と連携を深める。これに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3の断層破碎帯の強度モデルや公募5の摩擦強度の研究と連携する。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)。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ている。

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1の新潟盆地の段丘の変形研究との連携が非常に有効である。

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ている。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ている。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 9～12 による知見を加えて、変形（余効変動）や応力場のモデル化を進め、歪場の再現を試みる。応力場の解明も含めて、これらの研究を通じて、東北日本弧の地殻のダイナミクスの総合的な解明を進める。

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ている。

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。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歪速度場への寄与が無視できないことが示唆された。両者の不一致を埋める連携研究として注目される。

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観察された約 1000 本の小規模な断層が比較的最近、鳥取県西部地震に先行して形成されたことが示唆された。この結果は、小規模な断層群に関して、地質学および地震学的な解析の両方を適用できる可能性を示している。これまで全く行われてこなかった試みであり、今後の進展が注目される。

地殻流体

地殻流体は、媒質特性に大きな影響を持ち、絶対応力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ている。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 3,4,5,8)、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ている。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ている。

公募研究リスト

- 1(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)
- 2(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)
- 3(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)
- 4(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)
- 5(B02) 雲母・粘土鉱物の最大摩擦係数の物理 (佐久間 博)
- 6(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)
- 7(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)
- 8(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)
- 9(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)
- 10(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)
- 11(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)
- 12(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)

7. 若手研究者の育成に係る取組状況（1ページ以内）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

若手研究者の援助

本領域発足時に学術振興会 PD であった B02 分担者（大橋）の就職の際には、本研究経費で新規実験室の立ち上げを支援した。また、次世代の岩石変形実験・レオロジー研究をリードする若手研究者を育成するため、各計画研究および国際活動支援班でポスドクを積極的に雇用（現在 2 名、10 月よりさらに 1 名を予定）するとともに、この分野をリードするユトレヒト大学（オランダ）に博士課程大学院生を送り 1 年間共同研究を進めた。国際支援班では今後、ポスドクを他の岩石変形実験拠点にも長期派遣する予定である。

大学院生・若手研究者を対称とした学会での活動支援

平成 27 年度の全体集会（くりこま高原）では大学院生および若手研究者を対象とした夜間集会を開催した。この集会では、本領域の柱として掲げている 2 つの融合研究（応力と歪速度場の理解）に関して、分担研究者および領域評価者によって、学生もしくは大学院生でも理解できるレベルで基礎となる概念の説明を行った。学生、院生から多くの質問が飛び、多くの学生が議論に参加することができた。年に 1、2 回開催される融合研究集会では、若手研究者を各テーマのキーパーソンにすえ、融合研究を推進している。また今年の 7 月に高山で開かれる国際集会では、海外からの招聘研究者による投票から学生のポスター賞を企画し、著名研究者による若手研究者の卵となる院生のエンカレッジを予定している。総勢 30 名に及ぶ海外からの著名研究者に、学生のポスター発表について、評価をしてもらうことで、学生に海外の著名研究者と議論する機会を提供する。さらに毎年発行する本領域のニュースレターでは、巻末に若手研究者紹介の欄を設けている。このニュースレターは、本領域に関わる分担・連携研究者だけではなく、関連分野の大学・研究機関およびそこに所属する研究者に送付し、関連学協会の学会においても配付することで、若手研究者のプレゼンスを高める努力をしている。また総括班経費を用いて、大学院生の国内学会および国際集会への旅費の援助を行い、研究者としてひとり立ちするためのサポートも行っている。

8. 研究費の使用状況（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総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

A01 では東北と鳥取で、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、詳細な地下構造や流体の分布の推定にも有効活用される。これらの応力や地下構造、流体の分布の情報は C01 に伝えられ、最適なモデルの構築に役立てられる。

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ている。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ており、今後、詳細な地殻変動の議論に活用される。H28 年 1 月には、本研究予算を活用して日本列島の地殻歪速度に関する研究集会を開催し、プロジェクト関係者以外からも講演者を招聘し、有意義な議論を行うことができた。

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 年度には断層深部形状検出システムの開発に多額の研究費を使用した。本システムは、昨年度までに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の稼働の目途がたっている。

B02 では代表・分担・連携研究者の有する現有の実験装置を改良して用いるなど、設備を有効利用している。産総研のガス圧式変形試験機では既存の部品をできるだけ活用する形で改良ヒーターを設計した。東北大のガス圧試験機では、別予算で計画されていた圧力容器の更新と本研究で計画したヒーター改良を組み合わせることにより、低価格で抜本的な改造を行なった。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。東京大学では研究室の所有する電子顕微鏡（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。

B03 では、電磁気観測における 2 式の広帯域 MT 機材の購入、設置場所の準備、メンテナンス、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 式と合わせて東北および近畿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、有効に活用している。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ている。地殻変動解析に関しては、自前で開発した中規模問題まで扱える非線形解析プログラムと大規模問題を扱える商用プログラムを問題に応じて使い分けることで効果的に使用している。

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無料のサーバーに 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）、欧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。

9. 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；海洋開発研究機構、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；東京工業大学、平原和朗；京都大学）が、それぞれの専門分野に応じて分担評価したものを、研究項目ごとにまとめて研究領域に対する評価コメントとした。

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は、島弧地殻の強度がこれまで思っていたよりも弱いと考えて初めて理解可能である。それでは、島弧地殻はどのような応力・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、地殻の強度を弱くしている地質学的実体・物理化学的過程は何か、地震が発生しない下部地殻の強度はどの程度で上部地殻の変形・破壊にどのような役割を果たしているのか等々、魅力的なテーマを掲げて地球物理観測、地質調査、室内実験、モデル計算が同時並行的に進進しつつある。以下、これまで2年間の研究進展に関して研究項目ごとにコメントする。なお、項目Aに関しては深尾・松浦・平原、Bに関しては嶋本・高橋、Cに関しては松浦・平原が担当した。

研究項目 A：応力・歪・歪速度の推定

計画研究 A01 では、総計 160 点の臨時地震観測点の設置が完了し、データが蓄積されつつある。これにより、従来は震源メカニズムを決めることのできなかつた微小地震の高精度発震機構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う項目であるが、順調に進展していると判断する。また、既存の地震データの詳細な解析からは、複数の内陸地震（M7 級）に伴う余震の発震機構解が本震前の地震の発震機構解から系統的にずれることを明らかにし、島弧地殻の差応力は従来考えられていたレベルよりもはるかに低いと結論づけている。これは本研究項目で掲げた目標に直接応える重要な成果である。一方、2011年東北沖地震後の地震データの解析からは、東北地方の一部では弱まった筈の東西圧縮力による地震活動が活発化し、しかもその活動が拡大・移動していることを明らかにしている。これは深部高圧流体の流入による断層強度の低下を示唆するもので、弱い地殻強度の実態を考える上で重要な知見である。今後、項目 B との連携研究を一層強化することが望まれる。

計画研究 A02 では、列島内部の変形集中帯に既存観測網（GEONET）を補完する稠密な GNSS 観測点を展開し、高空間分解能データが蓄積されつつある。これまでの2年間に実施したキャンペーン観測で稠密観測点網の重要性は確認されており、対象地域の歪速度の速さから見て研究期間内に目標とした成果が得られると期待される。また、東北沖地震前後の歪速度分布をそれぞれ長波長成分と短波長成分に分解し、前者が地震前後で反転するのに対して後者は同じパターンを維持していることを見出し、地殻の非弾性変形に起因する短波長歪の速度が地質学的に推定されている歪速度とほぼ整合的であることを示した。これは、いわゆる歪速度パラドックス（測地学的歪速度が地質学的歪速度よりも1桁大きい）の解明の鍵となる重要な発見として高く評価される。

研究項目 B：媒質特性の推定

計画研究 B01 では、様々な深さで形成された断層岩の研究を通して、地震発生域からその深部延長方向における断層帯の構成岩類、構造、変形・反応・物質移動などの諸過程を解明することを目指している。このような研究は断層帯の実体を明らかにする上で極めて重要である。重点調査が進められている中央構造線の巨大剪断構造は、歪集中帯で進行している諸過程の解明にも示唆を与えるものである。鳥取県西部地震の震源域では、ほぼ余震域に対応して多数の小断層が発達していることを示した。南極では、地震性断層運動を示すシュードタキライトとマイロナイトが重複する産状が見つかった。C01 による摩擦—流動則を用いたモデリングでは、地震発生域の下部約 1/4 の領域で、地震性断

層運動とクリープがほぼ同じオーダーで起こることが示されており、南極の調査結果と整合的である。地震断層の発達過程では A01 との、岩石変形破壊機構では B02 との、地震のモデリングでは C01 との共同研究がさらに発展することを期待したい。

計画研究 B02 では、既存の変形試験機の改良と新しい回転式熱水摩擦試験機の導入を通じて、地殻と上部マントルにおける断層及び岩石の力学的性質を調べることを目指している。断層の浅部に焦点をあてた巨大掘削プロジェクトとは違って、地震発生領域からアセノスフェアまでを統一的に扱おうとするところが世界的にもユニークな試みである。断層調査と変形実験で着実な成果を上げているが、特筆すべきは、C01 と共同で、摩擦から流動の遷移領域において流体の有効圧の法則が成立することを実験的に示したことである。地殻の強度断面はこの法則を仮定して描かれている。しかし、流動領域に近づくと流体圧が断層の強度を下げる効果が失われるという説が提唱されており、その場合には通常の強度断面と違って、リソスフェアは大きなピーク強度をもつことになる。実験結果はこの説を否定しており、今後大きな議論を呼ぶと考えられる。新しい試験機では、他の試験機のコピーではなく、圧力溶解や地震との関連を調べる上で重要な超低速～中速の機能を含めることを希望する。

計画研究 B03 では、新学術領域研究「地殻流体」からの継続メンバーを中心に、地殻流体の分布や流量を明らかにすることを目指している。空隙やクラック量を制御した花崗岩を用いて弾性波測定・電気比抵抗測定を同時に行い、岩石のクラック開閉による物性変化を定量的にモデル化することに成功した。さらに、ケイ酸塩メルトの地殻～マントル遷移層での密度と体積弾性率を、高温高压実験と熱力学定式化に基づき、メルト組成・含水量の関数として求めることに成功した。また MT 観測により東北日本の比抵抗・電気伝導度構造が、地震発生領域での稠密構造から深部におよぶ広域構造まで、さまざまなスケールで解明が進んだ。岩石物性・地震観測・MT 観測の結果を総合して解析したところ、岩手宮城内陸地震の震源域の流体量は周囲よりも少ないという、従来の理解とは逆の結果が得られた。この重要な結果をもとに A01 や A02 などとの共同研究を進展させることにより、流体と地震発生の因果関係に関する新たなモデル構築へと発展させることを期待する。

研究項目 C：数値モデル化

計画研究 C01 では、項目 B で推定された媒質特性と温度構造を考慮して、広域日本弧および東北日本弧のモデルを構築し、項目 A で観測された応力場及び歪速度場を数値シミュレーションにより再現し、その変動を予測することを最終目標としている。初年度及び次年度は、モデル化に必要な物性値を観測及び実験データに基づいて絞り込み、基本モデルの構築と予備的シミュレーションを行う等、研究計画は着実に進捗している。具体的には、東北日本弧の熱構造を考慮した不均質粘性構造有限要素法モデルを構築して島弧地殻の地形形成シミュレーションを行い、東北日本弧の変形集中帯が深部の局在化した非線形流動で形成されることを示した。これは、島弧地殻の長期的非弾性変形を理解する上で、大変重要な知見である。また、基本モデルを高度化するための要素研究としては、実験に基づく脆性—塑性遷移の構成則を用いて地震発生サイクルをモデル化し、摩擦則が支配している領域から流動則が支配している領域までの応力蓄積・解放過程を統一的に扱えるようにした。次のステップで、この地震発生サイクルモデルを基本モデルに組み込むことができれば、沈み込みプレート境界での大地震の発生サイクルとそれに伴う地殻変形過程の同時シミュレーションが可能になり、画期的な成果が期待できる。

なお、C01 で歪の集中が指摘されていた領域で発生した 2016 年熊本地震については、本領域研究が総合的に取り組むことにより、内陸地震発生に関する基礎的な知見に加え、今後の活動予測に繋がる重要な知見が得られると期待できる。

10. 今後の研究領域の推進方策（2 ページ以内）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募研究での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

基本的な研究戦略

本領域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。これらに対応して3つの研究項目をおくとともに、絶対応力および非弾性変形の解明という、地殻ダイナミクスに関する2つの根本問題を解明するために、2つの融合研究課題を定めて研究項目や計画研究間の連携を深めている。これまでの研究により、これら2つの課題について、これまでの常識をくつがえす、あるいは、これまで誰もなし得なかった成果を得ることが出来た。これらのインパクトは非常に大きく、異論も多々存在する。そのため、得られた結果の吟味を慎重に行うとともに、計画研究間および公募研究との連携をさらに強化して、媒質の特性や状態を明らかにし、それらに基づいてモデル化することにより、得られた結果を検証したい。以下に、2つの融合研究課題のより具体的な推進方策、および媒質特性に基づいたモデル化の課題について述べる。加えて、研究期間中に発生した内陸大地震である熊本地震についての調査研究について述べる。

絶対応力の解明

日本列島内陸の地震発生域において、絶対応力の大きさが従来言われているよりも1桁程度小さい可能性が高いことが分かってきた。しかしながら、この結果は地震すべりによる応力場の空間変化を用いたものであり、それが長期間にわたって存在し続けるのなら、地震前の均質な応力場を前提とした解析には問題がある可能性がある。順調に稼働している稠密観測データ等を活用して、過去100年程度以内に発生したM7級の地震の応力場の空間不均質とその時間変化を明らかにする。また、東北沖地震後の山形・福島県境付近の地震活動の解析から示唆されるように、余震域は深部高压流体の流入により強度が下がる特殊な領域である可能性もある。東北沖地震後の地震データ等の解析および鳥取県西部地域における断層深部形状検出システム(1000台の簡易型地震計による)と小断層調査の総合などにより高間隙水圧に関する解析を進める。さらに、これらの内陸の一部の地域で得られた知見を列島規模の島弧海溝系のシステムの中で位置づけることが重要である。実験と野外調査で得られる断層構造についての情報を総合し、地下浅部の脆性領域から深部の延性領域にいたるまでの摩擦・変形特性と、地殻流体の物理化学的効果を明らかにし、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を構築する。断層帯以外の物性データも用いて地殻内部の応力場や地震発生サイクルにおける応力変動を推定し、地震観測から推定される絶対応力と比較検証する。

熊本地震に関する研究

4月に発生した熊本地震は、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が、現時点までの地震活動は、本領域の関係者が提唱してきた「深部すべりモデル」で説明可能である。熊本地震は、まだコンセンサスの得られていない内陸地震の発生モデルを確立する機会となると期待されるとともに、今後の推移の予測、および、絶対応力や地殻の強度の解明において極めて重要な研究対象となる。この領域では、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・量ともに恵まれたフィールドである。断層深部形状検出システムのテスト観測を今年度に磐城地域で行う予定だったが、熊本地域に変更することにより、断層端の応力集中の程度や絶対応力レベルの推定が可能となると考えられる。また、地質調査や地下水の調査に加えて地震の連鎖的な発生に関する動力学的なシミュレーションも試験的に開始されており、不均質な断層レオロジー特性や媒質特性を考慮した震源域の歪集中過程、動的破壊過程及び粘弾性緩和過程のモデル化による変形や応力場の理解を当地域で行う。このように、本領域が総合的に取り組むことにより、絶対応力等の基礎的な知見に加えて、今後の活動予測に資する重要な知見を得られる可能性もあると期待される。

非弾性変形の解明

非弾性歪を測地観測データから分離するという重要な成果を上げることが出来た。本研究で設置した稠密GNSS観測網およびそれらを用いて補正した山岳地域におけるInSAR解析により得られる情報と地質学的なデータとを総合して、日本列島の地殻変形を多様な時空間スケールで捉え、総合的に解釈していくことが、今後の中心的な課題である。具体的な問題の一つは、日本列島の変形速度に関する

る地質データと測地データの矛盾である。これまで明らかになった活断層の活動開始時期の違いや、断層面外の変形の寄与についての調査結果を踏まえ、異種データ間の矛盾に関する総合的な解釈を試みる。また、地殻変形における水平変動と上下変動の関係について、山岳の熱史解析に基づく隆起・削剥と地質学的時間スケールにおける水平地殻変動のデータとを、物理モデルを介して統合的に理解することを試みる。地震波の散乱構造から下部地殻における変形様式の解明を試みるとともに、**公募研究で採択された地形学の専門家や、非弾性変形の推定や活断層の活動履歴に詳しい研究者に研究協力者として参加して頂き、様々な観点から地殻変形の未解明問題に取り組む。**

媒質特性に基づいたモデル化

本領域では媒質特性に基づいてモデル化を行い観測データの再現を試みる。媒質特性に大きく影響する地殻流体に関しては、固液混合物性に関する実験的、理論的研究、MT観測、地殻流体・岩質インバージョンにより、東北地方と近畿地方での地殻流体分布を推定するとともに、深部由来流体のフラックス推定のために、現地調査、野外質量分析装置の作成と観測を実施する。得られた地殻流体分布や地殻・マントル物質の粘性におよぼす水の影響を合わせて列島規模の媒質特性モデルを構築し、余効変動の融合モデルにより島弧内陸変動の推移を予測する。regionalなモデルとしては、東北脊梁山脈周辺と新潟神戸歪集中帯（越後平野付近）における東北沖地震前・地震時・地震後の変形や応力状態に関する融合モデルを構築する。断層スケールのモデルについては、本研究で得られる結果に加えて、既存の実験研究や断層調査による知見に基づく構成則を用いて、地震発生サイクルや動的破壊成長モデルの構築を行い、応力状態やすべり過程を再現し観測結果と比較する。これらのモデル化のベースとなる媒質特性の推定のための実験研究の主な課題は、(1)中央構造線・跡津川断層系・鳥取県西部地域の小断層の断層の摩擦特性と強度履歴、(2)地熱地帯での高間隙圧発生条件の解明のための熱水と岩石の相互作用実験、(3)海洋地殻物質や含水マントル物質についての高圧高温下での摩擦実験による間隙圧や水の介在する溶解・沈殿・反応の効果の解明、(4)沈み込み帯深部における石英の流動応力の実験と高圧変成岩の石英組織による解明、(5)斜長石・マントルオリビンの粘性に対する水の影響の評価等である。

領域研究を進める上での問題点と対応策

地質と地震の融合研究においては、同じ地域で同じ空間スケールの現象を対象とする徹底的なフィールド調査・観測が重要な手段の一つである。地質調査においては、これまで以上に広い領域における、より詳細なスケール調査が必要になるが、本領域ではこれらの調査を実施出来るマンパワーが十分ではない。国際支援班で来日する**海外ポスドクおよび公募研究でこの体制を強化したい**。また、融合研究の重要なフィールドである鳥取県西部地震の余震域の小断層解析において、小断層の活動年代の解明は特に重要な課題であったが、断層岩の放射年代の専門家である京都大学のZwingmann教授との共同研究により解決できる見込みである。この共同研究は、MTL等で構造地質学的に推定された詳細な変形ステージを年代測定により検証するためにも重要である。これらにより、本領域の一つの目玉である**地質調査と地震観測の融合研究が現実のものとなると期待される。**

不足していること

本領域では、絶対応力および非弾性変形の解明で大きな成果を上げることが出来たが、異論も多いため、国内だけでなく海外でのデータ解析や海外の専門家による結果の検討が重要である。国際活動支援班の経費には大いに助けられている。また、観測結果の検討や再現のために領域内の融合研究をさらに進める必要があるので、総括班主催の融合研究集会を頻繁に開催する予定である。得られた結果の検証のために広く意見を求めることも重要であり、全体集会や国際シンポジウムを今後も開催する。ちなみに、本年7月の国際シンポジウムでは、宣伝を控えていたにもかかわらず既に130名以上の登録があり、若手や海外の研究者への旅費の助成が十分に行えず対応に苦慮している。**総括班主催の集会の旅費が不足**しており、総括班の予算を増やしていただくと有難い。また、断層深部形状検出システムでは、1点でも観測点を増やすために、設備に可能な限りの経費をつぎ込んでいる。そのため、観測点調査などは自力で行っているが、熊本地震の発生により、関係研究者のマンパワーは限界を超えている。熊本地震に関しては、当初予定にはなかったが、地震観測だけではなく地質や地下水の調査、数値シミュレーション等、本領域全体で取り組む予定であり、そのための経費の増額もお願いしたい。