

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」

平成28年度年次報告

【成果の概要】

平成29年9月

科学技術・学術審議会測地学分科会

地震火山部会

目 次

【平成 28 年度の成果の概要】

1. はじめに	1
2. 平成 28 年（2016 年）熊本地震に関する研究成果	3
2-1. 地震現象・構造に関する研究	3
2-2. 阿蘇山の火山活動との関連	4
2-3. 災害及び災害予測に関する研究	4
3. 平成 28 年度の成果の概要	5
3-1. 地震・火山現象の解明のための研究	5
3-2. 地震・火山現象の予測のための研究	10
3-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究	13
3-4. 研究を推進するための体制の整備	15
3-5. 優先度の高い地震・火山噴火	16
4. まとめ	17
用語解説	35

【参考資料】

I. 計画推進部会及び総合研究グループ等別の成果	45
1 (1) 海溝型地震	47
1 (2) 内陸地震	69
1 (3) 火山	91
1 (4) 地震先行現象・地震活動評価	103
1 (5) 地震動・津波等の事前予測・即時予測	131
1 (6) 地震・火山災害	156
1 (7) 史料・考古	167
1 (8) データベース・データ流通	175
2 観測・解析技術の開発	183
3 (1) 東北地方太平洋沖総合研究	193
3 (2) 南海トラフ巨大地震総合研究	213
3 (3) 首都直下地震総合研究	219
3 (4) 桜島火山噴火総合研究	221
4 拠点間連携共同研究	225
II. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）の概要	241
III. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の実施機関	246

[平成 28 年度の成果の概要]

1. はじめに

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（以下、「本研究計画」という。）は、科学技術・学術審議会において平成25年に建議され、平成26年度から5か年計画として実施されている。本研究計画は、平成23年の東日本大震災の発生を受け、これまでの「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」の方針を見直し、地震発生・火山噴火の予測を目指す研究を継続しつつも、地震・火山噴火による災害誘因*の予測の研究も組織的・体系的に進め、国民の生命と暮らしを守る災害科学の一部として、以下の4項目を柱として計画を推進することとなった。

1. 地震・火山現象の解明のための研究
2. 地震・火山噴火の予測のための研究
3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究
4. 研究を推進するための体制の整備

上記項目のうち、1は地震・火山噴火の発生予測や地震・火山噴火に伴う地震動、津波、火山灰*、溶岩流などによる災害に備えるための基本として重要である地震・火山現象の科学的解明のための研究を行うものであり、次のような中項目に分けられている。

- (1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理
- (2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明
- (3) 地震・火山噴火の発生場の解明
- (4) 地震現象のモデル化
- (5) 火山現象のモデル化

2は、1で得られた科学的理解に基づき地震と火山噴火の予測を目指した研究を行うものであり、次のような中項目に分けられている。

- (1) 地震発生長期評価*手法の高度化
- (2) モニタリングによる地震活動予測
- (3) 先行現象*に基づく地震活動予測
- (4) 事象系統樹*の高度化による火山噴火予測

3は、地震・火山噴火が引き起こす地震動や津波、火山灰や溶岩流などの災害誘因を予測するための研究を行うとともに、自然・社会の脆弱性である災害素因*と災害誘因の結びつきを考慮して地震・火山現象による災害事例や災害発生機構を研究し、地震・火山に関する情報を災害軽減に利用するための方策を研究するものであり、次のような中項目に分けられている。

- (1) 地震・火山噴火の災害事例の研究
- (2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明
- (3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化
- (4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化
- (5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

4は、計画全体を組織的に推進する体制の整備や、基礎的な観測体制の強化を図るものであり、本研究計画全体に関わる観測・解析技術の開発や、本研究計画で得られるデータや研究成果に関するデータベース等の研究基盤の開発・整備が含まれ、次のような中項目に分けられている。

- (1) 推進体制の整備
- (2) 研究基盤の開発・整備
- (3) 関連研究分野との連携の強化

- (4) 研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成
- (5) 社会との共通理解の醸成と災害教育
- (6) 国際共同研究・国際協力

本研究の実施に当たり、東北地方太平洋沖地震、南海トラフの巨大地震、首都直下地震、桜島火山噴火については、多項目に亘る実施計画の遂行が災害科学の発展に著実に貢献できることや、発生した場合の社会への影響の甚大さから、上記4項目を含む総合的な研究として優先して推進することとなっている。

本研究計画は、平成28年度において、国立大学法人等、国立研究開発法人、独立行政法人、政府機関、公設試験研究機関¹が策定した177の実施計画（個別課題）及び公募による25の実施計画（個別課題）からなっている。平成28年度の個別課題の成果は、「平成28年度年次報告【機関別】」に取りまとめられている。これらの個別課題による成果を基に、本観測研究計画の項目別の成果を取りまとめたものが、本報告書「平成28年度年次報告【成果の概要】」である。

本報告書では、難解な学術用語をなるべく避け、平易な文章で学術的成果を記述することを心がけて作成した。しかし、説明が冗長となることを避けるためにやむを得ず専門用語等を使用する場合には、本報告書付録の「用語解説」²のページで当該用語を解説しているので、必要に応じて参照されたい。

また、参考資料編には「地震・火山噴火予知研究協議会 *計画推進部会及び総合研究グループ等別の成果」を添付した。これは上記の中項目別あるいは研究テーマ別に学術報告として成果を取りまとめたもの³であり、より詳細な成果が報告されているので参考にされたい。

¹国立大学法人等（北海道大学、弘前大学、東北大学、秋田大学、新潟大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、鳥取大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、立命館大学、東海大学）、国立研究開発法人（情報通信研究機構、防災科学技術研究所、海洋研究開発機構、産業技術総合研究所）、独立行政法人（国立文化財機構）、政府機関（国土地理院、気象庁、海上保安庁）、公設試験研究機関（北海道立総合研究機構、山梨県富士山科学研究所）

²用語解説に掲載している用語に、*を付記している。

³東京大学地震研究所には、本研究計画で立案された研究を推進する目的で地震・火山噴火予知研究協議会が設置され、同協議会には研究分野毎に効率的かつ調和的に研究を推進するために、8の計画推進部会と4の総合研究グループが設置されている。参考資料編の「地震・火山噴火予知研究協議会計画推進部会および総合研究グループ別の成果」は、計画推進部会、総合研究グループ等別に平成28年度の学術的成果を取りまとめたものである。

2. 平成 28 年(2016 年)熊本地震に関する研究成果

2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分に熊本県中部でマグニチュード(M)6.5 の地震(前震*)が発生した。この地震を皮切りに活発な地震活動が発生し、約 28 時間後の 16 日 1 時 25 分には隣接する場所で M7.3 の地震(本震*)が発生した。これらの地震により震度 7 の強い揺れが 2 度も記録され、建物の倒壊や地盤災害など甚大な災害が発生し、人的被害をもたらした。本震後の地震活動は広範囲に亘り、阿蘇地方や大分県中部にまで飛び火するように広がり、それらの地域でも被害をもたらした。これらの地震活動は、これまでに知られている日本国内の内陸地震の余震*活動に比べ、極めて活発であった。地震活動は活火山である阿蘇山のごく近傍でも発生しており、火山活動への影響も懸念されている。この一連の地震活動である平成 28 年(2016 年)熊本地震(以下「2016 年熊本地震」とそれに伴う震災の発生を調査研究することは、災害誘因の予測に基づき災害の軽減に貢献することを目指す本研究計画にとっては、極めて重要な意味を持つ。

2-1. 地震現象・構造に関する研究

M6.5 の前震は日奈久断層帯で、本震は日奈久断層帯・布田川断層帯で発生した。これらの地震に伴う地殻変動*を GNSS*連続観測、緊急 GNSS 観測及び干渉 SAR*解析により捉え、震源断層モデル*を構築したところ、これらの地震ではそれぞれ異なる断層面が破壊した複雑な断層形状をもつことがわかった(図 1)。M6.5 の前震の震源断層は、ほぼ鉛直ながらもやや西に傾く断層が右横ずれ運動したと推定された。一方で本震時には、布田川断層帯では北西に傾斜する断層とその東側延長に南東に傾斜する小断層、日奈久断層帯では北西に傾斜する断層が、それぞれ右横ずれ運動したと推定された(図 1)。地震波の解析により断層面上での滑り分布を推定したところ、本震時には日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて、連続的に破壊が伝播したことがわかった。また布田川断層の浅部で大きな滑りが見つかり、地表に現れた断層のずれと対応していることがわかった。

地震活動調査に関しては、M6.5 の前震の直後から熊本地震合同地震観測グループによる緊急地震観測が行われた。高密度の観測の結果得られた余震の分布や発震機構解*から、断層の細かい形状が明らかになった(図 2 上)。M6.5 の前震から本震に至るまでの地震活動からは、鉛直に近い傾斜の複数の断層面で構成されているように見え、1999-2000 年に発生した M5 の地震を伴う地震活動がみられた鉛直断層面のやや西側で活動している。本震の断層については、日奈久断層帯と布田川断層帯の複雑に組み合わされた断層群に加え、震源近傍にはほぼ鉛直な断層も見られる事が明らかになった。このように、2016 年熊本地震を引き起こした断層群は、複雑な形状を持ち、相互作用をしているようにも考えられる。さらに、2016 年熊本地震前の地震活動から推定した応力*場によると、本震による滑りは地震前の応力場を強く反映している可能性がある。

2016 年熊本地震が発生した地域の詳細な地震波減衰構造を、3次元トモグラフィー*により調査した結果、減衰が小さい領域は本震の大滑り域とほぼ一致し、余震発生域と相補的な関係にあることがわかった。またフィリピン海プレート*から脱水した流体が上昇していると考えられる減衰の大きい領域が、2016 年熊本地震の震源域直下まで延びている様子も認められた。

M6.5 の前震発生後、本震発生に至るまでの過程も調べられた。地震波形の相関を用いた手法により、通常的手法では検出できなかった多くの微小地震を検出したところ、M6.5 の前震後の地震活動は余効滑り*の拡大を示すように断層帯に沿って放射状に広がり、本震発生時にはその震源付近にまで達していたことがわかった(図 2 下)。

2016 年熊本地震に伴い余効変動*が観測されている。日奈久断層帯周辺の GNSS 観測点の変動は地震時断層面での余効滑りにより説明できるが、布田川断層帯周辺の多くの観測点では、これだけでは説明できない。

2-2. 阿蘇山の火山活動との関連

地震及び地殻変動の観測と解析から明らかになった2016年熊本地震の断層は、阿蘇カルデラの内側まで達している。そのため、阿蘇山の火山活動推移も注視された。阿蘇山では、2014年11月25日から始まったマグマ噴火*が2015年5月まで継続し、その後は火口内で水蒸気噴火*を繰り返す様式へと推移していた。2015年9月14日と10月23日には少量のマグマ*が関与した水蒸気噴火が起き、小規模な低温の火砕流*も発生していた。これら一連の水蒸気噴火活動は2016年3月まで継続していたが、その後2016年熊本地震が発生した。本震直後にごく小規模な噴火が起こったが、その後火山活動の高まりはしばらく認められなかった。そして、本震の半年後の2016年10月8日にそれまでよりも規模の大きな噴火が発生し、一連の噴火活動が終了したと考えられる。

本震の際、阿蘇山の観測データを収集していた京都大学火山研究センターが被災しその機能を失った。また、阿蘇山中岳火口周辺では観測点の一部が被災した。これらの復旧活動にあたり、地震・火山噴火予知研究協議会では人員の派遣や観測資材の提供などの支援活動を行なった。その結果、5月初旬には火山活動のモニタリング機能が回復し、7月以降にはマグマ溜まり*の膨張を示す地殻変動や火山性微動*の活発化が観測されるなど、10月8日の爆発的噴火の前兆をとらえることができた。

阿蘇山の活動に対する2016年熊本地震による影響は明らかではないが、2016年熊本地震に伴う地殻変動が阿蘇山のマグマ溜まりに与える変化も見積もられている。断層面に最も近い部分に最大3.5 MPa程度の差応力*変化が発生すること、体積もごくわずかながら膨張することが示された(図3)。

2-3. 災害及び災害予測に関する研究

近代的観測が行われていない時代における熊本での地震に関する史資料を収集・分析し、調査・研究を行った。1889年(明治22年)の熊本地震について官報や新聞情報等を収集し、あらゆる建造物の被害状況から従来よりも詳細な推定震度分布図を作成した。また、1625年(寛永2年)の熊本地震によると考えられる被害に関する歴史資料の調査・収集を行った。

本震断層の即時推定技術の向上も行われた。震源断層モデルの即時推定について、リアルタイムGNSS測位を用い、地震発生後約5分で自動的に布田川断層に沿った右横ずれの矩形断層モデルを推定することに成功した(図4)。

本震により震度7を記録した益城町や西原村における強震動*の特徴を調査したところ、木造家屋に大きな被害をもたらす周期1~2秒の地震動成分が強かったことがわかった。これらは過去に震度7を記録した平成7年(1995年)兵庫県南部地震や、平成16年(2004年)新潟県中越地震の記録と同程度かそれ以上であった。また、本震では、長大構造物に被害を与える周期3~10秒の強い長周期地震動*も発生し、熊本と阿蘇地方において長周期地震動階級*4(最大ランク)が発表されたが、これは地盤による効果よりも断層の動きそのものの寄与が圧倒的に大きかったことがわかった。

2016年熊本地震による斜面災害の分布を調査したところ、傾斜角10度前後の緩斜面でも地滑りが発生しており、風化した軽石またはその近傍及び黒土に滑り面を持つことが明らかになった。地震に伴って崩壊した阿蘇大橋西側斜面では、地震発生以前に斜面が重力によってずり下がり、小崖が形成されていたことがわかった。

本研究計画により得られた情報や成果の社会発信が行われた。例えば、地震・火山噴火被害判読等の技術開発を進めていた航空機搭載合成開口レーダ(Pi-SAR2)による観測を本震の翌日に実施し、観測データを関係機関へ配布したほかWebを通じて一般に公開するなどの取り組みが、各機関において行われた。また、「平

成 28 年熊本地震シンポジウム」を 10 月に熊本市内で開催し、一般市民及び行政担当者に対し、災害の特徴に関する研究成果や災害復旧に向けた様々な社会的な取り組みについて理解の増進を図った。

3. 平成 28 年度の成果の概要

3-1. 地震・火山現象の解明のための研究

地震や火山噴火が引き起こす災害の予知の基本となる地震・火山現象の科学的理解の深化を目指し、史料・考古・地質データも含めた過去の地震・火山噴火現象に関する研究、地震・火山噴火の発生場と発生過程を理解するための観測・実験に基づく研究を以下のように実施した。

(1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理

地震・火山噴火とそれに関連する諸現象やそれらによる災害に関する史料、考古データ、地質データの収集と、近代的観測データとの対比・統合を指向したデータベースの構築について、次のような研究を行った。

ア. 史料の収集とデータベース化

新たな地震関連史料について、東海地方を中心とした 1854 年安政東海・南海地震に関する史料やその前後の有感地震を含む史料、岩手県大船渡市を中心とする史料や 1933 年昭和三陸地震津波に関する旧唐丹村行政文書の調査・収集を実施した。

地震・火山噴火史料データベースの構築に向けて、既刊地震史料集に所収されている史料記述について高度な検索に適したデータ化作業を継続して実施し、国土地理院の地理院地図上に地震による被害発生場所を表示できるシステムの試作版を作成した。

イ. 考古データの収集・集成と分析

全国の埋蔵文化財発掘調査報告書をもとに、和歌山県・香川県・福岡県・大分県・熊本県について災害痕跡に関する地質・考古資料を新たに収集し、データ整理を行った。奈良県・鳥取県・山口県の遺跡発掘現場においては、地震痕跡等の地層資料を採取し、災害発生時期を示す考古資料との照合を実施して、整理・分析を進めた。また、構築中の災害考古情報データベースについては、データベース項目の再定義と新たなデータ約 1 万件の入力作業を行い、地理情報システムの改良を実施した（図 5）。

ウ. 地質データ等の収集と整理

平成 5 年（1993 年）北海道南西沖地震の津波堆積物*が認められるロシア沿海州のバレンティン湾周辺や、1994 年北海道東方沖地震の津波が最も高かった国後島北東部の海岸での調査から、歴史時代の津波痕跡の候補が発見された。古地震に伴う地殻変動の痕跡となり得る海岸の隆起地形と生物痕跡について、北海道の羅臼町幌萌海岸において調査を行った。

地震や津波の痕跡が保存される条件を明らかにするため、青森県三沢市の海岸において平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（以下「2011 年東北地方太平洋沖地震」）の津波で形成された津波堆積物を追跡調査した結果、2011 年 4 月に記載された地点のうち 47% で津波堆積物が保存されていた。しかし、層厚が 1cm 以下の堆積物については、検出できなくなっていたものが多かった。

伊豆大島の有史以降の噴火の内、規模の異なる 5 つの噴火の噴出物について分析を行った。いずれの事例についても複数の組成のマグマの関与が確認されたが、マグマの状態と噴火規模との間に明確な関係性は見られなかった。また、諏訪之瀬島の全島避難につながった 1813 年噴火の噴出物分析

を行い、マグマ溜まりの状態を最近の火山活動時と比較するための基礎データを得た。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

近代観測データと史料・考古・地質データを総合して、2011年東北地方太平洋沖地震のような低頻度で大規模な地震・火山噴火現象の特徴を抽出し、その理解を目指して次のような研究を行った。

ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

過去の関東地震の多様性を調べるために、房総半島南部の海岸段丘について、ボーリングコア*試料の解析から離水年代の再検討を行った結果、関東地震の発生は従来知られていた年代よりも全体的に新しくなり、さらに再来間隔が非常にばらつくことが明らかになった(図6)。

京都盆地に被害を及ぼした近世の歴史地震のうち、1596年慶長伏見地震、1662年寛文近江・若狭地震、1830年文政京都地震について、信憑性の高い史料記述と過去の研究成果に基づき、地理情報システムを用いて推定震度分布図の試作版を作成した。

各地の地震関連史資料の検討によって、1847年善光寺地震とその5日後に発生した大地震による越後高田での被害状況や、1710年と1711年に山陰地方で発生した地震における家屋倒壊数・死亡者数を明らかにした。また、1855年安政江戸地震における武蔵国幸手領・川崎領の家屋倒壊率に関する従来の算出方法を再検討し、新たな算出方法を試作した。さらに、既存の地震史料の再検討により史料の解釈の誤りを見つけた。例えば、従来は善光寺地震の約3ヶ月前に越後高田で発生したとされてきた地震被害が実際にはそうではなく、後の善光寺地震によるものであったことを指摘した。

史資料と地形・地質を組み合わせた研究成果として、1964年新潟地震における佐渡島両津での津波被害の状況や、中央構造線断層帯が活動した1596年の地震による四国東部の地盤の隆起と、それに伴う入り浜式塩田の技術の普及を明らかにした。

日本海溝沿いでは、1611年慶長三陸地震の震源モデルを信頼できる史料の全てに基づき推定した結果、三陸沖の長さ250kmの断層が動いたとすることで説明できることが分かり、2011年東北地方太平洋沖地震で大きく滑った場所は、慶長三陸地震でも滑っていた可能性がある。

北海道南西部における津波堆積物から13世紀頃に発生したと考えられる津波は、地質学的証拠から地震性と推定され、 M_w *7.8相当の断層モデルを用いた津波シミュレーションにより計算された遡上域は津波堆積物の分布と概ね整合的であった。

過去の地震履歴を知るための新しい手法開発も試みられており、地震時隆起によりサンゴが受ける日射量の変化が骨格中の炭素同位体比組成に記録されていることを明らかにした。

LiDAR* DEM*による地表変動量の解析手法を高度化し、2014年長野県北部の地震前後のデータに適用したところ、地表断層や干渉SAR解析による地震時地殻変動、地震波からの逆解析や余震分布などから求められた震源断層域と整合し、手法の有用性が示された。

火山噴火の研究としては、福岡県・佐賀県・長崎県の史資料保存機関の他、国立国会図書館、国立公文書館などで1792年雲仙寛政噴火・眉山崩壊に関する史料の複写・撮影を実施し、噴火から眉山崩壊への推移についてより詳細な実態解明に向けて史料の分析と整理を進めた。

7,300年前の鬼界アカホヤ噴火及び12万年前の屈斜路カルデラ噴火のマグマ供給系を物質科学的に検討した。その結果、カルデラ形成噴火に先行して、二酸化ケイ素成分に富む複数のマグマの混合と集積が大規模かつ長期にわたって進行していたことが明らかになり、準備過程を観測できる可能性を示すものとして重要である。そして、この大規模なマグマ溜まりに二酸化ケイ素成分の少ない新しいマグマが不連続に貫入していた痕跡が見られ、カルデラ噴火の発生や噴火様式*の変化に対応していると考えられる。

イ. プレート境界巨大地震

日本海溝及び南海トラフ沖沿いで行われている海底地殻変動観測により、両海域における地殻変動場の実態が明らかになってきた。日本海溝沿いで観測される 2011 年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動は、大きな滑りが観測された宮城県沖においては粘弾性*緩和変形による西向き水平変位が卓越するが、福島県・茨城県沖ではプレート境界*面上での余効滑りに起因すると考えられる顕著な東向きの変位が観測されている(図7)。南海トラフ沿いでの海底地殻変動観測の結果を用いて、プレート境界面上での滑り欠損*を推定した結果、1944・1946年の東南海地震・南海地震の震源域よりも広い範囲で滑り欠損が大きく、プレート間固着が強いことが示された。一方、低周波地震の活動度が高い熊野灘、室戸沖や日向灘では、周囲に比べて滑り欠損が小さいことが明らかとなった(図8)。

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

地震・火山噴火の発生場における地下構造や応力場を明らかにし、断層面の摩擦の特性や断層周辺の流体分布、地震と火山噴火の相互作用などを明らかにするため、以下のような観測に基づく研究を実施した。

ア. プレート境界地震

2011年東北地方太平洋沖地震発生後のおよそ半年間の地殻変動データから、3次元粘弾性構造モデルを用いて粘弾性緩和による寄与を分離して、余効滑りの空間分布を推定した。この結果、余効滑りの領域は、2011年東北地方太平洋沖地震時の滑り領域とはほぼ重ならないことが示された。日本海溝沿いでは、プレート境界面における地震波反射率が、プレート境界周辺で発生する微小地震の活動度と相関をもつことが知られていたが、人工地震探査*から地震波反射率が2011年東北地方太平洋沖地震の前後で変化した可能性が示された。

紀伊半島周辺の深部低周波微動*発生域の地震学的構造を推定した結果、海洋性地殻の内部に地震波の速度が遅く、P波*速度とS波*速度の比が大きく、減衰が大きな領域が認められた。こうした構造の特性から、深部低周波微動の発生域には流体の存在が示唆され、沈み込むプレートの脱水作用によって生成された流体が深部低周波微動の発生に寄与していると考えられる。一方で、前弧ウェッジマントル*において蛇紋岩*が生成される速度に関する実験から、九州など他の地域と比べて中間的な温度の沈み込み帯では、水に未飽和なマントルを通過して水が湧出している可能性が高いことが分かった。これは、スラブ*とウェッジマントルとの境界で間隙流体圧*が高くなるため、深部低周波微動が起りやすくなっていると考えられる。

イ. 海洋プレート内部の地震

2011年東北地方太平洋沖地震後の2012年12月7日に、海溝付近で発生した深さ約60kmの逆断層*型地震と深さ約20kmの正断層*型地震との震源断層モデルを、近地津波波形の解析から推定した結果、浅部側で発生した正断層型地震の断層下端は、2011年東北地方太平洋沖地震前における正断層型地震活動域の下端よりも深いことが示された。このことは、沈み込む太平洋プレート内の応力場が2011年東北地方太平洋沖地震により変化したことを示唆する。

ウ. 内陸地震と火山噴火

東北日本弧内陸のひずみ*を説明するレオロジー構造モデル*の構築をすすめ、沈み込み帯の2次元熱対流モデルから期待される粘性*率の分布を仮定した数値計算により、2011年東北地方太平洋沖地震後に観測された地殻変動場を大局的に説明することができた(図9)。2011年東北地方太平洋沖地震後に発生した内陸

地震群の応力テンソル逆解析*から推定された応力場は、2011年東北地方太平洋沖地震直後と4年程度経過した後で概ね同じであることが確認された。2011年東北地方太平洋沖地震後に誘発された仙台市大倉周辺の群発地震*活動は、震源再決定と発震機構解の推定により、流体拡散に伴った間隙流体圧の増加がもたらす摩擦強度の低下が原因で発生したことが示唆された。一方、中部地方の跡津川断層近傍における地殻変動の解析から、弾性ひずみを示すと考えられる2011年東北地方太平洋沖地震に伴うひずみの変化が、地震前及び地震後の1年あたりのひずみの変化と全く異なる空間パターンを示した。このことは、跡津川断層近傍では長期間にわたり蓄積された応力*により非弾性変形*が進行している可能性が考えられる。

跡津川観測井で採取された地下水溶存ガスの組成分析データについて、 N_2 -He-Arの三成分図*により、マグマ、地殻、大気を起源とするガスの混合状態を分析し、地殻の内部状態の変化を評価することが可能であることがわかった。

山陰地方の地震帯において、高密度地震観測により得られた記録を用いて地震波速度構造と広域応力場を推定し、地震帯直下に推定される弱領域が応力場の主軸の回転の原因となる可能性と、大地震の断層の両端において応力が緩和されている可能性を示した。また、2000年鳥取県西部地震震源域における高密度の地震観測データによる詳細な余震分布とそれらの発震機構解などから、余震は本震断層の再破壊ではなく、ほとんどが本震断層の周辺で起きている現象であることが確かめられた。一方、ブロック断層モデル*を用いた西日本の地殻変動の解析から、アムールプレートとフィリピン海プレート間の相対運動は、南海トラフだけでなく、中央構造線から新潟-神戸ひずみ集中帯*、日本海から朝鮮半島の領域、山陰ひずみ集中帯の変動帯で賄われていることが示された。

御嶽山において、火山構造性地震のメカニズム解から山頂直下の局所応力場の時間変化を定量的に評価することで、火山活動の状態をモニターできる可能性が示された。また、御嶽山山麓の群発地震発生域において、地震のメカニズム解から地殻内の間隙流体圧分布を推定する新しいインバージョン解析が実施された。蔵王山周辺では、2016年8月に全磁力観測を実施した。これまでの繰り返し観測の結果をまとめ、2014年6月の観測から断続的に続く消磁*域が、現在噴気を上げている振子沢、丸山沢の直下に推定された。遠地地震波形のレシーバ関数*解析により、阿蘇カルデラの地殻から上部マントルのS波速度構造が求められ、中央火口丘下深さ8~15kmにS波の低速度領域の存在が明らかになった。これはマグマ溜まりと考えられている地殻変動発生源に近接しており、深部からのマグマが蓄積している可能性がある。

(4) 地震現象のモデル化

地震発生過程やプレート境界での滑り過程のシミュレーションに応用するために、これまでの研究成果に基づく標準的構造モデルを構築するとともに、滑りや破壊過程を記述する断層の物理モデルの高度化を目指して、次のような研究を実施した。

ア. 構造共通モデルの構築

多くの研究者が利用できる標準的な構造共通モデルの構築を進めた。例えば日本列島下のモホ面*のモデル化では、日本列島直下での既往研究成果を広域的なモホ面構造モデルと接続することを試みた。更に地震波トモグラフィーで得られたP波速度の7.2 km/sの等速度面の深度は、人工地震探査により推定されたモホ面とよく一致するため、モホ面の推定に活用できることがわかった。

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

地震の発生には震源周辺の流体の挙動が深く関与するため、岩石-流体相互作用に関する実験的な研究により、岩石の溶解と析出*による地殻の透水-不透水層境界の形成を明らかにした。その結果、350℃の温度付

近では急激な溶解による流体貯留スポットが形成され、400℃前後では二酸化ケイ素の急激な沈殿によって不透水層が形成されることを示した（図10）。

2011年東北地方太平洋沖地震後、東北日本で観測されている地殻変動分布の定量的な解釈を目指して、摩擦構成則*に従う余効滑りと、地震時の滑り及び余効滑りによるマンツルの粘弾性応力緩和との双方を考慮した地震後地殻変動モデルを構築し、摩擦パラメータ*やマンツルの粘性率等のパラメータを推定した。

(5) 火山現象のモデル化

大規模な災害を引き起こす可能性があるマグマ噴火や、噴火規模は小さいものの火口付近での災害を引き起こす可能性のある水蒸気噴火や火山ガスの噴出の予測を実現できるよう、先行現象とそれに続く噴火現象を把握し、それら諸現象のモデル化を行うため、多項目観測及び火山噴出物の解析をすすめた。

ア. マグマ噴火を主体とする火山

桜島昭和火口では2009年後半から2015年前半までブルカノ式噴火*が頻発し、2015年8月15日に発生したマグマ貫入*イベントの後、噴火頻度が減少していた。ブルカノ式噴火に対する多項目観測データの解析や噴出物の分析を継続するとともに、マグマ貫入イベントの解析を進めた。火山ガス成分の一つである二酸化硫黄の放出率変動を高時間分解能で観測した結果と地殻変動観測の結果を解析し、ブルカノ式噴火発生前の膨張量と二酸化硫黄の放出低下量に相関が見られた。このことは、ブルカノ式噴火発生前に火山ガスが地下に蓄積されるものと推定される。上記のマグマ貫入イベントに伴う地震の震源を決定した結果、地殻変動データから推定されたダイク*の走向に沿って震源が分布することが明らかになった。地震波干渉法*による地下構造の変化の抽出も試みたところ、マグマ貫入に伴う干渉波形の変化から、散乱*特性の変化した場所が貫入位置あたりに求められた。

伊豆大島では、地震波干渉法解析から得られた地震波速度変化とGNSS解析から得られた面積ひずみ*との間に相関が見出され、その関係式を推定することができた。

霧島山新燃岳2011年噴火の噴出物について、1µm以下の微結晶構造分析を行い、異なる噴火様式に対応する構造の違いを明らかにした。さらに高倍率観察を進めたところ、溶岩片中に1nm程度の鉄チタン酸化物の晶出の有無を示す違いが見られた。晶出しているものは火口まで気泡流として上昇してきたマグマが固結したもの、そうでないものは一度破碎したマグマが火口内で再溶結したものにそれぞれ対応すると考えられる。

西之島2013-15年噴火について、2016年6月に無人ヘリコプター調査及び同年10月に上陸調査を行った。この噴火は、安山岩質であるにもかかわらず流動性に富む溶岩流主体の活動となったことが特徴的である。採取された噴出物の分析を行った結果、溶岩の温度が高いことと、含まれる結晶の量が少ないことが流動性に富む原因であることがわかった。さらに、浅所に一時的に滞留し脱ガス*したために、噴火時の急減圧による発泡や微結晶の成長が生じず、爆発的な噴火が抑制されたと推察された。

イ. 熱水系の卓越する火山

2006年以降火口域の膨張が続く十勝岳での電磁気探査や熱水変質調査から、山頂火口域では熱水系が上下に厚く、山体膨張の膨張源や、浅部火山性地震*の発生領域に一致することが明らかになった。また、継続的な熱消磁傾向が観測されていることに関連して、熱水流動数値計算を行うことにより、噴気の移動経路の一部で流れにくくなっていることが原因である可能性を検討した。

一方、草津白根山では2014年5月の熱消磁イベント以降は大きな変化がないまま推移しており、高温流体の貫入が続いていたと考えられる。これは、熱化学的研究からも支持される。火口湖底から噴出する流体の熱

化学的特性を記述する数値モデルを開発し、それに基づく計算の結果、2014年以降の群発地震に同期して湯釜火口湖へ供給される熱水の化学的特徴が変化したことが判明した。この変化は、地下熱水系において気化しやすい成分が減少し、水に溶けやすい成分が濃縮したためと解釈され、原因はマグマからの高温火山ガス供給率が増加したことにあると考えられる。

噴出物に含まれる変質鉱物分析によっていくつかの火山を比較したところ、火山によってその特徴が異なることが明らかになった。御嶽山・秋田焼山では、長期的に安定した熱水系の環境下で生じた鉱物組み合わせが認められるのに対して、十勝岳では安定した熱水系の特徴が見られなかった。この違いは、マグマが地下浅部の熱水系に貫入する頻度に起因すると解釈できる。

御嶽山の東麓においては、2007年の噴火前から継続中の水準測量が実施された。2014年の噴火後は沈降が検出されていたが、今年度の成果により、山頂方向に向かって隆起が増す傾向がわずかに検出された。

口永良部島では2015年の噴火後初めて、水準測量で沈降が確認されたが、地震活動と火山ガス放出量からは火山活動は静穏化*には至っていないと判断される。

弥陀ヶ原火山・地獄谷の水準測量から、2015年9月以降の1年間で1cmを超える隆起が局所的に観測された。

箱根山大涌谷で2016年10月7日に採取した噴気ではマグマ性揮発性物質の減少が見られ、マグマから浅部熱水系に供給される流量が減少したことを示唆している。

3-2. 地震・火山現象の予測のための研究

地震や火山噴火現象の科学的理解に基づき、地震活動や火山活動の予測研究を行った。地震発生予測では、プレート境界地震の長期評価の研究及び先行現象に関する研究を行った。火山噴火の規模、推移、様式の予測のために、噴火事象系統樹の作成や事象分岐*論理の構築を進めた。

(1) 地震発生長期評価手法の高度化

プレート境界で発生する大地震に対しては、観測データ等から得られたプレート境界の状態を考慮した数値シミュレーションを実施し、新たな地震発生長期評価につながる手法の開発を行った。内陸地震については、地質データ等と近年の観測データとを統合して得られる地震発生の繰り返し特性の多様性を把握するための調査を実施した。

地下の温度、圧力等の条件による摩擦パラメータの変化を考慮した摩擦構成則を定式化し、日本海溝付近の掘削により得られた試料を用いた実験結果を考慮した、地震発生サイクルのシミュレーションを実施した。その結果、巨大地震や大地震を含むサイクル、海溝まで達する巨大地震の頻度、深部のみの大地震の頻度、巨大地震時の滑り量と発熱量、長期的摩擦発熱量等に関する観測結果の特徴をおおむね説明する結果が得られた。また、最浅部のみが数cm/s程度の低速度で滑る津波地震に相当するイベントも再現された。

過去に発生した地震像に2種類以上の典型例があることを見出した神城断層について、これらの多様性に関する詳細なデータを得るためのトレンチ調査*等の現地調査を実施した。

(2) モニタリングによる地震活動予測

物理モデルに基づく数値シミュレーションと地震活動や測地等の観測データを比較することにより、プレート境界滑りの時空間発展機構を包括的に理解する研究を実施した。さらに、プレート境界滑りを予測する手法の開発を進めた。また、地殻ひずみ・応力の変動を、断層滑りや広域応力場を基に推定する手法を開発し、地震・火山現象に及ぼす影響を評価した。統計的モデルを用いて、地震活動の予測実験を行うとともに、その予

測性能を評価した。

ア. プレート境界滑りの時空間発展

ブロック断層モデルを時間変化も含めて解析できるように拡張し、2011年東北地方太平洋沖地震前の日本列島の地殻変動の解析を実施したところ、平成15年(2003年)十勝沖地震(以下「2003年十勝沖地震」)の余効滑りや、2005年宮城県沖の地震に伴い、宮城県沖合の滑り欠損が小さくなる様子が捉えられた。さらに2008年の茨城県沖や福島県沖の地震後の余効変動により、茨城県沖や福島県沖でのプレート境界の滑り欠損が小さくなっていることが推定された。

相似地震*を利用し、プレート境界の固着状態の時空間変化を推定した。地震活動に関する時空間更新過程モデルを用いて非地震性滑り*の時空間的变化を推定したところ、2011年東北地方太平洋沖地震発生までの太平洋プレート境界では、十勝沖から釧路沖において、2003年十勝沖地震後の滑り速度が長期にわたって以前より高い水準にあること、平成6年(1994年)三陸はるか沖地震の余効滑りの減衰期間が深さにより異なることなどが推定された。日向灘から奄美大島にかけてのフィリピン海プレートが沈み込むプレート境界において、非地震性滑り速度を求めたところ、M6.5以上のプレート境界型地震4個のうち、3個について地震発生の少し前から非地震性滑り速度の増加が認められ、全ての場合において地震発生後は非地震性滑り速度が遅くなったことがわかった。

海底水圧計のデータの解析により、2013年12月から2014年1月の房総沖のゆっくり滑り*発生場所に近い観測点で2cmを超える隆起が認められた。東海地方で2013年頃からはじまった長期的ゆっくり滑りに関して、GNSS連続記録を用いて時空間分解能の高い解析を行った結果、2013~2015年の最大積算滑り量は約6.5cm、長期的ゆっくり滑り発生時に解放された地震モーメント*は約Mw6.5相当と推定されたほか、長期的ゆっくり滑りと短期的ゆっくり滑りの両方の滑り分布の同時推定に成功した。

南海トラフ沿いで発生する深部低周波微動から放射される波動のエネルギーを定量的に評価し空間分布を調べたところ、紀伊水道以西の四国地方で高く、東側の紀伊半島、東海地方で低いことが分かり、プレート沈み込み速度との関連性が考えられる。

房総沖のゆっくり滑りのメカニズムの理解に向けて、1996年に発生したゆっくり滑りの滑り分布の推定を基に、プレート境界面上における応力の時空間変化を求め、これを再現できるような摩擦構成則のパラメータを推定した。

イ. 地殻ひずみ・応力の変動

活断層周辺の応力状態を推定するために、観測されたP波初動の向きの分布から応力の空間分布を求める応力逆解析手法を開発・検証し、その有効性を確認した。人工誘発地震が発生する南アフリカ鉱山では、震源貫通掘削コアの楕円度から差応力を推定するための解析を実施した。

ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験

本震直後に発生する余震活動の欠測を埋めるための統計的手法が提案され、2016年熊本地震の余震活動に適用したところ、統計的に補充された余震データから、4月14日のM6.5の前震直後の余震活動の中に、日奈久断層北側の布田川断層付近で相対的静穏化が検出された。

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

大地震発生前の前震について、2016年熊本地震が発生した地域(九州中部)の過去の前震活動の統計的解析を行い、本震前に前震が現れる割合などを調査した。茨城県沖を対象として、連続地震波形記録から群発地震と

繰り返し地震*を自動的に検出したところ、大地震の前にはこれらの活動が増加し、また直前には空間的に広がりを持った前震活動として捉えられた。

大地震に先行する地震活動の静穏化を系統的に評価した。北海道からカムチャツカ半島までの千島列島沿いを対象として、長期静穏化にもとづく予測マップを作成したところ、1993年から2012年までの間で地震発生の可能性が高いと予測された領域の予測マップの全領域に占める割合が約15%に対して、期間中におきたMw8.3以上の地震3個すべてが同領域で発生した。また、1990年から2014年までに発生した世界のMw8.0以上の地震23個について、地震活動の長期的静穏化が先行していたかどうかを調査した結果、静穏化の有無が判断できなかった4例を除く19例について、本震発生前に10年程度以上の長期静穏化が見られた。さらに、2016年熊本地震に対しても震源域から九州西方海域にわたり、広範囲な静穏化が2014年末ごろから開始していた事が判明した。

2016年熊本地震に関してb値*の調査を行ったところ、時間的な低下傾向は見られなかったが、前震・本震の破壊の開始点はb値の非常に低い場所に位置していたことがわかった。世界及び東北沖の地震活動と、月の満ち欠けの周期程度で変化する潮汐*応力の振幅とを比較したところ、振幅が大きいときにはb値が小さくなることがわかった。

Mwが8.2より大きい地震の先行現象として、1時間程度先行することが報告されている電離層全電子数(TEC)*の変化を2010年マウレ地震(Mw8.8)、2014年イキケ地震(Mw8.2)、2015年イヤベル地震(Mw8.3)において調べたところ、それぞれMwに応じた空間的広がりや強度、先行時間をもつことを確認した(図11)。さらに、通常は観測可能な大きさのTEC異常は認められていない32個のMw7.0-8.0の地震について解析を行ったところ、例外的に地震前後のTECが大きい状況下では、直前の異常が観測される場合があった。

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

平成26年度に火山活動の活発化に伴って緊急的に作成された蔵王山の噴火事象系統樹は、御釜からのテフラ*層の噴火推移に関する最新研究成果などを加えて改定された。また、次年度の阿蘇山の噴火事象系統樹作成に向け、研究集会を開催した。

地質調査、年代測定、岩石学的解析に基づく、今後の噴火事象系統樹作成に必要な基礎データの収集が、富士山、草津白根山、白根火砕丘*群、摩周火山等について進められた。草津白根山では、約1万年前には山頂域でマグマ噴火による火砕丘の形成が始まっており、約1100年前頃には水蒸気噴火の活動期に入っていたことが明らかになった。

一方、事象分岐の条件を導くことを目指す研究も行われた。桜島火山歴史時代のプリニー式噴火* (文明・安永・大正)の噴出物に含まれるメルト包有物*の揮発性成分含有量から噴出前にマグマが滞留していた深度を見積もったところ、大部分が約0.5~3kmとなることがわかった。この深度範囲にわたってマグマが分布していたとすると、軽石噴火の噴出体積のほぼ全てが、噴火直前には浅部の火道に貫入した状態であったと推定される。これは、噴火規模の予測のためには、マグマ貫入量を正確に決めることが重要であることを示唆する結果である。また、大地震の発生と火山噴火の発生の関連性を調べるため、漏れなく記録されていると考えられる全世界の1976年以降のMw7以上の地震と1966年以降の噴火について統計解析を行った。その結果、Mw7.5以上の地震の発生後、距離200km以内にある火山の噴火数が数年間にわたり約50%増加していることがわかった。また、それ以遠の距離や、Mw7.5以下の地震に対しては、火山の噴火数に顕著な変化が見られなかった。

事象分岐の体系的分析の基盤となるデータセットの収集には、衛星を用いた広域観測が効率的である。ひまわり8号の超高頻度赤外画像、高分解能衛星画像、全球三次元地形データを組み合わせ、インドネシア・ラウン火山の2015年6-8月噴火の解析を行い、前駆期、2回の溶岩噴出期、そして終息期からなる噴火推移の全貌を明らかにした(図12)。

気象庁は噴火警戒レベルの判定基準の根拠を明示して公表するため、過去のデータを改めて精査し、注目す

べき現象の整理，判定基準のできるだけの具体化及び必要な見直しを進めた。平成27年度の浅間山，御嶽山，桜島に引き続き，伊豆大島，三宅島，阿蘇山等の8火山について公表した。

3-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

地震・火山噴火による災害誘因の自然素因への作用，社会素因への影響，社会的影響の波及効果を総合的に研究した。地震・火山噴火の災害事例の研究や，地震・火山噴火の災害発生機構の解明，地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法や即時予測手法についての研究を進めた。また，災害軽減のための情報発信についての研究，地震・火山現象や災害の基礎情報の啓発や予測情報の利用方法に関する研究を行った。

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

明治29年(1896年)陸羽地震(M7.2)の際に，震源域から離れている現横手市の一地域において住家全壊率が10%以上になった原因を探るために，常時微動*観測による地盤構造の調査を行った。常時微動の水平成分と上下成分のスペクトル比の特徴から，横手盆地では比較的狭い範囲(幅1~2km)で地盤が深くなる構造が存在していることが推測された。

室町時代後期の明応7年(1498年)に，近畿地方で記録された有感地震と地震・災害対応について検討した。「大地震」と記されている明応7年6月11日と，同様に「大地震」と記され東海地震と考えられる同8月25日の地震とについて，畿内で記された日記史料にみられる有感地震の記録に基づいた検討の結果，余震回数や被害様相などの地理的特徴の違いから，これら2つの「大地震」は同じような発生過程をもつ地震ではなかった可能性が高いことがわかった。

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

地震災害誘因を評価するための地下構造モデルを構築するために，国内の堆積平野において地震波干渉法を活用することにより地下構造を推定し，長周期から周期1秒までの首都圏の強震動シミュレーションに成功した。また南海トラフ海域の付加体*に対する地震波速度構造を推定し，過大な強震動予測をもたらしていた従来のS波速度や層厚を修正した新たな地下構造モデルを構築した。

大規模噴火避難に関して住民の意向をアンケート調査したうえで，避難シミュレーションを行い，避難勧告の情報を発表するタイミング等避難に関する検討を行った。桜島大正噴火に基づき降灰厚が30cm以上と予測された鹿児島市街地を対象として，車により渋滞のない最適な避難経路を取る場合，80万人の全住民が避難するのに約50時間かかることがわかった。また，アンケート調査からは，県内の降灰の少ない場所や他県に移動する長距離避難の意向をもつ住民は約20%であることが明らかとなった。この結果と，風向きによる降灰域の局在化を考慮すると，避難する住民の数は減少し，避難勧告から避難完了まで数時間程度となる。さらに，事前に避難準備情報等を出すことによってその時間が短縮されるという結果となった(図13)。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

地震動の事前評価に関しては，震源断層モデル及び地下構造モデルの高度化と，強震動特性の解析を進めた。日本海下の深発地震の広帯域地震波形を詳しく調べたところ，沈み込む太平洋プレート内部を伝わる地震波は，そこでの多様なスケールの不均質構造の影響を強く受けており，特に薄い低速度層は周波数2~4Hz程度の地震動を沈み込む太平洋プレート上部に向けて強く放射し，異常震域*の発現に寄与することを確認した。物理探査に基づいて作られた京都堆積盆地の地震波速度構造モデルを，近地地震のP波を用いたレーンバ関数解析により検証し，速度構造モデルの修正方針を示した。大阪堆積盆地の速度構造モデルの妥当性

評価のため、2011年東北地方太平洋沖地震の地震動シミュレーションを行い、震源域から大阪堆積盆地までの地殻構造と堆積盆地構造モデルの検証及び盆地の長周期地震動に対する応答特性の解析を行った。

南海トラフで発生すると考えられている巨大地震のリスク評価の精度向上のために、震源過程、地震波伝播特性、深部地盤構造、強震動予測、浅部地盤構造、構造物被害予測、リスク評価の各項目について、予測モデルの構築・選択とそれらのモデルによるリスク評価の不確かさに関する検討を実施した。リスク評価の結果、損失額及び木造家屋居住者一人当たりの死亡率は、地域により地盤増幅特性や震源からの距離に大きく依存し、また感度解析の結果、損失額及び死亡率ともに強震動予測式が結果に大きく影響することがわかった(図14)。

地震による地滑りの事前評価に関しては、甚大な被害を引き起こすテフラの地滑りハザードマップ作成方法について、現地調査で得られた崩壊タイプ等の知見を基に試案をとりまとめた。平成27年度に地滑り土塊に設置した加速度・傾斜センサーにより、基盤から移動土塊、地表面に至る地震動の増幅過程を明らかにした。

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

地震動の即時推定について、地震波は伝播中に地下構造の不均質性の影響を受けやすいため、この事を考慮した地震動予測シミュレーションを2016年熊本地震の本震について行ったところ、予測震度と観測震度の差が10%程度改善されるなど、震度の予測精度が向上した(図15)。リアルタイムの揺れの実況値から揺れの伝播を予測する手法の高精度化のため、高密度で配置されている自治体震度計からリアルタイムで震度と最大加速度値を受信するシステム開発をおこない、常時接続状態での安定稼働を実現した。

津波の即時予測に関し、日本海溝・千島海溝海底地震津波観測網(S-net)*程度の観測点間隔の観測網を仮定し、2011年東北地方太平洋沖地震を模して津波数値計算と沿岸の津波浸水域及び浸水高の予測計算を行った。その結果、地震の破壊過程終了後2~3分程度で十分な精度で津波浸水予測ができることを示した。また、この手法を、カナダ太平洋沖で発生した2012年ハイダグワイ地震(Mw7.8)時にオレゴン州沖海底圧力計で観測された津波データに適用し、手法の有効性を確認した。沖合から海岸に進む津波の高さと水深の関係について、2011年東北地方太平洋沖地震時の津波で得られた観測値から、沿岸の津波高は沖合に比べて水深比の1/5乗に比例して増幅することを見いだした。さらに、津波の生成・伝播過程を、波源と二次波源(散乱源)、伝播経路、観測点付近の効果の3つに区分して、それぞれの段階ごとに数理モデル化し、遠地津波の観測事例に適用して減衰定数などのパラメータの推定を進めた。

火山噴火に伴う降灰の即時予測に関して、噴煙観測による予測精度の向上が進められた。桜島では、LiDAR装置から発射されるレーザーを2016年7月26日の爆発に伴う噴煙に照射することにより、散乱強度と偏光解消度*の時空間分布を調べた。また、2016年3月26日桜島噴火に伴う噴煙について、Kuバンド高速スキャンレーダー*による観測データの解析から、世界で初めて約1分毎に火山噴煙の詳細な3次元構造を捉えた。気象庁レーダー観測網による日本国内における火山噴火噴煙の検知能力、各火山・高度別の検知時間間隔や高度分解能について調査し、小規模な噴火が検知困難な火山や、大規模噴火の検知高度分解能について明らかにした。近年、発生した火山噴火について、レーダー観測による噴出物総量の推定を行い、野外調査の結果と比較して妥当な値の得られたことを確認した。

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

釧路市を対象として避難施設と避難圏域に関するデータの収集と分析から、積雪寒冷地における高齢者福祉施設の津波避難の現状と課題を明らかにする等、各自治体のもつ、災害に対する社会的脆弱性に関する分析を行った。その結果、歩行困難な高齢者が多くそれを介助する職員が不足していることから、自動車避難

の検討及び避難高齢者の集団待機場所の確保が有効であると思われる。

富士山周辺市町村における火山防災担当者のスキル向上を目的に、継続的に知識を取得し、共通課題を共有し、地元の火山噴火に的確に対応できる人材育成を目指した研修プログラムの構築を試みた。

3-4. 研究を推進するための体制の整備

地震・火山現象に関する研究を推進する体制を構築し、研究成果を災害軽減に活用するため、観測網やデータベースなどの研究基盤の整備・拡充と成果公開、国際的な共同研究の推進、幅広い人材育成、災害軽減に関する教育や理解増進等の取組を組織的に行った。

研究基盤の開発・整備

・地震・火山現象のデータベースとデータ流通

平成 28 年度に噴火した阿蘇山と桜島のほか、火山活動の高まりがみられた霧島山（えびの高原（硫黄山）周辺）と薩摩硫黄島において、緊急観測により収集した火山活動の詳細なデータを解析し、データベース化した。平成 27 年度に確立した新たな検知手法を取り入れた自動震源決定の作業手順を、全国地震カタログ作成に導入した運用を開始した。この結果、カタログに登録される地震数が従来の約 2 倍に増大した。

陸上・海底地形データや人工地震探査等の解析から、日本列島周辺の海溝軸とプレート境界形状のモデルを構築し、研究者が共通して用いるコミュニティー・モデルとして研究成果共有システム上に公開した。

・観測・解析技術の開発

陸域の基盤的地震・火山観測網の整備と維持を行うとともに、海域の地震・津波観測監視システム（DONET）*も含めた海陸観測データの流通システムを構築した。また東日本沖では日本海溝海底地震津波観測網（S-net）の構築のために、海溝軸外側（北海道沖から千葉県）で観測装置と光海底ケーブルの敷設工事を行った（図 1 6）。

2015 年に、2011 年東北地方太平洋沖地震時の最大滑り域付近の日本海溝において海溝軸を跨ぐ形で、脚形状や搭載センサー等を改良した機器 5 台を設置し、海底間音響測距観測*を行った。収集された約 1 年間の連続データ（最長約 7.2 km の基線）から、ばらつきで $\pm 1 \sim 2$ cm、1 年間の変位速度で ± 2 cm/年の精度で基線長を計測できる見込みを得た。

次世代型広帯域海底地震計として自律展開設置・自己浮上回収方式を用いた新型機について実海域での試験を行った。着底時に大きな傾斜をもたらす降下時の傾斜変動が、回収時の浮力確保のために追加した浮力体の張力により大幅に低減されることがわかった。

火山観測の高度化を進めるため、ひまわり 8 号の全球画像を 10 分毎にダウンロードし、補正、解析、アーカイブ処理を行う「活火山リアルタイム観測システム」を完成し、東アジアから西太平洋域の火山の熱異常観測を行っている（図 1 2）。また、一般公開用の Web システムの開発を進めている。火山周辺における重力観測技術向上のため、変位計測の基準となる波長安定化光源 1 台を複数の観測点の装置の光源として共通に使用し、光ファイバーで分配することで、効率的かつ安定的に計測する絶対重力計観測網の構築を進めた。長距離伝送に適した光通信に使われる光源（波長 1550 nm 帯）を用いた絶対重力計の動作検証を行い、従来の可視光源を用いる場合と誤差の範囲内で整合する結果を得た。

地殻変動のリアルタイムモニタに関して、数日から 1 日以下程度の時定数を持つ地殻変動を精密に捉えるための GNSS 解析の高精度化に係る研究開発を進めた。キネマティック*精密単独測位解析において、観測地点、日付毎に最適な対流圏遅延パラメータを推定することが位置推定精度の向上に重要であることがわかった。平

成27年度に開発した3軸精密可動台を用いて、キネマティックGNSS時系列の精度評価を行ったところ、海上ブイを模した移動体に設置した実験により、アンテナの回転により大きな誤差が発生することを突き止めた。また、観測点周辺の地形や建造物等からのマルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発し、これを補正值としてキネマティックGNSS解析に用いることで、精度の向上が見込めることを確認した。

GNSS観測・解析技術において、GEONETリアルタイム解析システムで処理する衛星系をGPSのみからGPSとGLONASSのマルチGNSS対応に拡張するとともに、リアルタイム・キネマティックGNSS時系列から火山性地殻変動の圧力源の状態を逐次推定するシステムを構築した。

・社会との共通理解の醸成と災害教育

地震研究の成果や現状を伝えるため、内閣府における南海トラフの巨大地震の防災対策検討に対応した「南海トラフ巨大地震の予測可能性に関するシンポジウム」（平成28年9月）と、甚大な被害を生じた2016年熊本地震に関する「熊本地震シンポジウム」（平成28年10月）を、一般に公開して開催した。

関係機関の観測情報など火山防災情報を収集・統合表示する準リアルタイムシステムを改良し、北海道の火山周辺自治体等に試験的に設置している。2016年11月に活発な熱泥水活動の見られた倶多楽火山大正地獄の事例では、関係機関間のリアルタイムでのデータ共有と防災対応に利用された。本システムは、火山防災のみならず気象監視にも活用できるが、2016年8月の台風被害に関しては、市町村の規模により活用有無が分かれ、平時を含めた活用法の検討など課題も明らかとなった。

・国際共同研究・国際協力

ニュージーランドのヒ克蘭ギ沈み込み帯における地殻活動解明のために、日本、ニュージーランド、米国が共同で海底観測機器を設置して観測を行った。これまでで2番目に大きい規模のゆっくり滑りが観測され、陸上のGNSS観測網による検出の数日前に、海底の上昇（数cm）が捉えられ、滑りがプレート境界の浅部から深部に進行し、ほぼ海溝軸まで達したことを示唆する結果を得た。

3-5. 優先度の高い地震・火山噴火

本計画実施期間に災害科学の発展に貢献できることや、発生した場合の社会への影響の甚大さを考慮して、東北地方太平洋沖地震、南海トラフの巨大地震、首都直下地震、桜島火山噴火については、研究項目を横断する総合的な研究として推進している。ここでは、総合的な取り組みについてのみ記述し、それぞれの地震・火山噴火に関連する個別の研究成果は3-1から3-4に記述した。

・東北地方太平洋沖地震

2011年東北地方太平洋沖地震は、日本の観測史上最大の地震であり東日本大震災をもたらした。しかし地震発生の予知はおろか、発生ポテンシャルですら正しく推定できなかった。将来の巨大地震の際の災害軽減に役立つために、この地震に関する研究が行われた。例えば、今なお続いている余効変動のメカニズムの解明や、広域の応力場の変化による日本列島の陸海域における地震活動への影響、同様の巨大地震の発生による強震動の評価や津波即時予測の高度化が行われた。

・南海トラフの巨大地震

南海トラフ域では、昭和の東南海・南海地震から70年以上が経過し、次の巨大地震発生の可能性は高まっている。海域観測で得られる測地データを基に滑り欠損の分布が求められ、将来発生する地震発生像の理解が

進められた。南海トラフの巨大地震によるリスク評価の精度向上のための研究が、大学付置研究所に設置された共同利用・共同研究拠点間の連携共同研究として行われた。

・首都直下地震

地震像が多様な首都直下地震について、その災害誘因予測に必要な基盤となる観測網の維持や拡充とデータの取得が行われた。この観測結果と数多く残されている地震災害に関する史料との比較により、過去に甚大な被害をもたらした地震像が明らかになる可能性がでてきた。

・桜島火山噴火

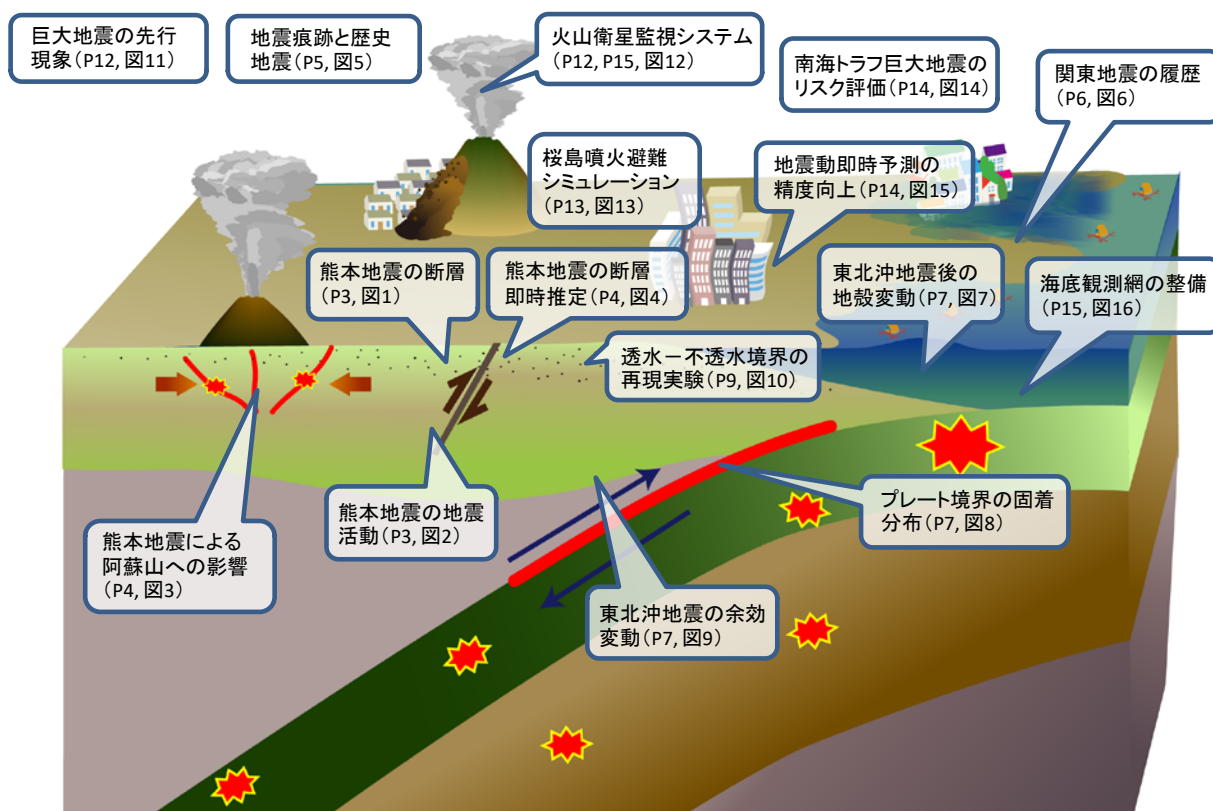
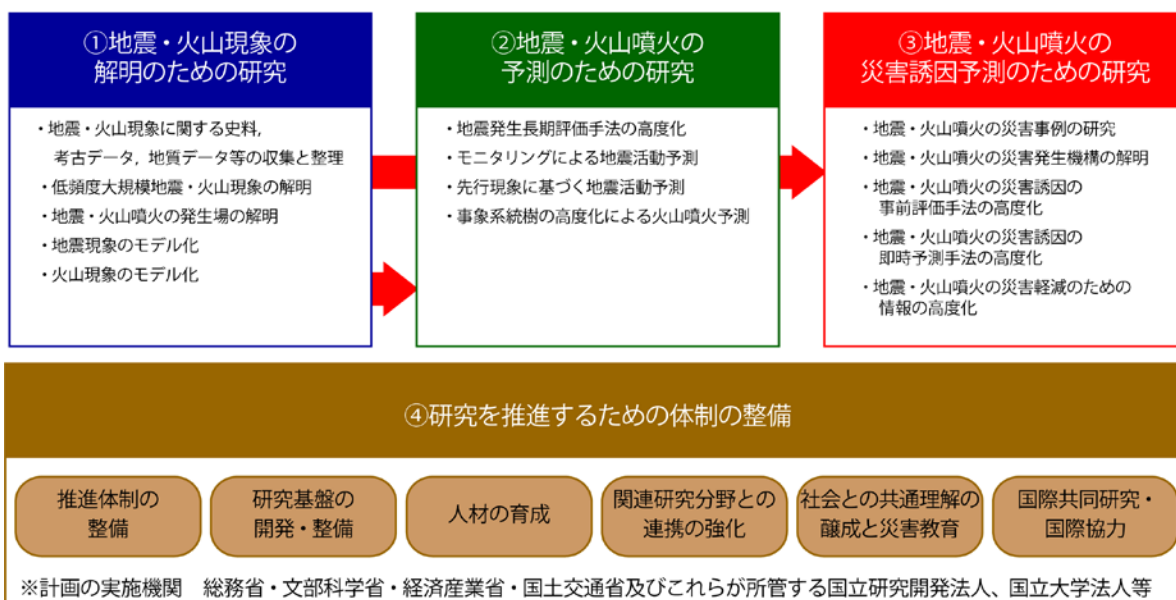
桜島火山では、2006年以降続いていた昭和火口の噴火活動が、2015年7月以降噴火回数が減少し、2016年度は噴火頻度の低い状態が続いた。活発期には、多項目観測から噴火機構の解明につながる重要なデータが蓄積され、解析やモデル化が継続されている。一方、地殻変動観測によると、1914年大正噴火級の大規模噴火を可能とするマグマはすでに始良カルデラ下に蓄積されている。この規模の噴火における広域事前避難について検討が行われた。

4. まとめ

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の3年度目にあたる平成28年度には、地震や火山噴火による災害を考える上で重要な地震として、2016年熊本地震が発生した。平成28年4月14日から始まった一連の地震活動とそれに伴う震災の発生に関わる調査研究を、地震直後の合同観測の記録等を活用して行った。地震による火山活動への影響が懸念された阿蘇山の火山観測・監視設備も甚大な被害を受けたが、本計画に関わる研究機関を中心に迅速な復旧が行われ、2016年熊本地震による影響については不明であるものの同年10月8日の爆発的噴火の先行現象を捉える事ができた。また、平成28年4月1日には三重県南東沖でM6.5の地震が発生した。この地震自体は被害を及ぼさなかったが、震源は昭和の東南海地震・南海地震の震源域に近く、また巨大地震の発生が懸念されている南海トラフで近年久しく発生しなかったプレート境界付近の地震であった。このような事情から南海トラフ巨大地震に関する研究の一環として、詳細な研究が現在進められている。災害誘因に関しての理解を深めるためには、災害誘因発生後や発生中の現状把握力の向上と継続的なデータの収集が不可欠である。また災害軽減に資するための観測システムとして、地震発生後の津波検知などのための海域観測網や、火山衛星監視システムなどの整備・維持も不可欠である。

本研究計画は、前計画では不足していた工学や人文・社会科学分野の研究者の参加による学際的研究の推進が特徴である。上記の2016年熊本地震に関するシンポジウムを開催し、一般市民及び行政向けのセッションを行うなど、研究成果の社会発信も行われた。また桜島火山噴火による避難シミュレーションなど、地方自治体の避難計画作成に資する学際的研究も進められた。歴史地震に関するデータベースの構築や、南海トラフ巨大地震のリスク評価に関する研究なども着実に進められた。引き続き、本計画に参加する研究者間の連携を強化し、地震や火山噴火による災害の軽減に貢献できる観測・調査・研究を推進していかなければならない。

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究



成果の概要概念図

災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究平成28年度成果のまとめ
 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究の全体像を描き、その主要な成果を吹き出しで記述した。
 詳しくは吹き出しに記載されたページと図を参照。

熊本地震の断層

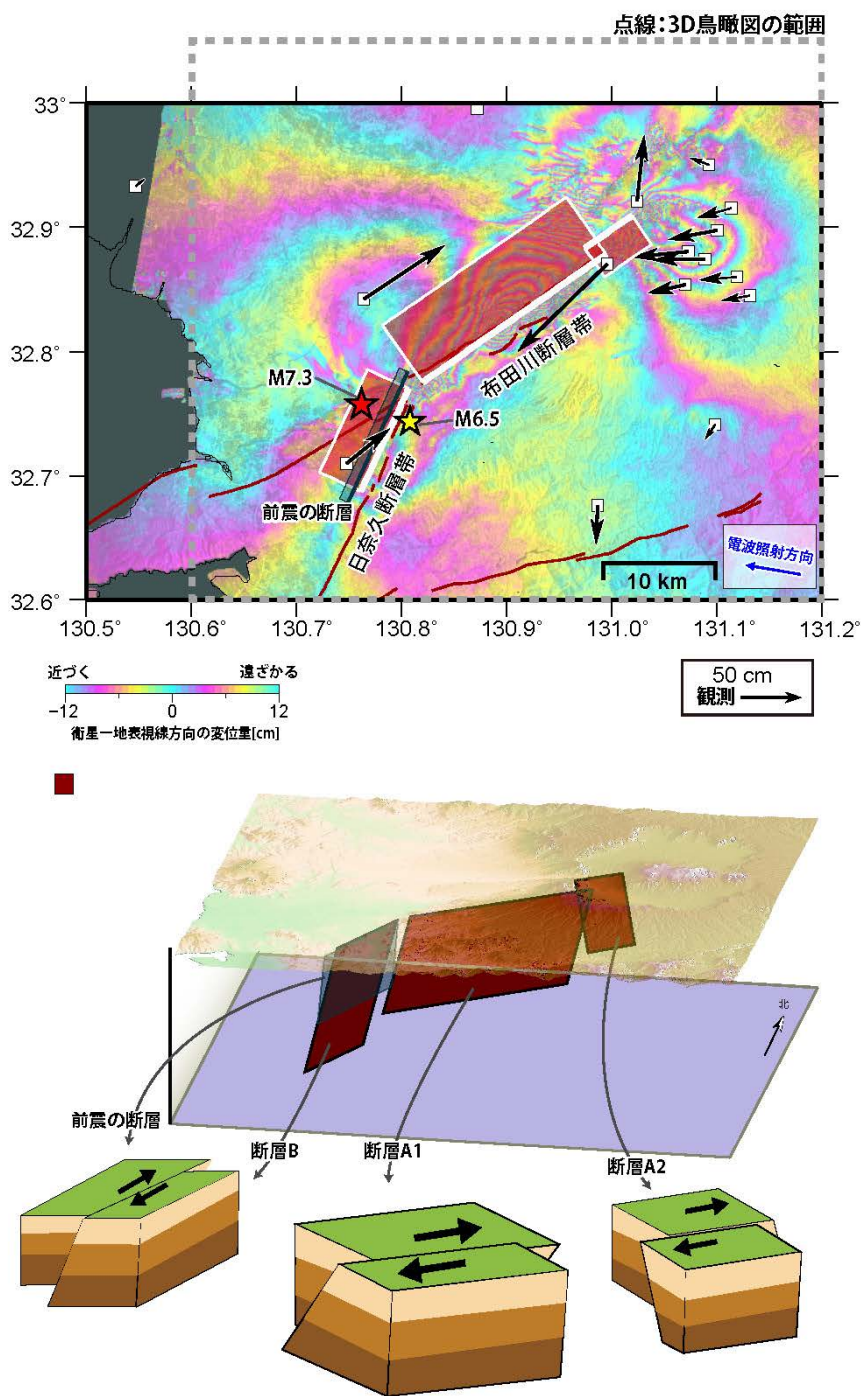


図1 宇宙測地技術により求めた2016年熊本地震の断層

(上図) 干渉SAR解析とGNSS連続観測により捉えた2016年熊本地震による地殻変動。干渉模様は人工衛星だいち2号から見た2016年熊本地震前後の平面的な地殻変動量を示す。また黒矢印はGEONET観測点で観測された熊本地震前後の水平方向の地殻変動量を表す。M6.5前震とM7.3本震の震源を星印で、前震と本震で動いた断層面をそれぞれ異なる色で示している。(下図) 観測記録の解析により明らかとなった、2016年熊本地震の断層形状。

熊本地震の地震活動

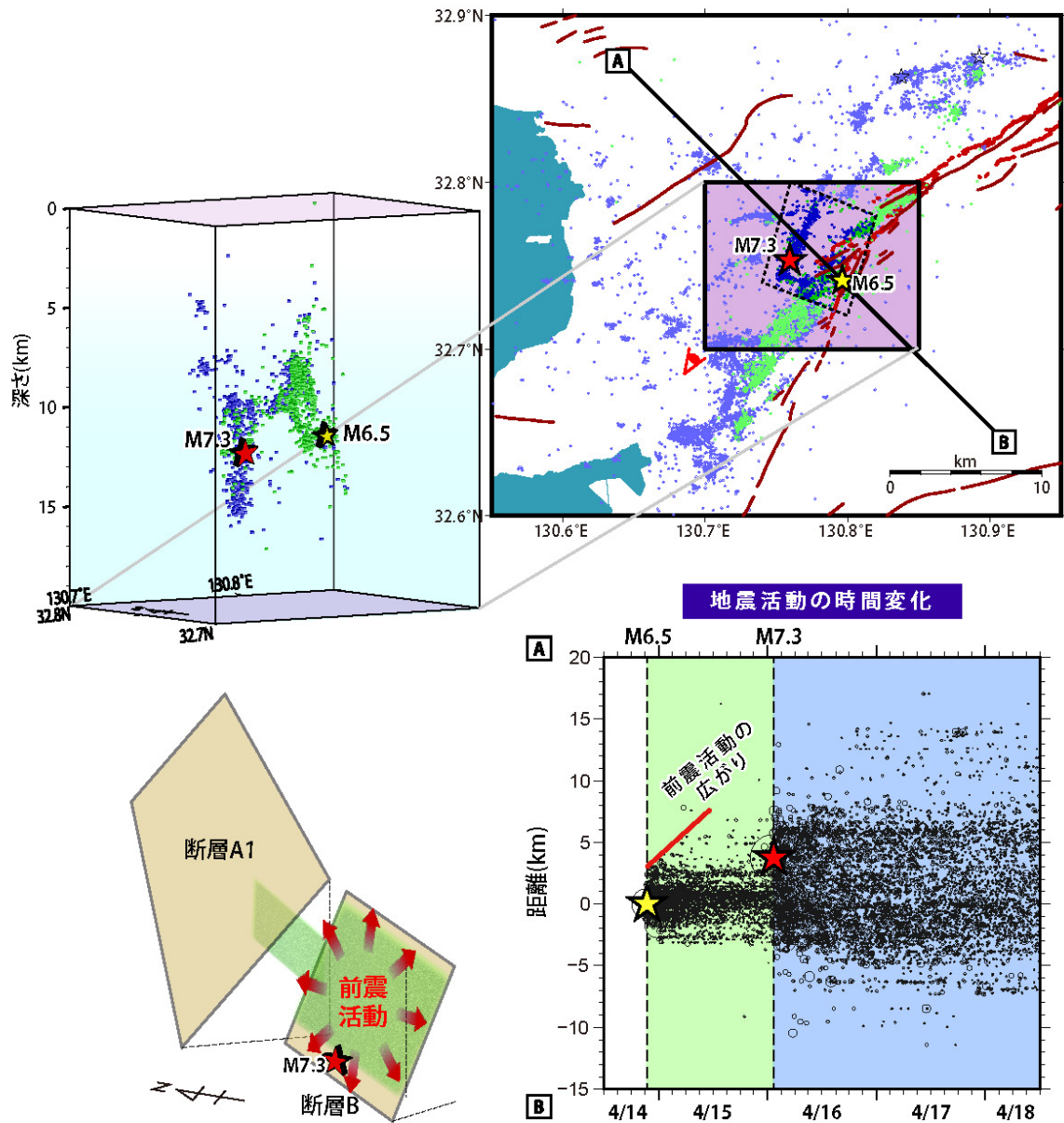


図2 2016年熊本地震の地震活動

(上段) 熊本地震合同地震観測グループによる緊急地震観測の結果，明らかとなった M6.5 の前震発生から一週間の地震の分布図。M6.5 の前震発生から本震発生前までを緑色，本震発生以降を青色で示す。

(下段) 地震活動の時間変化。地震波形の相関を用いた方法により，数多くの地震を抽出した(右図)。M6.5 の前震発生後の地震活動領域は徐々に移動し，本震発生時にはその震源付近を含む領域まで達していた(左図)。

熊本地震による阿蘇山への影響

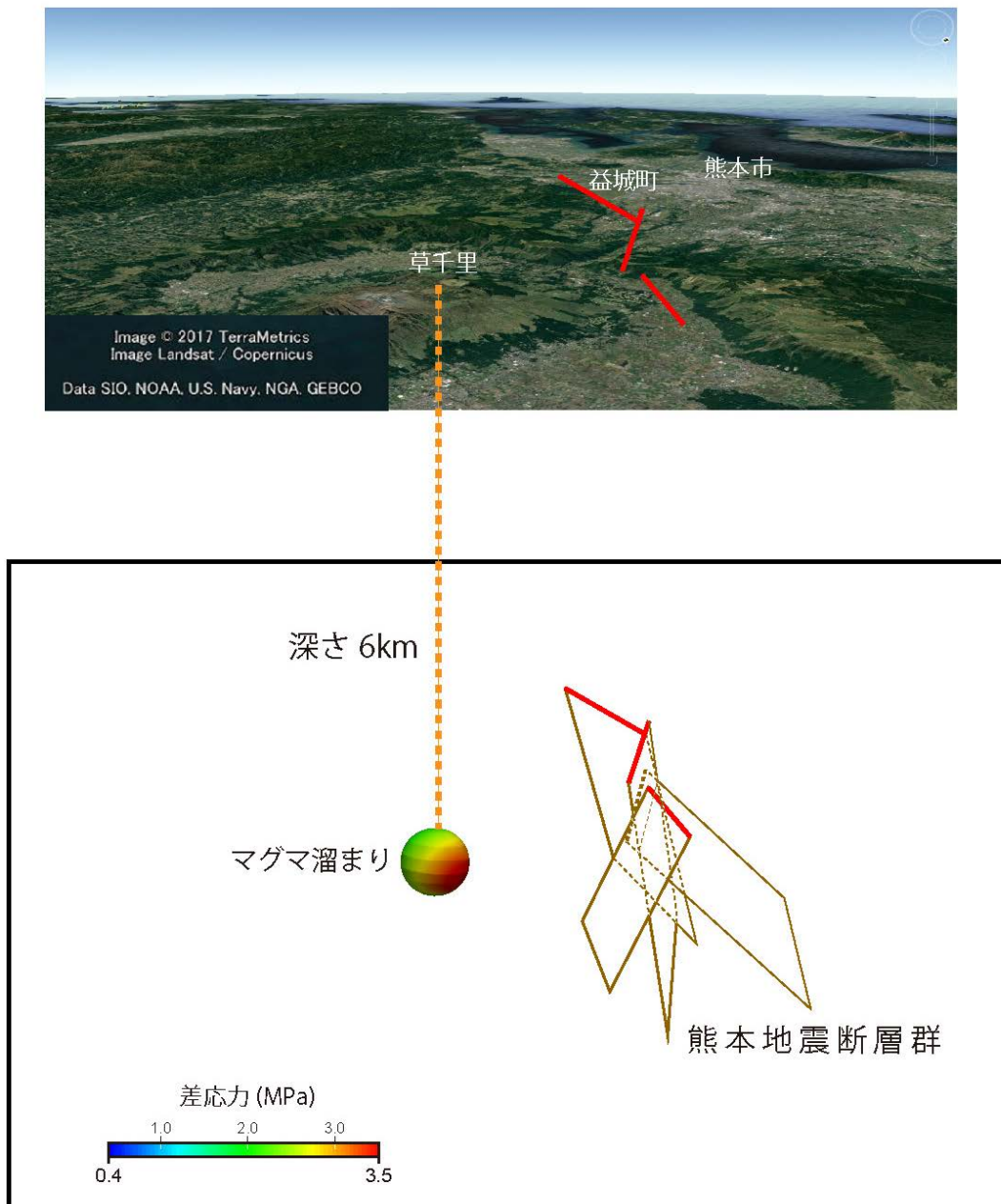


図3 2016年熊本地震による阿蘇山マグマシステムへの影響評価

干渉 SAR 解析により求められた 2016 年熊本地震の断層群の運動により、草千里下 6km に想定されている阿蘇山マグマ溜まりへの影響を有限要素法により求めた。マグマ溜まりは半径 1km の球形を仮定した。断層に最も近い部分では約 3.5MPa の差応力が負荷されていることがわかった。

熊本地震の断層即時推定

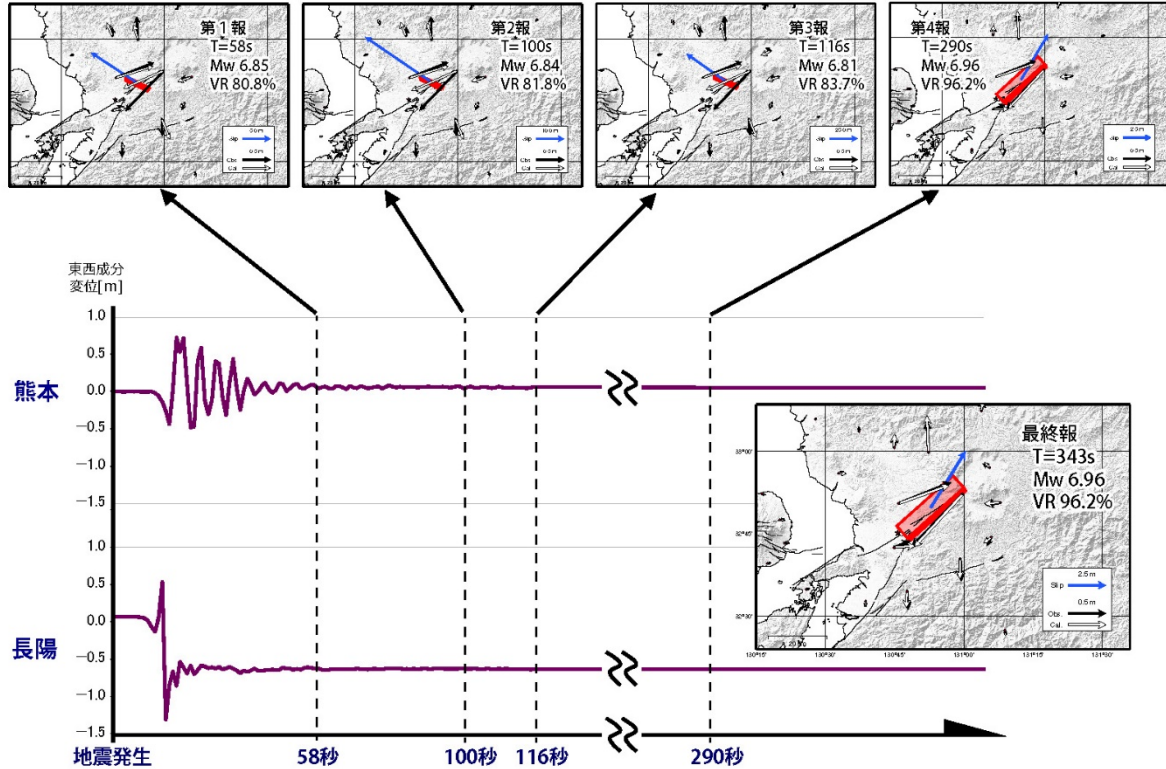
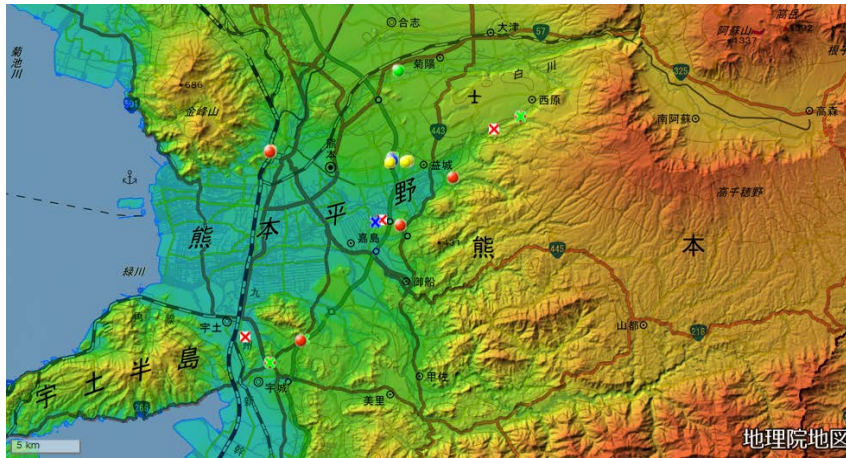


図4 リアルタイムGNSS解析システム（REGARD）による2016年熊本地震の震源断層モデル準リアルタイム推定

REGARD (REal-time GEONET Analysis system for Rapid Deformation monitoring) は、全国の電子基準点で観測されたGNSSデータをリアルタイムに解析し、地震に伴う地殻変動を求めて震源断層を自動的に推定するシステムである。国土地理院において平成28年度から試験運用を行っている。

図は2016年熊本地震の本震（M7.3）の際にREGARDで得られた地殻変動と震源断層モデルを示している。下段に示された波形は、REGARDでリアルタイムに得られた電子基準点「阿蘇」及び「長陽」の南北成分変位を示す。上段及び右に並べた5枚の図は、周辺の電子基準点での変動から自動的に推定された震源断層モデルを示している。赤矩形が推定された震源断層面で太線は断層上端位置。青矢印は断層の滑り方向とその滑り量を示す。黒矢印が観測された地殻変動、白矢印がモデル計算値である。

地震痕跡と歴史地震



熊本地域の地震痕跡

凡例

- : 液状化・噴砂
- × : 地割れ・地滑りなど

※ シンボルの色は「考古資料に基づく地震痕跡」に対応.

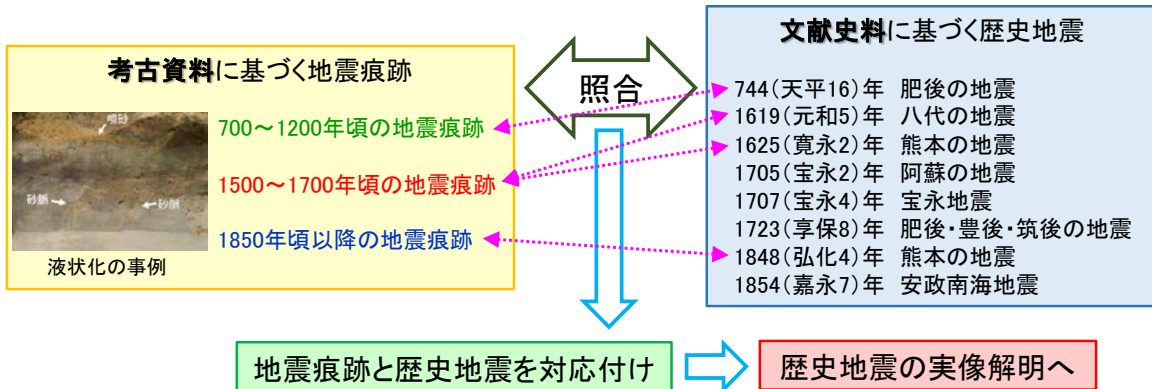


図5 考古資料に文献史料を照合した歴史地震の実像解明

考古資料に基づく地震痕跡は発生場所が明確であるが、詳細な年代の特定が難しい。一方、文献史料に基づく被害地震は発生年月日が明確であるが、被害発生地点の特定が難しい。そこで、考古資料からわかる地震痕跡の場所と、文献史料からわかる歴史地震の発生年を照合し、地震痕跡と歴史地震を組み合わせた被害実態から、歴史地震の実像解明を目指した。

元禄型関東地震の履歴の再評価

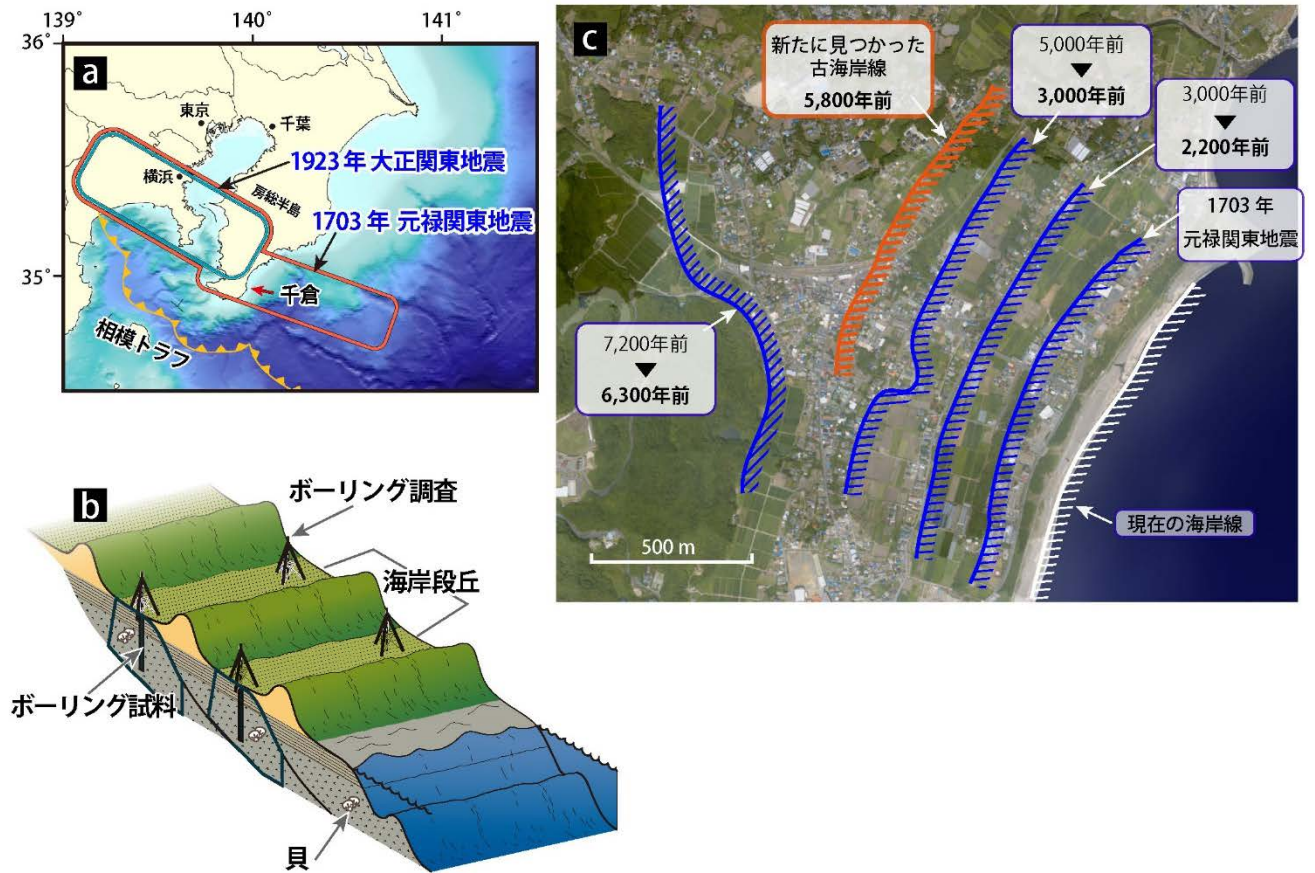


図6 海岸段丘の年代に基づく元禄型関東地震の履歴の再評価

(a) 房総半島南部千倉低地における完新世海岸段丘の離水年代の再検討による元禄型関東地震の履歴の再評価。(b) 堆積性海岸段丘の模式図と稠密ボーリング調査のイメージ。(c) 千倉低地における海岸段丘の古海岸線の位置及びその推定離水年代の従来値と再評価された値。

2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

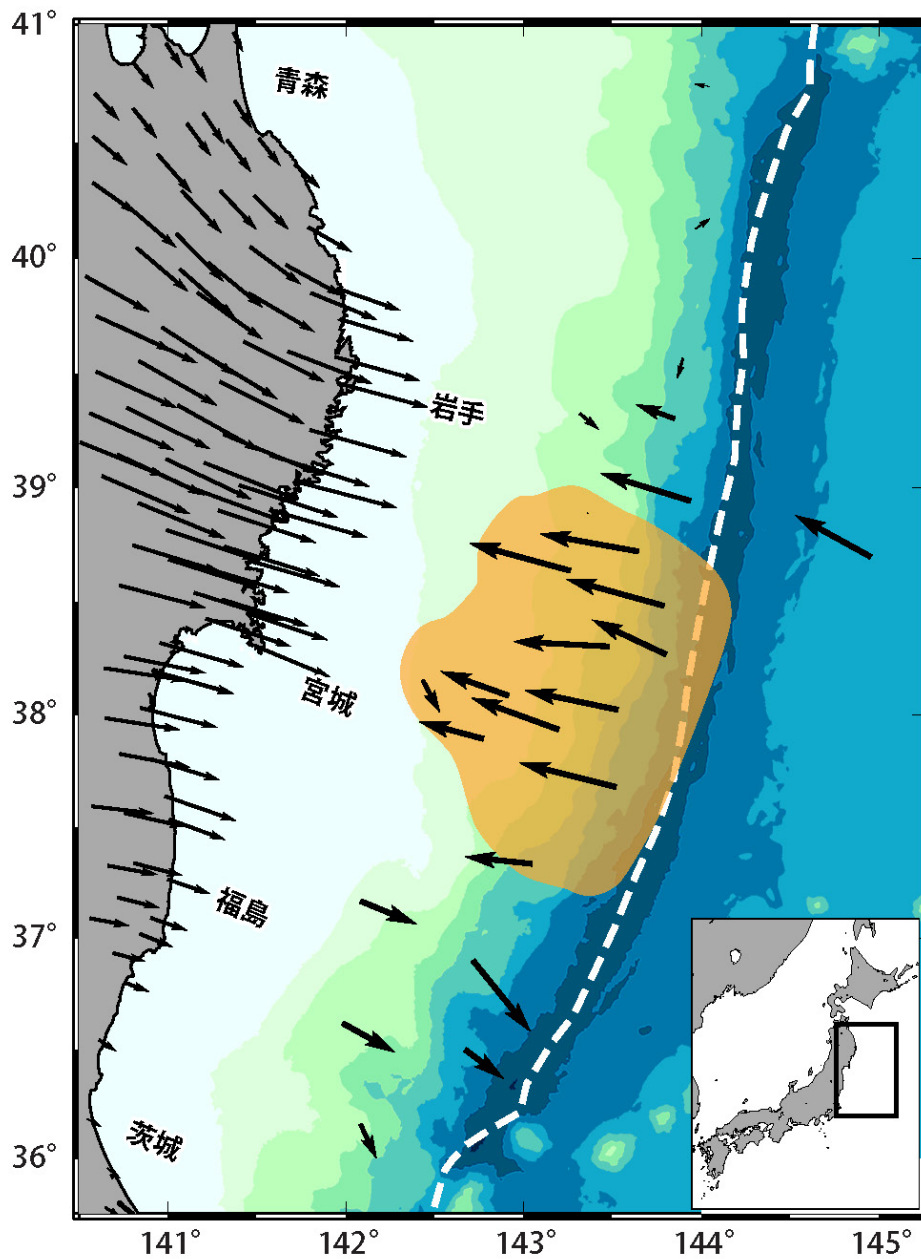


図7 2011年東北地方太平洋沖地震後の地殻変動

海域の太い矢印で、海底地殻変動観測による変位速度を示す。陸域の細い矢印は陸上のGNSS観測によるもの。2011年東北地方太平洋沖地震時に大きな滑りが観測された宮城県沖から岩手県沖南部においては、粘弾性緩和変形による西向き水平変位が卓越するが、福島県沖から茨城県沖では、プレート境界面上での余効すべりに起因すると考えられる顕著な東向きの変位が観測されている。

南海トラフ沿いプレート境界のすべり欠損

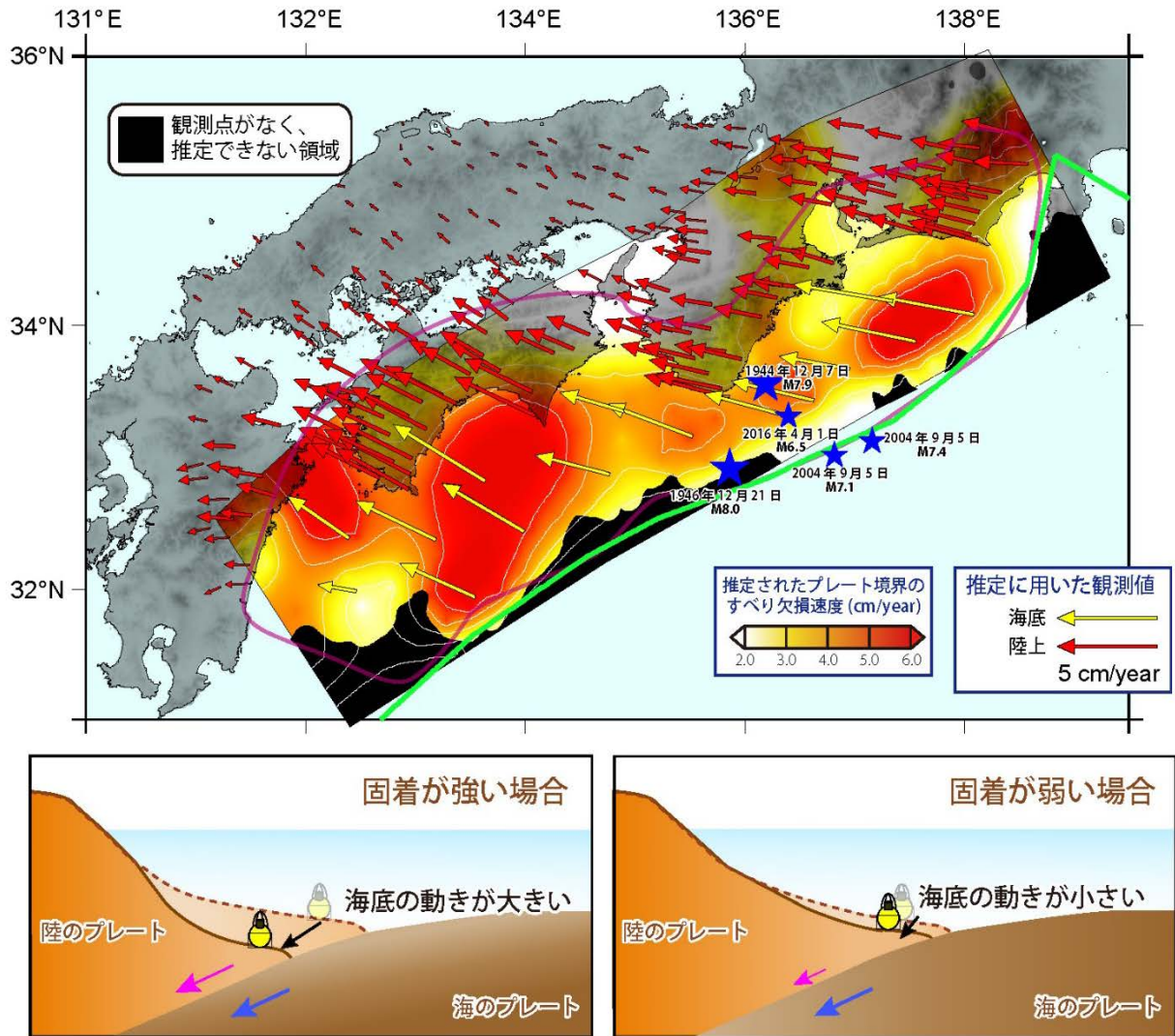


図8 GPS-音響結合方式による海底地殻変動観測によって得られた海底の変動速度から推定された南海トラフ沿いプレート境界のすべり欠損速度分布

すべり欠損速度の大小はプレート間の固着の強弱を反映していると考えられることから南海トラフ想定震源域内において固着分布に不均質があることが示された。

2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動の解析

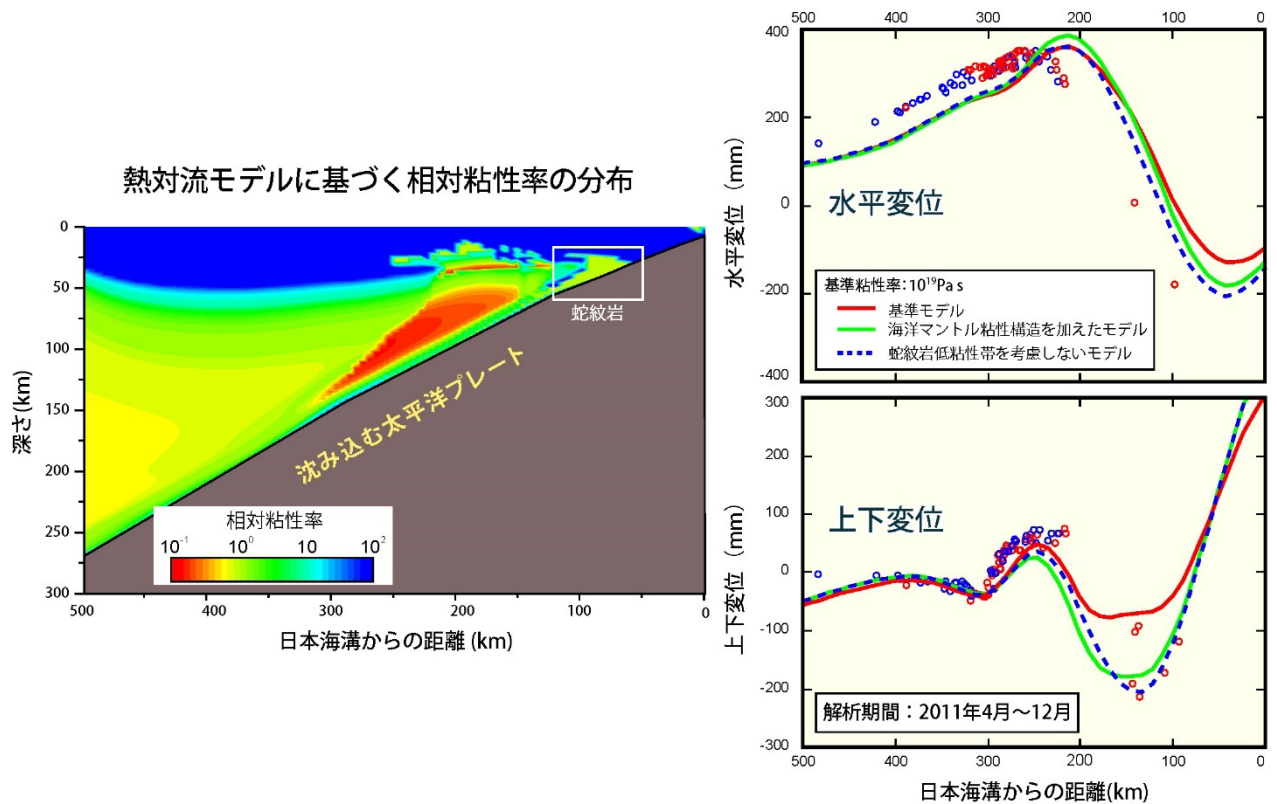


図9 熱対流モデルを用いた2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動の解析

東北地方の沈み込み帯熱対流モデルに基づく2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動のモデル計算と観測値との比較。ウェッジマンタルの熱対流モデルから相対粘性率を推定し基準粘性率を与え、沈み込む海洋マンタルの粘性構造や蛇紋岩低粘性帯を考慮することで、観測された余効変動をよく再現できた。

透水—不透水境界の再現実験

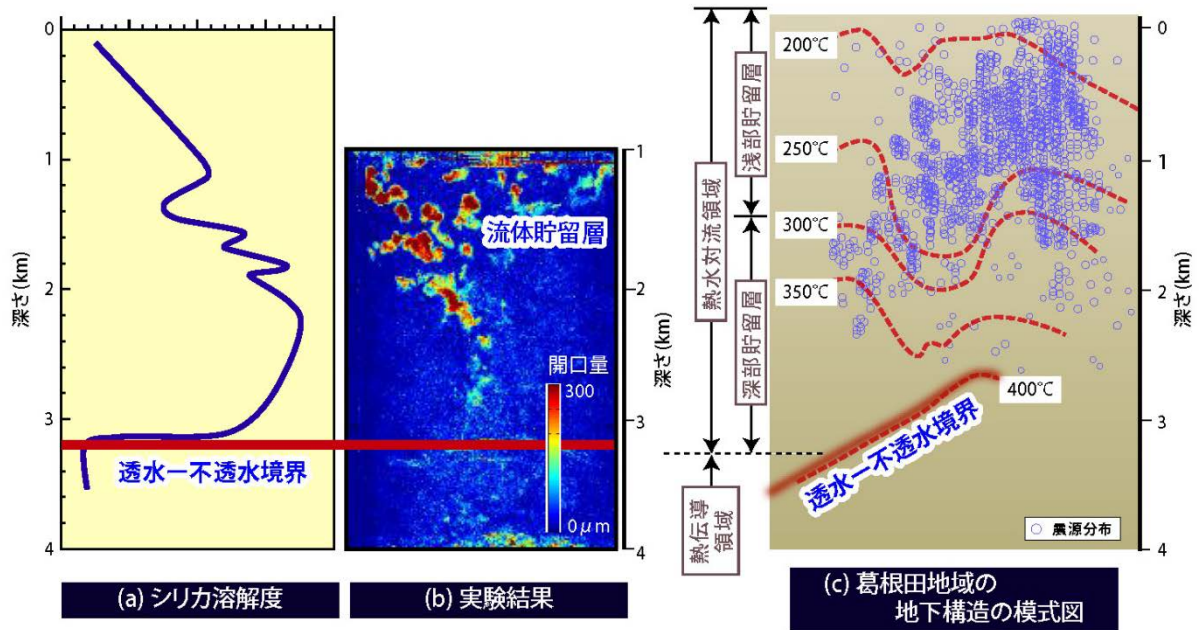


図10 岩石の溶解と析出による透水—不透水境界の再現実験

岩石流体相互作用による透水—不透水層境界の生成実験。実験結果の深さは、実際に相当する深さに換算して与えている。葛根田地区の地下温度構造を想定すると、深さ2km程度の350°C付近では超臨界水となりシリカ（二酸化ケイ素）溶解度が上がるため流体貯留スポットが形成されるが、400°C付近になると溶解度の低下によりシリカの急激な沈殿が生じ不透水境界が形成されることが実験的に明らかになった。

巨大地震に先行する電離層の電子数密度変化

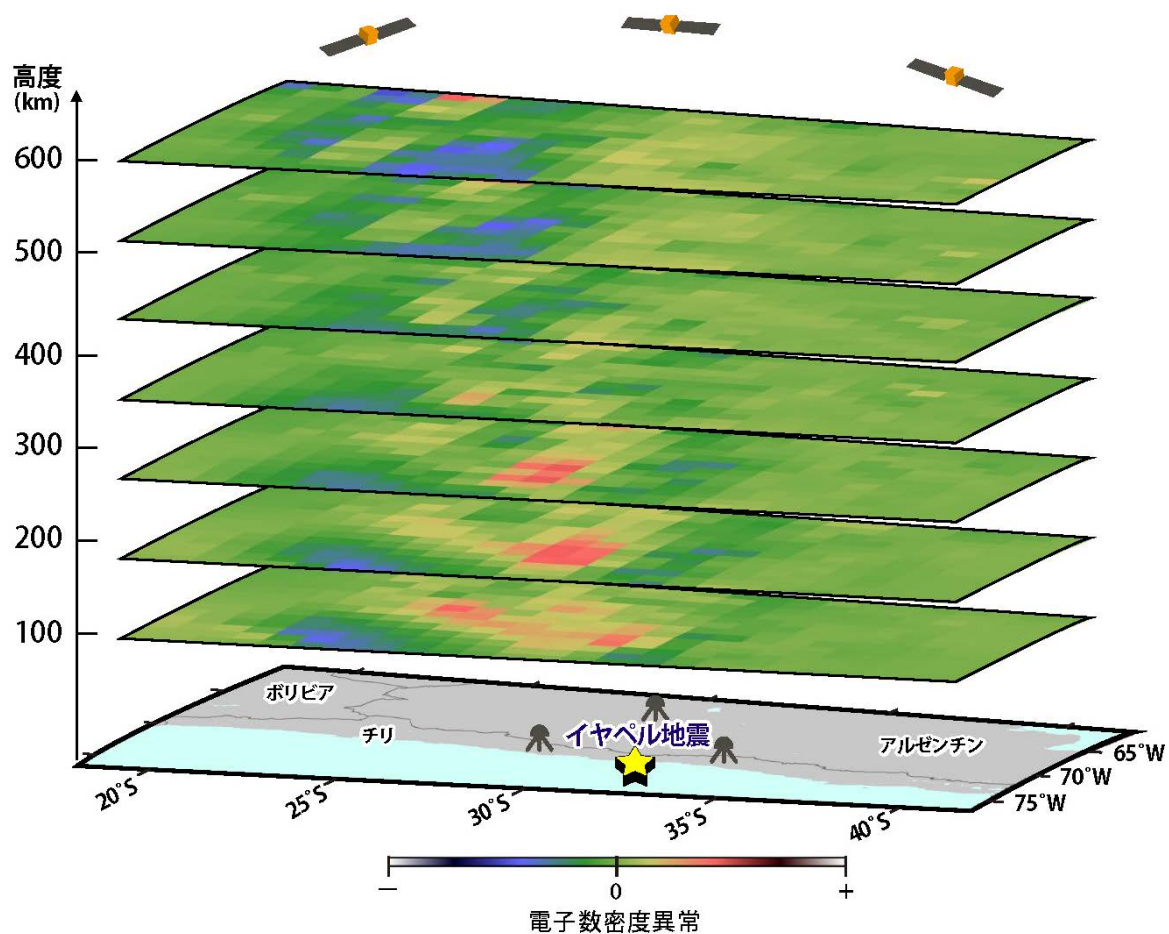


図1 1 巨大地震に先行する電離層の電子数密度変化

2015年にチリ沖で発生したイヤペル地震 (Mw8.3) 発生直前の電離層の電子数密度異常の空間分布。多数のGNSS衛星と観測点から3次元分布が推定され、震源域近くの低高度に正の異常が、高高度に負の異常が生じていることがわかった。

火山衛星監視システム

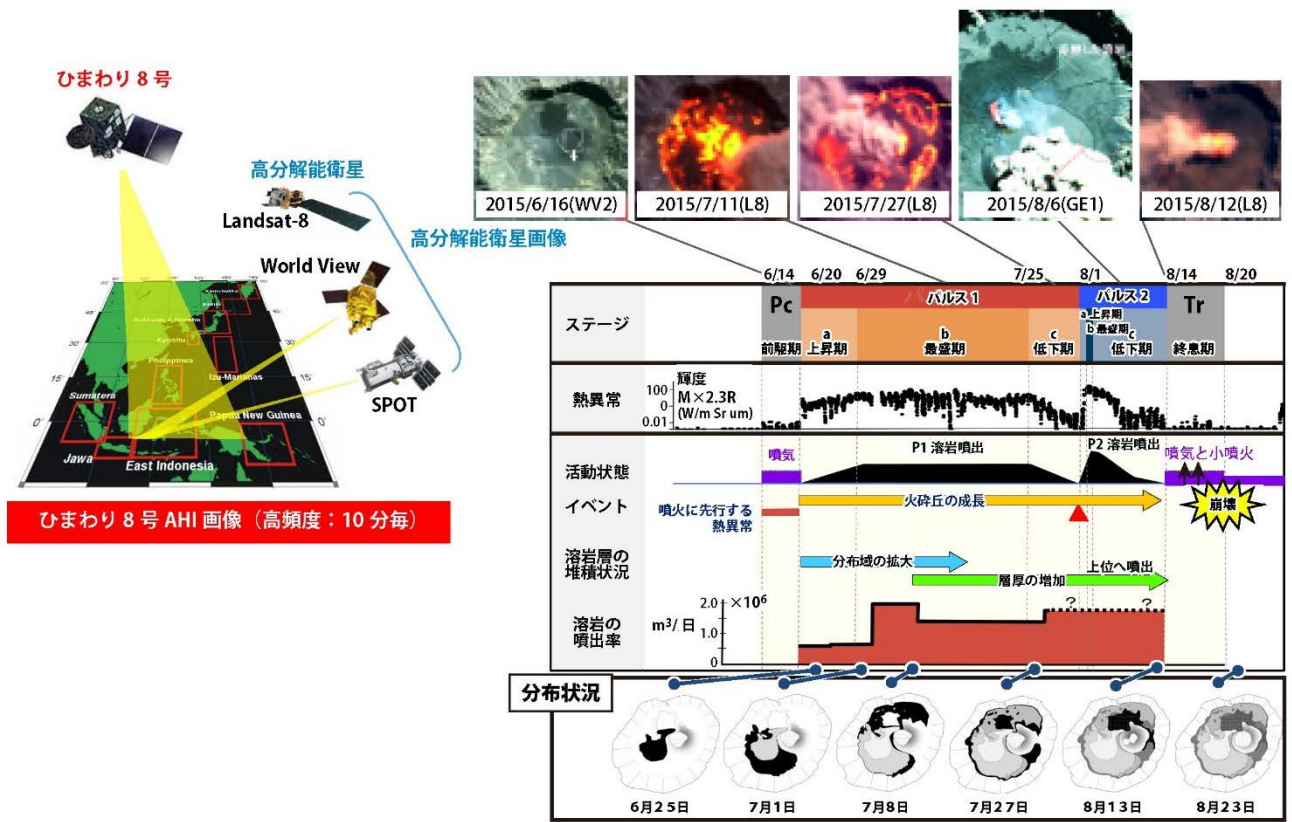


図1 2 衛星赤外面像による活火山観測の高度化及び自動化

衛星を用いた広域観測により、詳細が知られていなかった、インドネシア・ラウン火山の2015年6～8月の噴火の推移を明らかにした。ひまわり8号による超高頻度赤外面像(AHI)によって、熱異常変化を捉え、複数の衛星による高分解能画像から噴火活動状態や溶岩の分布状況を推定した。さらに、噴火前の地形データとの比較から溶岩の堆積状況と噴出率の変化を求めた。平成28年度には、熱異常観測を自動化し、東アジア～西太平洋域の火山のリアルタイム観測を行っている。

桜島火山における避難シミュレーション

避難意向調査を踏まえた避難シミュレーションー大量降灰地域の設定



図13 避難意向調査を踏まえた避難シミュレーションー大量降灰地域の設定

最近100年間、我が国において発生していない大規模噴火では、避難の途中において大量の降灰があれば、避難を続けられなくなる可能性がある。事前分析として、火山灰の堆積厚が30cm以上となる地域に住む80万人の住民全員が避難する時間の予測シミュレーションを行い、50時間となる結果を得た。次に避難意向のアンケート調査を行い、その結果と風向を反映したシミュレーションを行ったところ、避難する住民の数と避難時間は大幅に減少することが確かめられた。

南海トラフ巨大地震によるリスク評価

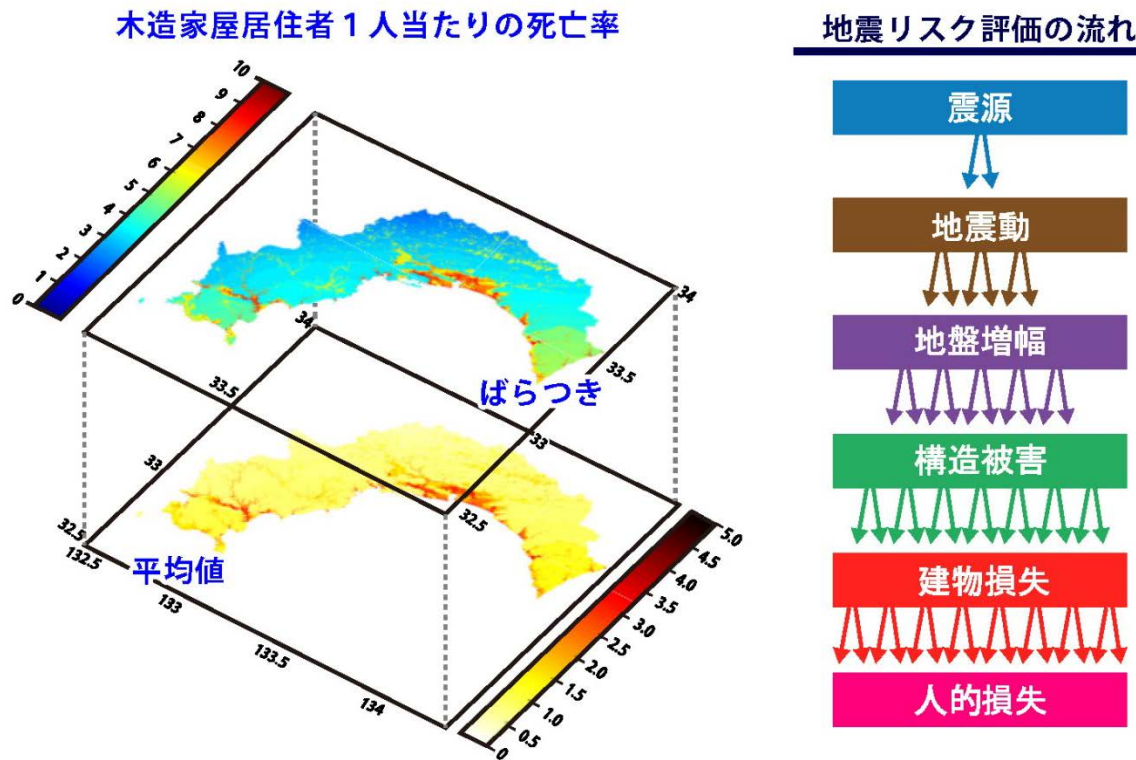
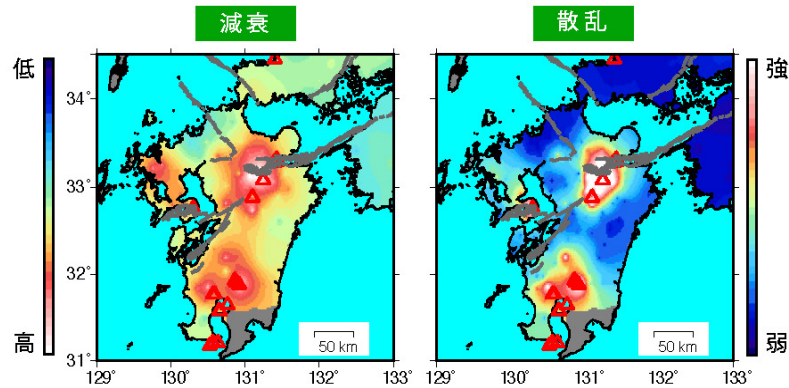


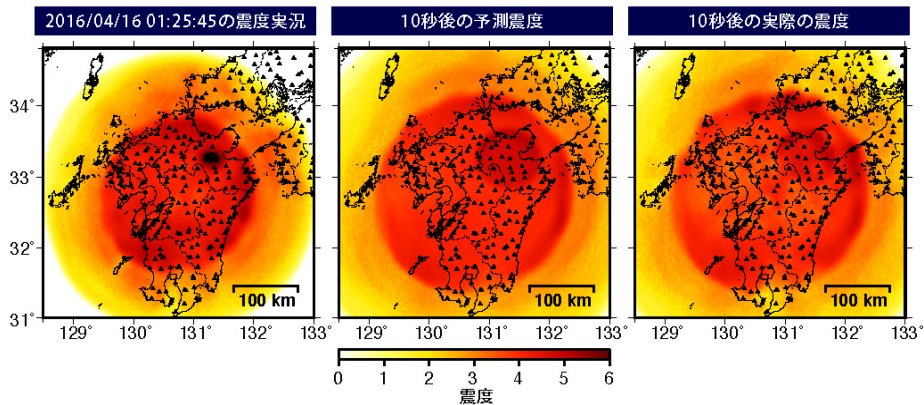
図1-4 南海トラフ巨大地震による高知県での地震被害リスク

南海トラフ地震が発生した際の高知県における人的被害について、震源断層モデル、地震動予測式、地盤増幅特性モデル、構造物被害予測式、建物損失モデルの不確実性を考慮して試算した。ここで人的被害とは、木造2階建て建物の被害程度に応じて推定される棟ごとの死者数の割合（棟死亡率）である。計算された棟死亡率は各モデルの不確実性によってばらつきを有した量になるが、その平均値は高知平野で特に大きく、室戸岬と足摺岬及び高知平野と室戸岬の間の沿岸部で大きかった。これは、震源からの距離及び堆積層での地盤増幅により地震動が大きく推定されたことによる。また、棟死亡率のばらつき（予測の幅）も同じ地域で大きくなると推定された。

地震動即時予測の精度向上



地震動即時予測手法を平成28年熊本地震 (M7.3)の記録に適用した例



不均質減衰構造モデルの導入による地震動即時予測の精度向上

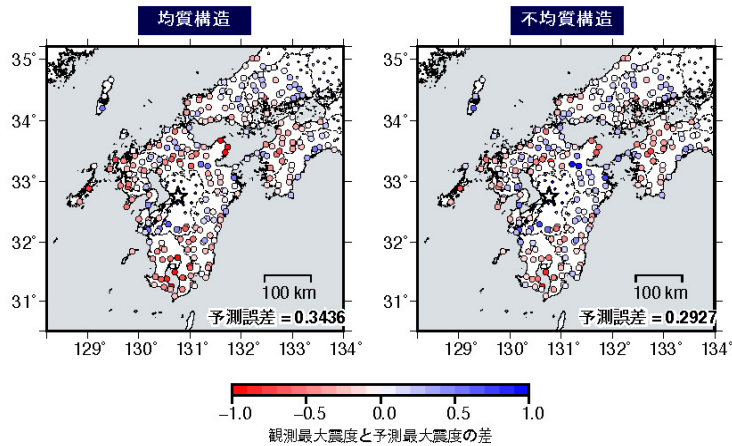


図 1 5 不均質減衰構造の導入による地震動即時予測の精度向上

(上段) 九州地方の地下における地震波の減衰と散乱の構造推定を行った。活火山周辺に加え、一部の活断層周辺においても局所的に散乱及び減衰が大きいことが明らかとなった。(中段) 震源とマグニチュードの推定を介さず、リアルタイムの揺れの実況値から直接揺れの伝播を予測する方法に、不均質減衰構造(上段)を導入し、2016年熊本地震の本震に適用した。震度実況から10秒後の震度を予測し、実際の10秒後震度と比較した。

(下段) 2016年熊本地震本震へ地震動即時予測を適用した際の震度の予測残差。均質な減衰構造を仮定した場合に比べ、不均質な減衰構造を導入した場合は、予測残差が10%程度減少した。

日本海溝海底地震津波観測網(S-net)の整備

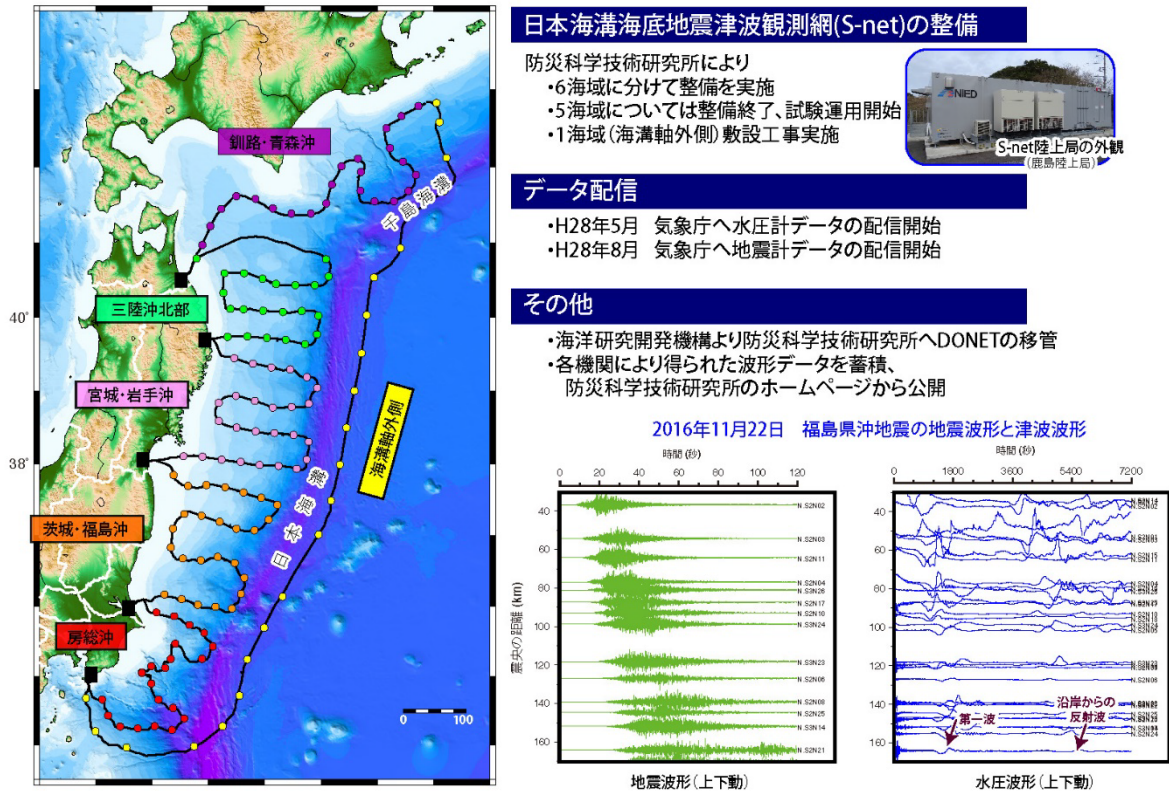


図 1 6 日本海溝海底地震津波観測網(S-net)の整備

6 海域に分けて S-net を整備し、試験運用を開始した。S-net による水圧計・地震計データは海溝軸外側を除き気象庁への配信が開始されている。津波高・津波浸水域等の即時予測手法の開発等の研究への活用が期待されている。2016 年 11 月 22 日福島県沖地震発生時の S-net 観測点における速度型地震計上下動成分の波形(左図)と水圧計の波形(右図)。地震波形は各波形の最大値、水圧波形は共通の値で振幅を規格化している。水圧波形は、潮汐の影響を除去し、50~3000 秒の帯域のバンドパスフィルターをかけている。

用語解説

異常震域

震度が地震の規模や震源直上からの距離（震央距離）に比して著しく高くなる地域。震源の深さが深い地震（深発地震）の際に出現することが多い。原因は主に海洋プレート内を伝わってくる地震波の減衰が小さいためと考えられている。

ウェッジマントル

沈み込む海洋プレートと直上の陸側プレートに挟まれた、くさび形状のマントルの領域。

応力

岩盤等の物体内部に考えた仮想的な面を通して及ぼされる単位面積当たりの力。面に対して垂直な方向の力を垂直応力、面に平行な力をせん断応力とよぶ。地球科学が取り扱うほとんどの範囲では、応力は6つの独立な成分を持つ2階の対称テンソルとして記述できる。一般に、応力テンソルは対角化が可能であり、3つの固有値と固有ベクトルを、それぞれ主応力と主応力軸とよぶ。特に3つの主応力を、圧縮が大きい方から順に最大主応力、中間主応力、最小主応力とよぶ。最大主応力と最小主応力の差を差応力とよぶ。震源域のせん断応力が岩盤のせん断破壊強度に達したときに地震が発生すると考えられている。

応力テンソル逆解析

色々な方向の複数の既存断層面上で滑り（地震）が発生すると考えたとき、実際に観測される複数の地震の発震機構解をもっともよく説明できる応力場を求める手法。

海底間音響測距観測

海底において、音波を用いた距離の測定により地殻変動(相対変位)を連続的に観測すること。

火砕丘

主として軽石やスコリアからなる円錐状の小丘。軽石・スコリアは火山砕屑物の一種で、多孔質で密度が小さく、軽石は白色などの明るい色、スコリアは黒色・暗褐色などの暗い色を示す粒子である。

火砕流

噴火によって火口から噴出した高温の火山噴出物が、高温の火山ガスや取り込んだ空気とともに高速で火山体斜面を流下する現象。規模や流下物質の構成等によって、熱雲、軽石流（浮石流）、スコリア流、火山灰流などとも呼ばれる。

火山性地震

マグマの動きや熱水の活動等に関連して、火山体の中やその周辺で発生する地震。火山が噴火する際だけでなく、噴火していない時にも発生する。

火山性微動

マグマの動きや熱水の活動等に関連して発生する地面の連続した震動。火山性地震とは異なり

震動が数十秒から数分、時には何日間も継続する。

火山灰

火山の噴出物の一種で直径 2 mm 以下の細かい破片のこと。

間隙流体圧

土や岩石中の粒子間のすきま（間隙）に入り込んだ水などの流体の圧力。

キネマティック

移動体のこと。例えば、GNSS 観測により得られた時系列データから移動する観測点の時々刻々の相対位置を高精度に求める解析手法をキネマティック GNSS 解析、1 観測点のみで移動体位置を求める方法をキネマティック精密単独測位解析という。

逆断層

→ 断層運動の様式の項を参照。

強震動

被害を及ぼすような強い地震動（揺れ）のこと。

繰り返し地震

発生場所（震源）、メカニズム、マグニチュードがほぼ同じで、概ね一定の時間間隔で繰り返し発生している地震のこと。

群発地震

本震や余震という区別がなく、ある期間に比較的狭い地域で集中的に発生する地震。

災害素因

災害誘因を受けた際に生じる被害・損失の規模、様態を左右する地形・地盤などの自然環境や構造物・人間社会の脆弱性のこと。

災害誘因

災害をもたらす原因（加害力、外力）のこと。地震や火山噴火による災害は災害誘因である地震動、津波、火山灰や溶岩の噴出などの外力（ハザード）が災害素因に作用することで引き起こされる。

差応力

→ 応力の項を参照。

散乱

波動や粒子線が物体や微粒子と衝突して色々な方向に広がっていく現象。地震学では、地震波が不均質な地下構造を伝わる際に、均質な構造の場合とは異なり、エネルギーの一部が色々な方向に広がっていく現象のことを指す。

事象系統樹（噴火事象系統樹）・事象分岐

火山ごとに、可能性のある複数の噴火現象の時間的推移を網羅的に示した、噴火の推移を示す系統樹。示された複数の噴火推移のうち、どの道筋をたどるかの分かれ目を、事象分岐という。

地震・火山噴火予知研究協議会

地震及び火山噴火予知研究を行っている全国の大学、研究機関、行政機関等が、本計画で立案された研究を、連携と協力関係を強化して推進するために東京大学地震研究所に設置された組織。

地震・津波観測監視システム（DONET）

南海トラフの地震・津波を常時観測監視するため、南海地震震源域及び東南海震源域に設置された地震・津波をリアルタイムで常時監視するシステム。DONET は英語名 Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis の略称。海底に設置された地震計や水圧計などの観測機器ネットワークによって、地殻変動、地震動、津波などを計測する。

地震波干渉法

2つの観測点で記録された地動の波形を処理することで、それらの間を伝わる波を抽出する手法。地震探査と違い、人工震源を使わずに地下構造を探査することができる。

地震発生長期評価

主要な活断層で繰り返し発生する地震や海溝型地震を対象に、地震の規模や一定期間内に地震が発生する確率を予測したもの。

地震モーメント

地震の規模を表す最も基本的な量。地震断層の面積と滑り量及び剛性率（岩盤の変形のしにくさを表す物性値）の積で計算される。

消磁

磁鉄鉱などの磁性鉱物を含む岩石の磁化（磁性の強さ）が低下、または失われること。特に、高温化による消磁のことを熱消磁という。マグマが地表へ近づくなどの原因により火山体内の温度が上昇することで、熱消磁が起こることがある。消磁領域の周辺では磁場（磁界）が変化する。

常時微動

地震計によって常時観測される地面のわずかな揺れのこと。常時微動を測定することにより、建物や地盤の揺れやすさの特徴を調べることができる。

蛇紋岩

蛇紋石を主成分とする岩石で、通常多少の磁鉄鉱・クロム鉄鉱等を含む。肉眼で黒～暗緑色を呈している。かんらん岩が水と反応してできる。具体的には、約 600° C 以下の温度条件で、かんらん岩に含まれているマグネシウムに富むカンラン石や輝石が蛇紋石に変化してできる。

震源断層モデル

断層面上における滑り量の分布や滑り方向、破壊の伝播様式を表すモデルのこと。

人工地震探査

火薬やパイロサイスなどの人工震源を用いて地震波を発生させ、これをいろいろな地点で観測して、地震波の伝播速度や減衰などを調べることにより地下の構造を明らかにする手法。構造探査の手法のひとつ。

深部低周波微動

プレート境界の固着域の下端付近で発生する低周波(数Hz)成分に富んだ地震波が長い時間にわたって放出される現象のこと。

水蒸気噴火

マグマなどの熱によって火山体内部または地表付近の水が気化されて体積が膨張することで、水蒸気が急激に噴出する現象のこと。噴火口付近の岩石が砕け、火山岩塊や細粒火山灰が飛散する。

滑り欠損

プレート境界におけるプレート間の相対変位を考えた時、プレートの収束運動から期待される量から、実際に生じているずれの大きさを減じた量。欠損が大きいとプレート間が固着していることを意味する。

スラブ

海洋プレートがマントル中に沈み込んだ部分。

静穏化

地震活動や火山活動が以前の活動よりも相対的に低下している現象。

正断層

→ 断層運動の様式の項を参照。

析出

液体の中から固体が分離して出てくること。

先行現象

地震や火山噴火の発生前に震源域や火山の周辺で発生するさまざまな異常現象。土地の隆起・沈降、地震活動の変化、電磁気異常、地下水の変化などがある。前兆現象と呼ばれることもある。

前震

本震の近傍で本震発生前に起きる地震のこと。

相似地震

観測された地震波形が良く似ている地震群のこと。ほぼ同じ断層面で同じような滑りが起きた

場合に発生すると考えられる。

ダイク

岩脈ともいい、地層や岩石の割れ目にマグマが鉛直方向に貫入し固まったもの。

脱ガス

マグマの中に溶け込んでいる、または、気泡として存在している火山ガス成分が、マグマの外に放出される現象のこと。

断層運動の様式

断層がずれ動くことを断層運動と呼ぶが、地殻内部にかかる力の状態は複雑で、その状況によって様々な型が存在する。断層面が傾いている場合、両側の岩盤のうち、断層面より浅い側を上盤、深い側を下盤と言う。断層面を境として両側のブロックが上下方向に相対運動するタイプを「縦ずれ断層」と呼び、「縦ずれ断層」のうち、上盤側がずり下がるタイプを「正断層」、のし上がるタイプを「逆断層」と呼ぶ。両側のブロックが水平方向に相対運動するタイプを、「横ずれ断層」と呼ぶ。実際の断層運動の殆どは、縦ずれ断層と横ずれ断層の重ね合わせである。

地殻変動

地震などの断層運動や火山活動などの地下の活動によって地表に生じた変位やひずみ、傾斜の変化。

長周期地震動

規模の大きな地震が発生した場合に生じる、ゆっくりとした揺れのこと。高層ビルは固有周期が長く長周期地震動により影響を受けやすい。

長周期地震動階級

固有周期が1～2秒から7～8秒程度の揺れが生じる高層ビル内における、地震時の人の行動の困難さの程度や、家具や什器の移動・転倒などの被害の程度から4つの段階に区分した揺れの大きさの指標。観測された長周期地震動階級は、気象庁ホームページで試行的に提供されている。

潮汐

月や太陽などの他の天体の引力により生じる海水面の昇降（海洋潮汐）や地球の変形（固体潮汐）。

津波堆積物

津波によって運ばれた砂や礫などが堆積したもの。これらの調査により、過去の津波の発生年代や浸水規模を推定することができる。

テフラ

噴火によって噴煙や火砕流として噴出した火山砕屑物が、地表に堆積した物。

電離層全電子数（TEC）

電離層（圏）の電子密度の総数を表す量のこと。単位面積を持つ鉛直の仮想的な柱状領域内の電子の総数を表す。TEC（Total Electron Content）とも呼ばれる。

トモグラフィー

多数の観測点の地震波形記録等から地下の2次元または3次元構造を推定する手法。地震波速度や減衰構造の推定によく用いられる。医学の分野において、X線や超音波で体の2次元断面を求めるための手法が、地球物理学に応用されたもの。

トレンチ調査

断層面を横切る方向に細長い溝を掘り、断層を観察して断層のずれ方や地層の年代を測定し、断層の動いた年代や周囲の環境を調べる調査。

日本海溝海底地震津波観測網（S-net）

地震計と津波計が一体となった観測装置を光海底ケーブルで接続した観測網で、防災科学技術研究所が日本海溝沿いの海底に設置したもの。24時間連続で観測データをリアルタイムに取得できる。観測装置は150カ所、ケーブル総延長は約5,700kmである。

粘性・粘性率

力を加えるとその速度に応じた速度で流動し、力を除くと静止するような物質の力学的性質を粘性と呼ぶ。粘性率はそのような変形に対する抵抗の大きさ表す物性値で、通常、流体内部に働く単位面積あたりに働く力（応力）と流体の変形速度の比で定義される。

粘弾性

加えられた力に応じて変形し力を除くと原形に戻る弾性的性質と、加えられている力に応じた速度で時間とともに変形が進行する粘性的性質を併せもつ性質。

発震機構解

地震時の断層運動を断層面の向き（走向、傾斜角）と相対すべりの向き（すべり角）によって表現したもののことをいう。震源域の応力場を知る手がかりとなる観測データである。地震波の放射パターンなどから求められる。

非地震性滑り

断層面やプレート境界面で発生する、地震波を出さない、ゆっくりとした滑り。

ひずみ

岩盤（プレート）などが変形する際の、変形の大きさをひずみといい、単位長さ当たりの変位で定義される。また変形前後の面積の変化の割合を面積ひずみという。

ひずみ集中帯

測地観測や地形から推定された地殻ひずみが大きい領域。

非弾性変形

物体に外力が作用すると変形するが、外力を除去した場合に可逆的に原形に復帰する変形は弾性変形であるが、可逆的でない場合のことをいう。

付加体

海溝やトラフにおいて海洋プレートが沈み込むときに、海洋底にたまっていた堆積物がはぎとられて陸側へ押しつけられていくが、この作用を付加作用といい、その結果、陸側斜面先端部につけ加えられた多くの逆断層で積み重なったプリズム状の断面をもつ堆積体のこと。

プレート

→ プレート境界の項を参照。

プレート境界

地球表面は、地殻と十分に冷却して固くなっている最上部マントルとを合わせた、厚さ 100km 程度の複数の固い岩石の層で覆われている。この岩石層がプレートとよばれ、隣り合う 2つのプレートの境界がプレート境界である。プレート境界においてはしばしば大きな地震が発生する。

ブロック断層モデル

ある地域を断層を境界とする多数のブロックに分割し、地殻変動などをブロックの運動で近似するモデル。

噴火様式

噴火時にマグマが地表に噴出する場合、噴火の様子はマグマの性質や破碎の程度などによって異なり、いくつかのタイプに識別される。その異なる噴火の様子を噴火様式という。

・ストロンボリ式噴火

比較的粘性の低いマグマによる間欠的な小噴火。火口からは数分～数十分間隔でマグマのしぶき、半ば固結した溶岩片、火山弾などが吹き上げられる。

・ブルカノ式噴火

やや粘性の高いマグマによる爆発的な噴火で継続時間は短い。噴煙高度が 10km 近くに達することもある。爆発によって 1 m 径の岩塊（火山弾）が数 km も飛ばされることがある。火山弾には、新しいマグマが冷え固まったものと、火口底にあった古い岩塊が含まれる。火砕流も同時に発生することがある。桜島や浅間山などでしばしば発生する。

・プリニー式噴火

比較的粘性の高いマグマによる爆発的な噴火。一般的にブルカノ式噴火よりも規模が大きく、継続時間が長い。大量の軽石や火山灰が火口から空高く噴出され、噴煙柱を形成する。噴煙高度は 20km から 30km にまで達することがある。しばしば規模の大きい火砕流が発生する。やや規模の小さい噴火を準プリニー式噴火と呼ぶ。

偏光解消度

光は電磁波と呼ばれる横波であり、進行方向に対して垂直な面内で電場と磁場が互いに垂直な向きで振動しながら伝播する。通常は、その垂直面内でいろいろな方向に振動する多数の波が集まっているが、レーザー光は完全に一方向にのみ振動しており、これを直線偏光と呼ぶ。レーザー光が粒子によって散乱される光は、散

乱体の粒子の形状によって、入射するレーザー光よりも直線偏光状態が弱くなる場合がある。その程度を示す指標が偏光解消度である。火山灰などの非球形粒子は偏光解消度が高い。

ボーリング（コア）

掘削により柱状試料を採取する手法で、トレンチ調査に比べ深い深度まで地質試料を入手することができ、より長い期間の地質現象を探ることが出来る。ボーリングコアとは、ボーリングにより採取されたサンプルのこと。

本震、余震

比較的大きな地震が発生すると、その近くで最初の地震より小さな地震が直後から続発する。この最初の大きな地震のことを本震、その後が続発する地震を余震という。

マグマ

岩石物質の高温溶融体。噴火によってマグマが地表に出たものを溶岩という。マグマが地殻内で結晶化したり、地殻物質を溶かしこんだりして、多様な組成のマグマができることを、マグマの分化という。それにより、二酸化ケイ素含有量の少ない組成のマグマから、より二酸化ケイ素含有量に富む組成のマグマが生成されていく。マグマの分化によって、一般に粘性が大きくなる。

・ 苦鉄質マグマ

二酸化ケイ素含有量の少ないマグマ。玄武岩組成のマグマが相当する。

・ 珪長質マグマ

二酸化ケイ素含有量の多いマグマで、通常はデイサイトや流紋岩組成のマグマを指す。

マグマ貫入

地下のマグマが岩盤に割れ目をつくりながら移動する現象。

マグマ溜まり

火山活動の源であるマグマが蓄積されているところ。その存在位置、形状、内部構造、内容物の特性などの情報は、噴火現象の理解に欠かせないが、現状では、よく研究されている少数の火山に限り、それらのごく一部が明らかにされているのみである。

マグマ噴火

噴出物のほとんどがマグマ物質からなる噴火のことで、ストロンボリ式噴火、プリニー式噴火、溶岩流の噴火などがこれにあたる。

摩擦構成則

岩石の破壊強度や断層面上の摩擦強度を滑り量や滑り速度などの関数として記述したもの。

摩擦パラメータ

摩擦構成則で用いられる媒介変数で、これらが摩擦強度の速度依存性などの摩擦の特性を表す。

メルト包有物

マグマ中で斑晶が晶出する際に、斑晶中に周囲の流体（メルト）が捕獲されたもの。結晶ができた当時のメルトの組成を記録している貴重な情報源である。

面積ひずみ

→ ひずみの項を参照。

モホ面

モホロビッチ不連続面の略称。地球の地殻とマントルとの境界であり、そこでは地震波速度が不連続となっている。

ゆっくり滑り

断層面やプレート境界面で発生する非地震性すべりの一種で、非定常なゆっくりとした滑り。ここでは、継続時間が数か月以上のものを長期的ゆっくりすべり、それ以下のものを短期的ゆっくりすべりと呼ぶ。スロースリップ、スロースリップイベント（SSE）ともいう。

余効滑り

地震の後に震源域あるいはその周囲の断層面で発生するゆっくり滑り。

余効変動

地震の後に震源域あるいはその周囲で生じる長期間に及ぶ地殻変動の総称。代表的な例としては、断層面上で発生する余効滑りや、マントルの粘弾性応力緩和による変形などが挙げられる。

余震

→ 本震、余震の項を参照。

レオロジー構造モデル

物質の変形や流動について、単位面積あたりに働く力（応力）と変形の大きさや変形速度の関係の様子を表したモデル。

レシーバ関数（解析）

一つの観測点において異なる成分で記録された地震波形を処理した関数。「レシーバ関数解析」とは、直達P波とPs変換波（境界面でP波からS波に変わる波）等の到達時刻差を用いて、波の変換が起こるような面（例えばプレート境界面）の深さを推定する手法。

b 値

地震の規模別頻度を横軸としてマグニチュード、縦軸として地震の発生数の対数をプロットした際の傾きのこと。通常は0.7~1.0程度である。

DEM

Digital Elevation Model の略。地表面を等間隔の正方形に区切り、それぞれの正方形の中心点の標高値の数値データ。

GNSS

全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System) の略称。位置や時刻同期を目的とした電波を発射する人工衛星群, 地上の支援システム及び電波の受信装置の総称。利用者は, 受信機で電波を受信することで自分の 3 次元的な地球上の位置や正確な時刻を計測することができる。アメリカ合衆国が構築した GPS は現在最も実用的な GNSS であるが, 他にもロシアの GLONASS や, ヨーロッパ連合 (EU) の Galileo などのシステムがある。

Ku バンド高速スキャンレーダー

12~18GHz の周波数帯域を用い、1 分以内で高頻度かつ 3 次元の観測ができるレーダーのこと。

LiDAR

Light Detection and Ranging の略。遠方の大気や物体にレーザー光を照射してその物理的な特性を計測する装置や技術。

M_w (モーメントマグニチュード)

地震モーメントの大きさから一意に算出されるマグニチュード。比較的短い周期の地震波から簡便に決定できるマグニチュードは, 大規模な地震でその値が飽和してしまうという問題があった。この問題を解消するために導入された。

N₂-He-Ar の三成分図

窒素, ヘリウム, アルゴンの三成分を三角グラフにより表現した図のこと。

P 波

Primary wave (第一波) または Pressure wave (圧力波) の略。進行方向に平行に振動する弾性波。固体・液体・気体を伝わることができる。

S 波

Secondary wave (第二波) または Shear wave (ねじれ波, たわみ波もしくはせん断波) の略。進行方向と直交に振動する弾性波。固体のみを伝わることができる。

SAR

Synthetic Aperture Radar (合成開口レーダー) の略。人工衛星や航空機などに搭載されたアンテナを高速で移動させることにより大型アンテナと同等の高い分解能を実現したレーダーシステム。干渉 SAR 解析は, 同じ場所を撮影した時期の異なる 2 回の画像の差をとる (干渉させる) ことにより地表面の変動を詳細にとらえる手法である。

[参 考 资 料]

I. 計画推進部会および総合研究グループ等別の成果

「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について」(建議)に示された実施内容について、平成28年度の成果を計画推進部会および総合研究グループ等別に学術報告として取りまとめた。

この報告は、地震・噴火予知研究協議会¹⁾に設置された8の計画推進部会と1の研究グループ(観測・解析技術の開発)、建議において全ての項目を含む総合的な研究として優先して推進するとされた、東北地方太平洋沖地震、南海トラフの巨大地震、首都直下地震、桜島火山噴火についての4の総合研究グループ、及び地震火山観測研究を災害研究に結びつけるための共同研究を実施する東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携委員会²⁾の責任で編集したものである。

この報告に基づいて、難解な学術用語をなるべく言い換え、平易な文章で表現して書き直したものが、本編の「平成28年度の成果の概要」である。本編の「平成28年度の成果の概要」の内容について、さらに詳細を知りたい場合、原著論文を参照したい場合には、以下の報告をご参照いただきたい。

○東京大学地震研究所 地震・火山噴火予知研究協議会

「海溝型地震」計画推進部会長 小原一成(東京大学地震研究所)

副部会長 西村卓也(京都大学防災研究所)

「内陸地震」計画推進部会長 松本 聡(九州大学大学院理学研究院)

副部会長 上嶋 誠(東京大学地震研究所)

「火山」計画推進部会長 大倉敬宏(京都大学大学院理学研究科)

副部会長 野上健治(東京工業大学火山流体研究センター)

「地震先行現象・地震活動評価」計画推進部会長 中谷正生(東京大学地震研究所)

「地震動・津波等の事前予測・即時予測」

計画推進部会長 香川敬生(鳥取大学大学院工学研究科)

副部会長 太田雄策(東北大学大学院理学研究科)

「地震・火山災害」計画推進部会長 木村玲欧(兵庫県立大学環境人間学部)

副部会長 三宅弘恵(東京大学大学院情報学環)

「史料・考古」計画推進部会長 榎原雅治(東京大学史料編纂所)

副部会長 佐竹健治(東京大学地震研究所)

「データベース・データ流通」計画推進部会長 鶴岡 弘(東京大学地震研究所)

副部会長 大見士郎(京都大学防災研究所)

「観測・解析技術の開発」技術開発担当 渡辺俊樹(名古屋大学大学院環境学研究科)

「東北地方太平洋沖」総合研究グループリーダー 松澤 暢(東北大学大学院理学研究科)

「南海トラフ巨大地震」総合研究グループリーダー 澁谷拓郎(京都大学防災研究所)

「首都直下地震」総合研究グループリーダー 酒井慎一(東京大学地震研究所)

「桜島火山噴火」総合研究グループリーダー 井口正人(京都大学防災研究所)

○東京大学地震研究所・京都大学防災研究所拠点間連携共同研究委員会

委員長 川瀬 博(京都大学防災研究所)

副委員長 森田裕一(東京大学地震研究所)

-
- 1) 東京大学地震研究所には、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画で立案された研究を推進することを目的に設立された地震・火山噴火予知研究協議会がある。ここでは、本観測研究計画に参加する全国の大学等が連携し、研究機関と協力しながら研究を推進している。また、科学技術・学術審議会測地分科会地震火山部会は大学、研究機関、行政機関が連携して計画の推進を図っている。地震・火山噴火予知研究協議会には、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の実施内容を、効率的かつ調和的に研究を推進するために、8の計画推進部会と4の総合研究グループが設置されている。
 - 2) 「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所は、地震や火山噴火の現象解明・予測の研究成果を災害軽減につなげるための組織的な共同研究を実施するために、拠点間連携共同研究委員会を設置している。

1 (1) 海溝型地震

「海溝型地震」計画推進部会長 小原一成（東京大学地震研究所）

副部会長 西村卓也（京都大学防災研究所）

海溝型地震の発生機構を科学的に解明することは、海溝型地震の発生予測ならびに地震に伴う地震動、津波などによる災害に備えるための基本として重要である。海溝型地震計画推進部会では、主としてプレート境界で発生する海溝型地震を対象に、地震現象に関する過去データの収集と整理、地震現象の解明、地震発生場の解明、地震現象のモデル化、モニタリングによる地震活動予測、先行現象に基づく地震活動予測、及び観測・解析技術の開発を進めてきた。加えて、海洋プレート内部で発生するスラブ内地震についても発生機構の解明に関する研究を行っている。以下では、これらの項目において、本計画の3年目である平成28(2016)年度の成果の概略を述べる。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

日本海溝・千島海溝、相模トラフ、南海トラフ、南西諸島海溝、日本海東縁で発生した巨大地震の履歴と発生様式を明らかにするため、津波堆積物、地形地質調査などに基づいたデータ収集と整理が行われた（北海道大学〔課題番号：1002〕、名古屋大学〔課題番号：1703〕、公募研究〔課題番号：2938〕、公募研究〔課題番号：2939〕、産業技術総合研究所〔課題番号：5004〕、北海道立総合研究機構地質研究所〔課題番号：9101〕）。

日本海溝沿いでは、1611年慶長三陸津波地震の震源モデルを信頼できる歴史史料の全てに基づき推定した結果、三陸沖の長さ250 kmの断層が動いたとすると説明できることがわかった。よって、2011年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）で大きく滑った場所は、慶長三陸地震でも滑っていた可能性がある（北海道大学〔課題番号：1002〕）。

北海道南西部における津波堆積物から13世紀頃に発生したと考えられる津波は、地質学的証拠（奥尻島における陸上の大規模山体崩壊の発生年代）から地震性と推定される（Kawakami et al., in press）。その波源モデルとして、北海道防災会議地震専門委員会（2016）による断層モデル（剛性率を30 GPaと仮定すると $M_w 7.8$ ）を選定し、津波シミュレーションを行ったところ（図1）、計算された遡上域は津波堆積物の分布と概ね整合的であった（北海道立総合研究機構地質研究所〔課題番号：9101〕）。

過去の地震履歴を知るための新しい手法開発も試みられている。公募研究〔課題番号：2939〕では、2004年スマトラ地震を経験したインドネシアのサンゴ骨格試料を用いて、地震隆起によるサンゴが受ける日射量の変化が骨格中の炭素同位体比組成に記録されていることを発見した（伊藤・他，2016）。喜界島及び奄美大島の化石及び現生サンゴを同様な手法で解析することによって、地震による地殻変動と津波の履歴調査が試みられており、現生サンゴ骨格試料から、1911年及び1995年の喜界島沖地震発生時にサンゴの骨格成長が減衰していることが明らかになった（公募研究〔課題番号：2939〕）。

イ. プレート境界巨大地震

(東北沖)

東北沖地震の震源域やその周辺では、主に海底での地震・地殻変動観測から東北沖地震以降の様々な地震活動・地殻変動・地下構造の変化が捉えられている。

2012年から2016年5月までに実施した6回のGNSS-音響測距結合方式海底地殻変動観測により、日本海溝近傍における東北沖地震後の地殻変動(図2)が明らかになった(東京大学地震研究所[課題番号:1503])。観測された地殻変動の変位速度ベクトルは、海溝沿いに南北で大きく異なっており、東北沖地震で大きな地震時滑りがあった中部では粘弾性緩和による顕著な西向き変位が観測されたが、南部の広い範囲では逆に東向き変位が観測され、プレート境界浅部で余効滑りが進行していることを示唆する。これに比べ、北部では地震後の変位速度は非常に小さい。

海底のGNSS-音響測距結合方式、水圧計、陸上のGNSS観測網によって得られた東北沖地震後8か月間の余効変動データから、プレート境界上での東北沖地震後の余効滑り分布を高分解能で推定した(海洋研究開発機構[課題番号:4002]、Iinuma et al., 2016)。得られた分布は東北沖地震時の滑り領域とはほぼ重ならないことが示された。

北緯39度付近の日本海溝陸側斜面では、同一測線での構造探査実験が東北沖地震発生前の1996年と2001年、東北沖地震後の2013年と2014年に実施されており、プレート境界の特性変化を抽出する目的で実験取得データの解析を行った(東京大学地震研究所[課題番号:1503])。東北沖地震前後において、ほぼ同じ記録断面を得ることができており、速度構造に大きな変化がないことが推定される。一方、プレート境界からの反射強度については、暫定的ではあるが、東北沖地震発生前に強度が強かった場所では発生後に強度が低下し、地震前に弱かった場所では発生後に強度が上がる傾向があるように見える。

統合国際深海掘削計画第343次研究航海(JFAST)によって採取された、日本海溝付近のプレート境界断層試料の高温高圧摩擦実験により、断層の摩擦特性が温度や変位速度によってどのように変化するか調べた(東京大学地震研究所[課題番号:1503])。有効圧50 MPa、間隙水圧50 MPa、温度20~200 °C、変位速度0.3~100 $\mu\text{m/s}$ の条件で、摩擦滑りの安定性の指標である(a-b)値の温度・変位速度依存性を調べると、(a-b)値は50~100 °Cでのみ0に近い負の値を取り、150 °C以上では正となることがわかった。スロー地震^{注1}は(a-b)値が負でかつ小さな値をとるような条件で発生しやすいと考えられており、東北沖では50~100 °Cの温度でスロー地震が発生しやすい条件となることが明らかとなった。東北沖地震前に観測された、スロー地震の発生域の温度は、この範囲内と考えられており、摩擦実験結果はスロー地震の観測結果と調和的である。(注1:スロー地震とは、通常の地震に比べ断層滑り・破壊伝播速度が遅い現象の総称であり、時定数の短い方から順に、低周波微動、超低周波地震、短期的ゆっくり滑り(スロースリップイベント、またはSSE)、長期的SSEなどが既に認識されている。)

(南海トラフ)

南海トラフ巨大地震想定震源域及びその周辺でも、海底での地殻変動観測から沈み込むプレートの運動が初めて実測され、プレート間の固着状態が推定された。

GNSS-音響測距結合方式海底地殻変動観測により、熊野灘及び南海トラフ軸近傍の地殻変動(図3)が明らかになった(名古屋大学[課題番号:1703])。トラフ軸のフィリピン海プレート上の観測点(TOA)の動きは、モデルから推定したフィリピン海プレートの運動と整合的であり、フィリピン海プレートの運動を実測することに成功した。また、トラフ軸の陸側の2観測点(TCA、TCB)では変動方向が異なっており、TCA直下のプレート間の固着率は少なくとも40%程度であることがわかった。またTCBは、誤差も考慮するとフィリピン海プレートの動きに近く、TCB直下の固着率が高いことを示唆している。平成27年6月までの海上保安庁による海底地殻変動観測データと陸域の国土地理院の電子基準点データから、Yabuki and Matsu'ura(1992)の手法を用いた測地学的インバージョンを行い、プレート境界面上の滑り欠損速度の分布(図4)を推定した(海上保安庁[課題番号:8001]、Yokota et al., 2016)。東北沖地震の観測結果への影響は先行研究のモデルを用いて取り除いた。内閣府(2012)による南海トラフ巨大地震の想定震源域全体で、ある程度の

滑り欠損速度が推定され、滑り欠損速度の大きな領域は、1940年代の東南海・南海地震の震源域よりも外側まで広がっている。また、滑り欠損速度が比較的小さい領域は、超低周波地震の分布と整合的であった。この領域の周辺では海山が沈み込んでおり、これらの現象とプレート境界の固着が弱い状態は何らかの相関を持つことが初めて示された。

熊野沖南海トラフにおいて浅部プレート境界断層（デコルマ）の発達過程に影響する、沈み込む堆積物の役割を解明するため、MCS データと深海掘削データとの統合解析を行い、沈み込む堆積層の3次元間隙率と間隙水圧を推定した（東京大学大気海洋研究所〔課題番号：2801〕）。四国海盆のIODP 掘削サイトを参照点として設定し、南海トラフ軸近傍の2か所において、中部四国海盆堆積層を対象に過剰間隙水圧比を求めたところ、2か所とも上部よりも下部において過剰間隙水圧比が増加し、堆積層の透水率が低いことが示された。中部四国海盆堆積層において過剰間隙水圧が最大で有効応力が最少となり、断層挙動に必要な剪断応力が最少となると考えられることから、将来、デコルマは中部四国海盆堆積層で発達することが推定された。

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ア. プレート境界地震

(プレート境界滑り現象を規定する構造的特徴)

紀伊半島では、2004年3月から2013年3月まで延べ6測線においてリニアアレイ観測が行われ、これらのデータを全て用いてトモグラフィの再解析を行った（京都大学防災研究所〔課題番号：1904〕）。得られた3次元地震波速度構造では、スラブ上面の深さ30~40 kmあたりの深部低周波微動が発生する海洋地殻の周辺で、P波速度（ V_p ）とS波速度（ V_s ）はともに5%以上の低速度異常を示し、 V_p/V_s 比は1.8を超える値を取る。これは、海洋地殻内の含水鉱物の脱水分解が進み、流体が放出されたためと考えられる。また和歌山県北部において、上部地殻に微小地震が多発する領域下の下部地殻に V_p が10%にも及ぶ非常に強い低速度異常域がやや東西に広がる形で存在する。この領域では V_s も低速度異常を示すが、その程度は V_p よりも小さく、その結果、 V_p/V_s 比は1.6を下回る。この低速度異常域から流体が浅部の脆性領域に上昇し、岩石中の間隙水圧を上げ、摩擦力を下げるため、この地域で微小地震が多発すると考えられる。そしてこの低速度異常域は、 V_p/V_s 比が非常に小さいことから、シリカの沈殿物ではないかと考えられる。

また、2015年度に紀伊半島北東部の深部低周波微動が活発な領域を通る甲賀 - 南伊勢測線（図5）で取得した稠密自然地震観測データを使用し、プレート間の滑り現象を規定する構造不均質を明らかにする目的で、地震波速度構造解析、地震波減衰構造解析が行われた（東京大学地震研究所〔課題番号：1509〕）。甲賀 - 南伊勢測線で得られたデータに加えて、過去に紀伊半島で実施された稠密自然地震観測（Kurashimo et al., 2014; Kato et al., 2014）と定常観測点で得られている波形データを加えて推定された3次元地震波減衰構造から、甲賀 - 南伊勢測線下の減衰構造を図5に示す。深さ15 km付近まで Q_p が200~600程度を示しやや減衰が強い傾向が見られる。その下の深さ15~25 kmでは Q_p が800程度となり地震波は減衰しない。そして、深部低周波微動が群発している領域では、 Q_p が400程度になり減衰する傾向が確認できる。これら得られた地震波速度構造、減衰構造から、プレート間の滑り現象を規定する地下構造の異常が、低周波微動の発生域やその近傍に存在することが明らかになった。また、それらの地震学的特徴から、低周波微動の発生域には流体の存在が示唆され、沈み込むプレートの脱水作用によって生成された流体が低周波微動の発生に寄与していると考えられる。

イ. 海洋プレート内部の地震

2012年12月7日にアウターライズ域で発生したスラブ内ダブルプレット地震（逆断層型地震、深さ59 km；正断層型地震、深さ20 km）の震源断層モデルを震源近傍の海底に設置された圧力計で捉えた津波波形の解析

から推定した(図6)(東北大学[課題番号:1201];久保田(2016))。その結果、スラブ浅部で発生した正断層型地震の断層下端は35~40 km、深部で発生した逆断層型地震の断層上端は45~50 kmとなった。それぞれの深さは、2011年東北沖地震前における正断層型地震活動域の下端と、逆断層型地震活動域の上端よりも深く、太平洋プレート内の応力場が東北沖地震により変化したことが示唆される。しかし、東北沖地震による静的応力変化の大きさは、地震発生層の深さ変化を定量的に説明するには不十分であり、破壊強度の低下による地震活動の活発化が起こっている可能性がある。

太平洋スラブ内の上面及び下面地震帯の間(面間)の地震活動が活発である、北海道東部下で発生した面間地震55個についてメカニズム解の決定を行った結果、面間地震のメカニズム解は多様であり特徴的な分布を示さないことが明らかになった(東北大学[課題番号:1201])。こうした面間地震のメカニズム解の多様性は、面間地震発生深さにおける起震応力場が小さいことを示唆する。

(4) 地震現象のモデル化

イ. 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

防災科学技術研究所が所有する大型振動台を利用した岩石摩擦実験の観測データを数値シミュレーションで再現することにより、岩石の摩擦パラメータを推定し、摩擦パラメータが累積変位と載荷速度に依存することを明らかにした(防災科学技術研究所[課題番号:3001], Urata et al., 2016)。

摩擦パラメータの実験条件(温度・圧力・変位速度など)依存性を考慮した摩擦構成則を定式化し、日本海溝付近のJFAST試料の摩擦実験から得られた摩擦の性質及び、実測された水理的性質と摩擦発熱による間隙水圧上昇を考慮した動的地震サイクルシミュレーションを行った(東京大学地震研究所[課題番号:1503])。平時の有効垂直応力分布に関するパラメータスタディから、スーパーサイクル挙動、海溝まで達する巨大地震の頻度、深部のみの大規模地震の頻度、巨大地震時の滑り量と発熱量、長期的摩擦発熱量の全てにおいて観測結果と良く一致するケースを実現することに成功した。またこのモデルでは、最浅部のみがcm/s程度の速度で滑る津波地震に相当するイベントが確認できた。

スロー地震や大地震の発生において根本的に重要な役割を果たすと考えられている、脆性-塑性遷移領域(BDT)における断層の剪断強度への間隙流体圧の力学的影響を調べるため、アナログ物質として岩塩ガウジを用いた実験を温度・封圧・間隙流体圧をそれぞれ独立に変えて行った(東京大学地震研究所[課題番号:1507], Noda and Takahashi, 2016a)。BDTでは塑性領域に近づくにつれ剪断強度の法線応力依存性が消滅するが、有効法線応力に対する間隙圧の負の効果は、断層の真実接触面積の増加によって徐々に消滅するはずであるという従来の説(Scholz, 1990; Hirth and Beeler, 2015)は全くデータにあわず、真実接触面積の割合が高い場合でも、封圧から間隙圧をそのまま減じたものを有効法線応力として採用すべきであることとその理論的な解釈を提案した。また、実験データによりBDTの強度プロファイルを構築すると、従来の説が予測する顕著なピーク強度は見られない。このなだらかな強度プロファイルを説明するには、上記の有効応力についての修正に加えて、真実接触面積と有効応力の関係の非線形性や真実接触の周辺バルク部分の流動が無視できない(加藤, 東大修論, 2009)ことが必要なことを指摘した。

東北沖地震の震源域で、前震による余効滑りと本震による高速滑りが重なっている領域があることから、プレート境界における摩擦強度の滑り速度依存性の実証的な評価を行った(東京大学地震研究所[課題番号:1503])。インバージョン解析により求めた滑りの履歴から応力変化を計算し、滑り速度と応力変化の関係に着目すると、顕著な動的弱体化現象を確認することができた。この結果は、従来の高速摩擦実験の結果(例えば, Di Toro et al., 2011)と調和的である。

スロー地震や繰り返し地震には卓越した活動周期が存在することが報告されており、地球・海洋潮汐などの周期的外力及び単独の繰り返し間隔を持つアスペリティの相互作用より生じる同期現象である可能性があ

る。そこで、標準線形固体（三要素固体）を組み込んだ、バネ・ダッシュポット・スライダーからなる固着滑り振動子への、周期的外力の応答を、数値シミュレーションにより調べた（京都大学理学研究科〔課題番号：1801〕）。標準線形固体を構成するマックスウェル粘弾性要素の緩和時間（TM）の、固着滑り振動子の繰り返し間隔（Tr）への影響を調べたところ、TM が無限大の場合に Tr が 111.95 年となるような設定では、Tr は TM の減少とともに減少していき、TM が 1～5 年で最少となり、それより小さい TM では増大する現象が見られた。この原因やその地震サイクルへの影響評価については今後検討を要する。

大地震後の余効変動について、摩擦構成則に従う余効滑りと地震時の滑りに加え、余効滑りによるマン托ルの粘弾性応力緩和を考慮した余効変動モデルを構築した（京都大学理学研究科〔課題番号：1803〕）。このモデルでは地震時の応力変化によって粘弾性緩和と余効滑りが駆動され、余効滑りの時間発展は速度・状態依存摩擦構成則に従うと仮定している。従ってこのモデルのパラメータは摩擦パラメータやマン托ルの粘性率などであり、初期条件は地震時の滑り分布で決まる。これらのパラメータの推定手法について検討するために、東北沖地震の余効変動にこのモデルを適用し、パラメータと初期条件が余効変動に与える影響について調査した（図 7）。地震時の滑り分布によっては、モデルが観測された上下変動を説明できないことや、摩擦パラメータの推定値が地震時滑り分布によって異なることが明らかになり、余効変動の観測データから余効滑り域の摩擦パラメータを推定する際には、地震時の滑り分布も同時推定する必要があることがわかった。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

ア. プレート境界滑りの時空間発展

(日本海溝・千島海溝)

地殻変動速度場を、ブロックの剛体回転運動とブロック境界における固着と滑りによる弾性変形の和でモデル化するブロック断層モデルを、時間変化も含めて解析できるように拡張し、東北沖地震前の日本列島の地殻変動解析を行った（図 8）（国土地理院〔課題番号：6003〕）。その結果、2003 年十勝沖地震の余効滑りや 2005 年宮城県沖の地震後の 2006 年に宮城県沖合の滑り欠損が小さくなる様子が捉えられた。また 2008 年の茨城県沖、福島県沖の地震後の余効変動のために、2008 年以降、茨城県沖、福島県沖でのプレート境界の滑り欠損が小さくなっていることが推定された。

相似地震カタログを用いた固着状態の時空間変化の推定は、日本列島の様々な地域で行われているが、本稿では日本海溝・千島海溝沿いと南西諸島海溝沿いの結果について記す（東京大学地震研究所〔課題番号：1510〕、鹿児島大学〔課題番号：2301〕）。

Brownian Passage Time (BPT) 分布更新過程から拡張した時空間更新過程モデル (Nomura et al., 2017) を用いて、2011 年東北沖地震までの太平洋プレート境界における準静的滑りの時空間的变化が推定された（東京大学地震研究所〔課題番号：1510〕）。その結果、十勝沖～釧路沖において 2003 年十勝沖地震後の滑り速度が長期にわたって以前より高い水準にあること、三陸はるか沖地震の余効滑りの減衰期間が深さにより異なること、三陸沖や福島沖では間欠的に M6 クラスの地震や群発地震に伴う滑り加速が見られることなどが考察された。さらに、GPS インバージョンによる同地域の滑り欠損速度分布 (Hashimoto et al., 2012, Ozawa et al., 2004) の推定結果と比較を行い、推定された滑り量のスケールに差があるものの、全体的に同じ傾向が捉えられていることを示した。

(相模トラフ)

房総沖スロースリップイベント (SSE) 領域において、水圧計のデータ解析を進めた (図9) (東京大学地震研究所 [課題番号:1503], Sato et al., 2016)。水圧計の時系列を線形成分 (機器トレンドと地殻の永年変動に対応)、1年と半年周期の周期成分 (地殻の年周変動に対応)、対数成分 (2011年東北沖地震の余効変動に対応)、ギャップ成分 (房総沖 SSE による変動に対応) の4つの成分からなる関数をフィッティングすることにより、水圧計による海底の上下変動は、深さに換算して約1cmの精度で観測できることが示された。2013年12月から2014年1月の房総沖 SSE に近い観測点 (KAP3) で2cmを超える有意な隆起が認められ、房総沖 SSE から遠い観測点 (BOS02) では有意な隆起はなかったことがわかった。

(南海トラフ)

東海地方で2013年頃から始まったと言われる長期的 SSE に関して、Fukuda et al. (2008)によって開発された改良型時間発展インバージョンを用いた解析を実施した (図10) (東京大学地震研究所 [課題番号:1509])。2013~2015年の最大積算滑り量は約6.5cm、長期的 SSE に解放されたモーメント (図10a 赤色矩形領域) は約 M_w 6.5 相当と推定された。また、この領域での解放モーメントの時間発展 (図10b 赤線) には、急激に加速した期間が2回見られ、2014年1月と2015年4月の短期的 SSE の発生に対応しており、長期的 SSE と短期的 SSE の両方の滑り分布の推定に成功した。長期的 SSE の滑りの中心付近での解放モーメントの時間変化は、短期的 SSE の発生領域での解放モーメントにかかわらずほぼ一定であることがわかった (図10b)。また、本研究で推定された結果から、短期的 SSE による滑りの加速に伴って低周波微動 (LFT) の発生が誘発されたことが示唆される。

深部低周波微動の輻射エネルギーを定量的に評価する目的で新たな手法を開発し、西南日本における時空間分布など、微動活動全体像に関する評価を行った (図11) (東京大学地震研究所 [課題番号:1509], Annoura et al., 2016)。その結果、微動エネルギーレートは豊後水道域で2010年と2014年に定常時に比べて値が2~3倍程度に増加しており、豊後水道長期的 SSE の発生に伴う応力擾乱の影響を定量的に明らかにした。また、微動エネルギーレートとプレートの沈み込み速度を沈み込むフィリピン海プレートの走向方向で比較すると、いずれも紀伊水道を境とした西側の四国で高く、東側の紀伊半島、東海地方で低いという対応関係を見出した。一つの解釈としては、プレート沈み込み速度が速い地域ではプレート境界でより多くひずみが蓄積し、微動活動も活発となることが考えられる。

2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震 (M_w 6.0) は、南海トラフ巨大地震想定震源域内で発生した海溝型地震で、この地震の地震像や周囲への影響に関する研究が行われた (防災科学技術研究所 [課題番号:3002]、海洋研究開発機構 [課題番号:4002])。熊野灘の海底掘削孔 C0010 の孔内計測装置を DONET への接続を行いリアルタイム計測を開始したことにより、この地震に伴い発生した、SSE に対応した孔内間隙水圧の変動がリアルタイムに観測できるようになった (海洋研究開発機構 [課題番号:4002])。DONET のデータの解析によると、この地震の余震群や超低周波地震は本震の発生域とは空間的に離れた場所で発生しており、深部側と浅部側双方にひずみが伝播したことが示唆されるとともに、SSE は周辺で発生した超低周波地震の活動を伴うことがわかった。

(南西諸島海溝)

日向灘から奄美大島にかけてのフィリピン海プレートの沈み込みプレート境界において、相似地震から準静的滑り速度を求めた (図12) (鹿児島大学 [課題番号:2301])。解析対象領域・解析期間中に発生した $M6.5$ 以上のプレート境界型地震4個のうち、3個について地震発生の少し前から準静的滑り速度の増加が認められたが、2009年10月30日の $M6.8$ の地震については、同様の変化は認められない。地震発生後は4ケースともに相似地震発生数が減少し、準静的滑り速度も遅くなっている。規模の大きな地震の発生前後にお

ける準静的滑り速度の時間変化が示唆されたが、さらに観測事例を増やしていく必要がある。また、M6.5以上の地震発生前後を除くと準静的滑り速度は大きな時間変化はなく安定していたが、2015年頃から半数以上の小領域で準静的滑り速度が増加する傾向を示しており、注目すべき変化である。

(断層摩擦パラメータのデータ同化)

過去に発生した房総 SSE のメカニズムの理解に向けて、GNSS データから推定された SSE 発生時の滑りや応力の時空間発展を、速度・状態依存摩擦構成則に基づいてモデル化した(東京大学地震研究所 [課題番号: 1503])。1996年の SSE の滑りの推定結果に基づきプレート境界面上における応力の時空間変化を計算し、速度・状態依存摩擦構成則の式において、滑り速度をインバージョン解析からの推定値に固定し、摩擦パラメータ L , $a \times \sigma$, $(b-a) \times \sigma$ (σ は有効法線応力) 及び状態変数の初期条件を未知パラメータと仮定した。この仮定の下で摩擦構成則の式を数値的に計算し、インバージョン解析から求められた応力の時空間変化を再現できるような未知パラメータを推定した結果を図 13 に示す。応力の時空間変化は速度・状態依存摩擦構成則で良く説明でき、SSE 発生域における臨界断層長(半径)は 30~50 km 程度と見積もられた。GNSS データから推定された SSE の滑り域の半径は臨界半径と同程度かそれよりもやや小さく、SSE の発生が条件付安定の摩擦特性に支配されていることが示唆された。

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

地震活動の時間変化をモニタリングし、超巨大地震の先行現象を検知する手法を開発するために、ISC の地震カタログから実体波マグニチュード 5.0 以上、深さ 60 km 以浅の地震を選択し、Zhuang et al. (2002) の方法でデクラスタリング処理した後、ZMAP で地震活動の長期変化を解析した(北海道大学 [課題番号: 1002])。2001年ペルー巨大地震 (M_w 8.4) と 2010年チリ巨大地震 (M_w 8.8) 震源域近傍での地震活動を解析したところ、ペルーでは、11年間の静穏化が発生しその直後に巨大地震が発生したと、チリでは約 13.8年間の静穏化の後、5.8年間は通常地震活動に戻った後、巨大地震の発生に至ったことがわかった(図 14)。これまでの静穏化の結果を総合すると、 M_w 8.8 以上の地震は、静穏化が 10年程度続いたのち、地震活動が復活して 10年程度経過すると巨大地震が発生することがわかった。上記の静穏化は 1952年カムチャツカ、1957年アリユーション、1962年アラスカ、2004年スマトラ、2011年東北沖でも見られた。また、M8クラスの巨大地震にも 10年程度の静穏化が起こる場合があり、1994年北海道東方沖や 2003年十勝沖のように静穏化直後に巨大地震が発生した。

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

(海域観測機器)

東北沖地震の最大滑り域付近の日本海溝において、3回目の海底間音響測距観測を 2015年から実施した(東北大学 [課題番号: 1210])。今回の観測機器は、従来の機器に比べて (1)ユニバーサルジョイントを廃止し姿勢の安定性を重視した脚形状、(2)音響コマンドで観測頻度の設定変更や計測データの随時吸い上げが可能、(3)高精度な外付け圧力・温度センサー搭載、という点で改良が加えられている。設置した 5 台のうち 2 台を回収し、ほぼ 1 年間の連続データを得ることに成功した。データの補正を行うことにより、最終的にばらつきで $\pm 1 \sim 2$ cm、1 年間の変位速度で ± 2 cm/yr の精度で計測できる見込みがたった。また、開発した大深度型の圧力計は水深 7000 m を超える海溝軸付近でも正常に動作しており、定期的な入れ替えにより圧力と温度の時系列データを取り続けている。

ケーブル式海域観測網の高度化に関して、復旧した既設の三陸沖海底光ケーブル式地震津波観測システム及び2015年に設置した新規海底光ケーブル式地震津波観測システム(OBCSTシステム)の併行観測を実施し、OBCSTシステムで得られたデータ特性の評価を地震学的雑微動スペクトルにより行った(東京大学地震研究所[課題番号:1521])。その結果、OBCSTシステムにおけるノイズは、2 Hzより高い帯域及び10秒よりも長い帯域で十分に低く、海底における典型的なノイズレベルとほぼ同じであり、1996年に設置された既設システムともほぼ同レベルであった。埋設された観測ノード(YOB1)については、他の観測ノードよりも低い雑微動レベルであり、地震計の埋設がノイズ軽減に有効であることが確かめられた。

(6) 国際共同研究・国際協力

2014年5月10日から2015年6月にかけて、ニュージーランド(NZ)北島ギズボーン沖合にて日・NZ・米3か国共同で行った大規模海域地球物理観測HOBITSS(Hikurangi Ocean Bottom Investigation of Tremor and Slow Slip)では、海底地震計5台、海底地震・圧力計10台、海底圧力計17台を設置し、全台の回収に成功した(東京大学地震研究所[課題番号:1524])。2014年9月から10月にかけて観測網直下において、これまでに観測されている中で2番目に大きい規模のSSEが発生し、この期間の海底圧力計のデータを調べたところ、SSEに伴う1.5~5.4 cmの海底上昇を記録していることがわかった。この海底上昇は陸上のGNSS観測網における変化よりも数日前から開始しており、SSEの滑りはプレート境界の浅部から深部へと進行したことが示唆される。最大の隆起量は、海岸線よりも30 km沖合の圧力計で記録され、その大きさは5.4 cmであった。海溝軸から5~10 kmの圧力計でも1.5~2 cmの隆起が認められており、SSEによる断層滑りはほぼ海溝軸まで達したことを示唆している(図15)(Wallace et al., 2016)。また、SSEに伴う断層滑りについて、反射法地震波構造調査によって得られているプレート境界の形状と比較すると、沈み込んだ海山を避けるように分布していることがわかった。

これまでの課題と今後の展望

今期の本部会の成果の中でも特筆すべき点として、海底観測技術の進展により陸域観測だけでは難しかった沖合の固着と滑りが検出できるようになった点が挙げられる。本観測研究計画の3年目である平成28年度においても、GNSS音響測距結合方式地殻変動観測により、南海トラフや日本海溝沿いにおいて地殻変動速度場が明らかになり、それぞれ固着分布の不均質や余効変動メカニズムの多様性についての研究が進められている。また、海底水圧計を用いた地殻変動観測により、房総半島沖やニュージーランドにおいてSSEに伴う地殻変動が検出された。ニュージーランドにおいては、SSEの滑り領域が海溝軸まで達していることが初めて明らかになり、房総半島沖の解析結果からは、様々なノイズを含む観測データからSSEに関連するシグナルを抽出するために、解析手法を工夫することの重要性も示された。また、従来は難しかった海溝軸近傍の深海域における観測に関する技術開発も進められており、海底間音響測距や水圧計、広帯域地震計において、長期的な観測を行う実証実験段階に入りつつある。

相似地震を用いたプレート境界での滑りのモニタリングからは、過去に発生した大地震の前後にプレート間固着状態が大きく変化したことが明らかになり、地下構造の研究からは、プレート境界面及びその近傍における間隙圧などの物理化学状態により、プレート間滑り特性がある程度規程されている可能性が高いことも明らかになってきた。数値シミュレーションを用いた地震発生予測を試行するために重要である断層摩擦パラメータの推定についても、海底掘削による実際の試料を用いた摩擦実験や測地データのデータ同化による成果が挙げられている。以上のことから、本計画は概ね計画通りに着実に成果を挙げてきたといえる。

Obara and Kato(2016)は、スロー地震が巨大地震に対して果たす役割を(1) Analog(類似現象)、(2) Stress meter(応力状態を反映するインジケータ)、(3) Stress transfer(周囲への応力転荷)という3

つの点に整理した。中南米では近年、SSEによって载荷された応力によりトリガーされた大地震の報告例が相次いでいることや、スロー地震の活動様式や発生原因の解明は未だに十分でないことから、今後もスロー地震の活動を継続的にモニタリングして発生機構の解明を進めることが、巨大地震の発生過程に関する理解の進展にも繋がることが期待される。これらスロー地震研究を中心としたプレート間滑りのモニタリングの高度化と、シミュレーションや実験を中心とした断層摩擦特性の理解を両輪として、地震発生予測に向けた研究を今後も続けていくことが重要である。

また、社会に貢献するという本計画の目標に関して、史料や地質データに基づく日本海溝・千島海溝における大規模地震に関して得られた知見は、地震本部が行う海溝型地震の長期評価の基礎データとして取り入れられつつあり、一定の貢献が行われている。一方、課題であった災害誘因の予測研究に向けた他部会・総合研究グループとの連携については、各課題レベルでの連携が行われている。今後は、部会としての有効な連携の方向性について他部会・総合研究グループ及び戦略室と議論を行っていくことが重要であろう。

成果リスト

- Ando, R., 2016, Fast Domain Partitioning Method for dynamic boundary integral equations applicable to non-planar faults dipping in 3-D elastic half-space, *Geophys. J. Int.*, 207, 833-847.
- Arai R., T. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaiho, A. Nakanishi, G. Fujie, Y. Nakamura, Y. Yamamoto, Y. Ishihara, S. Miura, and Y. Kaneda, 2016, Structure of the tsunamigenic plate boundary and low-frequency earthquakes in the southern Ryukyu Trench, *Nature Communications*, doi:10.1038/ncomms12255.
- Arai R., S. Kodaira, Y. Kaiho, T. Takahashi, S. Miura, Y. Kaneda, 2016, Crustal structure of the southern Okinawa Trough: Symmetrical rifting, submarine volcano and potential mantle accretion in the continental back-arc basin, 2016, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, doi: 10.1002/2016JB013448.
- Annoura, S., K. Obara and T. Maeda, 2016, Total energy of deep low-frequency tremor in the Nankai subduction zone, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 2562-2567, doi:10.1002/2016GL067780.
- Burgmann, R., N. Uchida, Y. Hu, and T. Matsuzawa, 2016, Tohoku rupture reloaded?, *Nature Geosci.*, 9, 183-184.
- Fukuyama, E. and W. Suzuki, 2016, Near-fault deformation and Dc'' during the 2016 Mw7.1 Kumamoto earthquake, *Earth Planets Space*, 10.1186/s40623-016-0570-6.
- Fukuyama, E., S. Xu, F. Yamashita, and K. Mizoguchi, 2016, Cohesive zone length of megathrust at supershear rupture velocity, *J. Seismology*, 20(4), 1207-1215, doi:10.1007/s10950-016-9588-2.
- Gerasimenko M. D., N. V. Shestakov, A. G. Koromuets, G. N. Gerasimov, H. Takahashi, D. V. Svisoev, G. V. Nechaev, 2016, Vertical crustal movement of the south of Primorsky Krai and their relationship with the subduction zone geodynamic processes, *Geodesy and Cartography*, 33-37.
- Harris, R., L. Wallace, S. Webb, Y. Ito, K. Mochizuki, H. Ichihara, S. Henry, A. Tréhu, S. Schwartz, A. Sheehan, R. Lauer, and D. Saffer, 2016, Investigations of shallow slow slip offshore of New Zealand, *Eos*, 97, 701-704, doi:10.1029/2016E0048945.
- Hata, M., M. Uyeshima, S. Handa, M. Shimoizumi, Y. Tanaka, T. Hashimoto, T. Kagiya, H. Utada, H. Munekane, M. Ichiki and K. Fuji-ta, 2017, 3-D electrical resistivity structure based on geomagnetic transfer functions exploring the features of arc magmatism beneath Kyushu, Southwest Japan Arc, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, doi:10.1002/2016JB013179.

- Hatakeyama, N., N. Uchida, T. Matsuzawa, T. Okada, J. Nakajima, T. Matsushima, T. Kono, S. Hirahara, and T. Nakayama, 2016, Variation in high-frequency wave radiation from small repeating earthquakes as revealed by cross-spectral analysis, *Geophys. J. Int.*, 207, 1030–1048, doi:10.1093/gji/ggw313.
- Hirono, T., Tsuda, K., Tanikawa, W., Ampuero, J. P., Shibazaki, B., Kinoshita, M. and Mori, J., 2016, Near-trench slip potential of megaquakes evaluated from fault properties and conditions. *Scientific Reports*, 6, 28184, doi:10.1038/srep28184.
- Ide, S., S. Yabe and Y. Tanaka, 2016, Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size-frequency statistics, *Nature Geoscience* 9, 834–837, doi:10.1038/ngeo2796.
- Ioki, K., and Y. Tanioka, 2016, Rupture Process of the 1969 and 1975 Kurile Earthquakes Estimated from Tsunami Waveform Analyses, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-016-1402-0.
- Iinuma, T., R. Hino, N. Uchida, W. Nakamura, M. Kido, Y. Osada, and S. Miura, 2016, Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake, *Nature Comm.*, 7, doi:10.1038/ncomms13506.
- Inagakim F., K. Hinrichs, Y. Kubo, and Expedition 337 Scientists, 2016, IODP Expedition 337: Deep Coalbed Biosphere off Shimokita –Microbial processes and hydrocarbon system associated with the deeply buried coalbed in the ocean, *Scientific Drilling*, 21, 17–28.
- Inazu, D., N. Pulido, E. Fukuyama, T. Saito, J. Senda, and H. Kumagai, 2016, Near-field tsunami forecast system based on near real-time seismic moment tensor estimation in the regions of Indonesia, the Philippines, and Chile, *Earth Planets Space*, 68:73, doi:10.1186/s40623-016-0445-x.
- 伊藤早織, 渡邊剛, 山崎敦子, Teddy Eka Putra, 西村裕一, 2016, サング骨格に記録される地震イベント, 月刊海洋 号外, 56, 60–71.
- 加瀬善洋・他, 2016, 北海道南西部奥尻島で発見された津波堆積物, *地質学雑誌*, 122, 587–602.
- Kato, A., J. Fukuda, T. Kumazawa and S. Nakagawa, 2016, Accelerated nucleation of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.2 Earthquake, *Scientific Reports*, 6, 24792, doi: 10.1038/srep24792.
- Kato, N., 2016, Earthquake cycles in a model of interacting fault patches: Complex behavior at transition from seismic to aseismic slip, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106, doi: 10.1785/0120150185.
- Kawakami *et al.*, in press, Stratigraphic records of tsunamis along the Japan Sea, southwest Hokkaido, northern Japan. *Island Arc*.
- Kim, S., T. Saito, E. Fukuyama, and T.-S. Kang, 2016, The Nankai Trough earthquake tsunamis in Korea: numerical studies of the 1707 Hwei earthquake and physics-based scenarios, *Earth Planets Space*, 68:64, doi:10.1186/s40623-016-0438-9.
- 久保田達也, 2016, 近地津波観測による2011年東北地方太平洋沖地震震源域周辺における地震発生過程に関する研究, 東北大学博士論文, 東北大学.
- Kubota, T., R. Hino, D. Inazu, Y. Ito, T. Iinuma, Y. Ohta, S. Suzuki, and K. Suzuki, 2016, Coseismic slip model of offshore moderate interplate earthquakes on March 9, 2011 in Tohoku using tsunami waveforms, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 458, 241–251.
- Mizoguchi, K. and Hirose, T., 2016, Transient water adsorption on newly formed fault gouge and its relation to frictional heating, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7921–7927.
- Nakamura, W., N. Uchida, and T. Matsuzawa, 2016, Spatial distribution of the faulting types of small earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: A comprehensive search using template event, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2591–2607.

- Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo, and K. Ariyoshi, 2016, Possible scenarios for occurrence of $M \sim 7$ interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, *Scientific Rep.*, 6, 25704, doi:10.1038/srep25704.
- Noda, H. and M. Takahashi, 2016a, The effective stress law at a brittle-plastic transition with a halite gouge layer, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2015GL067544.
- Noda, H. and M. Takahashi, 2016b, Technical note: Correction of output from an internal load cell in a high-pressure triaxial deformation apparatus without a split-piston, *J. Geol. Soc. Japan*, 122, 12, 653-658, doi:10.5575/geosoc.2016.0047.
- Nomura, S., Y. Ogata, N. Uchida, and M. Matsu'ura, 2017, Spatiotemporal variations of interplate slip rates in northeast Japan inverted from recurrence intervals of repeating earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 208, 468-481, doi:10.1093/gji/ggw395.
- Obara, K. and A. Kato, 2016, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, *Science*, 353, 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512.
- Obayashi, J. Yoshimitsu, H. Sugioka, A. Ito, T. Isse, H. Shiobara, D. Reymond, and D. Suetsugu, 2016, Mantle plumes beneath the South Pacific superswell revealed by finite frequency P tomography using regional seafloor and island data M, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL070793
- Ono, S., T. Kikegawa, Y. Higo, Y. Tange, 2016, Precise determination of the phase boundary between coesite and stishovite in SiO₂, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 264, 1-6, doi:10.1016/j.pepi.2017.01.003.
- Otsubo, M., Miyakawa, A., Kawasaki, R., Sato, K., Yamaguchi, A., Kimura, G., 2016, Variations in stress and driving pore fluid pressure ratio using vein orientations along megasplay faults - example from the Nobeoka Thrust, southwest Japan. *Island Arc*, 25, 421-432. doi: 10.1111/iar.12155.
- Ozawa S., M. Tobita, H. Yarai, 2016, A possible restart of an interplate slow slip adjacent to the Tokai seismic gap in Japan, *Earth Planets Space*, 68:54, doi:10.1186/s40623-016-0430-4.
- Palazzin, G., Raimbourg, H., Famin, V., Jolivet, L., Kusaba, Y., Yamaguchi, A., 2016, Deformation processes at the down-dip limit of the seismogenic zone: the example of Shimanto accretionary complex. *Tectonophysics*, 687, 28-43. doi: 10.1016/j.tecto.2016.08.013
- Saito, T. and H. Tsushima, 2016, Synthesizing ocean bottom pressure records including seismic wave and tsunami contributions: Towards realistic tests of monitoring systems, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, doi:10.1002/2016JB013195.
- Sakai T., H. Kumagai, N. Pulido, J. Bonita, and M. Nakano, 2016, Discriminating non-seismic long-period pulses and noise to improve earthquake source inversion, *Earth Planets Space*, 68:50, 1-14, doi:10.1186/s40623-016-0426.
- Sato, T., S. Hasegawa, A. Kono, H. Shiobara, T. Yagi, T. Yamada, M. Shinohara, and N. Usui, 2017, Detection of vertical motion during a slow-slip event off the Boso Peninsula, Japan, by ocean bottom pressure gauges, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 2710-2715, doi:10.1002/2017GL072838.
- Sawai, M., Niemeijer, A. R., Plümpner, O., Hirose, T. and Spiers, C. J., 2016, Nucleation of frictional instability caused by fluid pressurization in subducted blueschist, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2543-2551.
- Sawazaki, K., T. Saito, T. Ueno, 2016, Estimation of seismic velocity changes at different depths associated with the 2014 Northern Nagano Prefecture earthquake, Japan (M_w 6.2) by joint

- interferometric analysis of NIED Hi-net and KiK-net records, *Progress in Earth and Planetary Sci.*, doi:10.1186/s40645-016-0112-7.
- Suzuki W., N. Pulido, and S. Aoi, 2016, Rupture Process and Strong-Motion Generation of the 2014 Iquique, Northern Chile, Earthquake, *J. Earthquake and Tsunami*, 10(3), 1-19, doi:10.1142/S179343111640008X.
- Takemura, S, K. Shiomi, T. Kimura, and T. Saito, 2016, Systematic difference between first-motion and waveform-inversion solutions for shallow offshore earthquakes due to a low-angle dipping slab, *Earth Planets Space*, doi:10.1186/s40623-016-0527-9.
- Uchida, N., Y. Asano, and A. Hasegawa, 2016, Acceleration of regional plate subduction beneath Kanto Japan, after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 9002-9008, doi:10.1002/2016GL070298.
- Uchida, N., S. Kirby, N. Umino, R. Hino, and T. Kazakami, 2016, The great 1933 Sanriku-oki earthquake: reappraisal of the mainshock and its aftershocks and implications for its tsunami using regional tsunami and seismic data, *Geophys. J. Int.*, 206, 1619-1633.
- Urata, Y., F. Yamashita, E. Fukuyama, H. Noda, and K. Mizoguchi, 2016, Apparent dependence of rate- and state-dependent friction parameters on loading velocity and cumulative displacement inferred from large-scale biaxial friction experiments, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-016-1422-9.
- Wada, J., Kanagawa, K., Kitajima, H., Takahashi, M., Inoue, A., Hirose, T., Ando, J. and Noda, H., 2016, Frictional strength of ground dolerite gouge at a wide range of slip rates, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2961- 2979, doi:10.1002/2015JB012013.
- Wallace, L., S.C. Webb, Y. Ito, K. Mochizuki, R. Hino, S. Henrys, S.R. Schwartz, and A.F. Sheehan, 2016, Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Science*, 352, 701-704, doi:10.1126/science.aaf2349.
- Xu, S., E. Fukuyama, H. Yue, and J.-P. Ampuero, 2016. Simple crack models explain deformation induced by subduction zone megathrust earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106(5), 2275-2289, doi:10.1785/0120160079.
- Yamaguchi, A., Hina, S., Hamada, Y., Kameda, J., Hamahashi, M., Kuwatani, T., Shimizu, M., Kimura, G., 2016, Source and sink of fluid in pelagic siliceous sediments along a cold subduction plate boundary. *Tectonophysics*, 686, 146-157. doi: 10.1016/j.tecto.2016.07.030.
- Yamaguchi, A., Fukuchi, R., Hamahashi, M., Shimizu, M., 2016, UAV-based mesoscale lithologic distribution map of a large shear zone in Jurassic accretionary complex (Ohwaki outcrop in the Mino Belt, central Japan). *Island Arc*, 25, 436-438. doi: 10.1111/iar.12158
- Yamamoto, Y., Y. Hamada, N. Kamiya, T. Ojima, S. Chiyonobu, S. Saito, 2016, Geothermal structure of the Miura-Boso plate subduction zone, central Japan, *Tectonophysics*, 10.1016/j.tecto.2016.11.004
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, 2016, *Nature*, doi:10.1038/nature17632.
- Yoshida, K., A. Hasegawa, T. Saito, Y. Asano, S. Tanaka, K. Sawazaki, Y. Urata, and E. Fukuyama, 2016, Stress rotations due to the M6.5 foreshock and M7.3 main shock in the 2016 Kumamoto, SW Japan, earthquake sequence, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL070581.
- Yoshida, M., 2016, Formation of a future supercontinent through plate motion-driven flow coupled with mantle downwelling flow, *Geology*, 44, 9, 755-758, doi:10.1130/G38025.1.

- Yoshida, S., 2016, Earthquakes in Oita triggered by the 2016 M7.3 Kumamoto earthquake, *Earth Planets Space*, 68, doi:10.1086/s40623-016-0552-8.
- Yoshida, S., N. Kato, and J. Fukuda, 2016, Forecast experiment on the Kamaishi repeating earthquakes based on numerical simulations using friction law, *Earth Planets Space*, 68, doi:10.1186/s40623-016-0448-7.

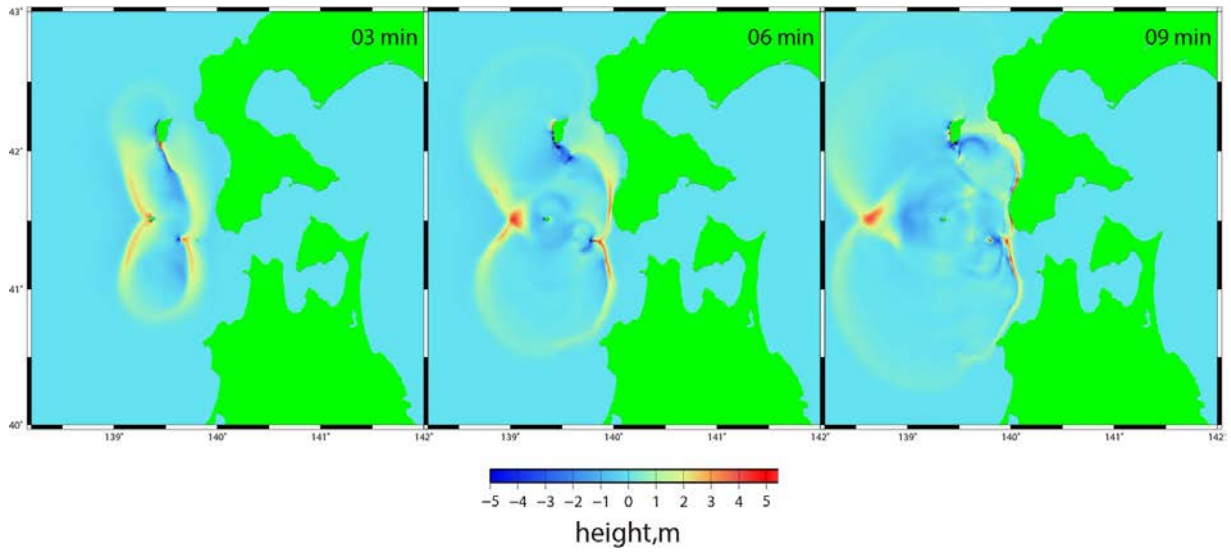


図1. 13世紀頃に発生した日本海東縁の地震の津波伝播図（北海道立総合研究機構地質研究所〔課題番号：9101〕）。奥尻島から青森県西方沖に至る領域においた震源断層モデルを用いて計算した津波の3分、6分、9分後の津波伝播図。

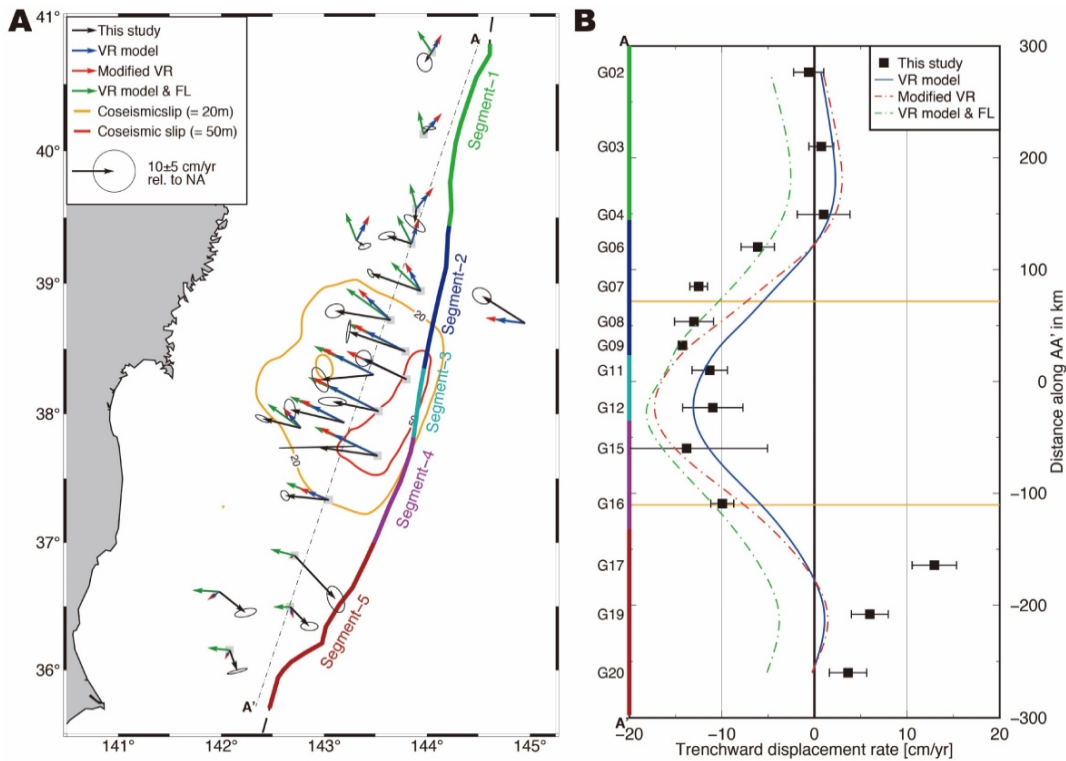


図2. 日本海溝近傍における2011年東北沖地震後の地殻変動（東京大学地震研究所〔課題番号：1503〕）。A：変位速度ベクトル。Iinuma et al. (2012)による本震時滑りの等値線（20 m と 50 m）とともに示す。B：変位速度の海溝と直交する成分の南北変化。Sun et al. (2014)による粘弾性緩和と変形モデル（青）、粘性係数を小さくしたモデル（赤）、粘弾性緩和に加えてプレート境界全面での100%固着を仮定した場合（緑）、のそれぞれにおける変位速度の計算値をあわせて示す。

熊野海盆～南海トラフ軸での観測結果

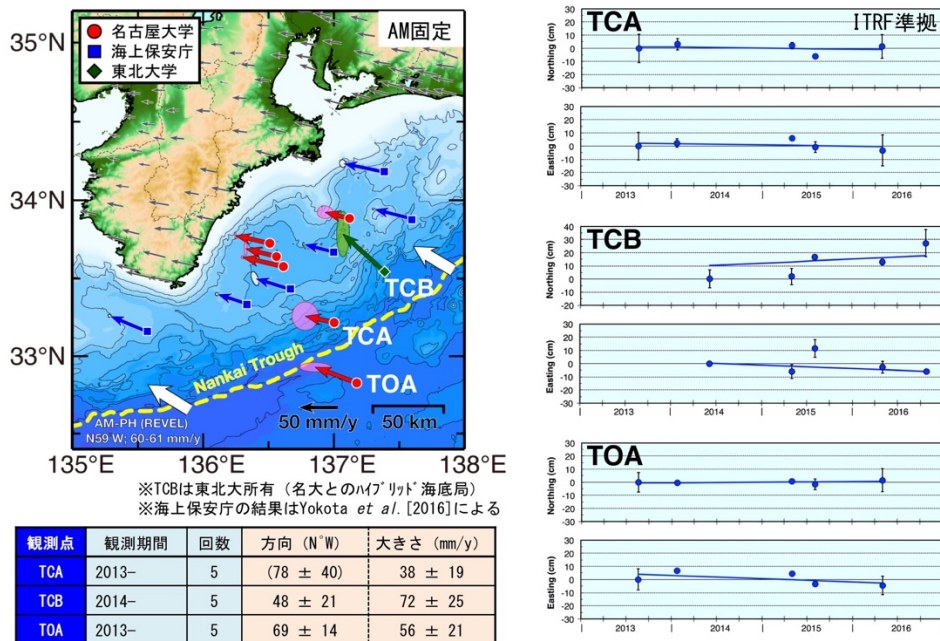


図3. 熊野灘～南海トラフ軸での海底地殻変動観測結果 (名古屋大学 [課題番号: 1703])。

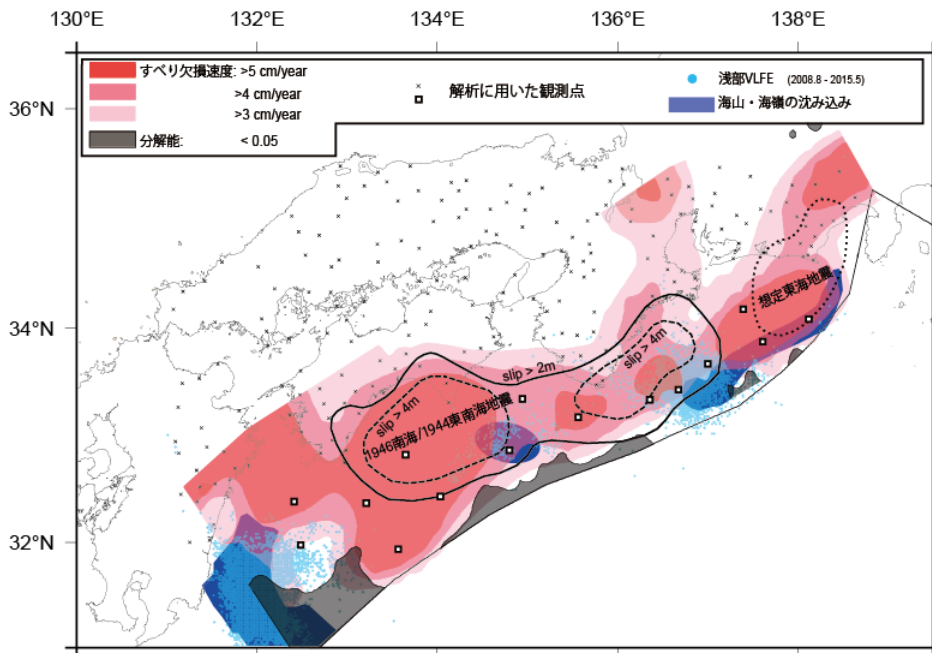


図4. 陸上及び海底の地殻変動データから推定された南海トラフ沿いプレート境界面における滑り欠損分布 (海上保安庁 [課題番号: 8001])。

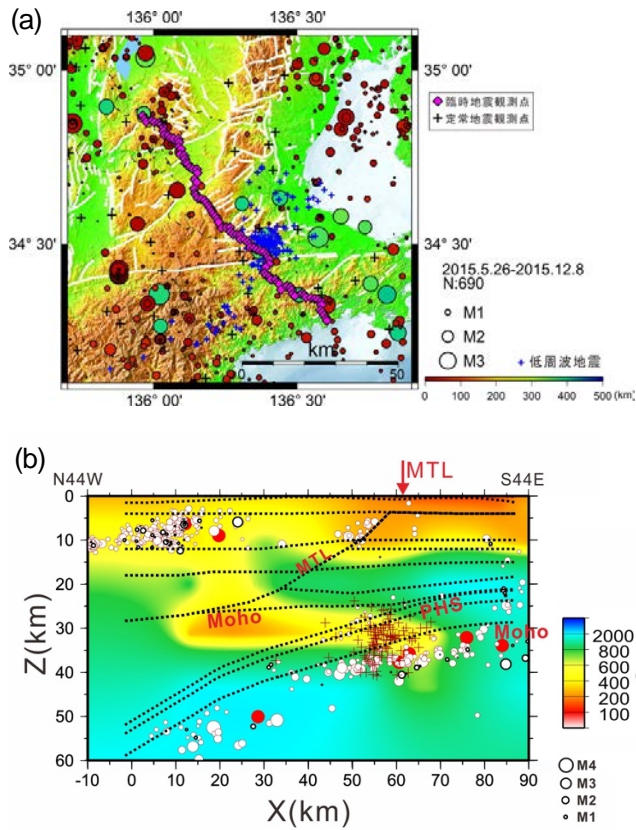


図5. 甲賀 - 南伊勢測線における地震波減衰構造（東京大学地震研究所 [課題番号: 1509]）。

(a) 丸印及び青色十印は、それぞれ観測期間中の気象庁一元化処理による通常の震源と低周波微動（低周波地震）の震央を表す。(b) 測線下の Q_p 鉛直断面図。赤丸は、減衰構造の推定に使用した地震の震源を示す。黒縁丸印は、本研究で使用した地震波形データの検測値を用いて再決定した地震の震源を示す。2000年1月1日から2015年5月25日までの気象庁一元化処理震源の検測値を用いて再決定した通常の地震の震源を赤縁丸印、低周波地震の震源を十印で示す。波線は、Iwasaki et al. (2008) によって示された測線下の速度境界面を示す。PHS: フィリピン海プレート、MTL: 中央構造線。

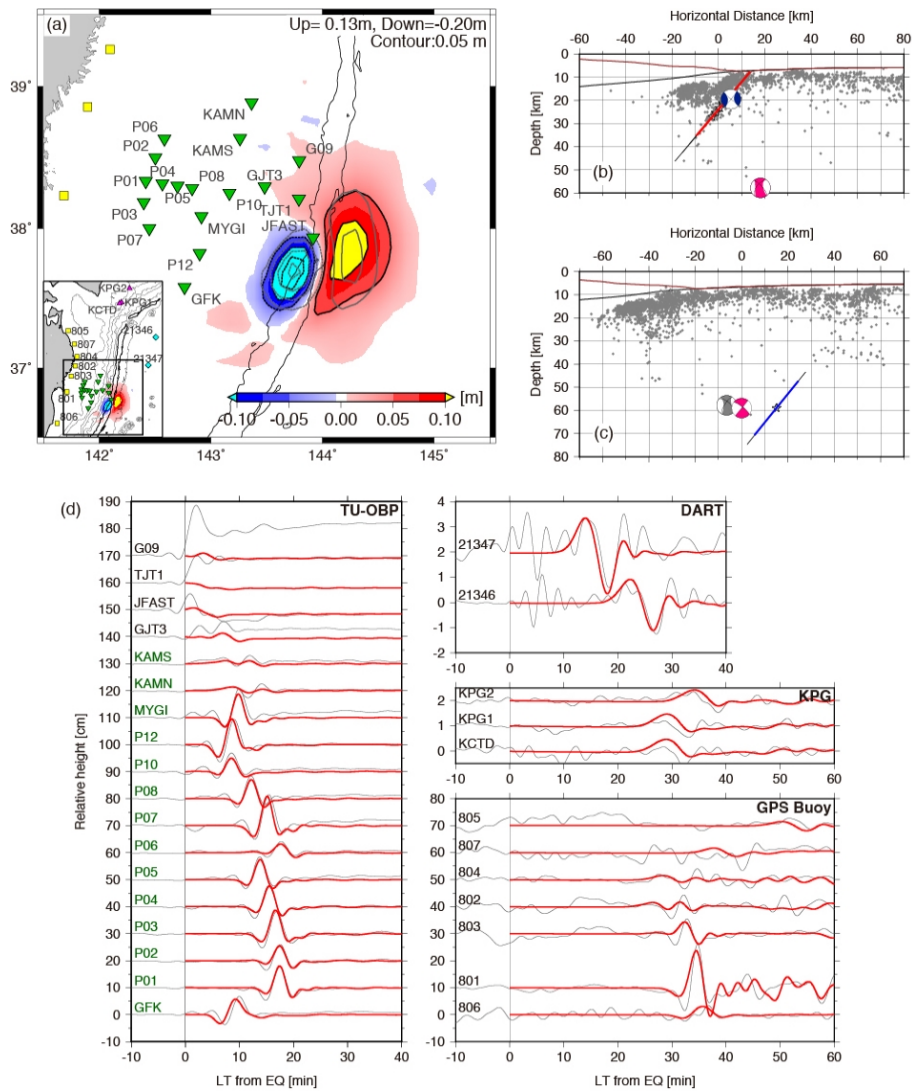


図6. 2012年12月7日にアウターライズ域で発生したスラブ内ダブルット地震の震源モデル(東北大学[課題番号:1201])。

(a) 震源断層モデルから期待される初期海面高分布。(b) 正断層型サブイベントの断層モデル。(c) 逆断層型サブイベント。(d) (a)から計算された津波波形と観測波形の比較。(a)内の逆三角が海底圧力計の観測点。(b)と(c)には、Obana et al. (2015)による余震分布(灰色)、各サブイベントのGCMT解(赤と青)と、遠地P波波形の最初15秒部分だけで逆断層型サブイベントのCMT解を求めた結果(灰色)を示す。(d)に示した津波波形は、黒が観測波形、赤が計算波形。

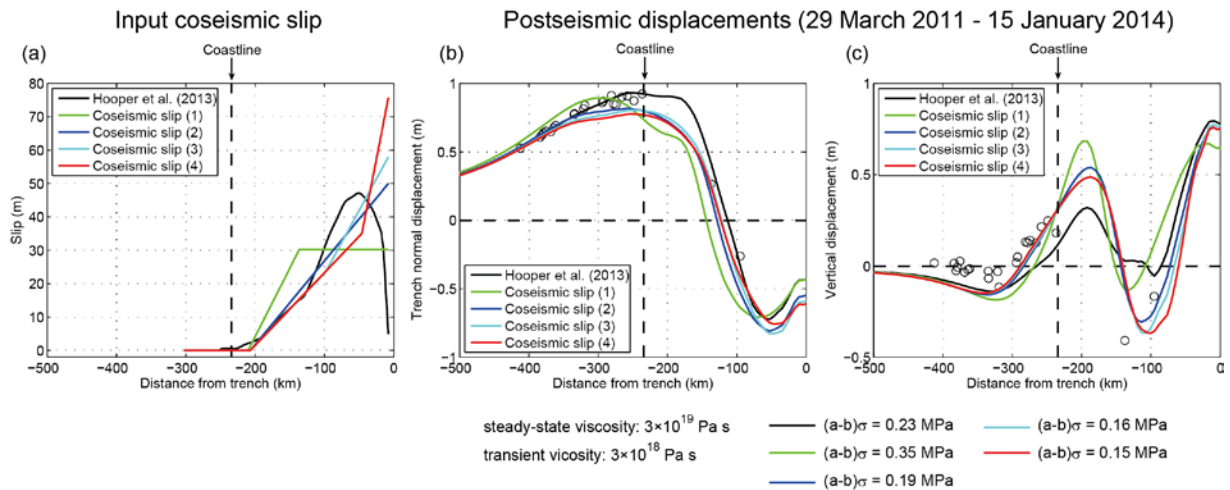


図7. 東北地方太平洋沖地震の余効変動モデルの計算値における地震時滑り分布依存性（京都大学理学研究科〔課題番号：1803〕）。複数の異なる地震時滑り分布を初期条件として余効変動の計算値と観測データの比較を行った。海溝軸に直交し、宮城県沖を通る直線上における計算値と観測値を示す。(a) 入力として用いた地震時滑り分布。黒線は実データのインバージョン解析から推定された滑り分布 (Hooper et al., 2013)。他の滑り分布は人工的に作成したものである。(b)、(c) GEONET の GNSS データ及び GPS/Acoustic データ (Watanabe et al., 2014) による余効変動の観測値 (黒丸) 及び(a)に示された地震時滑り分布に対するモデル計算値 (実線、余効滑りと粘弾性緩和による変位の和)。(b)、(c)はそれぞれ海溝軸に直交する方向の水平変位と上下変位を示す。

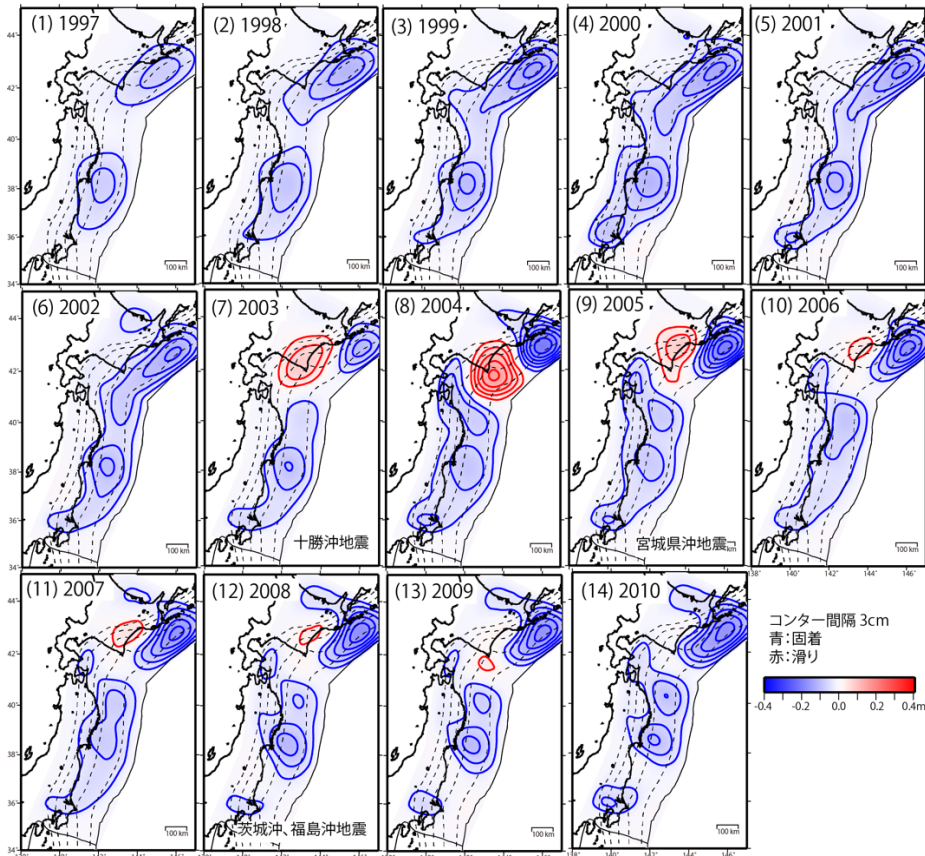


図8. 千島海溝・日本海溝沿いプレート境界面における滑り欠損及び滑り速度分布の時間変化（国土地理院 [課題番号：6003]）。

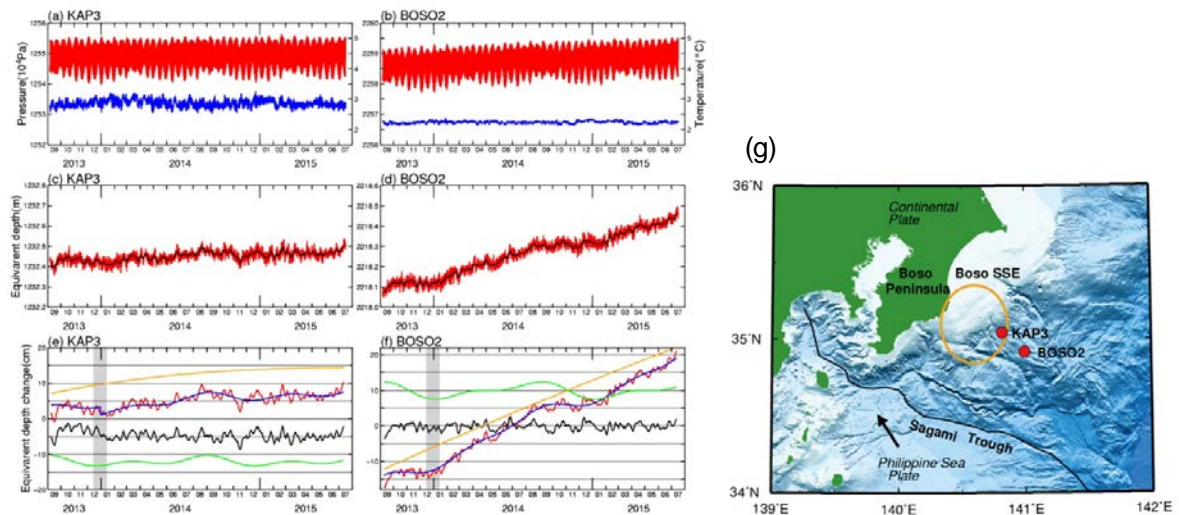


図9. 房総沖海底水圧計データの解析結果（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]、Sato et al., 2016）。(a)、(b)観測された圧力（赤）と温度（青）。(c)、(d)潮汐成分と温度相関線分を除いたもの（赤）。黒線は7日間の移動平均。(e)、(f)フィッティング結果。赤線は7日間移動平均、青線は最適なフィッティング曲線、オレンジ線は線形成分と対数成分、緑線は年周成分。黒線は7日間移動平均から線形、対数、年周成分を引いたもの。房総スロースリップイベント（SSE）発生時（グレー部分）KAP3に変動が見られる。(g)観測点配置図。赤丸が観測点、オレンジ円は房総SSEの滑り領域。

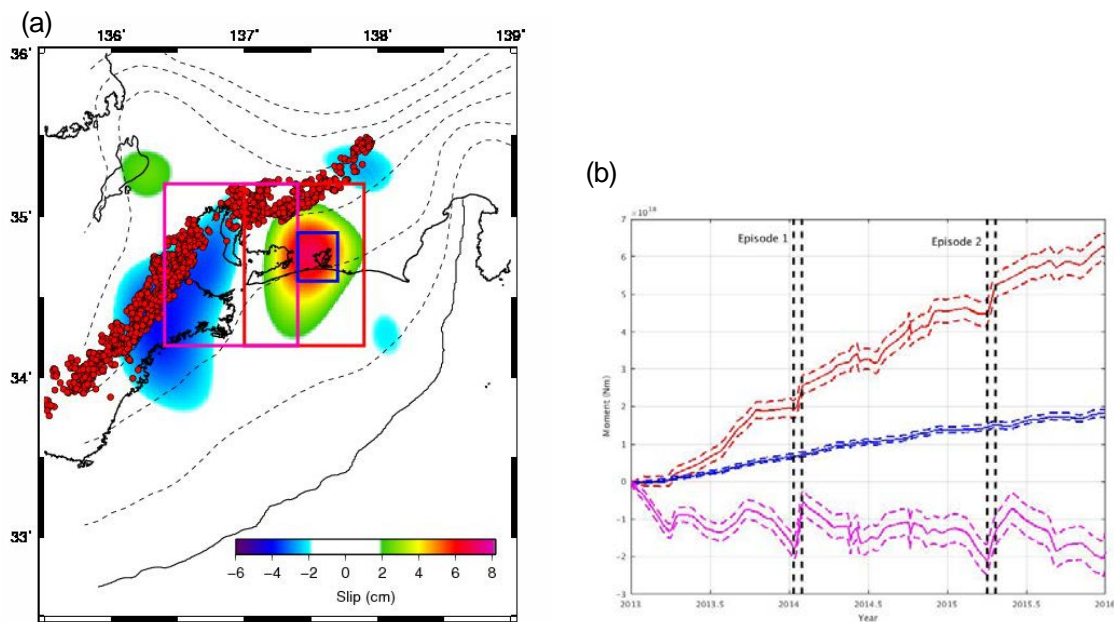


図 10. 東海地方における SSE の時空間変化の推定結果（東京大学地震研究所 [課題番号：1509]）。(a)プレート境界面における 2013 年 1 月 1 日から 2015 年 12 月 31 日の積算滑り分布と LFT の震央分布。(b) (a) の赤色、桃色、青色の領域における解放モーメントの時間変化。Episode 1、Episode 2 はそれぞれ 2014 年 1 月と 2015 年 4 月に発生した短期的 SSE の期間を示す。

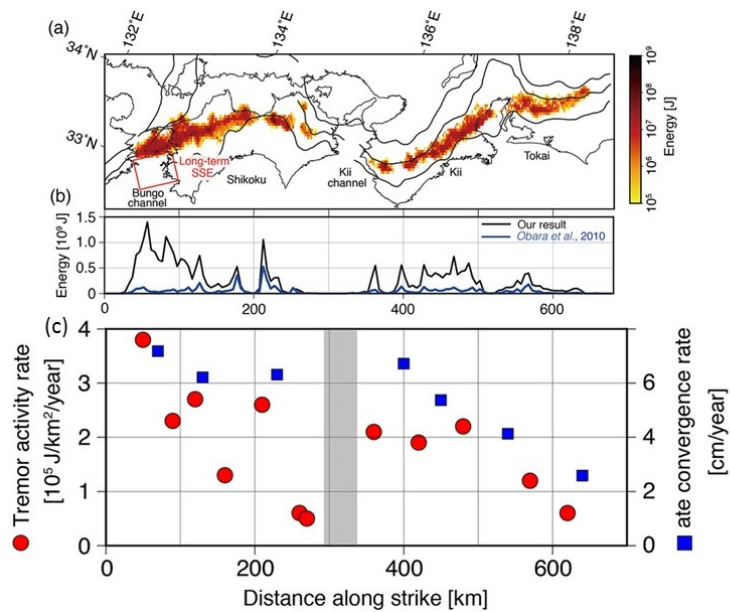


図 11. 南海トラフ沿いの深部低周波微動の累積エネルギーの推定と考察結果（東京大学地震研究所 [課題番号：1509]、Annoura et al., 2016）。(a) 11 年間(2004 年 4 月～2015 年 3 月)に発生した微動による累積エネルギーの空間分布。(b) 沈み込み帯の走向方向に対するエネルギー量のプロファイル。(c) フィリピン海プレートの走向方向に対する微動エネルギーレートとプレート沈み込み速度 [Heki and Miyazaki, 2001] の比較。

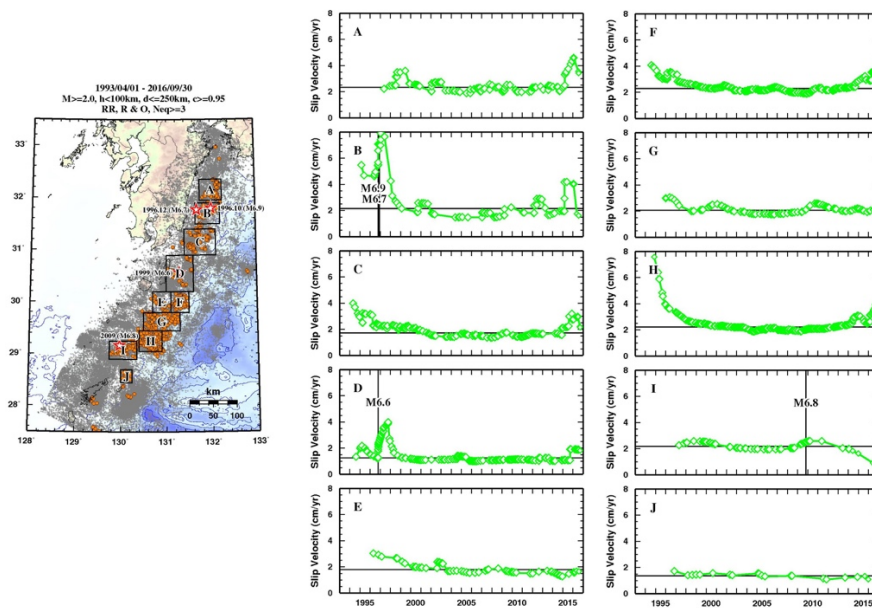


図 12. 日向灘から奄美大島にかけての小領域ごとの準静的滑り速度の時間変化（鹿児島大学〔課題番号：2301〕）。左図が領域区分、右図が領域ごとの準静的滑り速度の時間変化を示す。図中の横太線、縦太線はそれぞれ、全期間のデータを用いた当該領域の準静的滑り速度、M6.5以上の地震発生時である。

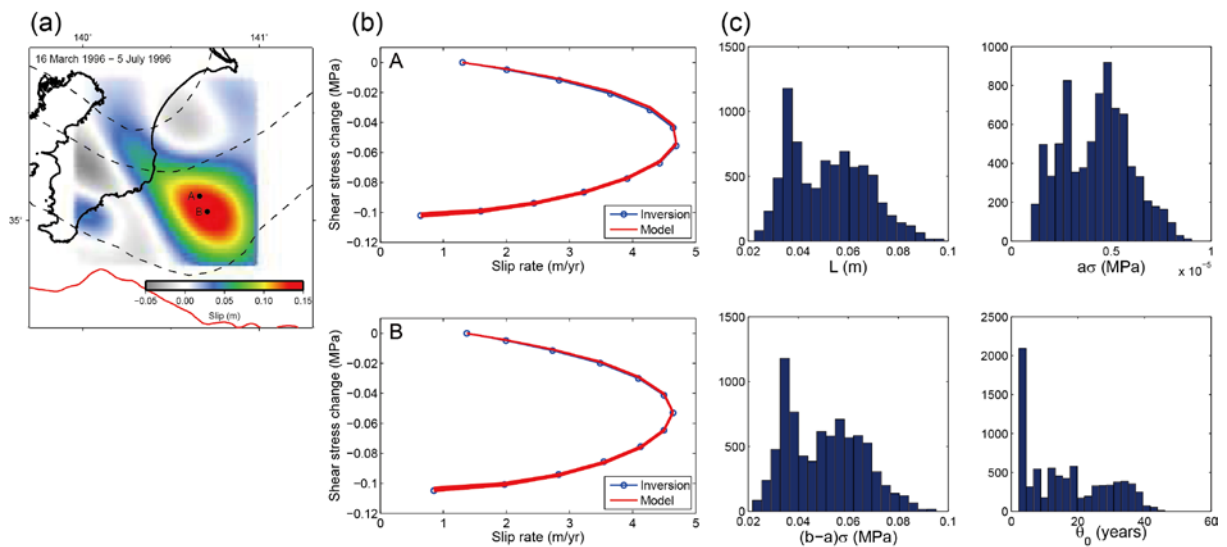


図 13. 房総 SSE における滑りの時空間変化から推定される断層摩擦パラメータ（東京大学地震研究所〔課題番号：1509〕）。(a) 1996年に発生した房総 SSE の滑り分布。(b) (a)に示したプレート境界面上の2点 A、B における剪断応力と滑り速度の関係。青線はインバージョン解析、赤線は摩擦構成則に基づくモデルによる応力と滑り速度の関係を示す。(c) 推定されたパラメータの分布。

2001年ペルー巨大地震

2010年チリ巨大地震

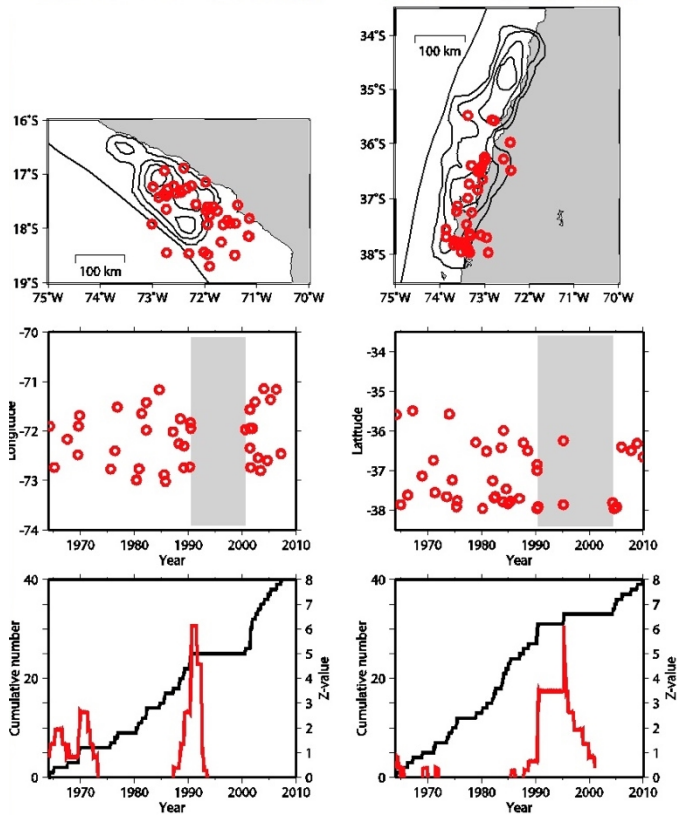


図14. 巨大地震と地震活動静穏化の関係（北海道大学〔課題番号：1002〕）。左）2001年ペルー巨大地震前の静穏化。右）2010年チリ巨大地震前の静穏化。上）巨大地震の滑り域とM5以上の地震活動。中）それらの地震の時空間分布。灰色が静穏化の期間。下）地震数積算とZ値の時間変化。

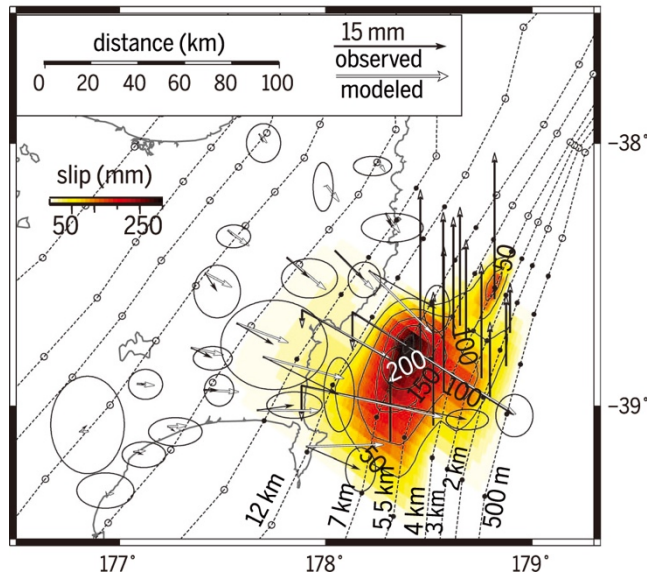


図15. ニュージーランド・ヒクラング沈み込み帯における海底圧力計による海底上下変動成分と陸域GPS観測による水平動成分を用いたインバージョン解析で得られた、2014年9～10月に発生したSSEにおけるプレート境界断層滑り量分布（東京大学地震研究所〔課題番号：1524〕）。

1 (2) 内陸地震

「内陸地震」計画推進部会長 松本 聡 (九州大学大学院理学研究院)

副部会長 上嶋 誠 (東京大学地震研究所)

内陸地震部会では、内陸地震発生のモデル化を進め、災害軽減に貢献するために、内陸地震の発生場と発生機構の解明、およびその発生予測に関する研究を推進している。また、空間的な地震発生ポテンシャルを推定する手法開発をめざした研究を進めようとしている。

内陸地震発生ポテンシャルを評価するための重要なパラメータとして、日本列島内陸にかかる広域的なローディング、それに対する地殻応答、個別の断層へのローディングと断層強度などがあげられる。今年度は、年度初頭に熊本地震が発生したため、その発生メカニズムの解明のための多岐にわたる観測研究が実施されたほか、2011年東北地方太平洋沖地震後の変動場を精密に観測することで、断層へのローディング機構や粘弾性構造などを推定する研究が実施された。その他の全国各地の内陸地震発生域においても、地殻活動の時空間的変化やその変化を担う背景構造の調査が進められた。また、地震発生ポテンシャル評価の確立に向けての試行が開始された。岩石や間隙流体の物理・化学的特性を明らかにするための室内における実験研究から、流体がレオロジー特性や速度構造・比抵抗構造特性に及ぼす影響について理解が進んだ。一方、様々な地殻変動モデリングを行う上で基本的な情報となる、日本列島基本構造モデルのコンパイルが進められた。また、関連する研究課題を取りまとめて得られる様々なパラメータを入力情報として、実際に地震活動評価を行い、災害発生予測や災害誘因予測につなげる研究手法の検討が始められた。以下にこれらの成果の概要を記す。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理

平成28年度においては、公表されている論文・報告書の中から活断層の活動性評価に関する重要な情報を含む資料を選定し、陸域8断層帯及び海域2断層帯についてのデータ化およびweb上での情報公開のためのデータ入力を実施した。2016年4月に熊本地震が発生した際には、この地震の震源である布田川・日奈久断層の活動履歴情報へのリンクをトップページに配置する措置を取った。地震発生直後のアクセス数は10万件を超えた。また、より良い情報公開のために、データベースのセキュリティ向上のための開発言語改修作業と、操作性・表示機能強化のための改善作業を実施した。(産総研[課題番号:5002])。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

低頻度大規模地震現象の解明へのひとつのアプローチは、過去の大地震の痕跡を詳細に調査し、位置、規模、頻度などを復元することである。活断層が一般に千年程度以上の長い活動間隔を有することを考えれば、1:変動地形学的手法によって数千年～数万年の時間スケールでの調査によって活断層の位置形状を明らかにする、2:過去の「地震像」を復元して活動繰り返しパターンを明らかにする、3:活断層が実際に動いて出現した地表地震断層を精査してその位置形状と「地震像」を検証する、ことが不可欠である。とくに、個別断層が連動した活動は大規模地震へ直接つながるものであり、連動の条件を知ることが重要である。

2016年熊本地震は、まさにその低頻度大規模地震に該当すると考えられたため、その地表地震断層と活断層の調査を進めた。その結果、大学の研究グループは出現した地表地震断層がほぼ出現時の姿のままに残っている間にその全貌を把握することに成功した。多くの地点で右横ずれ変位が認められ、最大右横ずれ変位量は益城町堂園で約225cmであった。布田川断層沿いの鉛直変位は、南部では南西側上がり、北部では北東側上がりと

なり、右横ずれ断層で認められる鉛直変位のパターンと一致した。なお、鉛直変位は最大100cmであった。出ノ口断層に沿っては、一部左横ずれ変位を伴う北西落ちの正断層変位が認められ、その変位は最大2mに及んだ。地表地震断層の位置は、概ねこれまでに決定された推定活断層線に沿っているものの、一部では一致していない。山地でのくい違い地形の連続性に基づいて活断層線を引いていたところでも今回の地表地震断層が通らず、想定外のところを地表地震断層が通る場合があることや、左ずれ変位を示す共役断層が活動したことが明らかになった。この点は今後の内陸地震発生ポテンシャルや強震動評価のうえで検討すべき重要な点である。

2014年11月に発生した長野県北部の地震に関連して、神城断層において詳細な調査が進められている。今年度は累積変位を示す、変動地形に関する精査が進められた。また、LiDAR DEMの変位ベクトル分布を用いた変動量計測の高度化に成功した。地震前後の詳細なLiDARデータを比較し、ベクトル解析を行うことによって水平方向も考慮した変動量が得られた。ここで得られた地表変動は、地表断層だけでなく、干渉SARの結果や地震波速度構造・余震分布による震源断層域とも相関が見られ、その有用性が確かめられた。(名古屋大学[課題番号:1702])。

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ) 内陸地震と火山噴火

内陸地震発生場の解明のためには、日本列島を取り囲むプレート運動や沈み込みによって形成される広域の応力応荷とそれに対する内陸地殻の弾性・非弾性応答を観測し、そのモデル化を行うことで、内陸地殻の応答特性を明らかにすることが求められる。また、内陸地震の発生予測のためには、広域の応力応荷に対していかに個別の断層へ応力が集中するか、またどのような条件で断層強度が低下するかを明らかにする必要がある。特に今年度は4月に熊本地震が発生し、大きな被害を及ぼした。この活動の背景と地震像を明らかにすることがきわめて重要な課題となった。一方、東北地方は、東北地方太平洋沖地震の発生に伴って顕著な応力場の変化が起きたため、その地震時・余効変動の詳細な変化を観測によって明らかにして、応力変化に対する内陸域の応答特性を知りえる重要な時期にあると考えられる。本年度は従来得られている複数の地域における構造や地震活動を対比するための観測およびデータ整理を進めた。また、個別の地域における発生場の推定、それらのモデル化の試みが行われた。

本部会ではさらに他部会との連携を重視している。その一環として、昨年度、各地域で行われてきた研究結果を整理し、日本列島の内陸地震発生域での地震発生域と地震波速度構造との関係について見いだされた経験則を「(2) モニタリングによる地震活動予測、ウ. 地震活動評価に基づく地震発生予測・検証実験」へ提供し、その経験則の有効性の検証を開始した(地震研[課題番号:1504])。

・2016年熊本地震

2016年4月14日から発生した熊本地震の一連の活動は、M6.5の最大前震から開始し、16日にM7.3の本震が発生し、その両方の地震をあわせて大きな被害を及ぼした。大学および関係機関は、その前震の発生後に直ちに現地で観測を開始したため、貴重な観測データを得ることができ、この一連の地震の特性がより明らかにされつつある。

地震の背景：熊本地震は別府一島原地溝帯と呼ばれる、九州でもっとも地震活動の高い領域で発生した。最大前震M6.5および本震M7.3は日奈久断層および布田川断層付近で発生した。この地域に働く広域偏差応力はほぼ南北の最小主圧縮応力が卓越し、そのほかの2つの主応力は近接する値を取る。このため、横ずれ断層地震、正断層地震のどちらも発生しやすい領域であった。また、震源は微小地震の非弾性ひずみが多い領域、比抵

抗構造でみると低比抵抗域の端に分布した。これは、流体などが関与し、変形しやすくなった領域に隣接した場所に応力が集中したことを示唆している（九州大[課題番号：2201]）。

断層形状：2016年熊本地震合同地震観測グループによる緊急観測データから、余震分布を基に推定される断層が、日奈久断層、布田川断層からなる断層面だけではなく、複数の断層面が存在していたことが明らかになった。これらの断層面の傾斜角は一定ではなく、空間的に変化が認められる。また、M6.5とM7.3の地震の断層面をつなぐ、ほぼ鉛直の深部断層の存在が示唆された。一方、1999-2000年に日奈久断層で発生したM5の地震を伴った地震活動が鉛直な断層面上での活動であったのに対して、熊本地震の活動はその断層面のやや西側で活動しているように見える。これらの複雑な形状は地表活断層との関係が必ずしも明確ではなく、今後の活断層評価にとって重要な知見であると考えられる（図1）。

応力場：M6.5の地震の発生以前のデータを用いて、応力テンソルインバージョンがおこなわれ、地震発生前の不均質な応力場が明らかにされた。さらに、その地震前応力場から期待される断層面上のすべり方向と、インバージョンによって決定された実際の地震時すべりには一致する部分が多いことが明らかになった。これは地震前の不均質な応力場が地震時のすべりを規定していることを示し、今後の地震動評価に資する結果であると評価できる。

地殻変動：日奈久断層を横断するGNSS繰り返し観測により、地震前後の変位ベクトルが得られた。これによると、変位の空間分布は日奈久断層の地表トレースより西側でパターンが変化しており、すべりがやや西側傾斜の断層面もしくは平行した断層で発生していたことが明らかになった。また、2016年熊本地震後に、8大学10部局が合同して21点のGNSS連続観測からなる余効変動観測を実施した。これらを解析した結果、布田川断層帯周辺の多くの観測点において、前震と本震の単純な2枚の断層面でのアフタースリップのみでは説明できない余効変動がとらえられていたことが明らかとなった。一方、日奈久断層帯周辺の観測点では、前述の単純なアフタースリップを仮定することにより、その余効変動がほぼ説明できることが示された（九州大[課題番号：2201]）。

一方、一連の地震に伴う地殻変動が、GNSS連続観測、緊急GNSS観測およびSAR干渉解析によりとらえられた。平成28年（2016年）熊本地震の前震および本震（4月14日M6.5、4月15日M6.4、4月16日M7.3）による地殻変動がGNSS連続観測によりとらえられたほか、4月18日M5.8熊本県阿蘇地方、4月29日M4.5大分県中部の地震に伴うわずかな地殻変動も検出された。SAR干渉解析によっても4月14日M6.5および4月16日M7.3の地震に伴う大規模な地殻変動の空間分布がとらえられた。これらのSARおよびGNSS連続観測で観測された地殻変動から、4月14日Mj6.5および4月15日Mj6.4の地震の震源断層は、北東-南西方向のやや西に傾き下がる高角の断層が右横ずれ的に動いたと推定された。4月16日Mj7.3の本震は、布田川断層帯および日奈久断層帯に沿った位置に震源断層が推定された。布田川断層帯では北西傾斜の断層面とその東側延長に南東傾斜の断層面、日奈久断層帯では北西傾斜の断層面で、それぞれ右横ずれ的な断層運動が生じたと推定された。また、一連の地震に伴った余効変動も観測された。震源域近傍では地震時と若干異なる変動を示す観測点があるが、その他は地震時とほぼ同じ変動パターンが観測されている。また地震後90日程度は急激な変動が続いたが、その後はゆっくりとした変動が継続した。（国土地理院[課題番号：6001]）。

速度構造：合同地震観測によって得られたデータを用いて、地震波速度DDトモグラフィ法による構造解析が実施された。その結果、熊本地震の余震活動や大きなすべりが地震波の高速域で発生していたことが明らかとなった（図2）。一方、阿蘇火山周辺域には低速度域が分布していて、地震時すべりとの関係が示唆された。

阿蘇カルデラ周辺観測点で得られた遠地地震波形の RF 解析から、カルデラの地殻～上部マントルの S 波速度構造が決定された。その結果、中央火口丘の下、8～15km の深さに S 波低速度領域（S 波速度は最小で 2.2km/s）が存在することが明らかになった。これは DD トモグラフィー法で決定された低速域とほぼ同様の位置にある。さらに、この RF 解析により、阿蘇カルデラ西部の 15～23km の深さに別の低速度層が見いだされた。この領域では、余震の発生深度が東側に比べて浅くなっている。このため、この低速度層の存在や布田川断層帯東縁の構造と、地震発生との関係を明らかにしていくことが今後重要であると考えられる（九州大[課題番号：2201]）。

・東北地方の地殻応答

東北地方太平洋沖地震後の地殻変動が継続している今期計画の研究期間は、その現象の詳細を観測によってとらえることで、定常的な地殻変動下では決定しづらいレオロジー構造を推定しえる重要な機会であると考えられる。このことをふまえ、今年度においても、地震・GNSS 観測を実施して変動場の把握を継続する一方で、地震発生直後から現在に至る時間的変動についての議論を展開した。また、現有のデータや物質科学的条件から地殻変動のシミュレーションを行い、不均一なひずみ速度分布を説明するモデルの検討が進められた。

東北沖地震後に発生した内陸地震群について、稠密地震観測を実施し、定常観測網だけでは推定できない小さな地震についてもメカニズム解を推定し、応力テンソルインバージョンにより、東北沖地震後の応力場の時間変化について検討を行った。それぞれの地震群について、東北沖地震直後と約 4 年半経過した後での応力場が概ね同じであったことが確認できた（図 3）。これは、地震発生直後から約 4 年半の期間では地殻応力状態があまり変化しなかったことを示すものであり、今後どのように推移していくのかをモニタリングすることが必須である（東北大[課題番号：1203]）。また、秋田県北部、南部地域での誘発地震活動には時空間的に消長が認められたが、その活動の消長が東北地方太平洋沖地震発生時とその後の応力変化によって引き起こされたとは考えづらい。従って、一つの可能性として、誘発地震は流体の存在による地殻強度の低下によって発生し、地震活動の時空間変化は流体分布の時空間変化を反映するという考えが提出された（弘前大[課題番号：1101]）。

東北地方における 3 次元レオロジーモデル構築に向けて複数の課題（東北大[課題番号：1203, 1204]、東大地震研[課題番号：1408]、京都大学[課題番号：1905]）が連携して、研究を進めている。今年度は、

1. 稠密な GPS 観測網により余効変動の時空間変化を把握するデータを蓄積すると同時に、GNSS データのクラスタ解析によって東北地殻において脊梁を境にしたブロック構造を持つことが示唆された。
2. 臨時地震・電磁気観測により、新潟ーいわき測線下では深さ 5ー10km の地震発生帯に高速度・高比抵抗層が存在し、その下部に低速度・低比抵抗層が分布していることが明らかになった。
3. ハイブリッド重力観測により余効変動中の上下変動と質量移動を把握することが可能となった。

これらの結果および従来得られている結果を基に、東北日本弧内陸の歪を説明するレオロジー構造モデルの構築を進めた。とくに、2 次元沈み込み帯熱対流モデル(Horiuchi and Iwamori, 2016、京都大学[課題番号：1905])に基づいて、余効変動を再現するモデルが提案された。これらは、物質科学的情報と地震波速度構造から推定される物質情報をもとに客観的にモデル化されたものであり、それが実際に観測された余効変動をある程度再現するものであることから、きわめて重要な成果であると考えられる（図 4）。（東北大[課題番号：1203, 1204]、京都大学[課題番号：1905]）

このほか、新潟県佐渡市ー阿賀町における GNSS 繰り返し観測から、新潟県周辺では東北地方太平洋沖地震の余効変動により、地震直後は東西方向の伸張が卓越していたが、時間と共に伸張は小さくなってきていること、2015 年 10 月～2016 年 10 月の 1 年間では、一部の場所において北西ー南東方向の短縮が卓越し、面積歪で短縮に転じている場所もあることが分かった（国土地理院[課題番号：6001]）。

・その他の内陸地震活動域での応力場、ひずみ速度場、地震発生場の研究

地殻構造と地震発生場

活断層の分布や内陸大地震、また定常的な地震活動がどのような物理的要因によって支配されているかを明らかにするために、地下構造と応力場の関係を調べ、モデル化することが重要である。昨年度までに山陰地方の地震帯における浅部の3次元地震波速度構造、地震メカニズム解、電気比抵抗構造等の解析から、地震帯直下の下部地殻内の「やわらかい」領域におけるゆっくりすべりが直上の地震発生域へ応力集中をもたらすことや、2000年鳥取県西部地震や1978年の三瓶山の地震(M6.1)などの余震域の両端における応力緩和の可能性が示されていた。今年度は、さらに、下部地殻の低速度域の幅が深さ18kmにおいては深さ25kmよりも狭く限られていることが明らかになった。このような低速度域の幅の変化が、応力場の回転や応力集中をもたらす可能性が示された。これは、応力載荷メカニズムを検討するうえで考慮すべき重要な成果である。(京都大学[課題番号:1907])

応力場

2000年鳥取県西部地震域での稠密地震観測データの整備を行い、震源断層周辺で発生した余震約4000イベントの発震機構解データをもとに本震断層周辺の主応力軸の空間分布を求めた。その結果、余震域の大部分では、この地域の広域応力場と整合的な北西-南東方向の水平最大応力軸が推定された一方で、余震域南端では東西方向の水平最大圧縮応力軸が推定された。さらに、本震断層面と余震分布との関係について詳細に調べた結果、余震は本震断層面から鉛直に1.0~1.5kmの幅で分布し、火山の活動に伴う現象と比較しても、断層露頭観察から得られた断層破碎帯の幅や流体拡散により引き起こされたと考えられている箱根火山の群発地震の震源分布幅よりも有意に広く分布していることが分かった。また、余震メカニズム解の節面での本震すべりによる静的応力変化(Δ CFF)を求めた結果、本震断層周辺の9割近くの余震が正の Δ CFFを持つことが分かった(図5)。以上の結果から、余震は本震断層の再破壊ではなくほとんどが本震断層の周辺で独立して起きている現象であること、余震は断層破碎帯や群発地震の震源分布より広い幅の領域で起きていること、余震分布の幅が本震の破壊により生じた静的応力変化にコントロールされていることが分かった。この結果は、断層破壊によって生じた応力変化が余震を引き起こす主要因になっていることを示唆し、また、こうした情報は今後余震データを用いて断層周辺の応力場を議論する上で重要となる(京大防災研[課題番号:1905])。

関東地方については、文部科学省活断層の地域評価(関東地域)の評価範囲に合わせるため、解析領域を少し広げ、322個の発震機構解を追加した。これにより関東地域の地殻応力図が一通り完成した。これらの情報の地殻応力場データベース(<https://gbank.gsj.jp/crstress/>)への登録は、結果を最終確認した上で、次年度の早い時期に達成できる見込みである。

山梨県北東部において約2年間にわたって行われた臨時観測のデータを用いて同地域での応力場が求められた。その結果、南北約40km、東西約30kmの調査地域において、5つの応力区に分かれることが明らかになった。この応力区境界の一部には活断層と構造線が分布する。

震源域の応力状態とそこで発生する地震の発生様式を調査するため、茨城県北部・福島県浜通り地域における地震を重点的に調査した。詳細な解析によってM3級の地震の震源スペクトルが標準的な ω^2 モデルから明確に外れる地震が多数発生していることが明らかとなった(Uchide and Imanishi, 2016)。国内の他地域における地震についても同様の傾向が見いだされた。 ω^2 モデルは小地震の応力降下量を見積もる際に仮定されるモデルであるので、今後、より現実的なモデルを仮定することで、小地震の応力降下量の見積もりが正され、その背景にある応力状態や断層強度の情報が適切に引き出されることが期待される(産総研[課題番号:5008])。

御嶽山においては、VTイベントのメカニズム解と御嶽山周辺域の広域応力場との関係から、山頂直下の局所応力場の時間変化をスカラー量により定量的に評価する手法が開発された(Terakawa et al., 2016)。同法の

適用例については、後の地震火山相互作用の項目のところで記述する。

変形場

GNSS データを用いて、跡津川断層近傍における東北地方太平洋沖地震前・地震時・地震後の地殻変動パターンを求め、地震前・地震後とも跡津川断層およびその東西両端の火山地域に歪速度が集中していることが明らかとなった。弾性歪を示すものと思われる地震時の歪は、地震前および地震後の歪速度場と全く異なる空間パターンを呈する（図6）。地震前・地震後に見られる歪速度の局在域では非弾性歪が進行していることが示唆される。次に、地震前と地震後を比較すると大局的には良く似ている。このことは、東北沖地震（および余効変動）によって日本列島全体の歪速度が大きく変わっても、跡津川断層近傍の非弾性変形は変わらずに進行しており、本質的にはその変形が長い時間スケールで蓄積した絶対応力により駆動されていることが示唆される（京大防災研[課題番号：1907]）。

また、鳥取県中部地震、茨城県北部の地震、新潟―神戸ひずみ集中帯、長野県北部の地震などの地域において、GNSS 連続観測およびALOS-2衛星によるSAR干渉画像を用いた地殻変動の検出が行われた。データを複合的に用いることによって、それぞれの地震時および地震後の断層上の不均質なすべりの検出に成功した（国土地理院[課題番号：6001]）。

断層の詳細構造

地震の震源分布からの断層形状の推定について、稠密な地震観測データ、手法の高度化などにより大量のイベントが検出され、より詳細な形状が明らかにされるようになってきた。昨年度においては茨城県北部における詳細かつ複雑な断層形状が明らかにされたが、さらに他地域でもその複雑な形状が検出された。

熊本地震をひきおこした断層の詳細な形状についてはすでに述べたが、昨年度の成果としてあげられていた2011年東北沖地震後に誘発された仙台大倉における移動性の群発地震活動について、気象庁一元化カタログデータに加えて、波形相関およびクロススペクトル法による到達時刻差データにDouble-Difference法を適用した再決定震源を得た。その震源は、複数の面状に分布し、その面の方向はメカニズム解の片方の節面の方向とほぼ一致した。この方向は広域応力場から見て想定される方向と異なるため、その面の摩擦強度が著しく低下している必要性が指摘された。震源の移動は流体拡散に伴う間隙水圧の増加で説明されていたが、摩擦強度の低下も同様に間隙水圧の増加により説明可能であろう。（東北大[課題番号：1203]）。

プレート間相対運動の分配の推定

南海トラフにおける固着と滑りや東北日本と西南日本間の東西圧縮、内陸活断層におけるすべり相互作用を考慮して、西南日本内陸における応力場の空間変化や内陸活断層におけるクーロン応力が計算された。そのクーロン応力の空間分布特性から、南海トラフ巨大地震と西南日本内陸地震の活発化・静穏化の因果関係を解明しようとする研究が実施されている。昨年度に引き続き、実データを整合的に説明するような断層ジオメトリを考え、ブロック断層モデルを用いて地殻変動のモデル化を行う研究が継続された。陸上GNSSデータに加えて、新たに海底地殻変動データ（GPS/A）データを用い、ブロック断層モデルの解析領域やジオメトリに改良を加えた結果、アムールプレートとフィリピン海プレート間の相対運動が、主に4つの変動帯でまかなわれており、日本海～朝鮮半島、山陰ひずみ集中帯、中央構造線～新潟―神戸ひずみ集中帯、南海トラフでの運動速度は、概ね1:1:2:7の割合となっていることが推定された。このように、内陸域の変動帯もプレート相対運動の解消に大きな役割を果たしていることが明らかとなった（京大防災研[課題番号：1907]）。

応力からとらえた地震火山相互作用

御嶽山の火山活動と周辺域の地震活動との相互作用を調べることを目的として、前述した局所応力場の時間変動を定量的に評価する手法を、御嶽山南東麓の群発地震活動域へ適用した。2014年8月から2015年3月までのVTイベントデータから、噴火前の約2週間には火山活動の活発化により広域応力場を乱す東西引張の応力変動場が形成されていたことや、噴火後は広域応力場に支配されて地殻が収縮する過程が進行することなどが示された。このことは、山頂直下の局所応力場を通じて、火山の状態が捉えられる可能性を示唆する。今年度においても、御嶽山周辺域での局所応力場の時間変化モニターを継続した(Terakawa et al., in prep.)。その結果、2014年の噴火以降に有意な応力変動場が形成された可能性がある時期は、2015年1~2月、2015年10~11月、2016年1月~9月頃であると考えられた(京大防災研[課題番号:1907])。

地殻強度低下メカニズム

地震メカニズムトモグラフィー法(Terakawa et al., 2010, 2014)により、御嶽山周辺域の間隙流体圧分布を調べた。名古屋大学の定常地震観測で得られた地震のメカニズム解(2012年5月~2014年7月, $M > 1$)から推定された解像度2-5km程度の広域応力場(Terakawa et al., 2016)を用いて、Terakawa et al. (2013)と同じデータセットから間隙流体圧場を推定した。その結果、間隙流体圧のレベルが静水圧状態を10-30 MPa程度上回るという結果が得られた。また、基にした応力場の空間分解能の違いによる間隙流体圧場の推定結果への影響を調べ(Terakawa et al., in prep.)、より高解像度の応力場を基にした結果の方が高い信頼性を持つことがわかった(京都大学[課題番号:1907])。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 地震現象のモデル化

ア) 構造共通モデルの構築

構造共通モデル(コミュニティモデル)は、シミュレーション研究などでの活用をめざし、従来までに得られているさまざまな情報から作成される統一的な構造モデルである。既往の成果を可能な限り収集・整理し、下記の6つの要素についてのデジタルモデル(grid データ)の構築を進めた(地震研[課題番号:1505])。

- (1) 地形・海溝軸モデルの構築
- (2) プレート境界モデルの構築
- (3) 日本列島及びその周辺の震源断層モデルの構築
- (4) 日本列島下のモホ面及び脆性・延性域境界モデルの構築
- (5) リソスフェア・アセノスフェア境界の構築
- (6) 日本列島下の岩石モデル・レオロジーモデルの構築

1. 地形・海溝軸モデルの構築

昨年度から継続して実施しているモホ面モデルでは、各プレート境界を明確に特定、数値化する必要がある。本年度は、フィリピン海プレート西縁部のマニラ海溝及びフィリピン海溝を対象とするモデルを海底地形データから求めた。(地震研[課題番号:1505])。

2. プレート境界モデル

日本列島周辺においては、多種類かつ高密度な地球物理的観測とその解析が行われており、上記の広域モデルより高精度にプレート境界位置が求められている。昨年度までに、当該範囲における構造探査・地震波トモグラフィー解析等の既往成果(59論文)をコンパイルし、自然地震に基づく広域モデル(base model)を修正する形でプレート境界モデル(regional model)を構築した。本年度は、特にフィリピン海プレート東部に焦点を

当て、既往の探査データ、地震波トモグラフィの結果を再吟味して、太平洋プレート接合部までの形状モデルの試作を行った（地震研[課題番号：1505]）。

3. 日本列島及びその周辺のマホ面及び震源断層モデルの構築

日本列島及びその周辺域のマホ面形状のモデル化のため、日本列島直下で提出されているマホ面構造と、広域的なマホ面構造（Crust 1.0 (Laske et al., 2012)）を接続したモデルを試作した。更に High-net による地震波トモグラフィの成果を用いて、地殻下部から上部マントルの地震波速度の変化について検討した。その結果、P 波速度の 7.2 km/s あたりが、P 波速度の変化が大きく、かつ制御震源によるマホ面とよく一致することが明らかになった。このためマホ面に類似した構造として、7.2 km/s 等速度面を用いることにした。また、九州地域の震源断層モデルを作成するとともに、既存の地下構造データを基に、関東地域の震源断層モデルを更新した（地震研[課題番号：1505]）。

4. リソスフェア・アセノスフェア境界の構築

日本海におけるリソスフェア・アセノスフェア境界（LAB）モデルをめざした情報収集を引き続き実施した。2001 年から 2004 年にかけて、日本海大和海盆で実施された広帯域海底地震計による長期地震観測では、深部構造が求められていた。また、2013 年から、文部科学省委託研究により、同じく大和海盆で、LAB を求めるための長期広帯域海底地震観測が実施されている。本年度は、2015 年に大和海盆に設置した長期観測型海底地震計の回収作業が実施され、大和海盆における全観測が終了した。解析の暫定的な結果では、実体波トモグラフィにより、大和海盆南部において、深さ約 65km から、約 90km までの低速度域がイメージされた。レーンバ関数解析からは、深さ 70km 程度から深部を低速度とする構造が観測波形を比較的良く説明する。その低速度層の上面が LAB となっている可能性が高く、今後解析を継続する予定である（地震研[課題番号：1505]）。

イ) 断層滑りと破壊の物理モデルの構築

断層滑りの物理モデル構築のためには断層周辺の応力や強度の振る舞いを知る必要がある。本年度は、実験および観測・観察においてこれらの基本的な挙動の解明が進展した。

電気伝導度と物性等の関係解明

地震波速度・電気伝導度統合インバージョンによる流体分布やその応力場との関係性の解明を目指して、含水岩石の電気伝導度を実験と理論の両面から研究した。クラック密度の増加に伴う電気伝導度の増加は、クラック密度 0.1 を境にして大きく変化している。クラック密度 0.1 以下では緩やかな増加、それ以上では急激な増加が見られる。X 線 CT 観察により、岩石試料内のクラックは主として開いた粒界であることが分かっている (Watanabe and Higuchi, 2015) ため、立方体粒子の集合を考え、どれだけの割合の粒界が開くと連結した経路が形成されるのか、数値実験を行った。開いた粒界が全粒界の 20%を超えると、系全体に渡る連結した経路が形成される。この閾値をクラック密度に換算すると、0.1 になる。したがって、クラック密度 0.1 以上での急激な電気伝導度の増加は、クラック（開いた粒界）のパーコレーションによるものと考えられる。地殻内で観測されている電気伝導度の大きな空間変化は、地殻内のクラック密度がパーコレーション閾値付近にあることを意味している可能性がある。（京大防災研[課題番号：1905]）。

地殻流体の実態の把握

蛇紋岩化した前弧マントルウェッジの弾性波速度は、含水相として主に蛇紋石 (Antigorite) のみを想定し解釈されてきた (e. g., Reynard, 2007)。しかし、実際に高温高压での加水反応実験を行った結果、かんらん

石より Si に富む輝石の反応性が高いため、蛇紋石より Si に富む滑石も同時に生成することが分かった（最大で蛇紋石と同量）。実験結果を元に、含水鉱物として滑石を含む場合の弾性波速度を計算した結果（VRH 平均）は、含水化の程度が同じでも、蛇紋石を含む場合より V_p と V_s の低下量は約 1/3 にとどまり、また V_p/V_s は無水の場合とほとんど変わらない。このことは、観測で V_p や V_s の低下量が小さく、また V_p/V_s が大きくないと推定された場所でも、含水化が進んでいる可能性を示している。そのような特徴が見つかる場所では、摩擦強度が低い滑石の存在により弱화가起っている可能性がある（Hirauchi et al., 2016）ため、速度構造から岩石の性質を推定するには注意が必要である。

一方、実験により前弧マントルウェッジの蛇紋岩化速度を求め、それに基づき、スラブからマントルウェッジに供給された水が地表に湧出してくる際の条件について検討を行った（Nakatani and Nakamura, 2016）。その結果、四国やカスケードのような温かい沈み込み帯では反応速度が速いので、前弧マントルが十分に飽和してから水が湧出してくるのに対して、九州やコスタリカのように中間的な温度の沈み込み帯では反応速度が比較的遅いことなどから、マントルによる吸水が遅くて水に未飽和なマントルを通過して水が湧出している可能性が高いことが分かった。このことは、温かい沈み込み帯であるにもかかわらず、トモグラフィーの結果が前弧マントルの含水鉱物化を示さない場合には、流体はスラブ・マントルウェッジ境界にトラップされている（e.g., Seno, 2005）可能性が高いことを示しており、そのような場所では間隙圧が高く深部低周波微動が起りやすい（Nakajima and Hasegawa, 2016）という解釈を支持する。（東北大[課題番号：1204]）。

地熱流体と内陸地熱誘発地震

断層での強度低下は高間隙水圧の流体が貫入することによって起こると考えられるが、流体圧を高めるための不透水層や流体の局在するメカニズムを明らかにする必要があった。今年度は岩石-流体相互作用による、岩石の溶解と析出による地殻の透水-不透水層境界の形成についての実験的検証を行った。その結果、350 °C 以下でゆるやかにシリカの沈殿が進行するのに対して、350 °C の温度付近では溶解度の急激な上昇が起こることが確かめられ、350 °C 付近での流体貯留スポットの形成メカニズムが示唆された。さらにその下部領域で 400 °C 前後になるとシリカ溶解度は急激に低下し、沈殿による不透水層形成の可能性が指摘された（図 7）（東北大[課題番号：1204]）。

断層周辺の流体挙動

野島断層におけるこれまでの注水実験（1800m 深度および 540m 深度）やアクロス連続運転データの解析を進め、断層近傍岩盤の透水係数が、1997 年から 2003 年頃にかけて急速に 44% まで低下したことが推定された。また、アクロス震源の連続運転を今年度行ない、従来の結果と統一的に解析した結果、長期的には、断層近傍でのクラック密度の減少による地震波速度の増加（強度回復）を示唆する結果が得られた（京大防災研[課題番号：1906]）。

3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

内陸地震研究を進める中で得られた情報を即時予測手法の高度化にフィードバックすることは、きわめて重要である。まず、昨年度に引き続いて、輻射伝達理論に基づく Multiple Lapse Time Window 法によって、九州地方の散乱減衰と内部減衰の同時推定を行った。昨年度より使用観測点を増やし、また、解析に用いる地震の条件を吟味するなどした結果、昨年度明らかになった活火山周辺に加え、一部の活断層周辺においても局所的に散乱及び内部減衰が大きいことが明らかとなった。加えて、地震動即時予測においても減衰構造とともに速度構造の影響が予想されることから、走時トモグラフィーを用いた高解像度の速度不均質推定にも着手し

た。

不均質な減衰構造の推定とともに地震動即時予測スキームの拡張も進め、不均質な散乱・減衰構造を取り込んだ計算が行えるようになった。この拡張したプログラムを用いて、平成 28 年熊本地震の一連の活動のうち最大地震(4 月 16 日 1 時 25 分、マグニチュード 7.3) の地震動即時予測シミュレーションを行った。地震発生 10 秒後の震度予測において、震度予測残差の 2 乗平均平方根(RMS) が、不均質構造を取り込むことによって、不均質構造を考慮しない場合に比べて約 10%程度改善されることがわかった。また、予測タイミングがより後になるほど予測残差の RMS の改善度合いが向上することが分かった。これは、リードタイムの長い予測を行う場合には不均質構造を考慮することが必須であることを示している。また、地震動即時予測に不可欠な観測点のサイト特性を補正する時系列フィルタの推定を行い、その成果を論文として公表した(九州大[課題番号: 2935])。

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

ウ. 観測・解析技術の開発

レーザー技術を用いた大深度ボアホール観測装置：

「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」において開発された、レーザー技術を利用した広帯域地震計および傾斜計に対する機能特性が昨年度までに把握できたことから、今年度は光ベースの大深度ボアホール用地震地殻変動観測装置の設計作業を進めた。

装置は地震計、傾斜計、温度計、歪計より構成される。地震計と傾斜計は板バネとマスを組み合わせた構造をしており、バネ材としてインコネルを用いる。いずれもマスにコーナープリズムを取り付け、その動きを高温用レーザー干渉計ユニットで高精度に計測する。温度計および歪計は光ファイバーグレーティング (FBG) を用いて、温度あるいは歪による光ファイバーの微小伸縮をレーザー吸収波長の変化から計測する。すべての装置は通信波長帯 1.55 μm のレーザー光源で動作できるように構成されていて、長距離伝送や複数のセンサーのネットワーク化に適している。次年度に本機の試作を行い、その特性を実測する予定である(東大地震研[課題番号: 1522])。

精密制御震源システム：

昨年度に発生した、震源装置の振動が異常に大きくなるという障害の原因を調査した結果、震源基礎部分と地盤との間にせん断滑りが生じていることによることが判明し、平成 27 年度末に石英砂を用いた補修作業を行った。その対策の結果を検証するために、平成 27 年度末に振動測定実験を行い、本年度はその解析を行った。その結果、補修後、1 割程度は異常振動が減少したものの、補修の十分な効果は認められなかった。このため、新たな方法による基礎の補強を行い、効果の検証のための実験を行う予定である(名大[課題番号: 1705])。

地殻流体の連続化学観測：

地球化学観測のために掘削された跡津川観測井において観測されたデータについて、地下水溶存ガスの組成変化を検討した。ガス組成のうち酸素の成分は大気由来であると考え、標準大気の組成に基づいて、記録された溶存ガス組成から大気の混入成分を差し引いた。この補正データを用いて $\text{N}_2\text{-He-Ar}$ の三成分プロットを行うと、溶存ガスの組成は、マグマ起源ガス・地殻起源ガス・大気起源ガスを端成分とする領域に収まるだけでなく、大気とマンツルの混合線上にも分布し、時間経過とともに混合線上を移動することが認められた。このように、溶存ガスの $\text{N}_2\text{-He-Ar}$ 三成分プロットは、簡便に三つの端成分の混合状態を評価する良い方法であること

がわかった。

次に、マグマ起源ガス・地殻起源ガス・大気起源ガスそれぞれの N_2 -He-Ar 三成分比を定め、地下水溶存ガスの組成から、三つの端成分の混合比の時系列変化を計算した。マグマ起源ガスの組成はわずかな変動を示し、地殻起源ガスと大気起源ガスの比率が主要な変動成分であることが確認された（東大理[課題番号：1401]）。

これまでの課題と今後の展望

これまで、内陸地震による災害軽減に資するために、全国の大学および関係機関は協力して、地震の発生場や発生機構を解明し、発生予測へ向けた観測・研究を順調に進展させた。また、それらの成果を発信し、災害誘因の評価・予測研究への橋渡しするための研究も進められるようになった。

今年度は特に、熊本地震の発生を受けて、その詳細かつ多岐にわたる調査から、いくつかの重要な成果が上がるるとともに問題点が投げかけられた。そのうちのひとつは起震断層の形状である。熊本地震を引き起こした断層群は複雑な形状を持ち、相互作用をしているようにも見られた。また、地震時すべりも地震前応力を反映したすべりを起こしていた。これらの点は地震発生ポテンシャル評価や強震動予測に資するものであるが、M6.5の最大前震とM7.3の本震の連動メカニズムについてはまったく解明が進んでいない。この点については、断層周辺域の応力載荷、変形（応力集中メカニズム）、強度、そして破壊の発生・停止のメカニズムが相互に関連していると考えられる。つまり、地震発生の物理モデルを構築しなければ予測にいたることは難しい。しかしながら、これらを目指して現在の内陸地震発生域においてそれぞれのパラメータを精度よく推定し、結合していく観測研究をより一層推進する必要がある。

地震発生から5年が経過し、地震活動・応力場などの時間的変化が検出しうる段階に至っている2011年東北地方太平洋沖地震に伴う地殻応答を対象とした研究に対しては、高精度の観測を継続し、断層強度の時間変化や応力集中機構のモデル化に資するデータを着実に取得していくことが重要である。特に、誘発地震の発生と地殻流体の関係、余効変動場の空間的不均質性への粘弾性構造の影響、震源メカニズムによる応力場の時空間特性、などの内陸地震発生に影響を与えるパラメータの推定につながる観測研究やモデル研究を引き続き実施することが必須である。

内陸地震発生域において、下部地殻をも含めた地殻構造や地殻流体との関係を検討するためのデータの整理を開始し、個別の断層の特徴が速度などの構造パラメータによって規定されている結果も得られつつある。今年度は実験的な研究が進歩し、流体の分布状況を規定する物理化学的条件が実験的にも明らかになってきた。このような実験・観測・シミュレーション研究の融合をさらに推進し、低地震波速度・低比抵抗領域と流体との関係、流体圧と地震活動の関係を定量的に比較していく必要がある。特に大すべり域や余震、誘発地震域と流体圧の関係を統一的に説明できる物理モデルを構築していくことが重要である。また、断層への応力集中機構に大きな役割を果たす地殻の弾性・非弾性構造の検出やモデル化を進め、様々な条件下での地殻の応答特性の解明を進める必要がある。

地震発生ポテンシャルを考える上で重要な地震活動のリニアメントと活断層との空間的、力学的関連性について、地下深部においては詳細なリニアメント構造が明らかになりつつあるが、浅部における形態が重要であるにもかかわらず、地震発生が限られているためにその部分の推定が困難である。今後、検出能力の向上を含めた観測研究も必要であろう。さらに、地震のソースフォルト推定の緻密化を目指した研究が必要である。地震波速度、比抵抗構造、重力、地質等のさまざまなデータを統合し、着実にコミュニティモデルの構築を進めることが重要である。

内陸地震研究からは、詳細な地震波速度・減衰構造や比抵抗構造、応力場などのアウトプットが得られつつある。これらのデータを地震発生予測や災害誘因予測研究で活用するために、内陸地震研究から得られる結果を、予測研究で活用できるよう、関連部会との連携体制を継続することが求められる。また、得られたデータ

や構造を関連研究者が広く活用できる道筋を確立することが急務であろう。

内陸地震発生メカニズムの物理モデル構築には多くの課題が残されているが、それらを解決していく過程で得られたさまざまな情報を整理して発信することが必要である。特に、今年度から進めている、地殻構造と地震活動との関連性に関する研究を深化させるため、統計的手法による地震発生予測研究、災害即時予測研究との連携を強めていくことが必要であろう。

成果リスト

- Abe, Y., T. Ohkura, T. Shibutani, K. Hirahara, S. Yoshikawa, H. Inoue, 2017, Low velocity zones in the crust beneath Aso caldera, Kyushu, Japan, derived from receiver function analyses, *Journal of Geophysical Research*, in press, DOI: 10.1002/2016JB013686
- Aizawa K., H. Asaue, K. Koike, S. Takakura, M. Utsugi, H. Inoue, R. Yoshimura, K. Yamazaki, S. Komatsu, M. Uyeshima, T. Koyama, W. Kanda, T. Shiotani, N. Matsushima, M. Hata, T. Yoshinaga; K. Uchida, Y. Tsukashima, A. Shito, S. Fujita, A. Wakabayashi, K. Tsukamoto, T. Matsushima, M. Miyazaki, K. Kondo, K. Takashima, T. Hashimoto, M. Tamura, S. Matsumoto, Y. Yamashita, M. Nakamoto, and H. Shimizu, 2017, Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 4, doi:10.1186/s40623-016-0590-2.
- 相澤 広記, 2016, 火山電磁気観測の進展, *火山*, 61, 2, 345-365.
- 檜山洋平・川元智司・古屋智秋・甲斐玲子・山口和典・鈴木 啓・菅富美男・嵯峨諭, 2017, GEONETによる熊本地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 128, 印刷中.
- Aoki, S., Y. Iio, H. Katao, T. Miura, I. Yoneda, M. Sawada, 2016, Three-dimensional Distribution of S-wave Reflectors in the Northern Kinki District, Southwest Japan, *Earth Planets Space*, 68:107, DOI 10.1186/s40623-016-0468-3.
- Freed, A. M., A. Hashima, T. W., Becker, D. A., Okaya, H., Sato, Y., Hatanaka, 2017. Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 459, pp. 279-290.
- 藤牧良太, 2017, 地震観測記録の分析による東北町周辺の地表付近の地震波速度構造の検討, 弘前大学大学院理工学研究科修士論文.
- Fukahata Y. and M. Hashimoto, 2016, Simultaneous estimation of the dip angles and slip distribution on the faults of the 2016 Kumamoto earthquake through a weak nonlinear inversion of InSAR data, *Earth Planets Space*, 68, 204, doi: 10.1186/s40623-016-0580-4.
- 長谷見 晶子・高橋 承之・岡田 知己, 2016, 山形県米沢一福島県会津の誘発地震域における反射波の検出, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SSS26-P02.
- Hashima, A., T. W., Becker, A. M., Freed, H., Sato, D. A., Okaya, 2016, Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, pp. DOI: 10.1186/s40623-016-0535-9.
- Hashima, A., H. Sato, and T. Ishiyama, 2016. Simulation for Inland Stress accumulation due to Interseismic Coupling in the Southwest Japan Arc, AGU fall meeting.
- Hashima, A., T. W. Becker, A. M. Freed, H. Sato, D. A. Okaya, H. Suito, H. Yarai, T. Ishiyama, and T. Iwasaki, 2016. Near-field and far-field effects of elastic structure on coseismic deformation of

- the 2011 Tohoku earthquake, Japan, European Geosciences Union General Assembly 2016.
- 橋間昭徳・T.W. Becker・A.M. Freed・佐藤比呂志・D.A. Okaya・水藤尚・矢来博司・松原誠・武田哲也・石山達也・岩崎貴哉, 2016. 粘弾性と余効すべりを考慮した2011年東北沖地震による関東地方の応力変化モデル, 日本地球惑星科学連合 連合大会2016年大会.
- 橋間昭徳・A.M. Freed・T.W. Becker・佐藤比呂志・D.A. Okaya・畑中雄樹, 2016. 2011年東北沖地震後の地殻変動データを用いた粘性構造と余効すべりの推定, 第212回地震予知連絡会.
- Horiuchi, S., and H. Iwamori, 2016, A consistent model for fluid distribution, viscosity distribution, and flow-thermal structure in subduction zone, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 3238-3260, doi:10.1002/2015JB012384.
- Ichimura, T., R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, and Y. Fukahata, 2016, An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3D island-scale high-fidelity model, *Geophys. J. Int.*, 206, 114-129, doi: 10.1093/gji/ggw123.
- Iidaka, T. Y., Hiramatsu, The Research Group for the Joint Seismic Observations at the Nobi Area, Heterogeneous mantle anisotropy and fluid upwelling: Implication for generation of the 1891 Nobi earthquake, 2016. *Earth, Planets and Space*, 2016 68: 164, DOI: 10.1186/s40623-016-0540-z.
- Iio, Y., 2016. Fluid Path in the lower crust Estimated by S-Wave Reflection Analysis (招待講演), Goldschmidt 2016, .
- Iio, Y., 2016. Fluid Path Below a Seismogenic Fault Estimated by S-Wave Reflection Analysis (招待講演), AOGS 12th Annual meeting, SE10-A006.
- 飯尾能久, 2017. 熊本地震はなぜ起こったのか?、日本の科学者, 52, 6-11.
- 今西和俊・内出崇彦・松下レイケン, 2016, 臨時地震観測による山梨県北東部の微小地震の発震機構解と応力場, 活断層・古地震研究報告, (印刷中)
- 石川正弘, 谷健一郎, 桑谷立, 金丸龍夫, 小林 健太, 2016, 丹沢山地の地質: 伊豆衝突帯のジオダイナミクス. *地質学雑誌* 122, 291-304.
- Ishikawa, M., 2016, Crustal and uppermost mantle lithology of the NE Japan arc from comparison with the measured and calculated rock velocity and observed seismic velocity. *International Symposium on Geofluid3*, 2016年3月 (招待講演)
- 磯部渉, 2017. 稠密アレイを用いたレシーバ関数解析による東北南部前弧域の地殻・マントル構造の研究, 東京大学修士論文.
- 伊藤嘉秋, 2017, 東北地方におけるGNSS速度場のクラスタ解析, 東北大学卒業研究.
- Iwamori, H., K. Yoshida, H. Nakamura, T. Kuwatani, M. Hamada, S. Haraguchi, K. Ueki, 2017, Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses, *Geochem. Geophys. Geosys.*, 10.1002/2016GC006663.
- Iwasaki, T., H. Sato, M., Shinohara, T., Ishiyama & A. Hashima, 2016, Fundamental structure model of island arcs and subducted plates in and around Japan, 17-th SEISMIX International Symposium (International Symposium on Multi-scale Seismic Imaging of the Earth's crust and Upper Mantle), Aviemore, Scotland, May. 15-20.
- 岩崎 貴哉・佐藤 比呂志・篠原 雅尚・石山 達也・橋間 昭徳・程塚 保行・雨宮 由美, 2016, 日本列島基本構造モデルの構築 -海溝軸・プレート境界モデル-, 日本地球惑星科学連合2016大会, 幕張メッセ, 5月22日~26日, SCG63-25, 日本地球惑星科学連合.

- Kawamoto, S., Y. Hiyama, Y. Ohta, and T. Nishimura, 2016, First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto earthquakes, *Earth Planets Space*, 68:190, doi:10.1186/s40623-016-0564-4.
- Kitagawa Y. and Y. Kano, 2016, Changes in permeability of the Nojima fault damage zone inferred from repeated water injection experiments. *Earth Planets Space* 68:185 DOI 10.1186/s40623-016-0566-2.
- Kobayashi, T., 2017, Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (Mj6.5 and Mj6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR, *Earth Planets Space*, 69:7, doi:10.1186/s40623-016-0594-y.
- Kosuga, M., 2016, Fracture induced shear wave splitting in a source area of triggered seismicity by the Tohoku-oki earthquake in northeastern Japan, *Proceedings of the 11th Asian Seismological Commission General Assembly*.
- 小菅正裕, 2017, 東北地方太平洋沖地震後の秋田県内の誘発地震活動の推移, *東北地域災害科学研究*, 53.
- Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, A. Van Horne, Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophysics*, in press.
- Matsumoto, S., 2016a, Method for estimating the stress field from seismic moment tensor data based on the flow rule in plasticity theory, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL070129.
- Matsumoto, S., T. Nishimura, T. Ohkura, 2016b, Inelastic strain rate in the seismogenic layer of Kyushu Island, Japan, *Earth, Planets and Space*, 68:207, DOI: 10.1186/s40623-016-0584-0
- 松本聡・山下裕亮・中元真美・宮崎真大・酒井慎一・飯尾能久・2016 年熊本地震合同地震観測グループ, 2016, 2016 年熊本地震断層周辺の応力場とその変化, *日本地震学会秋季大会*, S21-02, 名古屋, 10月.
- 松島 健・手操 佳子・中尾 茂・清水 洋・松本 聡・中元 真美・内田 和也, 2016, GNSS Campaign観測で捉えられた 2016年熊本地震の地殻変動, *日本地球惑星科学連合2016年大会*, MIS34-P32, 幕張, 5月.
- 村上英記, 2016. 野島断層注水実験に伴う自然電位変動の原因, *日本地球惑星圏科学連合2016年大会*, SEM35-P08, 2016年5月25日 (千葉市) .
- 村上英記, 2013. 2013年野島注水実験で自然電位変動が観測されなかった原因について, *第140回地球電磁気・地球惑星圏学会*, R003-P08, 2016年11月21日 (福岡市) .
- Muto, J., B. Shibazaki, T. Iinuma, Y. Ito, Y. Ohta, S. Miura, and Y. Nakai, 2016, Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068113.
- Nagasaki, S., H. Ishibashi, Y. Suwa, A. Yasuda, N. Hokanishi, T. Ohkura, K. Takemura, 2017, Magma reservoir conditions beneath Tsurumi volcano, SW Japan: evidence from amphibole thermobarometry and seismicity, *LITHOS* in press, DOI:10.1016/j.lithos.2017.01.011
- 中東和夫・山下裕亮・山田知朗・望月公廣・塩原肇・篠原雅尚, 2016. 日本海大和海盆下の上部マントル構造, *日本地震学会2016年度秋季大会*, S07-P04.
- Nakahigashi, K., Y. Yamashita, T. Yamada, K. Mochizuki, H. Shiobara, M. Shinohara, 2016. Mantle wedge structure beneath the Yamato Basin, southern part of the Japan Sea revealed by long-term seafloor seismic observations, 2016 American Geophysical Union Fall meeting, T31D-2933.
- Nakamura, H., K. Chiba, Q. Chang, N. Morikawa, K., Kazahaya, H. Iwamori, 2016, Origin of the Arima-type and Associated Spring Waters in the Kinki District, Southwest Japan, *J. Geol. Geophys.*, 5:240. doi:10.4172/2381-8719.1000240.
- 中尾 茂, 松島 健, 田部井 隆雄, 山品 匡史, 大倉 敬宏, 西村 卓也, 澁谷 拓郎, 寺石 眞弘, 伊藤 武男, 鷲

- 谷 威, 松廣 健二郎, 加藤 照之, 福田 淳一, 渡邊 篤志, 三浦 哲, 太田 雄策, 出町 知嗣, 高橋 浩晃, 大園 真子, 山口 照寛, 岡田 和見, 2016, GNSSによる2016年熊本地震発生後の地殻変動観測, 日本地球惑星科学連合2016年大会, MIS34-P31, 2016. 幕張, 5月.
- 中尾茂, 松島健, 田部井隆雄, 山品匡史, 大倉敬宏, 西村卓也, 澁谷拓郎, 寺石眞弘, 伊藤武男・鷺谷威・松廣健二郎, 加藤照之・福田淳一・渡邊篤志, 三浦哲, 太田雄策, 出町知嗣, 高橋浩晃, 大園真子, 山口照寛, 岡田和見, 2016, 2016年熊本地震後のGNSSによる余効変動の観測, 日本地震学会2016年秋季大会, S21-17, 名古屋, 10月.
- 中尾茂, 松島健, 田部井隆雄, 山品匡史, 大倉敬宏, 西村卓也, 澁谷拓郎, 寺石眞弘, 伊藤武男, 鷺谷威, 松廣健二郎, 加藤照之, 福田淳一, 渡邊篤志, 三浦哲, 太田雄策, 出町知嗣, 高橋浩晃, 大園真子, 山口照寛, 岡田和見, 2016, 2016年熊本地震後のGNSSによる地殻変動の観測, 日本測地学会第126回講演会講演予稿集, 141-142.
- Nakatani, T., and M. Nakamura, 2016, Experimental constraints on the serpentinization rate of fore-arc peridotites: Implications for the upwelling condition of the slab-derived fluid, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, doi:10.1002/2016GC006295.
- 前田裕太・加藤愛太郎・寺川寿子・山中佳子・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 2016. 傾斜波形解析から示唆される御嶽山2014年噴火の浸透率増大モデル, 日本地球惑星科学連合大会.
- 西村卓也, 2016. GNSSデータから見出される日本列島のひずみ集中帯と活断層及び内陸地震, S-5 (招待講演), 日本活断層学会講演会2016年秋季学術大会.
- Nishimura, T., 2016. Interplate coupling strain partitioning and block motions deduced from GNSS and GPS/A data in southwest Japan, AGU 2016 Fall Meeting, T31E-2950.
- Ogiso, M., S. Aoki, and M. Hoshiya, 2016, Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors, *Earth Planets Space*, 68:83, doi: 10.1186/s40623-016-0467-4.
- 小木曾仁・干場充之・志藤あずさ・松本聡, 2016, 減衰構造を取り入れた揺れから揺れの即時予測の試み: 2016年熊本地震, 日本地震学会2016年秋季大会, S21-P08, 2016年10月
- Ogiso, M., M. Hoshiya, A. Shito, and S. Matsumoto, 2016, Real time numerical shake prediction incorporating attenuation structure: a case for the 2016 Kumamoto Earthquake, AGU Fall Meeting, S23A-2746
- 太田雄策, 大園真子, 高橋浩晃, 日野亮太, 2016, キネマティックPPP解析を用いた2016年熊本地震による動的歪み場の特徴, 日本測地学会第126回講演会, 70, 2016年10月, 水沢市文化会館.
- 大槻憲四郎, 2016, 熊本地震前後のb-値の時空間変化, 日本地質学会第123年学術大会講演要旨, R-14-03.
- 大園真子, 高橋浩晃, 2016, GNSSデータに基づく2016年熊本地震の前震・本震時のひずみ・応力変化, 日本測地学会第126回講演会, 71, 2016年10月, 水沢市文化会館
- Okada, T., T. Nakayama, S. Hirahara, S. Hori, T. Sato, and T. Matsuzawa, 2016, Effect of stress and fluid pressure change on shallow earthquake swarm induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake inferred from dense seismic observation, JpGU 2016 Annual Meeting, STT18-03.
- 岡田知己・中山貴史・平原聡・堀修一郎・佐藤俊也・松澤暢・長谷川昭・吉田圭佑・2011年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ, 2016, 稠密地震観測で求めた, 東北沖地震後の内陸誘発地震のメカニズム解, 日本地震学会2016年度秋季大会, S09-15
- Saito, Z., 2017, 3D magnetotelluric imaging of fluid distribution in a seismogenic region, Miyagi, NE Japan, 東京工業大学修士論文.

- Saito, Z., Y. Ogawa, M. Ichiki, A. Suzuki, Y. Kinoshita, and P. Amatyakul, 2016, 3D magnetotelluric imaging of fluid distribution in a seismogenic region, Miyagi, NE Japan, The 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Chiang Mai, Thailand, August 14-20.
- Shibazaki, B., T. Okada, J. Muto, T. Matsumoto, T. Yoshida, and K. Yoshida, 2016, Heterogeneous stress state of island arc crust in northeastern Japan affected by hot mantle fingers, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 3099-3117, doi:10.1002/2015JB012664.
- 清水・他, 2016, 2016年熊本地震の緊急合同地震観測 - 地震活動の特徴と背景 -, 日本地球惑星科学連合2016年大会, MIS34-P02, 2016. 幕張, 5月.
- 志藤あずさ・松本聡・清水洋・2016年熊本地震合同観測グループ, 2016, 2016年熊本地震震源域の3次元地震波速度構造, 日本地震学会2016年秋季大会, S21-P28, 2016年10月
- 志藤あずさ・松本聡・清水洋・2016年熊本地震合同地震観測グループ, 2016, 2016年熊本地震震源域の3次元地震波速度構造, 日本地震学会秋季大会, S21-P28, 10月, 名古屋市.
- 水藤 尚・小林知勝・川元智司・森下 遊, 2015, ひずみ集中帯の地殻変動特性に関する研究(第2年時), 国土地理院調査研究年報(平成28年度), 印刷中.
- Suzuki, A., Y. Ogawa, Z. Saito, M. Ushioada, H. Ichihara, M. Ichiki, and M. Mishina, 2016, 3D fluid distribution and co-, and post-seismic deformation: MT imaging of focal zone of 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, Japan, The 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop, Chiang Mai, Thailand, August 14-20.
- 鈴木真奈美, 2017, メカニズム解による米沢-会津地域の断層面の推定, 山形大学卒業論文, 30pp.
- Takada, Y., K. Katsumata, H. Katao, M. Kosuga, Y. Iio, T. Sagiya, 2016. The Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at the Niigata-Kobe Tectonic Zone. Stress accumulation process in and around the Atotsugawa fault, Central Japan, estimated from focal mechanism analysis. *Tectonophysics* 682, 134-146.
- Takagi, S., and S. Okubo, 2016, Internal deformation caused by a point dislocation in a uniform elastic sphere, *Geophys. J. Int.*, 208, 973-991.
- Takahashi, H., M. Ohzono, K. Minato, N. Okazaki, T. Suzuki, T. Takahashi, F. Akita., 2016. Magma, thermal structure, strain concentration and active seismicity in Kussharo caldera, Hokkaido, Japan, JKASP2016, Fairbanks, AK, USA, 31/05/2016.
- 寺川寿子・加藤愛太郎・前田裕太・山中佳子・堀川信一郎・松廣健二郎・奥田隆, 2016. 応力場の時間変化に基づく御獄火山のモニタリング, 日本地球惑星連合大会, 2016.
- 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, 応力場の時間変化に基づく御獄火山のモニタリング, 日本地震学会2016年秋季大会, S08-P13.
- Terakawa, 2016. Temporal stress changes at Mt. Ontake volcano, *Crustal Dynamics 2016*, A08.
- Tsunomori F., T., Shimodate T., Ide, and H., Tanaka, 2017, Radon concentration distributions in shallow and deep groundwater around the Tachikawa fault zone. *Journal of Environmental Radioactivity*, in press.
- 内田康人, 岡崎紀俊, 山崎新太郎, 高橋浩晃, 音響調査による屈斜路湖の湖底地形・堆積構造と内陸地震の関係について, 日本地震学会講演予稿集, 2016年10月, 名古屋国際会議場
- Uchide, T., H. Horikawa, M. Nakai, R. Matsushita, N. Shigematsu, R. Ando, and K. Imanishi, 2016, The 2016 Kumamoto-Oita earthquake sequence: Aftershock seismicity gap and dynamic triggering in volcanic areas, *Earth Planets Space*, 68, 180, doi:10.1186/s40623-016-0556-4.

- Uchide, T., and K. Imanishi , 2016, Small earthquakes deviate from the omega-square model as revealed by multiple spectral ratio analysis, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106, 1357-1363, doi:10.1785/0120150322.
- 上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅・仲井博之・本田昌樹・攪上泰亮・山下達也・矢来博司・小林知勝・森下 遊、2017, だいち2号SAR干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出, *国土地理院時報*, 128, 印刷中.
- Usui Y., Y. Ogawa, K. Aizawa, W. Kanda, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Yamaya, and T. Kagiya , 2016, Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements. *Geophysical Journal International*, 208 (3), 1359-1372. doi: 10.1093/gji/ggw459.
- Uyeshima, M., M. Ichiki, S. Sakanaka, and M. Tamura, 2016, 2-D analysis of wide-band MT data across southern part of Tohoku, NE Japan, and evaluation of inter-station horizontal component geomagnetic transfer functions, *The 23rd Electromagnetic Induction in the Earth Workshop*, Chiang Mai, Thailand, August 14-20.
- 山下裕亮・松本聡・中元真美・宮崎真大（京大防災研）・松島健・清水洋・飯尾能久・2016 年熊本地震合同地震観測グループ , 2016, 稠密観測データによって再決定された余震分布から推定される平成 28 年（2016 年）熊本地震の断層構造, *日本地震学会秋季大会*, S21-P26, 10月, 名古屋市
- 矢来博司・小林知勝・森下 遊・藤原 智・檜山洋平・川元智司・上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅, 2017, 熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル, *国土地理院時報*, 128, 印刷中.
- Watanabe, N., T. Numakura, K. Sakaguchi, H. Saishu, A. Okamoto, S. E. Ingebritsen, and N. Tsuchiya, 2017, Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust, *Nature Geosci.*, doi: 10.1038/NGEO2879.

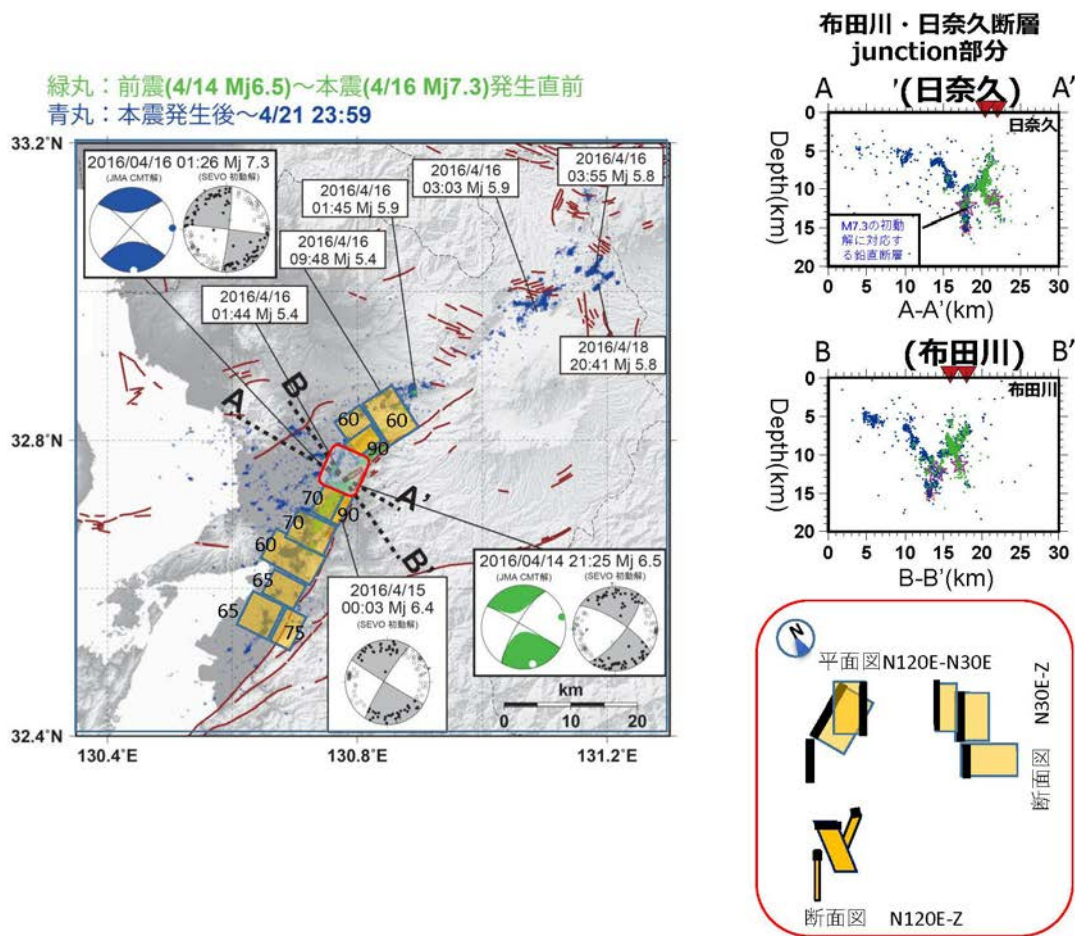


図1. 臨時観測点データを加えた精度の高い余震分布(山下・他, 2016に加筆)。M6.5, M6.4, M7.3の地震のP波初動から得たメカニズム解と気象庁によるM6.5, M7.3の地震のモーメントテンソル解。オレンジの矩形は震源分布から読み取った断層面形状。右に断層接合部の余震分布および読み取った断層形状を示す(九州大[課題番号: 2201])。

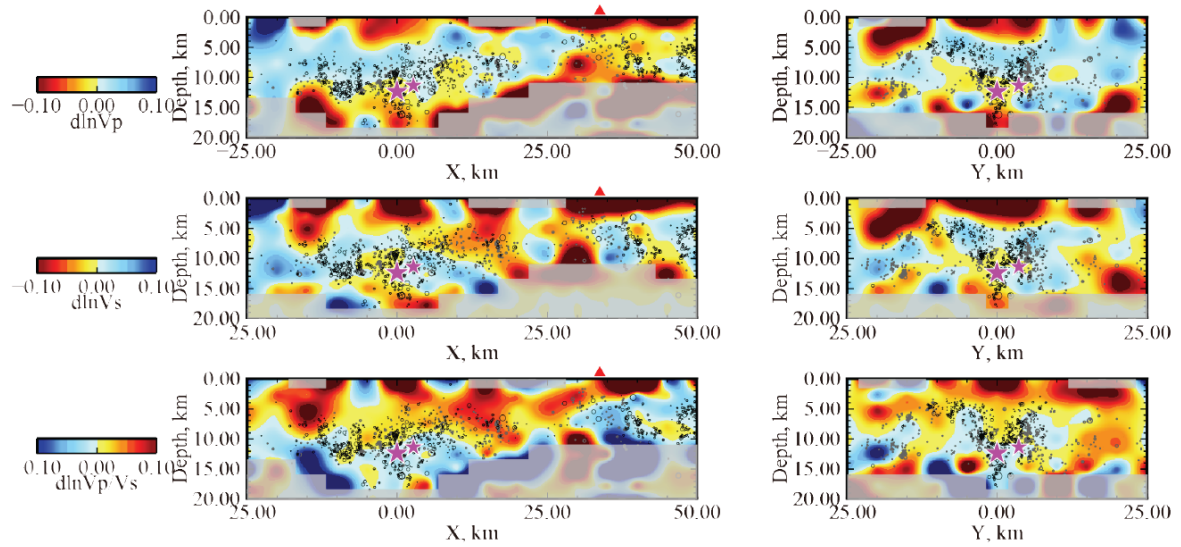


図2. 布田川断層に平行、直行断面での速度構造偏差 (志藤・他、2016)。それぞれ、P波速度偏差(上)、S波速度偏差(中)、Vp/Vs比(下)。暖色(赤色)が低速度を示し、寒色(青色)が高速度を示す。星印は最大前震と本震の位置を、黒○は余震の震源を示す (九州大[課題番号: 2201])。

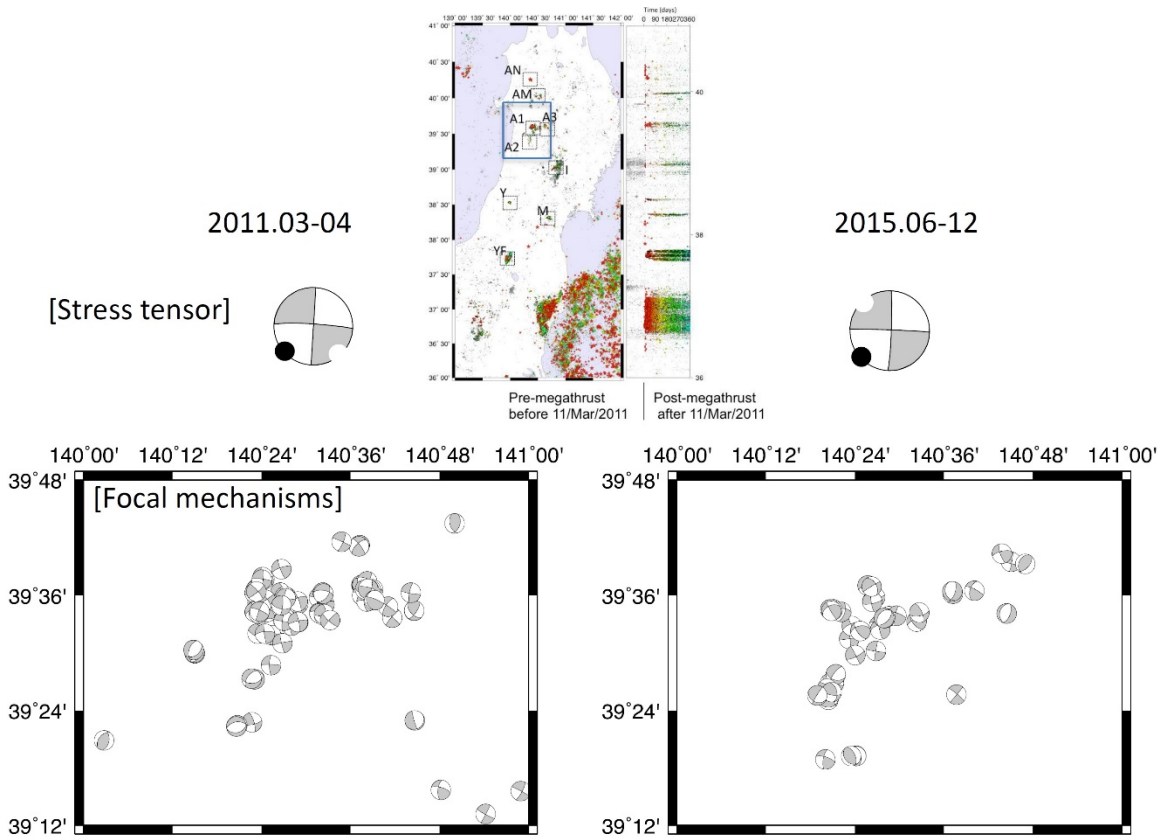


図3. 秋田県南部における東北地方太平洋沖地震発生直後の2011年3月-4月 (左図) と約4.5年後の2015年6月-12月 (右図) に発生した地震のメカニズム解の分布と、これらの地震から推定した応力テンソル (東北大[課題番号: 1203])。

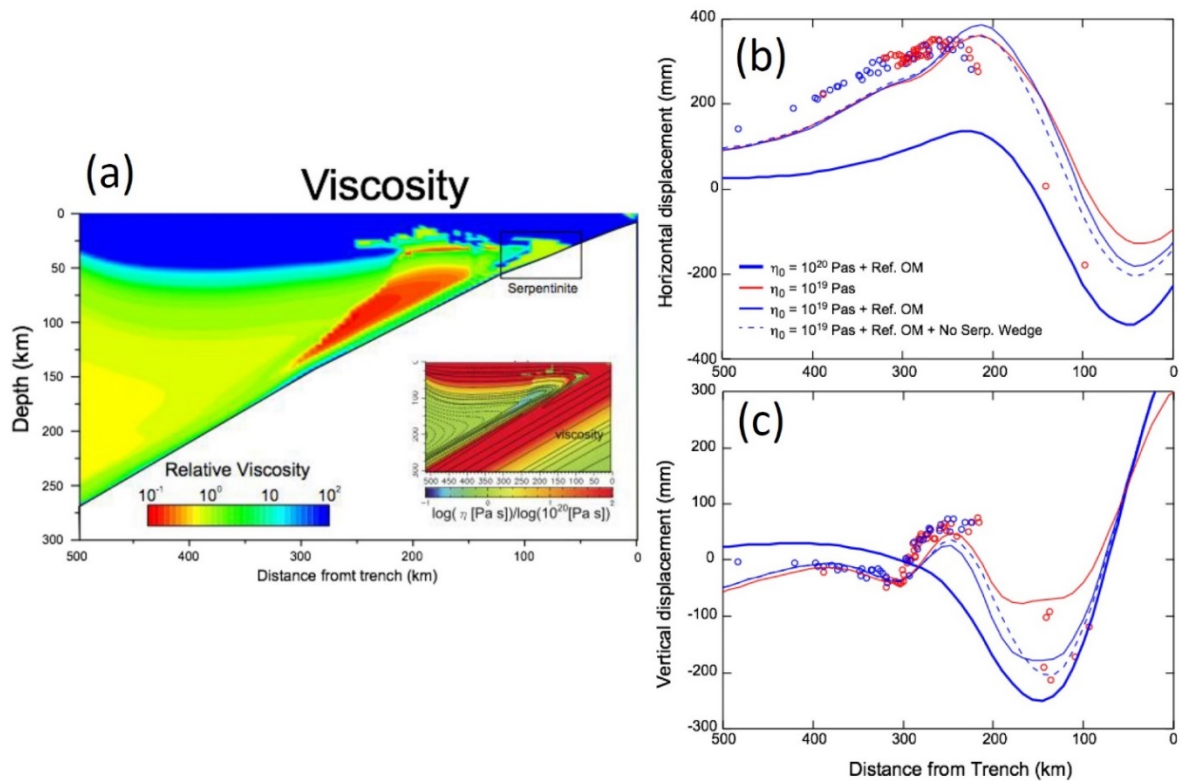


図4. 沈み込み帯熱対流モデルを用いた2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動解析結果。解析期間は2011年4月23日から12月11日。(a) Horiuchi and Iwamori (2016)による沈み込み帯熱対流モデルに基づき構築した相対粘性分布。(b) 水平変動。(c) 上下変動。青太線は基準粘性を 10^{20} Pa s とし海洋マントル粘性構造としてMuto et al. (2016) での最適解を与えたモデル。赤線、青細線、青破線はいずれも基準粘性を 10^{19} Pa s とし、赤線はHoriuchi and Iwamori (2016)によるモデル、青細線は赤線に対してMuto et al. の海洋マントル粘性構造を与えたモデル、青点線は青細線から前弧の蛇紋岩低粘性体を削除したモデルによる結果を示す(東北大[課題番号: 1203])。

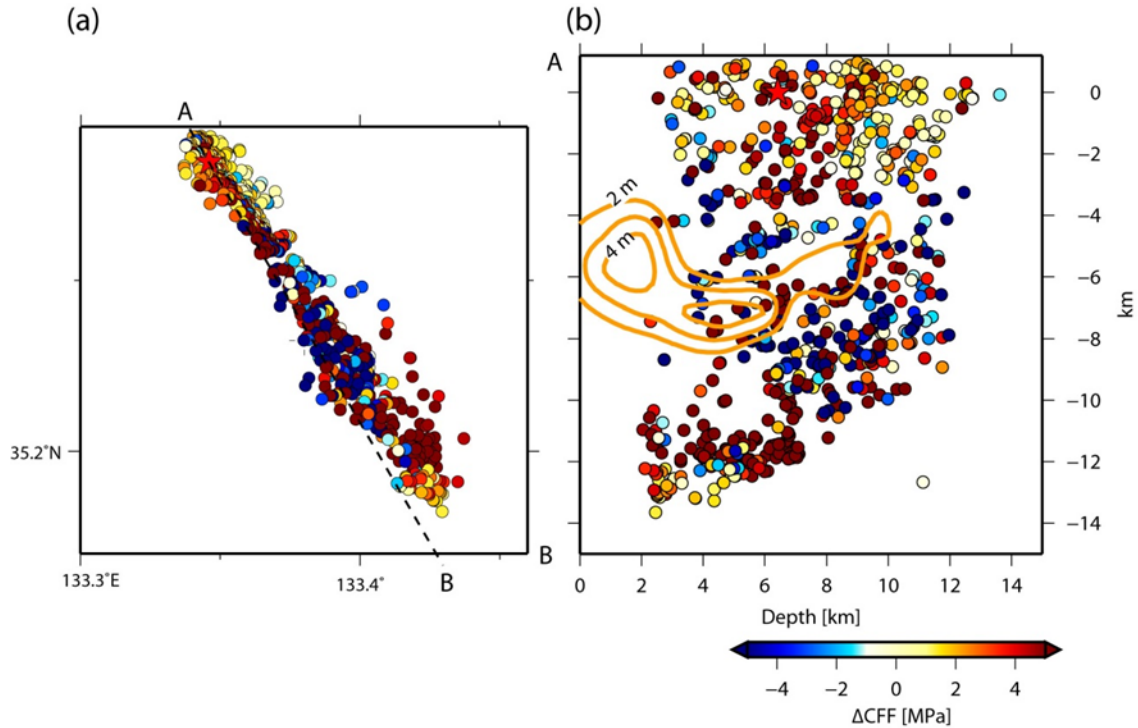


図5. 2000年鳥取県西部地震の余震域南部での余震メカニズム解節面に作用する ΔCFF (Yukutake and Iio, under review)。(a)、(b)はそれぞれ断層面に垂直, 平行な断面を示す。コンターラインはIwata and Sekiguchi (2002)により推定された、本震時の滑り分布を示す(京大防災研[課題番号:1905])。

東北沖地震を挟む跡津川断層近傍の歪・歪速度場 (最大せん断歪)

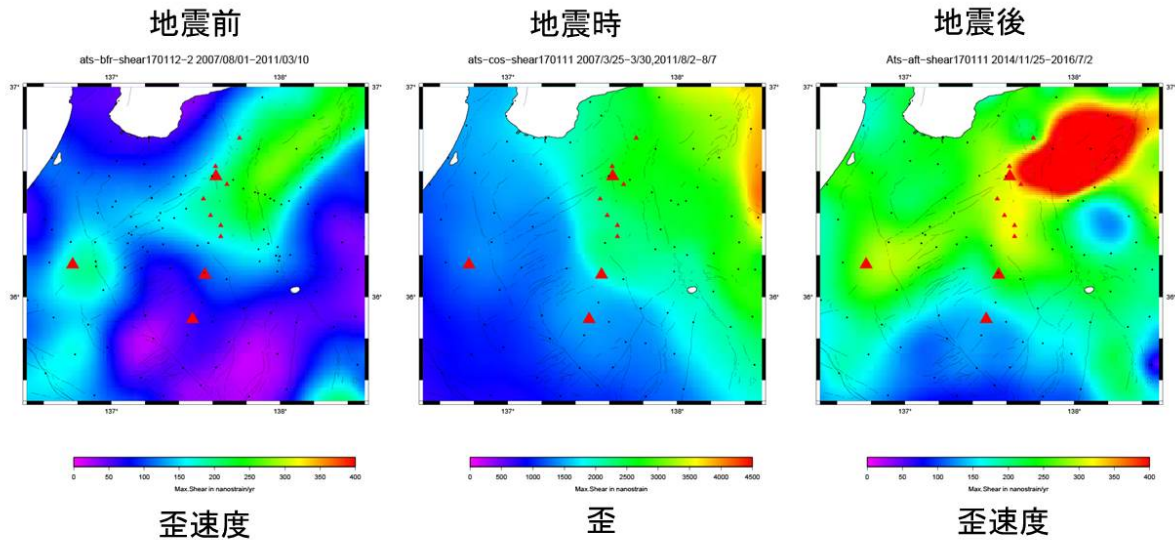


図6. 東北地方太平洋沖地震前・地震時・地震後の跡津川断層近傍の最大せん断歪。左:地震前(歪速度)、中:地震時(歪)、右:地震後(歪速度)。黒点はGPS観測点。黒線は活断層。大三角は主な火山(東から立山、乗鞍、御嶽、白山)。小三角は飛騨山脈(京大防災研[課題番号:1907])。

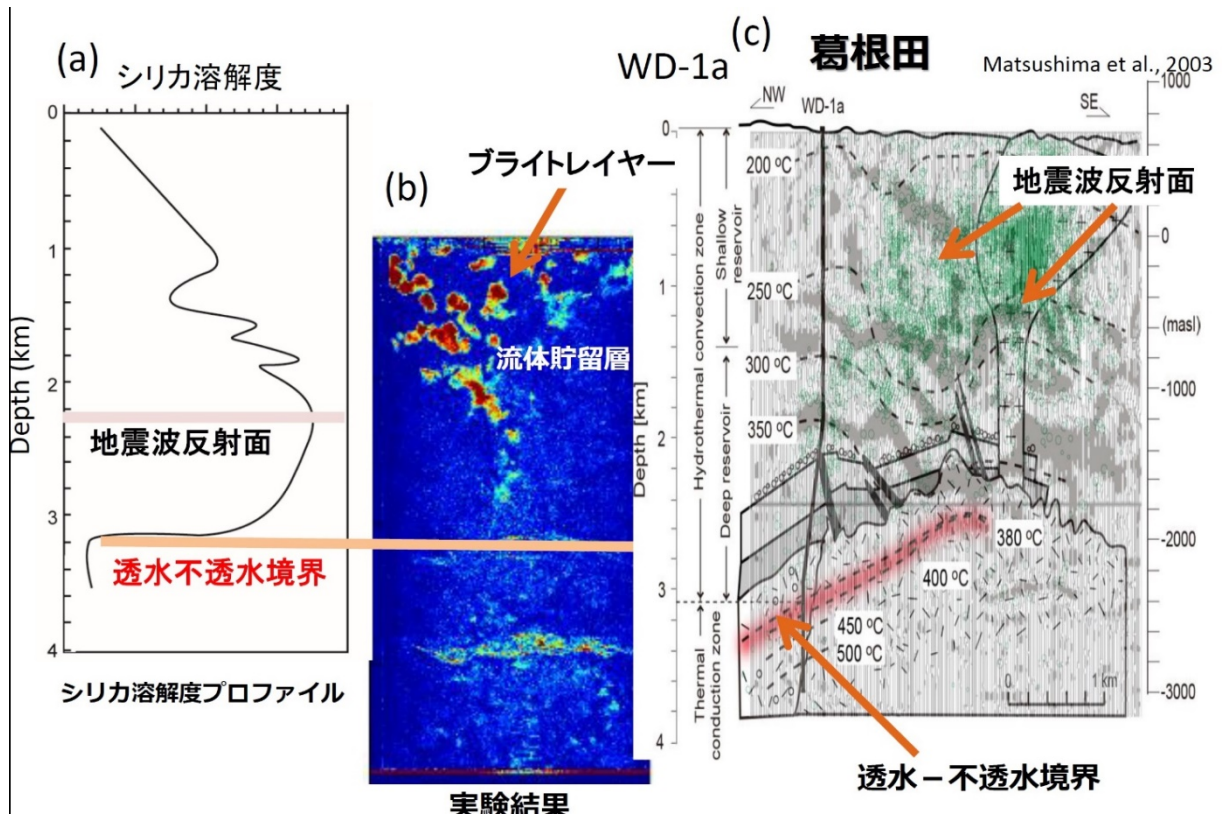


図7. 透水-不透水境界の再現実験結果。(a) 期待される石英の溶解度の深度プロファイル。(b) 実験で再現された流体貯留層と透水-不透水境界。(c) 葛根田における地震波反射面（ブライトレイヤー）と透水-不透水境界。地温勾配が高いため、深さ2 km程度という浅部で超臨界水となるために石英の溶解度が上がり、450 °C付近で急激に溶解度が下がるために沈殿が生じる。このため、深さ2 km付近に流体貯留層が形成され地震波反射面（ブライトレイヤー）となって観測されることになる（東北大[課題番号：1204]）。

1 (3) 火山

「火山」計画推進部会長 大倉敬宏（京都大学大学院理学研究科）

副部会長 野上健治（東京工業大学火山流体研究センター）

火山噴火による災害を軽減するためには、火山噴火の発生の場所・規模・時期を予測することおよび火山噴火現象の発展段階に応じた災害の推移を予測することが重要である。しかしその前段階として、火山噴火現象自体を解明することも非常に重要である。

「火山」計画推進部会では、発災の原因である火山噴火を科学的理解に基づき予測する手法の開発をすすめるとともに、火山噴火予測の基礎となる火山噴火の仕組みを自然科学的に解明する研究を推進している。そして、これらの研究を支える観測手法の開発および体制の整備も主たる推進内容の一つである。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理

ウ. 地質データ等の収集と整理

火山現象とそれに伴う災害を長い時間スケールにわたって正確に把握するためには、岩石資料や地質調査データなどの分析をおこなうことが重要である。そこで、本年度は主として伊豆大島の最近数百年間の噴火噴出物についてそのマグマの含水量と温度が決定され、マグマの含水量については1986年噴火（2 wt%程度）より9世紀のN2や12世紀のY6噴火（2.6-2.8 wt%程度）のほうがやや多いことなどが明らかになった。また、諏訪之瀬島と西之島の噴出物の分析も実施され、西之島火山については2013-15年噴火の噴出物の分析により、マグマがもともと高温であったこと、浅所に一時的に滞留し脱ガスが行われてから噴火に至ったために斜長石の微結晶の成長が抑制されたことが明らかになり、これらが2013-2015年噴火が1973-74年とは様式が異なり、流動性にともむ溶岩流主体の活動となった要因であると推察された（東京大学地震研究所 [課題番号：1502]）。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明

低頻度で大規模な火山現象の発生過程や噴火現象を理解するためには、現在の火山学の知見と対比しながら、近代的観測データの解析や岩石・地質データの分析を行なうことが必要である。火山部会では、低頻度大規模火山現象としてカルデラ噴火と大規模山体崩壊とをターゲットとした研究が実施されている。

薩摩硫黄島でのボーリングコアの解析により、特に7.3 ka 鬼界アカホヤ噴火によるカルデラ形成後の火山活動についての検討および鬼界アカホヤ噴火と12万年前の屈斜路カルデラIV噴火のマグマ供給系の構造とそのプロセスについての物質科学的な検討が行なわれた（北海道大学 [課題番号：1001]）。その結果、1) 両噴火ともそのマグマ供給系は、大きく珪長質マグマ系とマフィックマグマ系に大別される。2) このうち珪長質マグマ系では、起源の異なる流紋岩質マグマとデイサイト質マグマが混合し、噴火前には珪長質成層マグマ溜りを形成していた。3) マフィックマグマはアカホヤ噴火では2種、屈斜路噴火では3種が存在し、カルデラ形成噴火の間に、それらが順次珪長質成層マグマ溜りに貫入していた。4) このマフィックマグマの不連続的な貫入が、カルデラ噴火の引き金となるだけでなく、噴火様式の変化や噴火休止期に対応している可能性があること、などが明らかになった。また、カルデラ形成噴火では噴火の数百年前から大規模珪長質マグマの集積過程が進行しているなどの準備過程も明らかになった。

また、1888年磐梯山噴火の後の「お雇い外国人」技術者・教師が行った磐梯山調査について史料を精査した結果、彼らが磐梯山の崩壊地形測量と噴火写真撮影について多大な貢献をしたこと、その成果が Sekiya and

Kikuchi (1890)の論文に反映されていることが明らかになった(京都大学防災研究所 [課題番号: 1902])。

(3) 地震・火山噴火の発生場の解明

ウ. 内陸地震と火山噴火

マグマ溜まりや火道などの構造や物質科学的特性、火山周辺の応力・ひずみの時空間分布を明らかにし、火山噴火現象のモデル化の研究を進めるためには、地震・地殻変動観測や電磁気探査などを実施することが重要である。

この目的のため、近年活動が活発化している蔵王山周辺では地震・地殻変動観測、重力観測や地磁気観測の総合観測が実施されている。全磁力繰り返し観測とそのデータ解析から、御釜から北東へ約700m、深さ約350mの位置(御釜直下ではなく、現在噴気を上げている振子沢、丸山沢の直下)に消磁域が推定された。ただし、低周波地震・長周期地震の解析からは浅部の熱水系での顕著な温度変化や物性的変化は検出されておらず、丸山沢噴気地熱地帯の現地調査からも目立った変化は見いだされていない(東北大学 [課題番号: 1202])。同火山の噴火ポテンシャルを評価するため、今後もこうした総合観測を継続して行くことが重要である。

一方、阿蘇カルデラの地殻～上部マンツルのS波速度構造が遠地震波形のレシーバー関数解析により求められた結果、中央火口丘の下、8～15kmの深さにS波低速度領域(最低で2.2km/s)が存在することが明らかになった。この低速度領域の存在は、熊本地震合同地震観測班がダブル・ディファレンストモグラフィ法によって決定した速度構造とも調和的である。この領域が深部低周波地震発生域や地殻変動発生源に近接していることから、深部地殻あるいは上部マンツルからの高温物質の移動により、低速度層内にマグマが蓄積している可能性がある(九州大学 [課題番号: 2201])。

(5) 火山現象のモデル化

大規模な災害を引き起こす可能性があるマグマ噴火を主体とする火山、および噴火規模は小さいものの災害を引き起こす可能性が高い水蒸気噴火を主体とする火山それぞれに対し、火口近傍や火山周辺における多項目の観測や火山噴出物の解析から、先行現象とそれに続く噴火現象を把握し、それら諸現象のモデル化を行なうことを目的とした研究が実施されている。

ア. マグマ噴火を主体とする火山

2006年に58年ぶりに噴火が発生した桜島昭和火口では、2009年後半から2015年前半までブルカノ式噴火が頻発した。同火山では地震、地盤変動観測、重力測定、火山ガス放出量、噴出物の分析が継続され、火山体構造の変化抽出のための人工地震探査が実施された。また、2015年8月15日に発生したマグマ貫入イベントの再解析を行うことにより、その特性が詳細に調べられた(京都大学防災研究所 [課題番号: 1908])。

桜島の地盤は、約1年周期で膨張と収縮を繰り返しているが、2009年10月～2010年5月、2011年11月～2012年2月、2015年1月～6月の地盤の膨張は、それまでの年周変化的な変動をはるかに超える。この地盤変動はマグマの貫入量が数十万 m^3 /月のレベルまで増加したことに対応する。また、これらの時期には噴火活動が活発化し、火山灰放出量も増加した。そして、この時期に観測された地盤変動は、始良カルデラ下約10km及び北岳下4kmにおける球状圧力源の増圧と南岳下約1kmの減圧により説明できる(京都大学防災研究所 [課題番号: 1908])。このうち始良カルデラ下のマグマ溜まりの継続的な膨張はGEONETでもとらえられている(国土地理院 [課題番号: 6002])。また、噴火発生前の高時間分解能の SO_2 放出率変動観測の結果と地殻変動観測の結果を解析した結果、噴火前の膨張量と火山ガスの蓄積量に相関があることが明らかになった(産業技術総合研究所 [課題番号: 5006])。

一方、2015年8月15日に発生したマグマ貫入イベントは、通常のブルカノ式噴火に先行する地盤変動の

300 倍の膨張速度と活発な A 型地震の発生を伴う顕著なイベントであり、上述のマグマ移動とは異なり、明瞭な割れ目の開口によりモデル化できるものであった。このマグマ貫入イベントの再解析のため、ASL (Amplitude Source Location) 法で震源決定を試みた。その結果、深さの決定精度が悪いため震源 (震央) 分布の時間変化を議論するには至らなかったが、8 月 15 日に発生した地震はダイクの付近に走向 (北東-南西方向) に沿って分布することが明らかになった。

火山現象・噴火のモデル化を行なう際には、マグマの挙動についての実験的研究の成果を取り入れることも重要である。東北大学ではこれまでに霧島火山新燃岳 2011 年の噴火様式の分岐に対応した噴火噴出物のナノライトの鉱物組み合わせの相違を発見している。本年度においてさらに高倍率観察を進めたところ、マグマが火口内で固結して形成されたと考える本質石質岩片・溶岩ブロックの中に、直径 1 ナノメートル程度の FeTi 酸化物を晶出しているものと、そうでないものの二種類があることがわかった。これは、火口まで気泡流として上昇してきたマグマが固結したものと、一度破碎したマグマが火口内で再溶結したものとに対応すると考えられる。これらの結晶化条件 (圧力・含水量、温度、酸素分圧) を実験によって明らかにして行くことにより、噴火様式の各分岐点を制約することができると考えられる (東北大学、[課題番号: 1205])。

マグマ噴火のモデル化のためには、地球物理学、地球化学および岩石学的手法を用いた多項目の観測を桜島以外でも推進し、噴火にともなう諸現象の一般性を抽出することが非常に重要となる。東京大学地震研究所では、伊豆大島と浅間山においても地震観測、ガス観測、電磁気観測等の多項目・高精度観測を継続している ([課題番号: 1508])。また、北海道立総合研究機構地質研究所は、北海道の 5 火山 (雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、有珠山、北海道駒ヶ岳) において、地球物理学的・地球化学的モニタリングを実施している。そのうち十勝岳では 2006 年以降火口域の膨張を示す変動が継続していることが GPS 観測により捉えられており、同火山における火山体内部構造や熱水流動系解明のための電磁気 (MT) 探査や重力観測、熱水変質調査が実施された。その結果、火山活動の中心である山頂の火口域の地下では熱水系が上下に厚くなっていると考えられ、その領域は浅部での山体膨張を引き起こしている膨張源や、ごく浅部の火山性地震の発生領域に一致することが明らかになった ([課題番号: 9102])

雌阿寒岳では、気象庁も全磁力連続観測を実施しており、2015 年 3 月から 2016 年 4 月にかけて熱消磁とみられる全磁力変化が観測された。繰り返し観測のデータも用いて解析を行なった結果、その消磁源はポンマチネシリ 96-1 火口南斜面の地下約 500m、半径 107m と求められた (気象庁、[課題番号: 7005])。

観測と並行して、データ解析による比較研究も実施されている。東京大学地震研究所では、地震波干渉法解析を国内 14 火山に適用し、その結果伊豆大島・桜島等においては、速度変化が GNSS による面積歪と関連することが明らかになった。山体変形の大きい伊豆大島について、面積歪に対する地震波速度変化の感度係数を推定することができた。また、桜島においては 2015 年 8 月のマグマ貫入に伴う相互相関関数の変化を検出し、散乱特性の変化した場所が貫入位置に調和的であることが明らかになった ([課題番号: 1508])。

イ. 熱水系の卓越する火山

熱水系の卓越した火山で発生する水蒸気噴火や小規模なマグマ水蒸気噴火の準備過程に関連する先行現象の事例を多数集め、それらの現象の理解を深めるため、十勝岳・吾妻山・草津白根山・阿蘇山・口永良部島を対象とした全国連携の比較研究が継続された (北海道大学 [課題番号: 1003])。このうち、阿蘇山と口永良部島については、H26 年度中に噴火が発生しマグマ性の活動に移行したため、H27 年度からは別課題でも観測研究が実施されている (京都大学理学研究科 [課題番号: 1802])。

十勝岳、吾妻山、草津白根山では、火口周辺域での地盤変動、地震、磁場のモニタリング観測とそのデータ解

析が継続された。その結果、十勝岳では継続的な山体の消磁による、草津白根山では2016年春頃からの山体の帯磁による磁場変化がそれぞれ観測されている（北海道大学 [課題番号：1003]）。一方、草津白根山では、火口湖の塩化物イオンおよび水安定同位体比に注目して、その時間変動を計算する数値モデルが開発され、湯釜火口湖に注入している流体は、高温火山ガスと天水の単純な混合で説明可能なことが初めて明らかになった。2014年以降の活動活発化とその後の経過は、熱水系での気液分離の進行で説明可能である。また、同火山では火山ガス、湖水・温泉水の化学組成の繰り返し観測が実施された。2014年3月の火山の活発化以降、フッ化物イオン、塩化物イオンの濃度が増加すること、ポリチオン酸イオン濃度が増大することが見出され、このことはマグマ性の火山ガスが湯釜火口湖に注入している結果であると解釈されている（東京工業大学 [課題番号：1601]）。

地質学的な調査により、御嶽山や秋田焼山などの火山体浅部へのマグマ貫入頻度が低く、熱的にも化学的にも長期的に安定な熱水系が発達する火山では、変質分帯を形成する熱水系内の多様な場所から火山灰が由来していることが明らかにされている。一方、十勝岳のように地下に熱水系の存在が示唆されていながらも頻繁にマグマが浅所に貫入しマグマ噴火やマグマ水蒸気噴火が生じる火山では、変質分帯と噴出物の対比において様相が異なることが明らかになった。このように、変質物分析から熱水系の特徴が分類され、マグマ貫入の頻度と熱水系の卓越度と関連を示唆する結果が得られている（北海道大学 [課題番号：1003]）。

阿蘇火山では、2016年熊本地震直後には火山活動の活発化が見られなかったが、2016年10月8日に爆発的噴火が発生した。噴火に先行して、2016年7月ころからマグマ溜まりの膨張を示すGPS基線長変化、10月に火山性地震の活発化とガス放出量の増大がそれぞれ観測された（京都大学理学研究科 [課題番号：1802]）。御嶽山では、2016年9月に水準測量が実施された。2015年4月からの約1年半の期間で、上松（BM34）の不動点に対して、御岳ロープウェイ・中の湯路線のBM505で約6mmの隆起、屋敷野路線のBM214で約3mmの沈降の上下変動が検出された。2016年1月～12月に御嶽山頂直下で発生した地震のメカニズム解から推定される局所応力場の変化は、この時期においても増圧・減圧過程が繰り返し発生していることを示しており、この圧力変化が上下変動に現れている可能性もある（京都大学理学研究科 [課題番号：1802]）。一方、口永良部島での水準測量では、火口側地盤の沈降が初めて確認でき、圧力源の収縮が地下深部に及び始めていることが推定された。地震活動と火山ガス放出量から見ると2015年噴火直後に比べて、低下しているとはいえ、静穏化には至っていないと判断される（京都大学理学研究科 [課題番号：1802]）。

他の熱水系卓越火山でも観測研究が進められている。京都大学防災研究所は、焼岳火山の観測網強化のため焼岳山頂観測点に短周期地震計、気泡型傾斜計、プロトン磁力計、高精度地中温度計を設置した（[課題番号：1909]）。また、富山大学は、弥陀ヶ原火山・地獄谷において水準測量、レーザースキャナによる高精度地形測量および地中温度測定を実施した。硫黄ドームの形成と崩落が繰り返されており、ガスの噴出も活発な領域で、2015年9月から1年間で1cmを超える隆起が観測された。これは地下浅部のガスの過剰圧変化により引き起こされたと考えられている（[課題番号：2941]）。東海大学は2016年4月から2017年1月まで箱根山の大涌谷と上湯場の二か所で噴気の採取・分析を繰り返し実施した。火山ガスの化学組成や安定同位体比の変化が乏しかったが、2016年10月7日に大涌谷で採取した噴気では、マグマから発散する揮発性物質が減少していた。このことは、地殻中の通路の目詰まり（シーリング）により、浅部熱水系に供給される流量が減少したことを意味する。その後、2016年11月4日にCO₂/H₂Oが急増した。シーリングに対応する噴気の組成変動の後にCO₂/H₂Oが上昇したのは、2015年4月前後の群発地震活動以来であったが、2016年11月に群発地震は発生していない。今後は組成変化の大きさと群発地震発生の関係を調べて行く必要がある（東海大学 [課題番号：2922]）。この箱根火山においては東京大学大気海洋研究所も2ヶ所における継続的に噴気ガスを採取を実施している（東京大学大気海洋研究所 [課題番号：2802]）。

海底火山の活動は、その周囲が大量の海水に囲まれていることから、大規模な熱水活動を伴うことが特徴であり、陸上の火山活動とは全く異なった様相を呈する。2015年11月17日の噴火を最後に、弱い噴気活動だけを残して活動を休止していた西之島の周囲で2016年に海水試料を採取し、海水の組成分析を行った。その結果、すべての海水試料でpHは通常の海水とほぼ等しく、塩化物イオンや硫酸イオンの濃度もほぼ通常の海水と等しくなっていた。これらの観測結果は、火山活動が縮退する過程で徐々に火山体から放出される熱水の量が減っていることを示しており、変色域の縮小と整合的である（東京工業大学〔課題番号：1602〕、海上保安庁〔課題番号：8003〕）。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

(4) 事象系統樹の高度化による火山噴火予測

火山活動の推移を俯瞰的に理解してその予測を目指すためには、史料、考古データ、地質調査、火山噴出物の解析、地球物理観測の研究成果を多角的に取り入れ、可能性のある火山活動や噴火現象を網羅してその時系列を整理した噴火事象系統樹を作成することが重要である。また、作成された噴火事象系統樹も、最新の研究成果により更新されていく必要がある。

一昨年度に緊急的に作成された蔵王山の噴火事象系統樹は、御釜からのテフラ層の噴火推移に関する最新研究成果（山形大学、〔課題番号：2932〕）などを加えて改定された。また浅間山を対象火山とした系統樹作成が進められ、豊富な噴火履歴に基づき、分岐確率を付与した噴火事象系統樹を作成した。また、次年度の作成に向け、阿蘇火山に関する研究集会を開催した（北海道大学〔課題番号：1004〕）。

また富士山では文献調査と既存資料のデータベース化を継続するとともに、富士山北麓市街地に最も近い雁ノ穴火口のトレンチ調査を実施し、割れ目火口の南端と北端を推定するとともに、噴出年代の測定をおこなった。作業を実施した。また、富士山における溶岩の古地磁気方位と既存の古地磁気永年変化を比較した。その結果、AD1707年の宝永噴火やAD1000から1100年にかけては層序とも整合性が認められるが、富士火山地質図とは異なる場合もあり、今後テフラ層序や岩石学的特徴を加えた検討が必要である（山梨県富士山科学研究所、〔課題番号：9202〕）。その他、草津白根火山でのテフラ層序調査と白根火砕丘群噴出物の層序調査と岩石学的解析（富山大学、〔課題番号：2942〕）、過去4万年にわたる摩周火山の詳細な噴火史調査と約7500年前の摩周カルデラ形成における初期の噴火推移（北海道教育大学、〔課題番号：2940〕）に関する研究の成果も、今後両火山における噴火事象系統樹作成に活用されるであろう。

一方、火山活動の活発化や噴火の発生、噴火発生後の噴火規模や様式の急激な変化の予測を行うためには、これまでの火山学的知見や本計画の成果をもとに、観測データの特徴、火山噴出物の解析などから、事象分岐の条件や論理を導き出すことも不可欠である。

気象庁・気象研究所は噴火警戒レベルの判定基準の根拠を明示して公表するため、過去のデータを改めて精査し、注目すべき現象の整理、判定基準のできるだけの具体化、および必要な見直しを進めた。平成27年度に公表した浅間山、御嶽山、桜島に引き続き、伊豆大島、三宅島、箱根山、阿蘇山等で作業を進めた。阿蘇山については、過去データの再精査を行うとともに、2014年からの噴火活動、特に2016年10月の爆発的噴火の先駆現象を整理して基準に具体的に反映させ、12月に公表した（気象庁〔課題番号：7003〕）。東北大学は分岐の確率を例示できる例として、大地震の発生と火山噴火の発生に関連性を全世界のデータをもとに調べた。データが漏れなく記録されていると考えられるマグニチュード7.8の地震の発生後、距離200km以内にある火山の噴火数が5年間にわたり20%ほど増加すること、それ以遠の火山の活動は大地震の発生に影響を受けていないことが明らかとなった。また、桜島火山歴史時代のプリニー式噴火（文明・安永・大正）の噴出物に含まれる斑晶メルト包有物の揮発性成分含有量から最終定置深度を求めたところ、大部分が約0.5～3kmとなることがわかった。軽石

噴火の噴出量は、火道の直径と深さ方向の分布範囲で規定される体積でほぼ賅える。このことから、プリニー式噴火の噴火直前には、浅部の火道にマグマが貫入した状態であったと推定される（東北大学〔課題番号：1208〕）。これは、火山の噴火様式の予測のためには、マグマ貫入レートを正確に決めることが重要であることを示唆する結果である。また、岩石学的な手法により火道内での滞留時間を推定することも重要である。

4. 研究を推進するための体制の整備

(1) 推進体制の整備

観測研究の成果が防災・減災に効果的に役立てられるためには、行政機関等の関連機関との連携の下に、適切な計画推進体制を整備する必要がある。3回の火山噴火予知連絡会定例会を開催し、全国の火山活動の状況についての検討を行った。検討結果は定例会終了後に報道発表し、気象庁の「火山の状況に関する解説情報」で発表するとともに、気象庁のホームページでも公表されている（気象庁〔課題番号：7013〕）。

(2) 研究基盤の開発・整備

ア. 観測基盤の整備

イ. 地震・火山現象のデータベースとデータ流通

ウ. 観測・解析技術の開発

長い時間スケールをもつ火山現象の理解とその予測には、その基盤となる観測網の維持・拡充を進めるとともに、データの継続的取得と膨大なデータの効率的利用が重要である。また、海域における観測体制の強化、各種観測を火口近傍で安全に実施する技術の開発、人工衛星を利用したリアルタイム火山観測システムの高度化、航空機搭載型センサーを用いた観測技術の開発も必要である。

山梨県富士山科学研究所では、火山活動の予兆現象として地下水の変動状態を監視することを目的に、富士北麓の4箇所に観測点を設けて地下水変動の連続観測を継続している〔課題番号：9201〕。防災科学技術研究所（〔課題番号：3003〕）は、熊本地震発生後の火山現象・災害過程の把握のため、阿蘇山周辺に19臨時観測点を整備した。海上保安庁は、海域火山の定期巡回監視と、海域火山基礎情報図調査を「海徳海山」で実施した。また、西之島の上陸調査及び海洋調査を実施した（〔課題番号：8003〕）。

東京大学大学院理学研究科（〔課題番号：1403〕）は、二酸化硫黄簡易型トラバース測定装置の測定プログラムの修正を行ったほか、装置全体のメンテナンスなどを行い、観測を継続してきた。この装置を用いた口永良部島での測定結果は気象庁の火山活動解説資料に採用されており、同島での火山活動の監視に役立てられている。

また、北海道大学（〔課題番号：1008〕）は、Lバンド航空機SARを用いた火山性地殻変動の検出にむけた解析ソフトの改良を重ねた。その結果、H27年度時には干渉が得られなかった画像ペアについて、新たに干渉が得られるようになった。また、軌道間距離が目標値（10m）のおよそ5倍程度に劣化したペアでも、干渉性が獲得できるようになった。防災科学技術研究所（〔課題番号：3005〕）は、地上設置型レーダー干渉計を浅間山に設置し、その初期性能評価を実施し、植生がほとんどない火口周辺においては、30日間のデータペアにおいても地殻変動検出が可能なほどの干渉性が得られることを確認した。また、小型単発機に搭載可能なセンサー：ARTS-SEのカメラ型センサデータの処理手法の開発を実施した。

人工衛星を利用した研究では、東京大学地震研究所が、ひまわり8号のAHI画像およびGCOM-C SGLI画像処理システムの正式運用のためのシステム開発を実施した。また、複数衛星データによるインドネシア・ラウン火山2015年噴火推移を、特に高分解能画像を活用することにより明らかにした（〔課題番号：1520〕）。また、小型絶対重力計網によるマグマ活動等の火山観測手法を確立をめざし、絶対重力計の系統誤差の評価と小型通信帯波長光源（1.5 μ m）による観測を実施した（〔課題番号：1506〕）。また、火山噴火事象の分岐条件や論理の構築のた

めに分岐前に現れる物理量の変化を検出するための機器開発のみならず、宇宙線（ミュオン）を利用した火山浅部透視技術においては桜島におけるミュオグラフィ長期観測点へのカロリメータ方式の導入・観測開始が行われている（[課題番号：1523]）。

(4) 研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

気象庁は火山活動監視・評価の高度化に資するため、傾斜データ等のノイズ軽減、GNSS データ解析の高品位化、だいち2号（ALOS-2）の観測要望 SAR データの解析環境の再構築を実施した（[課題番号：7004]）。

これまでの課題と今後の展望

噴火履歴をもとにした噴火事象系統樹作成は前計画から継続して推進している研究課題である。この従来型の噴火事象系統樹は、地域住民や自治体が火山活動や噴火現象の推移の全体像を把握し適切な判断ができるようにするために必要不可欠であり、今後も噴火履歴データ等の蓄積に応じて、新たな火山での系統樹の作成や既存の系統樹の改訂を進めていくべきである。

一方で、火山噴火の予測のためには、本計画の比較研究などを通して得られた火山学的知見を活用して、事象分岐の条件や論理を明らかにすることも重要である。「火山」計画推進部会では、火山噴火の事象分岐の条件・論理を明らかにし、噴火事象系統樹を高度化することで、発災の原因である火山噴火を予測する（東北大学 [課題番号：1208]）ことを上位目標にすえ、低頻度で大規模な現象を含む火山噴火現象および発生場の解明、噴火のモデル化、観測手法の開発および体制の整備に関する研究等を推進している。

しかしながら、現時点で噴火事象系統樹の一般化や高度化に結びつくような観測結果はまだ少なく、噴火のモデル化にもいたっていないのが実情であろう。今後、事象分岐の条件や論理を明らかにするための研究を推進していくためには、海外を含めた観測事例の豊富な複数の火山で、観測データの特徴や噴出物の解析などを進め、事象分岐基準について議論をさらに進めることが重要である。これには、気象庁が噴火警戒レベルの判定基準の根拠としている観測データの精査が端緒となると思われる。また桜島におけるマグマ貫入速度と噴火規模・様式の関係が他の火山でも成立するか、どの程度の一般性があるかなどを比較研究を通して検討することも今後の課題であろう。その一方で、火道流モデルなどを用い、理論的あるいはシミュレーションによって噴火の予測を行うことも今後は重要となるであろう。

成果リスト

Abe, Y., T. Ohkura, T. Shibutani, K. Hirahara, S. Yoshikawa, H. Inoue, 2017, Low velocity zones in the crust beneath Aso caldera, Kyushu, Japan, derived from receiver function analyses, *Journal of Geophysical Research*, DOI: 10.1002/2016JB013686

Aizawa, K., H. Asaue, K. Koike, S. Takakura, M. Utsugi, H. Inoue, R. Yoshimura, K. Yamazaki, S. Komatsu, M. Uyeshima, T. Koyama, W. Kanda, T. Shiotani, N. Matsushima, M. Hata, T. Yoshinaga, J. Uchida, Y. Tsukashima, A. Shito, S. Fujita, A. Wakabayashi, K. Tsukamoto, T. Matsushima, M. Miyazaki, K. Kondo, K. Takashima, T. Hashimoto, M. Tamura, S. Matsumoto, Y. Yamashita, M. Nakamoto, and H. Shimizu, 2017, Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan. *Earth, Planets and Space*, 69:4, DOI: 10.1186/s40623-016-0590-2.

相澤広記, 2016, 火山電磁気観測の進展, *火山*, 61, 2, 345-365.

新谷昌人, 2016, 光ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 22, 241-243.

- Coussens, M., D. Wall-Palmer, P. J. Talling, S. F. L. Watt, M. Cassidy, M. Jutzeler, T. Gernon, M. Clare, M. R. Palmer, S. Hatter, G. Boudon, D. Endo, A. Fujinawa, R. Hatfield, M. Hornbach, O. Ishizuka, K. Kataoka, A. Le Friant, F. Maeno, M. Manga, M. McCanta, and A. Stinton, 2016, The relationship between eruptive activity, flank collapse, and sea level at volcanic islands: A long-term (>1 Ma) record offshore Montserrat, Lesser Antilles. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 17, doi:10.1002/2015GC006053.
- Furuya, M., K. Fukui, H. Iida, S. Kojima and T. Matsuoka, 2017, Experimental Observations of Two Mountain Glaciers on the Eastern Slope of Mt. Tsurugi by Pi-SAR2 Airborne SAR, *Bulletin of Glaciological Research*, doi: 10.5331/bgr.16R04
- Geshi, N., Iguchi, M. and Shinohara, H., 2016, Phreatomagmatic eruptions of 2014 and 2015 in Kuchinoerabujima Volcano triggered by a shallow intrusion of magma, *Journal of Natural Disaster Science*, 37, 67-78.
- 浜口博之・中道治久・植木貞人, 2016, 1888年磐梯山水蒸気爆発に関するノート(4) 諸大家の誤謬に関する考察, *火山*, 61, 3, 503-518.
- Hasegawa, T., A. Matsumoto, and M. Nakagawa, 2016, Evolution of the 120 ka caldera-forming eruption of Kutcharo volcano, eastern Hokkaido, Japan: Geologic and petrologic evidence for multiple vent systems and rapid generation of pyroclastic flow. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 321, 58-72.
- Hasegawa, T. and M. Nakagawa, 2016, Large scale explosive eruptions of Akan volcano, eastern Hokkaido, Japan: A geological and petrological case study for establishing tephro-stratigraphy and -chronology around a caldera cluster *Quaternary International*, 397, 39-51.
- 長谷川健・中川光弘・宮城磯治, 2017, 北海道東部, アトサヌプリ火山における爆発的噴火履歴の再検討. *地質学雑誌*, 印刷中.
- Hirose, T., H. Nakahara, T. Nishimura, Combined use of repeated active shots and ambient noise to detect temporal changes in seismic velocity: Application to Sakurajima volcano, Japan, *Earth, Planets and Space*, (in press).
- Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T. and Yamamoto, K., Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 310, 12-25, 2016.
- Hotta, K., Iguchi, M. and Tameguri, T., Rapid dike intrusion into Sakurajima volcano on August 15, 2015, as detected by multi-parameter ground deformation observations, *Earth Planets Space*, 68, doi:10.1186/s40623-016-0450-0.
- 石毛康介・中川光弘, 2017, 北海道中央部, 大雪火山群旭岳グループの後期更新世～完新世火山活動史. *地質学雑誌*, 123, 印刷中.
- Kagoshima, T., Y. Sano, N. Takahata, et al., 2016, Spatial and temporal variations of gas geochemistry at Mt. Ontake, Japan. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 325, 179-188.
- 海上保安庁, 2016, 海域火山の最近の活動, 火山噴火予知連絡会会報, 124, 印刷中
- 海上保安庁, 2016, 西之島周辺海域における海洋調査結果, 火山噴火予知連絡会会報, 124
- 海上保安庁, 2016, 西之島における噴火の概況, 火山噴火予知連絡会会報, 124
- 海上保安庁, 2016, 海域火山の最近の活動, 火山噴火予知連絡会会報, 125
- 海上保安庁, 2016, 西之島における噴火の概況, 火山噴火予知連絡会会報, 125
- Kawagucci, S., N. Takahata, Y. Sano, et al., 2016, Fluid chemistry in the Solitaire and Dodo hydrothermal

- fields of the Central Indian Ridge. *Geofluid*, doi:10.1111/gfl.12201.
- Kazahaya, R., Shinohara H., Mori T., Iguchi M., Yokoo A, (2016) Pre-eruptive inflation caused by gas accumulation: Insight from detailed gas flux variation at Sakurajima volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 11, 219-11, 225, doi:10.1002/2016GL070727.
- 火山噴火予知連絡会衛星解析グループ, 2017, 火山活動の評価及び噴火活動の把握に関する共同研究「平成28年度成果報告書
- 木下貴裕・神田径・高倉伸一・関 香織・松永康生, 高密度電気探査による那須火山茶臼岳噴気地帯における比抵抗構造の推定CA研究会論文集, 2016, 78-83.
- 気象研究所, 2017, 伊豆大島の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 123 (印刷中) .
- 気象研究所・気象庁, 2017, 伊豆大島の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 125 (印刷中) .
- 小林知勝, 2016, 数値気象モデルを用いた干渉SARの大気遅延誤差の低減効果について ～2015年桜島マグマ貫入イベントの解析を例に～, 測地学会誌, 62, 79-88.
- Kuritani, T. and M. Nakagawa, 2016, Origin of ultra rear-arc magmatism at Rishiri Volcano, Kuril Arc, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 17, 4032-4050, doi:10.1002/2016GC006594.
- Kuritani, T., M. Tanaka, T. Yokoyama, M. Nakagawa, and A. Matsumoto, 2016, Intensive hydration of the wedge mantle at the Kuril arc-NE Japan arc junction: Implications from mafic lavas from Usu Volcano, northern Japan. *Journal of Petrology*, 57, 1223-1240.
- Maeno, F., S. Nakada, and T. Kaneko, 2016, Morphological evolution of a new volcanic islet sustained by compound lava flows. *Geology*, 44, 259-262, doi:10.1130/G37461.1.
- 松本亜希子・中川光弘・井口正人, 2016, 火山灰中の本質ガラスの石基組織からみる桜島火山2012年7月24日南岳山頂火口噴火—特にマイクロライトの特徴について— *火山*, 61, 545-558.
- Matsuzawa, T. Matsumoto, T. and Tanada, T., 2016, Seismic inversion analysis of the 2014 and 2015 Kuchinoerabujima volcanic eruptions, using F-net broadband seismometers, *Journal of Natural Disaster Science*, 37, 91-103.
- 増渕佳子・石崎泰男・白井智仁・松本亜希子・宮坂瑞徳・中川光弘, 2016, 岩石学的にみた沼沢火山におけるマグマ溜まりの長期的進化とカルデラ形成噴火の準備過程. *地質学雑誌*, 122, 533-550.
- Minami Y., T. Imura, S. Hayashi, and T. Ohba, 2016, Mineralogical study on volcanic ash of the eruption on September 27, 2014 at Ontake volcano, central Japan: correlation with porphyry copper systems, *Earth Planets Space*. 2016, 68:67, DOI 10.1186/s40623-016-0440-2.
- Miyamoto, H., T. Niihara, T. Kuritani, P. Hong, J. Dohm, and S. Sugita, 2016, Cluster analysis on the bulk elemental compositions of Antarctic stony meteorites. *Meteoritics & Planetary Science*, 51, 906-919, DOI: 10.1111/maps.12634.
- Miyaoka, K., and A. Takagi, 2016, Detection of crustal deformation prior to the 2014 Mt. Ontake eruption by the stacking method. *Earth, Planets and Space*, 68:60.
- Mori, T., T. Hashimoto, A. Terada, M. Yoshimoto, R. Kazahaya, H. Shinohara, and R. Tanaka, 2016, Volcanic plume measurements using a UAV for the 2014 Mt. Ontake eruption, *Earth Planets Space*, 68:49, DOI: 10.1186/s40623-016-0418-0.
- Morishita Y., T. Kobayashi, and H. Yarai, 2016, Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068293.
- Nagai, Y., and T. Yokoyama, 2016, Molybdenum isotope analysis by negative thermal ionization mass

- spectrometry (N-TIMS): Effects of oxygen isotopic compositions. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 31, 948-960.
- Nagasaki, S., H. Ishibashi, Y. Suwa, A. Yasuda, N. Hokanishi, T. Ohkura, K. Takemura, 2017, Magma reservoir conditions beneath Tsurumi volcano, SW Japan: evidence from amphibole thermobarometry and seismicity, *LITHOS*, DOI:10.1016/j.lithos.2017.01.011
- Nagorny, V. D., S. Svitlov, and A. Araya, 2016, Improving absolute gravity estimates by the Lp-norm approximation of the ballistic trajectory, *Metrologia*, 53, 754-761.
- Nakada, S., T. Yamamoto, and F. Maeno, 2016, Miocene-Holocene volcanism. In Moreno, T. et al (eds.) "The Geology of Japan," Geological Society of London, 273-308.
- 日本大学, 名古屋大学, 九州大学, 京都大学, 東濃地震科学研究所, 気象庁, 精密水準測量による御嶽山における上下変動 (2015年4月~2016年9月), 火山噴火予知連絡会会報, 125
- Nishimura, T., M. Iguchi, M. Hendrasto, H. Aoyama, T. Yamada, M. Ripepe, R. Genco, 2016, Magnitude-frequency distribution of volcanic explosion earthquakes. *Earth, Planets and Space*, 68:125, DOI: 10.1186/s40623-016-0505-2
- Noguchi, R., A. Hoskuldsson, K. Kurita, 2016, Detailed topographical, distributional, and material analyses of rootless cones in Myvatn, Iceland, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 318, 89-102.
- 荻野 激・高橋 良・岡崎紀俊, 2016, 樽前山火山観測における湧水および地下水の水質調査報告(1998-2015). 北海道地質研究所報告, 88, 49-54.
- 大見士朗, 2016, 飛騨山脈南部脊梁部で発生する地震による震源域近傍での震度について-2014年5月飛騨山脈南部の地震活動の例-, *地震*, 69, 113-118
- 大湊隆雄・金子隆之・小山崇夫・渡邊篤志・神田径・為栗健, 2016, 無人へりによる口永良部島火口周辺域における地震観測点の再構築, *京都大学防災研究所年報*, 59B, 76-83
- Ooki, M., T. Kagoshima, N. Takahata, Y. Sano, et al., 2016, Volatile element isotopes of submarine hydrothermal mineral deposits in the Western Pacific. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, doi:10.1002/2016GC006360.
- Ozawa, T., E. Fujita, and H. Ueda, 2016, Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano, *Earth Planets Space*, 68:186, doi:10.1186/s40623-016-0563-5.
- Prambada, O., Y. Arakawa, K. Ikehata, R. Furukawa, A. Takada, H.E. Wibowo, M. Nakagawa, and M.N. Kartadinata, 2016, Eruptive history of Sundoro volcano, Central Java, Indonesia since 34 ka. *Bull. Volcanol.*, 78, 81, doi: 10.1007/s00445-016-1079-3.
- Razzhigaeva, N. G., A. Matsumoto, and M. Nakagawa, 2016, Age, source and distribution of Holocene tephra in the southern Kurile Islands: Evaluation of Holocene eruptive activities in the southern Kurile arc. *Quaternary International*, 397, 63-78.
- Rouilleau, E., Y. Sano, N. Takahata, et al., 2016, New insight from noble gas and stable isotopes of geothermal/hydrothermal fluids at Cavihue-Copahue Volcanic Complex: Boiling steam separation and water-rock interaction at shallow depth. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 328, 70-83.
- Sakamoto, M., Kuri, M., Iguchi, M., Maki, N., Ichiko, T., Sekiya, N. and Kobayashi, H., 2016, Disaster Governance in Disaster Management Planning-Analysis of the Evacuation Planning Process for Kuchinoerabujima Volcano Eruption-, *Journal of Natural Disaster Science*, 37, 105-117.
- Sano, Y., N. Takahata, T. Kagoshima, et al., 2016, Groundwater helium anomaly reflects strain change

- during the 2016 Kumamoto earthquake in Southwest Japan. *Sci. Rep.* 6, 37939; doi:10.1038/srep37939.
- Savage, M. K., Y. Aoki, K. Unglert, T. Ohkukra, K. Umakoshi, H. Shimizu, M. Iguchi, T. Tameguri, T. Ohminato, J. Mori, 2016, Stress, strain rate and anisotropy in Kyushu, Japan, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 439, 129-142, doi:10.1016/j.epsl.2016.01.005
- Seki K., W. Kanda, T. Tanbo, T. Ohba, Y. Ogawa, S. Takakura, N. Kenj, M. Ushioda, A. Suzuki, Z. Saito, Y. Matsunaga, 2016, Resistivity structure and geochemistry of the Jigokudani Valley hydrothermal system, Mt. Tateyama, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 325, 15-26.
- 鈴木由希, 2016, 噴火時のマグマプロセスを噴出物組織から探る手法—過去10年間の研究進展のレビュー—, *火山*, 61, 367-384.
- Takagi, A. and S. Onizawa, 2016, Shallow pressure sources associated with the 2007 and 2014 phreatic eruptions of Mt. Ontake, Japan. *Earth, Planets and Space*, 68:135.
- 高橋 良・荻野 激・岡崎紀俊, 2016, 北海道駒ヶ岳周辺の温泉水の化学成分と酸素・水素同位体比の特徴とその変化. *北海道地質研究所報告*, 88, 55-60.
- 田村 慎・岡崎紀俊・高橋 良・橋本武志・, 奥田真央・菅野倭大朗・早川美土里・高田将仁・橋本政樹・三嶋 渉, 2017, 十勝岳における電磁気探査—山体横断MT 探査および火口近傍AMT 探査—. *Conductivity Anomaly 研究会2017 年論文集*
- Tanaka, H. L. and Iguchi, M., 2016, Numerical Simulation of Volcanic Ash Plume Dispersal from Kuchinoerabujima on 29 May 2015, *Journal of Natural Disaster Science*, 37, 79-90.
- Tanaka K. M. H., 2016, Visualization of the Internal Structure of Volcanoes with Cosmic-ray Muons, *J. Phys. Soc. Jpn.* 85, 091016.
- 田中 良・橋本武志, 2016, 雌阿寒岳ナカマチネシリ火口の全磁力変化と磁気測量, *北海道大学地球物理学研究報告*, 79, 15-23.
- Tardani, D., N. Takahata, Y. Sano, et al., 2016, Exploring the structural controls on helium, nitrogen and carbon isotope signatures in hydrothermal fluids along an intra-arc fault system. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 184, 193-211.
- Uesawa, S., M. Nakagawa, and A. Umetsu, 2016, Explosive eruptive activity and temporal magmatic changes at Yotei Volcano during the last 50,000 years, southwest Hokkaido, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 27-44.
- Usui Y., Y. Ogawa, K. Aizawa, W. Kanda, T. Hashimoto, T. Koyama, Y. Yamaya, and T. Kagiya, 2016, Three-dimensional resistivity structure of Asama Volcano revealed by data-space magnetotelluric inversion using unstructured tetrahedral elements. *Geophysical Journal International*, 208 (3), 1359-1372. doi: 10.1093/gji/ggw459.
- Wen, H.-Y., Y. Sano, N. Takahata, T. Kagoshima, et al., 2016, Helium and methane sources and fluxes of shallow submarine hydrothermal plumes near the Tokara Islands, Southern Japan. *Sci. Rep.*, 6, 34126; doi: 10.1038/srep34126.
- 山崎明・中橋正樹・角村悟, 2017, 樽前山・吾妻山・御嶽山・霧島山における全磁力観測, *Conductivity Anomaly 研究会2017 年論文集*
- 山里平・石原和弘, 2016, 火山防災・減災の仕組みと防災情報. *地盤工学会誌*, 703, 76-83.
- 山里平, 2016, 火山噴火—そのメカニズムと減災. *気象年鑑* 2016年版, 1-23.
- 山里平, 2016, 噴火警戒レベル. *地質と調査*, 145, 54-57.
- 柳澤妙佳, 2017, 秋田駒ヶ岳火山, 主成層火山形成期のマグマ供給系変遷について. *茨城大学大学院理工学研究*

科修士学位論文.

安井真也・高橋正樹・河田倫明・金丸龍夫, 2016, 草津白根火山の南東麓で見出された埋没岩層なだれ堆積物, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 51, 221-230.

安井真也, 2016, 浅間火山天明噴火(1783年)の噴出物の記載岩石学, 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, 51, 231-255.

Yokoyama, T., Y. Nagai, Y. Hinohara, and T. Mori, (in press) Investigating the influence of nonspectral matrix effects for determination 22 trace elements in rock samples by ICP-QMS. *Geostandards and Geoanalytical Research*.

吉村俊平, 2016, 火山噴火の素過程に関する実験的・理論的研究. *火山*, 61, 605-613.

Yoshimura, S., M. Nakamura, and H. Yurimoto, in press, Presence of carbonate ions in high-SiO₂ rhyolite observed in fluid-melt equilibrium experiments, *Geochemical Journal.*, 51 (in press).

1 (4) 地震先行現象・地震活動評価

「地震先行現象・地震活動評価」計画推進部会長 中谷正生（東京大学地震研究所）

現行計画には地震発生を予測するためのいくつかのアプローチが含まれている。地震先行現象・地震活動評価部会では、種々のモニタリングデータから断層面の滑り・応力等を推定し滑りの物理的予測モデルと対比するための研究、地震発生との因果関係に合意のとれた物理モデルがなくても、経験則として地震発生の予測に役立つ情報があるのかを統計的に吟味する研究、あるいは先行現象と目される事象の地震発生に対する物理的意義を解明するための研究を行っている。

2. 地震・火山現象の予測のための研究

(2) モニタリングによる地震活動予測

活断層周辺の応力状態を推定するために、断層面解を経由せず、観測されたP波初動極性の分布から直接に応力の空間分布を求める、新たな応力インバージョン手法を開発した。空間的に変化する応力場を仮定して生成したシミュレーションデータに対する解析(図1、Iwata, 2016, AGU)では良好な結果を得た(東北大学[課題番号:1206])。いっぽう、南アフリカ大深度鉱山では、震源付近での絶対応力場を実測する試みが進んでいる。今年度は、M3.5地震の震源付近でオーバーコアリングを行うとともに、別に行われた震源貫通掘削コアの楕円度から面内差応力を推定するDCDA解析(Funato and Ito, 2017)を行った。さらに、複数の鉱山で起こったM2.8、3.5、5.5の震源断層付近で多数のボーリングによる応力測定を行うDseis計画(e.g., Ogasawara et al., 2017, Schatzlap Workshop on Induced Seismicity)が2016年8月31日に国際陸上科学掘削計画(ICDP)に採択された(立命館大学[課題番号:2401])。

活断層周辺の断層強度や応力状態を誘発作用の観点から検討することもできる。2016年4月16日の熊本地震では、表面波による誘発地震(動的トリガリング)が非常に広域で発生した(Enescu et al., 2016)。誘発された活動は遠くは北海道の阿寒湖火山にまで及び、これらは数kPa~数10kPaといった小さな動的応力変化で誘発されている。今回誘発地震がおこった地域には、以前の大地震(e.g., 2000年鳥取県西部地震Mj7.3など)によって今回以上の応力擾乱を受けたが地震が誘発されなかったところもある。一つの解釈として、2011年東北地方太平洋沖地震の影響で地震が誘発されやすい環境になっていたことが考えられる(東北大学[課題番号:1206])。

地殻変動のモニタリングデータは、断層滑りの時空間履歴を計算・予測する物理モデルとあわせて地震発生の予測に使うことが原理的に可能であり、ゆっくり滑りイベント(SSE)などの非地震性滑りのモニターを高度化する努力が行なわれている(産業技術総合研究所[課題番号:5007]、気象庁[課題番号:7006])。産総研・防災科研・気象庁の3機関のひずみ・地下水・傾斜データをリアルタイムで共有して南海トラフ周辺地域の短期的SSEを解析するシステムの運用を継続し、2015年11月-2016年10月の短期的SSE39個の断層モデルを決定した(落ら, 2016, 2017)。

パッカーを用いて、産総研北勢観測点の井戸を2016年5月に密閉したところ、地下水圧に対する地殻歪感度が著しく向上し(北川・松本, 2016, 地震学会)、伊勢湾周辺での深部低周波微動活動に同期した水圧変化を捉えることができた。また、GNSSデータから推定した固着・滑り分布の時間変化(Ochi, 2015)と産総研の微動カタログを比較(図2、Ochi and Takeda, 2016, AGU)したところ、スロースリップと微動活動が同期する場所やスロースリップの時期以外でも、固着のゆらぎと微動活動のゆらぎが良く相関することがわかった(産業技術総合研究所[課題番号:5007])。

いっぽう、気象庁では、GNSS日値を用いた解析から、2014年半ばから紀伊水道において長期的SSEが発生し

ていること、時間とともに滑りの中心が東に移動していることを明らかにした。また、2013年から継続している東海地域の長期的SSEについては、ひずみ計データのスタッキング解析からモーメント解放の時間変化を求めた。さらに、新たな長期的SSEのモニタリング手法として、中国地方を領域固定したGEONETのF3解座標値を用い、フィリピン海プレートの沈み込み逆方向の成分について、南海トラフのプレート等深線25km沿いに並べた地点を中心とする一定範囲内の平均を求め、1年の傾斜期間を持つランプ関数との相関を取ることで、南海トラフ沿いの長期的SSEの客観的な時空間分布(図3)を得る手法を開発した。さらに、干渉SAR時系列解析により、室戸岬周辺の面的な定常的地殻変動を解析し、GNSS観測と整合したより詳細な結果が得られることを確認した。また、東北地方太平洋沖地震の余効変動について、GNSS日値を再調査し、新たなパラメータで余効変動を除去したデータを作成した(気象庁 [課題番号: 7006])。

プレート境界におけるSSEは、少くとも近接する固着域への剪断応力を増加させることによって大地震の発生を促進する効果があると期待される。これは固着域の内部もしくは隣接域で発生した地震でも同じことであり、2016年4月に紀伊半島南東沖で発生したようなM6クラスの地震が南海トラフ巨大地震に与える影響について数値モデルを用いて調査し、固着域の応力が高まっているサイクル後期においては、このような地震から短い期間で大地震が誘発されるとの結果を得た(気象庁 [課題番号: 7006]、弘瀬ら, 2016)。また、南海トラフの数値モデルについては、海域におけるGPSから推定された滑り欠損や重力異常分布等を考慮した摩擦パラメータを与えたり、プレート収束速度を見直したりして試行錯誤的に改良を進めている(気象庁 [課題番号: 7006])。いっぽう、大域的な強度の不均質を与えた透明なゲルシートを用いた室内実験(Yamaguchi et al., 2016)で、マーカー粒子の変位分布を追うことによって、固着滑りのサイクルに伴う応力分布の発展を追うことに成功し(図4)、巨大イベント発生に向う応力蓄積の途上で、小地震の活動が大域的な応力を再配分する様子などが観察された(東京大学地震研究所 [課題番号: 1512])。

非地震性滑りをより高い分解能で推定するために、小繰り返し地震の活動度が用いられる。南アフリカCooke 4鉱山内の地質断層上で多数発見されたM-4級のきわめて小さな繰り返し相似地震(Naoi et al., 2015)を14ヵ月間観測したところ、繰り返し地震活動群32群のうち12群についてMwが時間とともに減少する傾向が認められた(図5、山口ら, 2016, JpGU)。アスペリティの摩擦を捉えている可能性がある(東北大学 [課題番号: 1206])。いっぽう、大型試料の二軸剪断試験においては、断層全面が滑る大規模な動的滑りイベント(本震)が何度も繰り返したが、本震に先行した前震には、繰り返し似た位置で発生するものがあり、それらの波形は互いに酷似していた(図6、Tsujiura et al., 2016, AGU)。これらは、断層全面が滑る大規模な動的滑りイベントをはさんで発生しており、前震を発生させるパッチは、そのような大規模イベントによっても損なわれずに存続し続けたことになる(立命館大学 [課題番号: 2402])。

Matched filter法による連続波形からの類似イベントの検出によって、大地震前後のゆっくり滑りを推定する研究は近年めざましい成果をあげている。今年度は、2016年熊本地震シーケンスにおいて、4月14日の前震(Mj6.5)発生以降、地震発生域が時間の経過とともに徐々に拡大する様子を捉えた(図7、Kato et al., 2016)。前震域の拡大は、断層の走向方向に加えて傾斜方向(浅い・深い)にも起きており、4月16日に発生した本震(Mj7.3)の破壊開始点へ向かう動きも見られた。前震域の拡大は、14日の前震を発端としたゆっくり滑り(余効滑り)の伝播によるものと解釈できる。実際、前震発生域の近傍の地殻変動観測点(電子基準点)のデータを分析することで、前震時と同じ方向に地表変位が非定常的に進んだことが確認できた。前震による静的な応力载荷に加えて、ゆっくり滑りによる本震の震源域への応力载荷も進行することで本震の発生が促進されたと考えられる(図8、Kato et al., 2016)。また、昨年度から継続して、2014年長野県北部地震の稠密余震観測網(約150点)のデータ解析を実施し、震源域の北部が南部に比べて地震活動の継続時間が長いことを明瞭に示した。さらに、2016年10月に発生した鳥取県中部の地震の前震活動や2016年4月の三重県南東沖地震にともなう地震活動の時空間変化も明らかにした(東北大学 [課題番号: 1206])。

初期の余震活動中の地震欠測を埋めるために、上記の波形を用いた方法だけではなく統計学的手法も検討されてきた。今年度は、GR則を仮定せずに欠測を埋めるためにバイスケール変換を用いた新手法を提案し、熊本地震の余震系列に適用した(図9、Zhuang et al., 2017)。発生する地震のマグニチュードと発生時刻は独立であるということだけを仮定するこの手法により補充された余震データセットでは、ETASパラメータの最尤推定値が十分に安定しており、また、4月14日Mj6.5前震の余震活動に相対的静穏化が検出された(東北大学 [課題番号: 1206])。この静穏化は、前震のあった日奈久断層の北側の布田川断層付近で確認された、本震1日前からのp値やb値の顕著な増加(東海大学 [課題番号: 2501]、Nanjo and Yoshida, 2016)とも対応しており、前述のゆっくり滑り(Kato et al., 2016)による応力変化を捉えていた可能性がある。

地震の確率予測を実現する基本的な戦略は、ベースとなる地震活動(定常的な地域性、余震活動のような広く認められる時間変化など)を統計モデルで表現し、それに先行現象で得られるゲインを組み込むことである(e.g., 尾形, 2015)。CSEPはベースとなる統計モデルを確立することを主要な目的としており、CSEP-Japanでは本年度も3テストクラス、4テスト領域の合計12のカテゴリーの地震活動予測検証実験を進め(Hirata and Tsuruoka, 2016, StatSei10)、2016年10月には東大地震研において国際研究集会を開催した。All Japanテスト領域について25ラウンドを超える検証実験でのモデルの比較を行い、HISTETAS7PA1205がベストの成績を収めた。また、熊本地震について、HISTETASおよび改良版のRI(図10)を使用して1日予測テストクラスの検証実験を実施した。なお、領域内の地震総数については、大森宇津則を適用して予測に用いることにより、CSEPのN-, S-, M-, L-テストをパスすることを確認した(東京大学地震研究所 [課題番号: 1511])。いっぽうで、大地震発生をベースレートの推定に関して、断層調査・古地震等の資料から推定した地震の繰り返し時間間隔とそのばらつきに基づく方法もよく使われている。1系列3個以上ある中規模の相似地震の系列を対象に、ベイズ統計対数正規分布モデルを用いた事前予測の実験において、2016年2月1日からの1年予測(田中・岡田, 2016)は、拡張ブライスコア0.028と良好な成績を示した(気象庁 [課題番号: 7006])。

(3) 先行現象に基づく地震活動予測

代表的な短期的先行現象である前震について、その群発活動としての特徴から「より大きな地震がおきそうな」可能性を、本震がおこる前にある程度推察できることが明らかになってきた(e.g., Ogata and Katsura, 2012、前田・弘瀬, 2016)。本年度は、2016年熊本地震が発生した地域(九州中部)について、この地域の過去のの前震活動の統計的解析から、本震発生予測に効率的な前震候補抽出のパラメータを求めた。その結果、そのパラメータの条件を満たす地震が発生した場合、前震候補のどれよりも大きくかつM5よりも大きい地震が周辺で12日以内に発生する確率は約7% (=3/43)、本震前に前震が現れる割合は約31% (=4/13)であることなどを明らかにした(気象庁 [課題番号: 7006])。このパラメータを熊本地震の系列に適用すると、4月15日0時3分のMj6.4の地震の発生によってフラグがあがったことになる。また、Lippiello et al. (2012)では、実際の地震カタログにみられる前震活動は、ETAS効果によるみかけの前震(Helmstetter et al., 2003)では説明しきれないことを示し、そのことを利用した新たな事前識別法とETASを組み合わせることでカリフォルニアのM6以上の地震をかなりのピンポイントで予測できたと報告している。そこで、2016年熊本地震を含む日本の内陸地震について予備的な調査を行い、本震以前の地震活動の空間密度は、カリフォルニアの場合と同様に将来の本震の震源を中心として高まっており、その空間範囲の大きさが本震のサイズと相関する傾向を確認した(図11、Nanjo et al., 2016)。熊本地震の場合についていえば、このような活動の集中は、一連の活動の始まりである4月14日のMj6.5前震より前の段階で既に現れていた(公募研究 [課題番号: 2931])。また、茨城沖を対象として、連続データからの自動イベント検出により群発地震と繰り返し地震を検出したところ、大地震の前にはこれらの活動は増加し、地震直前には空間的に広がる前震活動として捉えられた(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

南アフリカ大深度金鉱山でのMw-5までの微小破壊(AE)の観測では、既存断層の厚さ1m以内に密集する面状

クラスター(Naoi et al., 2015)と掘削前線前方の岩盤内に出現する厚さ2、3mの板状クラスター(Moriya et al., 2015)が見いだされている。どちらも20m程度の大きさをもつが、これらについて波形の類似性による検討(図12、山形ら, 2016, 地震学会)を行い、前者はクラスタ全体にわたっての活動が一つの大きな類似波形グループを形成し、後者は1メートル程度の小さなクラスタが多数並んだものであることが見いだされた。これは、前者が既存地質断層面上の微小破壊活動、後者は岩盤中の微小破壊が相互作用で集中化したものであるという解釈(Naoi et al., 2016)と整合的である(東北大学 [課題番号: 1206])。

近年、普通のカタログにはのらないような小さな繰り返し地震からなる直前前震活動(e. g., Bouchon et al., 2011, Doi and Kawakata, 2013)が発見され、本震に直接つながる震源核によるもの(e. g., Tape et al., 2013)である可能性が指摘されている。ごく微小な繰り返し地震を自動検出するための客観的な基準の設定方法を模索していたが、本年度は、各観測点・成分ごとに誤検出率を目安に波形相関値の閾値を定め、複数の観測点・成分で同時に閾値を超えることを判定基準とすることによって、2011年長野県中部の地震(M5.4)前の2年間(微小繰り返し前震は直前14時間に集中)の周囲10km以内の4観測点におけるHi-Net連続データから正しい判定が行えることが確かめられた(Toyomoto et al., 2016, AGU)。そこで、2016年熊本地震に続発した愛媛県北東部の地震(33.946N, 133.691E, 深さ7.7km, M3.1, 2016/04/18 23:19 LT)に関し、これが大地震の前震である可能性を想定し、この地震の波形記録をテンプレートとして、準リアルタイムのモニタリングを1週間ほど実施したが、気象庁一元化震源カタログに記載された2つのM0クラスの地震以外には前震は検出されなかった(立命館大学 [課題番号: 2402])。

大地震に先行する中期的な変化としてよくとりあげられるものに、地震活動の静穏化がある。この現象を系統的に評価するために、北海道からカムチャツカ半島までの千島列島沿いを対象として、長期静穏化(Katsumata, 2016)にもとづく予測マップを客観的に作成する方法を考案し試行した。Z値解析による長期静穏化が10年以上続いたらその周辺の警報を1年間だけONにするという方法で予測マップを作成した(図13)。1993年から2012年までの間で警報分率(ONの領域が予測対象時空間に占める割合)が約15%に対して、期間中におきたMw8.3以上の地震3個すべてが警報ON領域で発生した。これは、確率利得6.7倍、p値は0.3%という好成績になるが、検証対象の地震が3つしかなく予測手法の事後的最適化が容易な例である点を割り引いてみるべきである(東海大学 [課題番号: 2501])。また、1990年から2014年までに発生した世界のMw8.0以上の地震23個について、地震活動の長期的静穏化が先行していたかどうかを調査した。その結果、バックグラウンドの地震活動が極めて低いため静穏化の有無が判断できなかった4例を除く19例について、本震発生前に10年程度以上の長期静穏化が見られた。ただし、これが前兆として統計的に有意であるかの評価はまだ行われていない(東北大学 [課題番号: 1206])。また、2016年熊本地震に関しても、Z値解析とRTM解析を実施し(Nanjo et al., 2016)、いずれの解析でも熊本地震の震源域から九州西方海域にわたる広範囲な静穏化が2014年末ごろから開始していた事が判明した(東海大学 [課題番号: 2501])。ただし、この地域では2015年11月に薩摩半島西方でM7.1の地震も発生していることに注意が必要である。

b値の低下(e. g., Nanjo, 2012)も中期的な先行現象としてとり上げられることが多いものである。熊本地震に関して調査を行った(図14、Nanjo et al., 2016)ところ、時間的な低下傾向はみえなかったが、前震・本震は非常にb値の低い場所から始まったことがわかった(東海大学 [課題番号: 2501])。一般に、地震の破壊過程が階層的に進展すると考えた場合、b値が低いことは一旦始まった破壊が止まりにくいことに対応するという解釈が可能である。世界および東北沖の地震活動と、朔望周期程度で変化する潮汐応力の振幅を比較したところ、振幅が大きいときにはb値が小さくなることがわかった(Ide et al., 2016)。また、階層性のある場を適切にモデル化するために、複数の繰り返し地震グループについて震源再決定を行った。さらに、摩擦法則の不均質性と地震の階層性との対応について二次元シミュレーション(Yabe and Ide, 2016)を行い、コントロール集成的な階層的不均質性によって破壊エネルギーが増大することを示した(東京大学理学系研究科 [課題番

号：1402])。

先行時間の短さと、その強度の本震規模への依存性、出現率の高さから、本震破壊の開始への密接な関与が推察される現象のひとつに、M8クラス巨大地震に一時間程度先行する電離層全電子数(GNSS-TEC)の変化がある。この異常の強度は背景TECと地震規模に依存 (Heki and Enomoto, 2015) し、 $M_w > 8.2$ の地震では、相応した強度の異常がみられている。今年度は、32個の $M_w 7.0-8.0$ の地震前後のGNSS-TECを解析(He and Heki, 査読中)し、この程度の M_w では観測可能な大きさのTEC異常は生じないのが普通だが、例外的に背景TECが大きい場合(低緯度地域の昼間等)には、直前の異常が観測される場合があった。また、メカニズム解明の手掛かりとして、GNSS局の配置が良かったチリの2010年Maule ($M_w 8.8$)、2014 Iquique ($M_w 8.2$)、2015 Illapel ($M_w 8.3$)地震において、直前に生じた電離圏の異常の空間分布を調べた(図15、He and Heki, 2016)。それぞれ M_w に応じた空間的広がりを持つ異常が、 M_w に応じた先行時間をもって、 M_w に応じた強さであられることを確認した。特にGNSS局の分布が良い2015年地震に関して三次元トモグラフィーを行った結果、磁場に沿って低高度に正の異常が、高高度に負の異常が並んで生じる構造を見出した。地表に生じた正電荷への応答として電離圏で生じる電子の再配置によりTEC異常が生じるという解釈(e. g., Kuo et al., 2014)も可能であろう(東海大学 [課題番号：2501])。

また、これとは別の現象として、GIM-TECのデータベースを用いた解析で、M6やM7の地震の1-5日の前に電子密度の正の異常が現われやすい傾向が統計的に有意であることが世界各地で示されている(e. g., Le et al., 2011, Kon et al., 2011, Hattori et al., 2016, EMSEV)が、東北地方太平洋沖地震の3日前のケースを含むいくつかの事例の三次元トモグラフィー(廣岡ら, 2016)では、高度250km程度に電子密度の減少領域が、さらに上空に増加の領域がみられた(東海大学 [課題番号：2501])。

DEMETER衛星で観測されたVLF電磁波強度の減少が $M > 4.8$ 地震の直前4時間に現われやすい傾向が統計的に有意だと報告されている(Nemec et al., 2008, 2009, Pista et al., 2013)。本年度は、統計処理の変更を含む独立な検証を行い(新田ら, 2016, 地震予知学会)、この傾向がやはり有意であるとの結論を得た。さらに、地震に先行した変動がみられた衛星軌道の電場データをスタックすると震央最接近の時刻で平均強度が減少することを見出した(図16、Togo et al., 2016)。さらに、メカニズムの解明のために、雷によって発せられたホイスラー波強度を分析したところ、伝搬経路が地震の震央付近を通る場合には強い吸収を受けることを見出した(Nitta et al., 2016)。伝搬経路シミュレーションからは、そのような吸収がおこるのは高度90-200kmの電離圏下部で数十パーセント電子密度が増加した場合であることが示唆される(公募研究[課題番号:2943])。

北海道大学は九州大学と共同して島原市礪石原におけるVHF帯電波伝播異常の観測を行っている。2016年の熊本地震シーケンスは、4月14日21時26分の $M_j 6.5$ の地震から始まったが、4月14日の朝に、伝播経路に熊本地震の震源域を挟む宮崎放送局からの見通し外伝播が観測されていた。そこで、異常伝播と地震発生の関連の統計的有意性を検討するために、2015年1月1日から2016年11月30日までの島原-宮崎間のデータを網羅的に調査したが、統計的有意といえるような相関はみつけられなかった(東海大学 [課題番号：2501]、Morita et al., 2016, AGU)。いっぽう、本計画で新規開発したVLF帯パルス電磁波観測装置が、熊本地震発生当時、静岡(東海大)、国分寺(学芸大)、金沢(金沢大)の三点で稼働しており、静岡および国分寺では、熊本地震シーケンスの開始(2016年4月14日21時26分の $M_j 6.5$)以前の数日間において、空電の発生していない時間に震央方向から到来する電磁波が何度も観測された(図17、Nagao et al., 2016, EMSEV)。網羅的な解析ができるように、信号到来時刻の自動読み取りアルゴリズムの実装を開始している(東海大学 [課題番号：2501])。

三陸地方では、1933年の大地震時に数ヶ月ほど先行して多くの井戸で水位低下と混濁がみとめられている(吉村, 2004)。三陸地方の研究目的でない井戸に2011年東北地方太平洋沖地震前後の変動がなかったかを調査しており(公募研究 [課題番号：2930])、昨年度までに調査した宮城県石巻市から岩手県山田町までの65カ所のうち4カ所に先行変化があった(織原・鴨川, 2016)。今年度は岩手県の北部の5カ所での聞きとり調査をした

が、変化はなかった。また、青森県八戸市の所収する8本の井戸の月次データにも異常はみつからなかった。また、2016年熊本地震の発生をうけて、熊本市が公開している日次データ(深井戸16本、浅井戸8本、震源から約10km以内)を精査したが地震の先行変化といえそうなものはなかった(公募研究[課題番号:2930]、織原ら、2016,地震学会)。また、産総研は台湾・国立成功大学との共同研究の一環として、水文学的・地球化学的手法による地震予知研究についての日台国際ワークショップを開催した(産業技術総合研究所[課題番号:5007]、Matsumoto and Shieh eds., 2016)。

大気中ラドン濃度には、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震に短期的に先行した例を含め、地殻活動と関連した変化が指摘されている。大気中ラドン濃度は、一般に放射線管理施設の排気監視モニタデータにバックグラウンドとして計測されており、日本全国の医薬系の施設を中心にデータ収集のネットワークを構築し、そのデータを解析している(東北大学[課題番号:1207])。本年度は、季節変化と長期トレンド除去後の福島県立医科大学データの積算値が、2008年以降東北地方太平洋沖地震まで臨界現象モデルで知られる対数周期振動を示し、べき的に増加していたことが確認された(図18)。同地震では、地震活動の積算ベニオフ歪に関しても同様の傾向(Xue et al., 2012)が報告されている。また、昨年度から試行を始めた部分空間法による異常検出(岩田ら、2016, JpGU)を札幌医科大学・福島県立医科大学のデータに適用し、周辺の地震活動と比較した(図19, Iwata et al., 2016, 5th International Geo-Hazard Research Symposium)。従来の残差法で大きな異常のあった時期以外にも異常が検出され、こういった異常も周辺地域の地震活動と関連している可能性がある。

これまでの課題と今後の展望

本年度までに、電磁気現象や地震活動のデータから、統計的に有意なゲインをもって地震発生の確率が上昇していると判断できるような現象がいくつも確認された。近年は、本計画以外の研究からも、先行時間が数時間から数年以上まで様々な先行現象の統計的有意性が確認されている(中谷, 2017, シンポジウム「南海トラフ巨大地震の予測に向けた観測と研究」)。ある程度の事前識別が可能になってきた短期的な前震活動を除けば、多くの先行現象の確率ゲインは低い(2-20倍)が、個々の現象の現われ方について、定量的な経験則を作っておけば、多項目の事象の重ねあわせによるゲインの掛け算(宇津, 1979)に用いることによって、生活の参考になりかねないほど高い地震発生確率が予測されること(Ogata, 2016, AGU)もある。また、短期的な前震活動では、それだけでもかなりの高い確率がでる場合があり、社会への情報発信について考え始める必要があるかもしれない。

いっぽうで、経験則として予測能力を示す先行現象があったということは、それが可能なような準備過程(あるいはトリガとなる事象)が地震に先行したということである。空振り警報が多くゲインの低い先行現象でも、地震の前にその現象が生じる割合(≒予知率-警報分率)としては、数割を超えるものが珍しくなく、特殊なおこり方をした地震に伴う例外的な現象だと片付けられるものでもない。逆に、先行現象をてがかりに地震の準備過程をよりよく理解することができれば、準備過程をもっと上手に捉えるための戦略もうまれるだろう。大きな前震に誘起されたゆっくり滑りが本震をトリガした、と考えて様々な先行現象が説明できるような「わけのわかった気になれる」ケースもあるが、統計的な有意性が示された先行現象の多くはメカニズムがほとんどわかっておらず、これは、地震の準備過程に対して我々が知っていることが、まだほんの一部であるということを意味する。先行現象について、観測エンドからソースへ一歩ずつ近づいていくようなアプローチは、巨大地震の地震直前(1時間以内)にほぼ100%おこり、振幅が地震サイズを予見するTEC変動などの最近発見された重要現象についても成果が得られはじめたが、十中八九地下のプロセスであるに違いない地震発生の準備過程(あるいはトリガ要因)との結びつきとなると、有力な仮説すらないというのが現状だろう。異常のソースに近い地表での観測が、今後大きな進歩の手掛かりになる可能性はあるが、こんなに

明瞭な相関をもつものがいまごろまで見つからなかった理由は、巨大地震で統計的有意性が議論できる程度の検証例数を地震カタログの存在する程度の時間で稼げるグローバルで高密度な電磁気観測がGNSS以前にはなかったからだと考えられる。つまり、問題は、グローバルに敷き詰めた地表(あるいは地下)での電磁気観測のコストが、期待される地震発生子測能力の改善に見合うものであるかということに帰結する。まあ、しかし、本計画のような予算的には小規模な研究計画の範疇でものを考えるのであれば、例えばM5級の地震でも、地表でみれば観測可能な振幅の異常が現われるかもしれないと期待して、とりあえず予算の許す範囲で実現できる地表観測を試みるというくらいが唯一可能な取り組みかもしれない。

他方、物理的にあってもよさそうだと定性的には思えるタイプの先行現象候補には、統計的有意性が確認されていないものが多い。プレート境界のSSEや定常的滑り遅れの空間分布などのモニタリング能力の向上には目を見はるものがあるが、今後は、それらの現象が、経験則として統計的に有意な予測能力があるかを検討できるような事例の集め方を目指す必要があるだろう。三陸沖のゆっくり滑り(Uchida et al., 2016)などは、既に十分な事例が集まった例である。また、経験の事例数が集められない事象については、今年度、南海トラフでの中規模地震による巨大地震誘発効果を検討したような数値シミュレーションを用いることも方策であろう。このような状況で、新たに統計的有意性が示されたb値の潮汐応力に対する依存性が、破壊サイズの予見性に本質的な役割を果たすと思われる地震破壊の階層間の確率的進展仮説(Ide and Aochi, 2005)と結びつけられそうなことなどは、今後の画期的な進展の端緒を開きそうである。

成果リスト

- Chu, A., and J. Zhuang, 2016, Multiple Linear Regression Analyses on the Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. In *Rock Anisotropy, Fracture and Earthquake Assessment*, edited by Y.-G. Li., 219-237.
- Enescu, B., Shimojo, K., Opris, A., and Y. Yagi, 2016, Remote triggering of seismicity at Japanese volcanoes following the 2016 M7.3 Kumamoto earthquake, *Earth, Planets and Space*, 68:165, doi: 10.1186/s40623-016-0539-5.
- Funato, A., T. Ito, 2017. A new method of diametrical core deformation analysis for in-situ stress measurements, *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, 91, 112-118.
- Goto, M., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Omori, Y., Ihara, H., Mukai, T., 2017 in press, Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and the after 2011 northern Wakayama Earthquake (Mj 5.5). *Radiation Protection Dosimetry*. DOI:10.1093/rpd/ncw142.
- Han, P., K. Hattori, J. Zhuang, C.-H. Chen, J. -Y. Liu, and S. Yoshida, 2016, Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram. *Geophysical Journal International*, 208: 482-490. doi: 10.1093/gji/ggw404.
- Hattori, K., Han, P., Hirooka, S., Liu, J.-Y., 2016, Assessment of Ionospheric precursory signatures before large earthquakes over Japan area, *Int' l 2016 EMSEV Workshop*, Aug. 25-29, Lanzhou, China.
- He, L. and K. Heki, 2016, Three-dimensional distribution of ionospheric anomalies prior to three large earthquakes in Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7287-7293, doi:10.1002/2016GL069863.
- Heidarzadeh, M., T. Harada, K. Satake, T. Ishibe, A.R. Gusman, 2016, Comparative study of two tsunamigenic earthquakes in the Solomon Islands: 2015 Mw 7.0 normal-fault and 2013 Santa Cruz Mw 8.0 megathrust earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL068601.
- Hirata, N. and H. Tsuruoka, 2017, CSEP-Japan earthquake predictability experiment and testing results,

- Abstract of the 10th International Workshop on Statistical Seismology (StatSei10) in Wellington.
- 廣岡伸治・市川 卓・服部克巳・韓 鵬・吉野千恵・劉 正彦, 2016, 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)に先行する電離圏異常の時空間分布, 電気気学会論文誌基礎・材料・共通部門誌, 136, 265-271, DOI: 10.1541/ieeefms.136.265.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・藤田健一, 2016, 三重県南東沖の地震(2016年4月1日, M6.5)による南海トラフ大地震に対する影響, 地震予知連絡会会報, 96, 311-316.
- Huang, Y. L., S.Y. Zhou, and J.C. Zhuang, 2016, Numerical tests on catalog-based methods to estimate magnitude of completeness (in Chinese with English abstract). Chinese Journal of Geophysics. 59:1350-1358. doi:10.6038/cjg20160416.
- Ide, S., S. Yabe, and Y. Tanaka, 2016, Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size-frequency statistics, Nature Geoscience, 9, 834-837.
- 今西和俊・小笠原宏・矢部康男・堀内茂木・大久保慎人・村上 理, 2016, 南アフリカ金鉱山の地震観測網による2014年オークニー地震の余震分布と発震機構解, 日本地球惑星科学連合2016大会, SSS27-17, 千葉, 2016年5月26日.
- Ishida, A, Ogasawara, H snr, Ogasawara, H jnr, Uchiura, T, Durrheim, R, Milev, A, Okubo, M, Yamaguchi, T, and SATREPS, 2016, Searching for the significant displacement zone of the 2014 Orkney earthquake fault with strain data and Map3Di for targeting scientific drilling, 35th Ing. Geol. Congr., T8. P1, Paper No.3772, 29 Aug 2016, Cape Town.
- Iwata, D., Nagahama, H., Muto, J., Yasuoka, Y., 2016, Anomalous atmospheric radon concentration related to earthquakes :Anomaly detection by singular spectrum transformation”, 5th International Geo-Hazard Research Symposium, Taipei, Taiwan, October, 2016; Prof. Tsanyao Frank Yang Young Scientist Award (Poster presentation).
- 岩田大地・長濱裕幸・武藤 潤・安岡由美, 2016, 特異スペクトル変換法を利用した大気中ラドン濃度異常変動解析, 日本地球惑星科学連合連合大会2016年大会, 2016年5月22日.
- 岩田大地・長濱裕幸・武藤 潤・安岡由美, 2016, 特異スペクトル変換法を利用した大気中ラドン濃度異常の検出, データ駆動科学イノベーション共創ワークショップ, 東京大学地震研究所, 2016年9月.
- 岩田大地・長濱裕幸・武藤 潤・安岡由美, 2016, 特異スペクトル 変換法を利用した大気中ラドン濃度異常検知と地震活動, 日本地質学会第123年学術大会, 東京都世田谷区桜上水, 日本大学文理学部キャンパス, 2016年9月.
- Iwata, T., 2016, A Bayesian approach to estimate a spatial stress pattern from P-wave first motion polarities, AGU fall meeting 2016 abstract, San Francisco, USA.
- Ishibe, T., Y. Ogata, H. Tsuruoka, and K. Satake, 2016, Correlation between static Coulomb stress changes imparted by three megathrust earthquakes and post-seismicity revealed from abundant focal mechanism solutions, Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2016, July 31- August 5, China National Convention Centre, Beijing, China.
- 石原万己・南 のどか・新井友里愛・安岡由美・長濱裕幸・武藤 潤・飯本武志・大森康孝・床次眞司・向高 弘, 2016, 連続測定におけるラドン濃度測定器の比較, 日本保健物理学会第49回研究発表会発表, 2016年6月30日.
- Kasahara, A., Yagi, Y., and B. Enescu, 2016, etas_solve: A robust program to estimate the ETAS model parameters, Seismol. Res. Lett., 87(5), 1143-1149, doi: 10.1785/0220150240.
- Kato, A., J. Fukuda, T. Kumazawa and S. Nakagawa, 2016, Accelerated nucleation of the 2014 Iquique,

- Chile Mw 8.2 Earthquake, *Scientific Reports*, 6, 24792, doi: 10.1038/srep24792.
- Kato, A., J. Fukuda, S. Nakagawa and K. Obara, 2016, Foreshock migration preceding the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1002/2016GL070079.
- Kato, A., K. Nakamura, and Y. Hiyama, 2016, The 2016 Kumamoto earthquake sequence, *Proc. Jpn. Acad. Ser. B*, doi:10.2183/pjab.92.359.
- Katsumata, K., 2016, Long-term seismic quiescences and great earthquakes in and around the Japan subduction zone between 1975 and 2012, *Pure and Applied Geophysics*, doi:0.1007/s00024-016-1415-8.
- Kawakata, H., Hidehiro Inaba, 2016, Development of a New Piezoelectric Transducer Usable as a Seismograph, *Progress in Acoustic Emission*, XVIII, 355-358.
- 木口 努・松本則夫・北川有一・板場智史・落 唯史・佐藤 努・武田直人, 2016, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2015年11月~2016年4月) (53), *地震予知連絡会会報*, 96, 271-277.
- 木口 努・松本則夫・北川有一・板場智史・落 唯史・佐藤 努・武田直人, 2017, 東海・関東・伊豆地域における地下水等観測結果(2016年5月~2016年10月) (54), *地震予知連絡会会報*, 97, 印刷中.
- 気象庁・気象研究所, 2016, 平成28年(2016年)熊本地震, *地震予知連絡会会報*, 96, 492-556.
- 気象研究所, 2016, 海溝と直交する方向の全国の基線長変化, *地震予知連絡会会報*, 96, 30-36.
- 気象研究所, 2016, 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測, *地震予知連絡会会報*, 96, 333-336.
- Kitagawa., Y and Y. Kano, 2016, Changes in permeability of the Nojima fault damage zone inferred from repeated water injection experiments, *Earth, Planets Space*, 68:185
- 北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落 唯史・木口 努, 2016, 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2015年11月~2016年4月), *地震予知連絡会会報*, 96, 345-358.
- 北川有一・板場智史・武田直人・松本則夫・落 唯史・木口 努, 2017, 紀伊半島~四国の歪・傾斜・地下水観測結果(2016年5月~2016年10月), *地震予知連絡会会報*, 97, 印刷中.
- 北川有一・松本則夫, 2016, 井戸密閉化による地下水位の地殻歪応答の改善-北勢観測点の場合-, *日本地震学会2016年秋季大会*, S13-01.
- 小林昭夫・弘瀬冬樹, 2016, 千葉県北部の地震活動と同期した非地震性すべり, *地震*, 69, 1-9.
- Luo, J. and J. Zhuang, 2016, Three regimes of the distribution of the largest event in the critical ETAS model. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 106(3), 1364-1369. doi:10.1785/0120150324.
- 前田憲二・弘瀬冬樹, 2016, 群発的地震活動を前震活動と仮定して行う本震の発生予測手法:最近の活動事例による検証, *地震予知連絡会会報*, 96, 476-480.
- 松本則夫, 2016, 南海トラフ地震の中短期予測をめざして, *地震ジャーナル*, 62, 8-12.
- Matsumoto N. and C.-L. Shieh eds., 2016, *Proceedings of the 15th Taiwan-Japan International Workshop on Hydrological and Geochemical Research for Earthquake Prediction*, <https://unit.aist.go.jp/ievg/tectonohydr-rg/topics/workshop/2016/15thProceeding.pdf>
- Mildon, Z., S. Toda, J. P. Faure Walker, and G. P. Roberts, 2016, Reassessing all models of Coulomb stress transfer - is variable fault geometry important? Accepted by *Geophys. Res. Lett.*
- 南 隆太郎・直井 誠・石田 毅・中谷正生・五十嵐俊博, 矢部康男・南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 2016, 南アフリカMponeng金鉱山地表下3.3kmで発生したMw 2地震の余震中のRepeating Earthquake, *資源・素材学会 第13回若手研究者・学生のための研究発表会*, キャンパスプラザ京都, 2016年12月9日.

- 森田 笙・中谷正生・茂木 透, 2016, 簡単な客観手法で作成した予測マップによるVHF電波伝播異常と地震発生の相関, JpGU meeting, 2016年5月.
- Morita, S., M. Nakatani, T. Mogi, 2016, Correlation between earthquake occurrence and the anomalous propagation of VHF radio waves indicated by the gain and the p-value of prediction maps produced by a simple objective algorithm at the Shimabara area, Kyushu, Japan, AGU fall meeting, San Francisco, 2016年12月.
- Nagao, T., J. Izutsu and M. Kamogawa, 2016, High-sampling electromagnetic waveform detection system in VLF range, Int' l 2016 EMSEV Workshop, Aug. 25-29, Lanzhou, China.
- 中谷正生, 2016, 巨大地震の前兆現象, シンポジウム「南海トラフ巨大地震の予測に向けた観測と研究」, 東京, 2016年9月30日.
- Naoi, M., M. Nakatani, H. Moriya, and Y. Yabe, 2016, Acoustic emission monitoring for mitigating seismic risks in deep gold mines in South Africa, International Journal of the JSRM, 12, 19-22.
- Nanjo, K. Z., and A. Yoshida, 2017, Anomalous decrease in relatively large shocks and increase in the p and b values preceding the April 16, 2016, M7.3 earthquake in Kumamoto, Japan, Earth, Planets and Space. 69:13, DOI: 10.1186/s40623-017-0598-2.
- Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, N. Furuse, S. Togo, H. Nitta, T. Okada, R. Tanaka, M. Kamogawa and T. Nagao, 2016, Seismicity prior to the 2016 Kumamoto earthquakes, Earth, Planets and Space, 68:18, DOI 10.1186/s40623-016-0558-2.
- Nitta, H., S. Togo, T. Kodama and M. Kamogawa, 2016, Physical mechanism of pre-seismic VLF intensity decrease observed by DEMETER satellite, In Proceedings of the CSES workshop, China, 23 August 2016.
- 新田英智・東郷翔帆・鴨川 仁・児玉哲哉・長尾年恭, 2016, DEMETER衛星のVLF帯電場データによる地震先行電離圏擾乱の統計的研究, 地震予知学会 第3回学術講演会, 2016年12月22日.
- 新田英智・東郷翔帆・Jean-Jacques Berthelier・児玉哲哉・長尾年恭・鴨川 仁, 2016, DEMETER衛星の連続サンプリング VLF帯データを用いた地震先行電離圏擾乱の統計的研究, 大気電気学会第95回研究発表会, 2017年1月17日.
- Ochi, T. and N. Takeda, 2016, Coupling and tremor rate in the transition zone around the Shikoku region, southwestern Japan, 2016 AGU Fall Meeting, S33A-2822.
- 落 唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・武田直人・木口 努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2016, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント(2015年11月~2016年4月), 地震予知連絡会会報, 96, 255-270.
- 落 唯史・板場智史・松本則夫・北川有一・武田直人・木口 努・木村尚紀・木村武志・松澤孝紀・汐見勝彦, 2017, 東海・紀伊半島・四国における短期的スロースリップイベント(2016年5月~2016年10月), 地震予知連絡会会報, 97, 印刷中.
- Ogasawara, H., R. Durrheim, Y. Yabe, T. Ito, G. van Aswegen, A. Cichowicz, T. Onstott, T. Kieft, M. Boettcher, S. Wiemer, M. Ziegler, C. Janssen, S. Shapiro, H. Gupta, P. Dight, and the ICDP DSeis Team, 2016, Drilling into seismogenic zones of M2.0 - M5.5 earthquakes in deep South African gold mines (DSeis), EGU Geophysical Research Abstracts, vol. 18, EGU2016-2057-4.
- Ogasawara, H., Y. Yabe, T. Ito, G. van Aswegen, A. Cichowicz, R. Durrheim, T.C. Onstott, T. Kieft, A. Ishida, H.Y. Ogasawara, T. Yasutomi, A. Funato, K. Imanishi, M. Okubo, M. Boettcher, P. Moyer, W. Ellsworth, M. Ziegler, S. Wiemer, C. Janssen, S. Shapiro, H. Gupta, P. Dight, N. Wechsler, A.K.

- Ward, B. Liebenberg, Y. Mukuhira, S.N. Somala, J.P. Hunt, S. Bucibo, N. Berset, R. Harris, E.D. Cason, 2017, Drilling to probe quasi-static and dynamic seismic ruptures in deep South African gold mines, Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, 14-17 March 2017, Switzerland.
- Ogasawara, HY., H. Ogasawara, M. Okubo, A. Cichowicz, D. Birch, S. Horiuchi, T. Utiura, A. Ishida, SATREPS, 2016, The 2014 Orkney M5.5: location of initial and main rupture origins and high energy sources, 35th Int. Geol. Congr., T8.P1, Paper No. 3937, 29 Aug 2016, Cape Town.
- 小笠原宏・矢部康男・伊藤高敏・ワークショップ参加者, 2016, 南アフリカ金鉱山M2-5.5地震発生場掘削ICDPワークショップ報告, J-DESCニュースレター, No. 9, 14.
- Okubo, M., A. Cichowicz, D. Birch, H. Ogasawara, O. Murakami, S. Horiuchi, 2016, Source Process of the 2014 ML5.5 Orkney earthquake, South Africa, Asian Seismological Commission General Assembly, Friday, 25 November 2016, Paper 20, Melbourne.
- Omi, T., Ogata, Y., Shiomi, K., Enescu, B., Sawazaki, K., and K. Aihara, 2016, Automatic aftershock forecasting: A test using real-time seismicity data in Japan, Bull. Seismol. Soc. Am., 10.1785/0120160100.
- 大澤祐輝・本島邦行・羽賀 望, 2016, 複数の観測点における見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震の関連解析, 日本地震予知学会, 第3回学術講演会予稿集, 49-52, 調布市, 2016年12月.
- 織原義明・鴨川 仁, 2016, 三陸地方における東北地方太平洋沖地震前の井戸水異常の調査 - 岩手県山田町から宮城県石巻市にかけて -, 地震2輯, 69, 31-34.
- 織原義明・鴨川 仁・長尾年恭, 2016, 熊本市が公開する地下水位データにみる2016年熊本地震の先行現象に関する考察, 日本地震学会講演予稿集2016年度秋季大会, S14-11.
- Reverso, T., Marsan, D., Helmstetter, A., and B. Enescu, 2016, Background seismicity in Boso Peninsula, Japan: Long-term acceleration, and relationship with slow slip events, Geophys. Res. Lett., 43, 5671-5679, doi:10.1002/2016GL068524., 43, 11, 5671.
- 田中昌之・岡田正実, 2016, 中規模繰り返し相似地震の発生状況と発生確率(2016), 地震予知連絡会会報, 96, 456-461.
- Tanaka, A., Minami, N., Yasuoka, Y., Iimoto, T., Omori, Y., Nagahama, H., Muto, J., Mukai, T. 2017. Accurate measurement of indoor radon concentration using a low-volume radon monitor. Radiat. Prot. Dosimetry (in press), DOI: 10.1093/rpd/ncx050.
- 谷川廣祐・本島邦行・羽賀 望, 2016, 見通し内VHF帯放送波の伝搬異常と地震及び地表面平均風速の統計的関連性, 日本地震予知学会, 第3回学術講演会予稿集, 45-48, 調布市, 2016年12月.
- Togo S. and M. Kamogawa, 2016, Ionospheric earthquake precursors on satellite measurement: physical features and predictability, In Proceedings of the International Workshop Earthquake Precursor, Taiwan, 16 May 2016.
- Tormann, T., Wiemer, S., Enescu, B., and J. Woessner, 2016, Normalized rupture potential for small and large earthquakes along the Pacific Plate off Japan, Geophys. Res. Lett., 43, 7468-7477, doi:10.1002/2016GL069309.
- Tormann, T., Enescu, B., Woessner, J., and S. Wiemer, 2016, Reply to 'Tohoku rupture reloaded?', Nature Geoscience, 9, 183-185, doi:10.1038/ngeo2650.
- Toyomoto, Y., H. Kawakata, S. Hirano, I. Doi, 2016, Foreshock search over a long duration using a method of setting appropriate criteria, AGU Fall Meeting 2016, MR41B-2702.
- 豊本 大・川方裕則・平野史朗・土井一生, 2016, 相互相関を用いた地震波形解析の検出基準の設定, 日本地

- 球惑星科学連合連合大会 2016 年大会, SSS30-P08.
- 豊本 大・川方裕則・平野史朗・土井一生, 2016, 前震検出のための適切な基準の設定方法 ~2011年6月30日長野県中部M5.4の地震を例に, 日本地震学会2016年度秋季大会, S09-P14.
- Tsujimura, Y., H. Kawakata, E. Fukuyama, F. Yamashita, S. Xu, K. Mizoguchi, S. Takizawa, 2016, Spatio-temporal foreshock activity during stick-slip experiments of large rock samples, AGU Fall Meeting 2016, S21B-2697.
- 辻村優志・川方裕則・福山英一・山下 太・徐世慶・溝口一生・滝沢 茂・平野史朗, 2016, 大型岩石試料のスティックスリップ試験中に発生した前震活動, 日本地球惑星科学連合連合大会 2016年大会, SSS27-P22.
- Wang, T., Zhuang, J., Obara, K. and Tsuruoka, H., 2016, Hidden Markov modelling of sparse time series from non-volcanic tremor observations. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C.* doi:10.1111/rssc.12194.
- Yabe, S., and S. Ide, 2016, Slip-behavior transitions of a heterogeneous linear fault, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, doi:10.1002/2016JB013132.
- Yagi, Y., Okuwaki, R., Enescu, B., Kasahara, A., Miyakawa, A., and M. Otsubo, 2016, Rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake in relation to the thermal structure around Aso volcano, *Earth Planets Space*, 68:118, doi:10.1186/s40623-016-0492-3.
- 山形直毅・直井 誠・中谷正生・森谷祐一・大槻憲四郎, T. Kgarume, J. Philipp, 村上理, T. Masakale, L. Ribeiro, 矢部康男・川方裕則, A. Ward, 石田毅, Ray Durrheim, 小笠原宏, 2016, 南アフリカCooke 4金鉱山地下1kmの切羽沿いに密集する微小破壊の空間分布詳細構造, 日本地震学会秋季大会, 名古屋国際会議場, 2016年10月6日.
- 山口純弥・直井 誠・石田 毅・中谷正生・五十嵐俊博・村上 理・森谷祐一・矢部康男・大槻憲四郎, Thabang Kgarume, Ray Durrheim, Thabang Masakale, Anthony Ward, 川方裕則・小笠原宏, 南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 2016, 南アフリカ大深度金鉱山の地質断層上で観測されたRepeating Earthquakeの活動の時空間変化, 資源・素材学会 第13回若手研究者・学生のための研究発表会, キャンパスプラザ京都, 2016年12月9日.
- 山口純弥・直井 誠・中谷正生・森谷祐一・五十嵐俊博, T. Kgarume, 村上 理, T. Masakale, 矢部康男・大槻憲四郎・川方裕則・石田 毅, A. Ward, R. Durrheim, 小笠原宏・南アフリカ金鉱山半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 2016, 南アフリカ大深度金鉱山の地質断層上で観測されたRepeating Earthquakeの出現と消失, 地球惑星連合大会, SSS27-03, 幕張メッセ, 2016年5月25日.
- Yamaguchi, T., Y. Sawae, S. M. Rubinstein, 2016, Effects of loading angles on stick-slip dynamics of soft sliders, *Extreme Mechanics Letters*, 9, 331-335.
- Yamashita, F., E. Fukuyama, S. Xu, H. Kawakata, K. Mizoguchi, S. Takizawa, 2016, Influence of fault surface conditions on foreshock activity in large-scale biaxial friction experiment, AGU Fall Meeting 2016, S21B-2698.
- 山下 太・福山英一・徐 世慶・川方裕則・溝口一生・滝沢 茂, 2016, 大型二軸摩擦実験において観察された前震の特徴, 日本地震学会2016年度秋季大会, S08-P17.
- 安岡由美, 2016, ラドン濃度変動と地震-地震先行現象の痕跡を排気モニターに求めて-, 立命館大学放射線教育訓練, 招待特別講演, 2016年4月16日.
- 安岡由美・長濱裕幸・武藤 潤・大森康孝・鈴木俊幸・本間 好・山本文彦・高橋克彦・向 高弘, 2017, アイソトープ実験施設の排気モニタによる東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)に先行する大気中ラドン濃度変動の検討, 日本薬学会, 2017年3月26日.

- Zakharova, O., Hainzl, S., Lange, D., and B. Enescu, 2017, Spatial variations of aftershock parameters and their relation to geodetic slip models for the 2010 Mw8.8 Maule and the 2011 Mw9.0 Tohoku-oki earthquakes, 174(1), 77-102, doi:10.1007/s00024-016-1408-7, Pure Appl. Geophys.
- Zhuang, J., D. Wang, and M. Matsu'ura, 2016, Features of the earthquake source process simulated by Vere-Jones' branching crack model. Bulletin of the Seismological Society of America. Volume 106. doi:10.1785/0120150337.
- Zhuang, J., Y. Ogata, and T. Wang, 2017 in press, Data completeness of the Kumamoto earthquake sequence in the JMA catalog and its influence on the estimation of the ETAS parameters, Earth, Planets and Space.

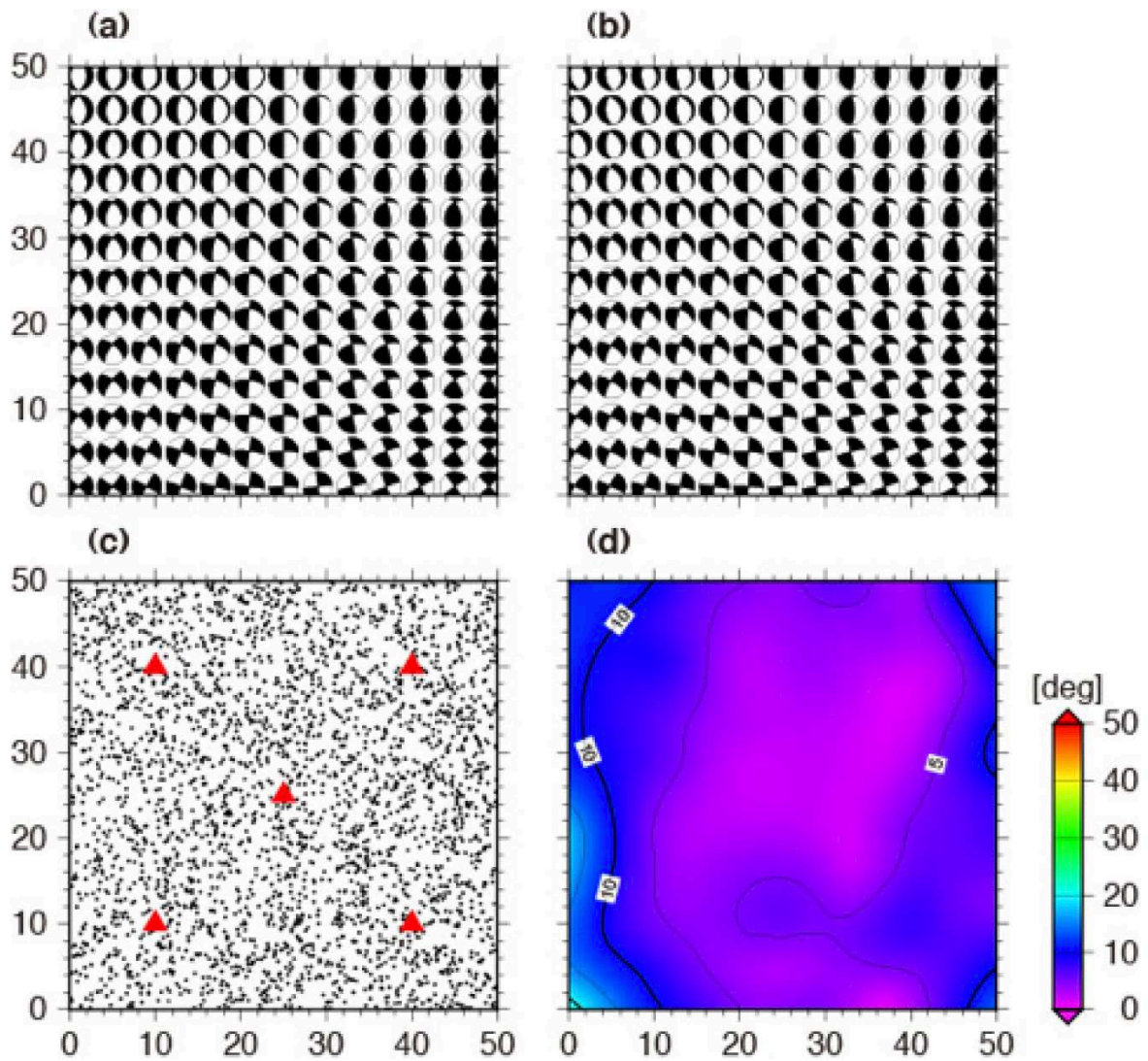


図1. 断層面解を介さずに行うP波初動極性からの応力場インバージョン: シミュレーションデータによる検証 (東北大学 [課題番号: 1206])

a) データ生成時に仮定した応力場. 実際に与えた応力テンソルから主応力軸の向きを求め, 震源球で表現した.
 b) 今回開発した手法から推定された応力場. これもa)同様に, 推定された応力テンソルから求めた主応力軸の向きを示してある. c) シミュレーションデータを生成した際の地震3000個の震央分布(黒点, 解析領域内に一様とした)と観測点5点(赤三角)の位置. d) a)とb)の主応力軸の向きの違いを角度 (Kagan角)で表したもの. ほぼ 5° ~ 10° 以内におさまっており, 元の応力場を再現できていることがわかる.

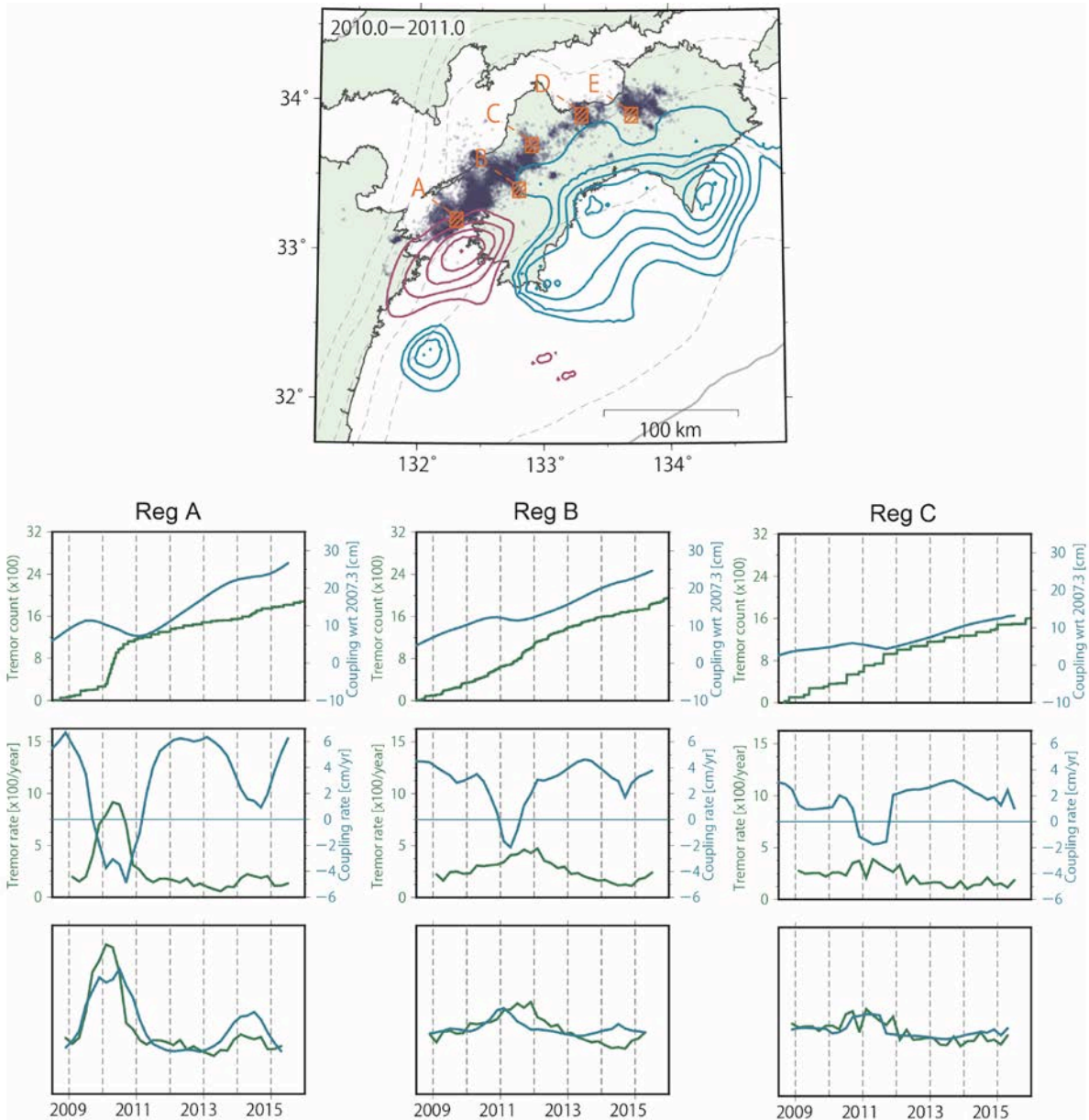


図2. 固着と微動活動のゆらぎ (産業技術総合研究所 [課題番号: 5007])

上: 2010年1月から12月の平均のプレート間固着(青色)およびスロースリップ(赤色). 紺のドットは同じ期間の産総研カタログによる深部低周波微動の震央を示す.

下: 上図に示すA-Cの領域における固着・すべり(青色, 正が固着・負がすべり)と微動の個数(緑色)の関係. 上段が積算量, 中段が年平均のレート, 下段が中段の2つの線をスケールリングと上下反転によって合わせたもの. いずれの領域でも双方の増減に対応関係があるように見える.

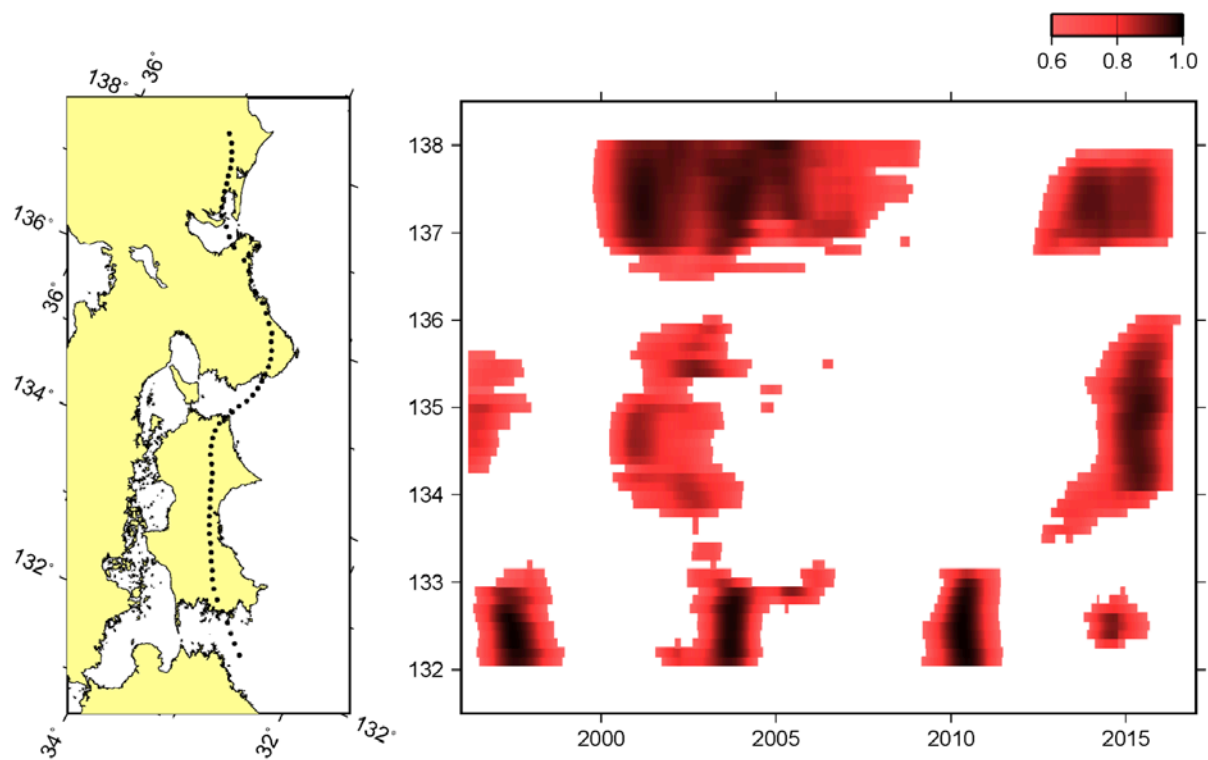


図3. 南海トラフ沿い長期的SSEの客観的検出(気象庁 [課題番号 : 7006])
 相関値の時空間分布 (期間1年, 相関係数0.6以上, 変化+2mm以上)

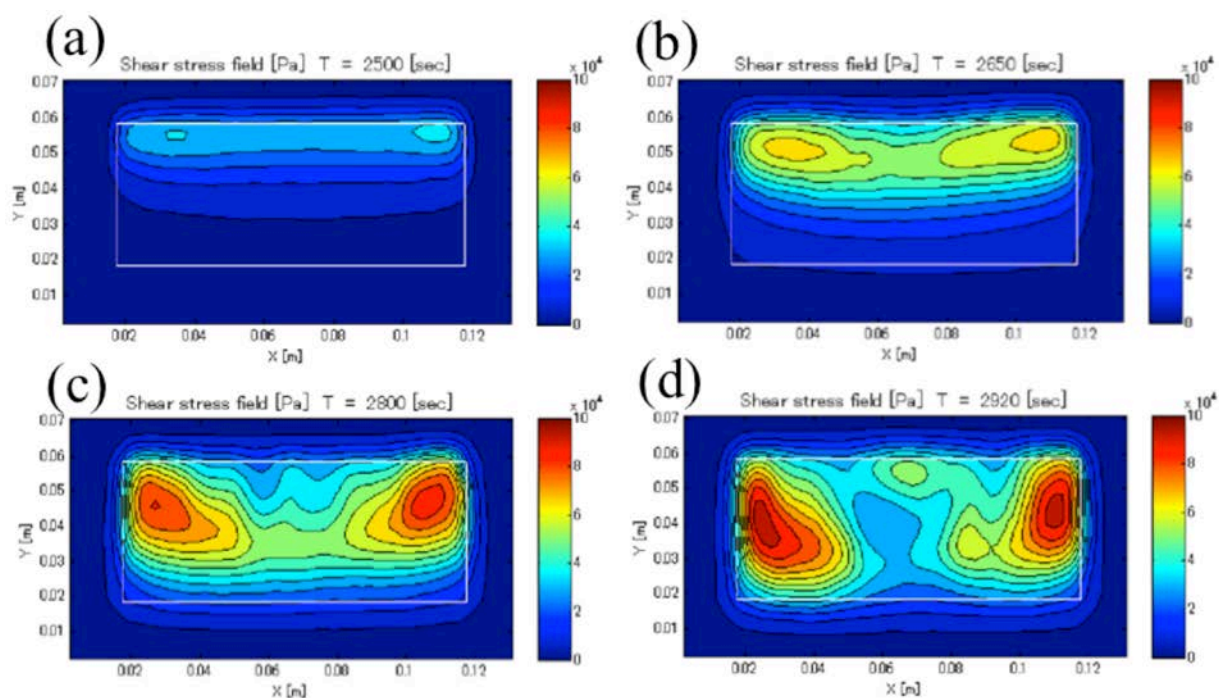


図4. ゲルシート摩擦実験における各時刻での剪断応力分布(東京大学地震研究所 [課題番号 : 1512])
 $t =$ (a) 2500(巨大イベント発生直後), (b) 2650, (c) 2800, (d) 2920 sec(巨大イベント発生直前). 白い枠は接触面の境界を示している. この系では周期的 (約 500 秒ごと) に巨大イベントが発生する. イベント発生直後の(a)では, 剪断応力は, 法線応力の大きな領域(図において白い枠内で上側の領域)のみに蓄積していたが, 次第に法線応力の小さな領域に拡大していった. また, 接触面の中央部付近では微小イベントが多数発生した結果, 剪断応力が大きな領域が 2 つに分裂する様子が観察された((b)-(c)). 最終的(d)には, 2 つの“アスペリティ”がほぼ同時に滑ることによって巨大イベントが発生した.

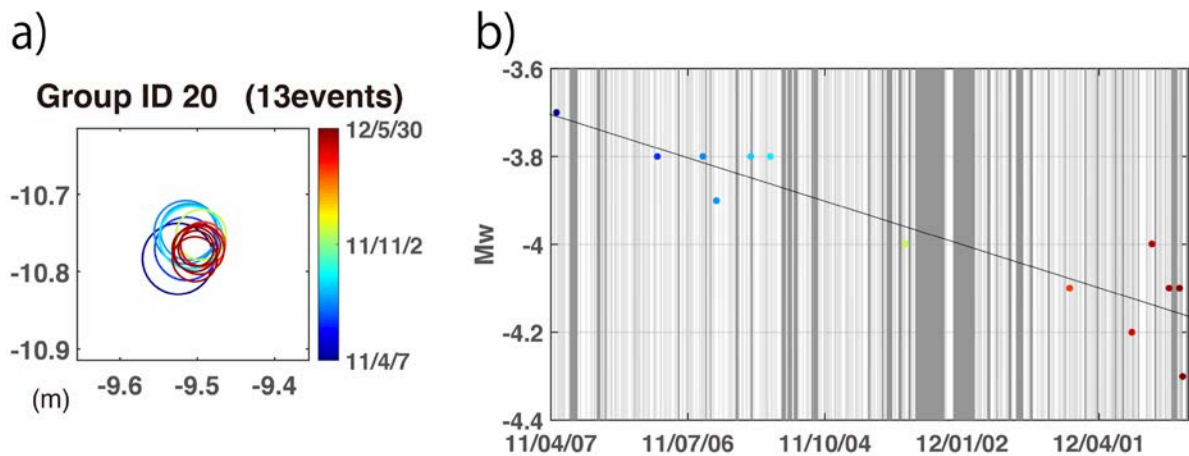


図5. M_w が低下する繰り返し極微小地震群の例（東北大学 [課題番号：1206]）

a) 震源分布図. 円の半径の大きさは円形クラックモデルを仮定してEshelby (1957)から求めた破壊サイズに対応する. b) M-T図. 直線は時間と M_w の関係に対する回帰直線. 灰色は欠測期間.

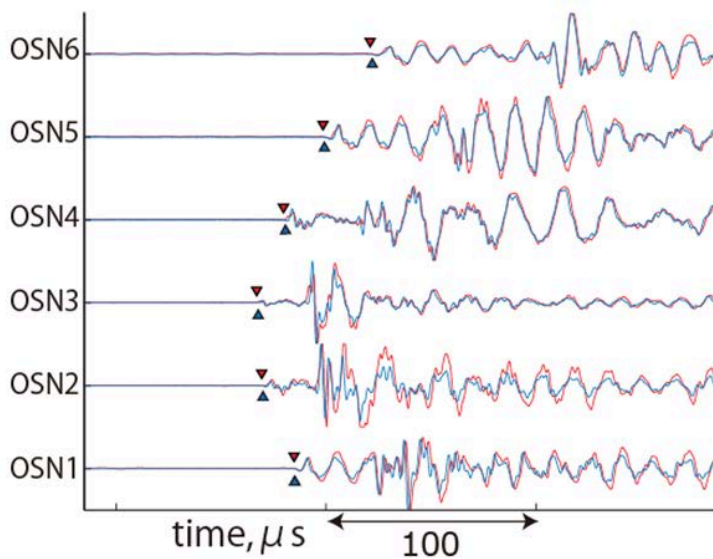


図6. 大型二軸剪断試験時に得られた微小繰り返しイベントの波形記録の例(立命館大学 [課題番号：2402])
 下側ブロックの側面に分布するAEセンサーで集録された波形. 赤は4回目の大規模な動的すべりイベントの前震記録, 青は54回目の大規模な動的すべりイベントの前震記録である.

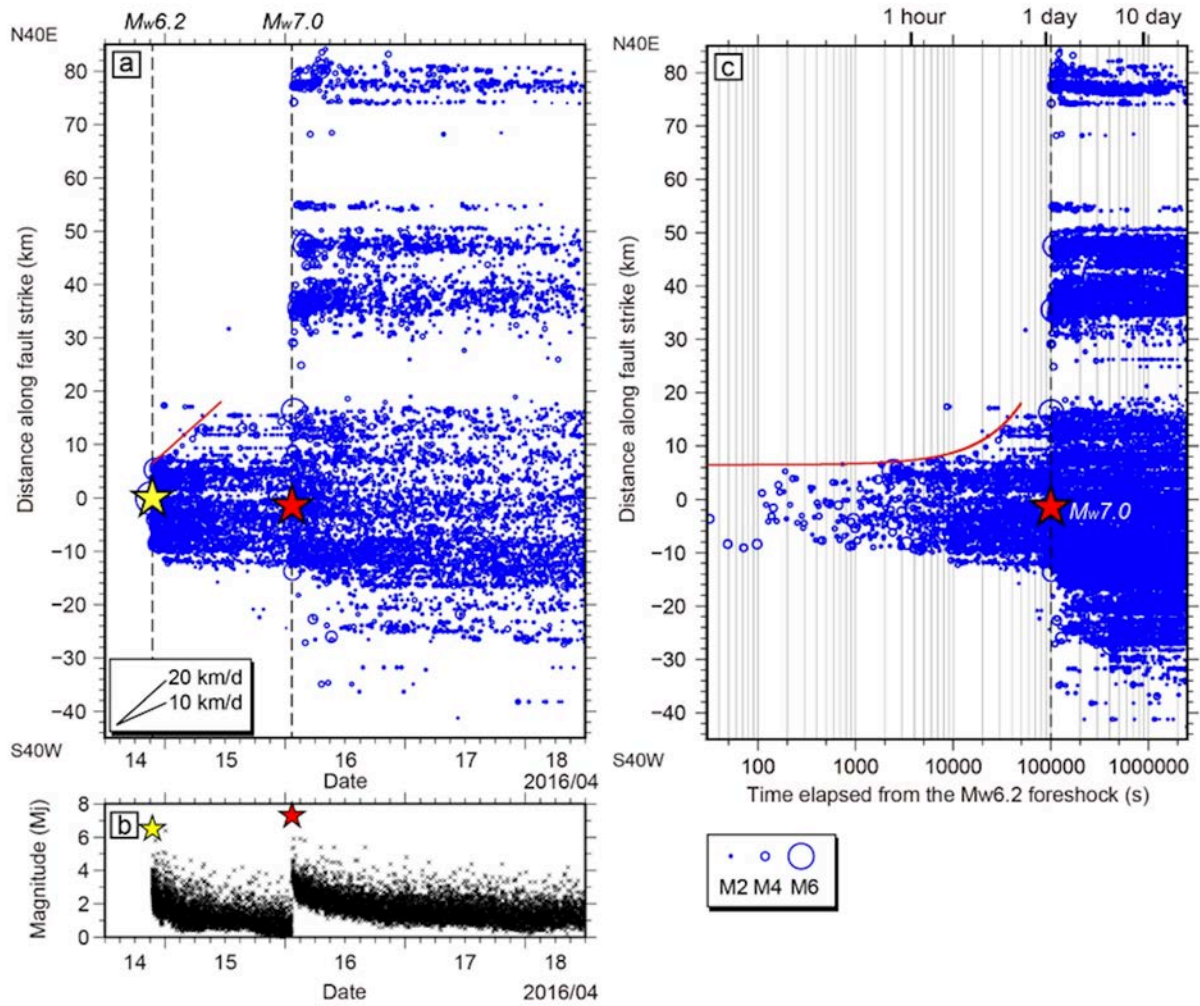


図7. Matched filter法によって抽出された地震による熊本地震シーケンスの時空間発展(東北大学 [課題番号: 1206])

a) 震源断層走向沿いの地震活動の時空間発展. 黄星印は前震($M_w 6.2$, $M_j 6.5$), 赤星印は本震($M_w 7.0$, $M_j 7.3$)を示す. b) M-T図 c) 常用対数軸における前震からの地震活動の時空間発展. 地震活動の拡大フロントを赤線で示す. (Kato et al., 2016を改変)

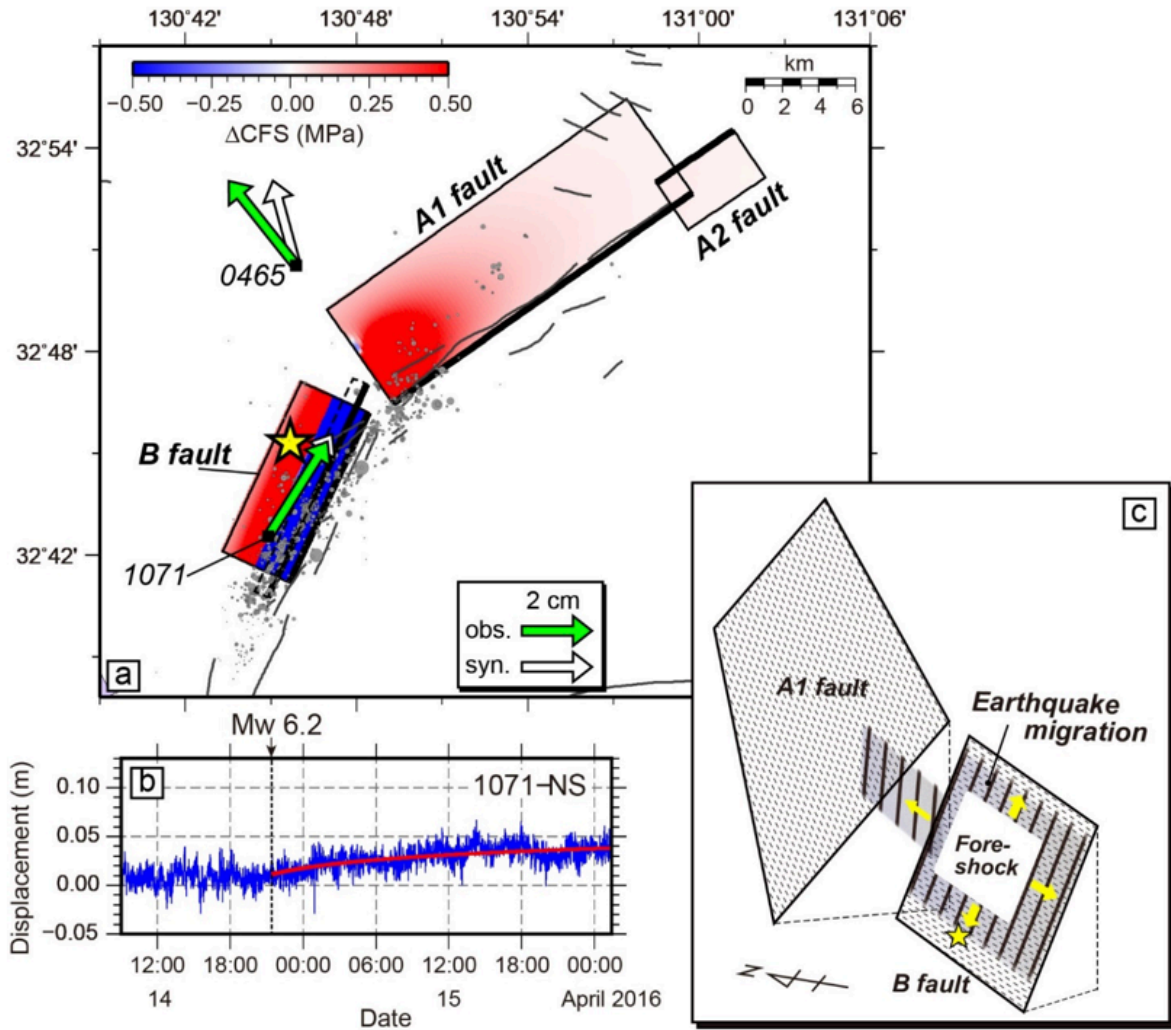


図8. 2016年熊本地震シーケンスにおける前震とそれに続いた非地震性すべりによる本震震源断層への影響(東北大学 [課題番号: 1206])

a) 4月14日21時26分の前震(Mw6.2, Mj6.5)と4月15日0時3分のMw6.0地震による、本震(4月16日1時25分, Mw7.0, Mj7.3)震源断層(A1, A2, B)へのクーロン応力変化(ΔCFS)。摩擦係数は0.4と仮定。本震の震央は黄星印, 前震-本震間に発生した地震は灰色ドットで, 同期間のGPS水平変動は緑矢印(観測)と白矢印(モデル)で示す。

b) GNSS観測点1071南北成分の変位量時系列, c) 前震とその後の非地震性すべりの進展を示す透視概念図。(Kato et al., 2016)

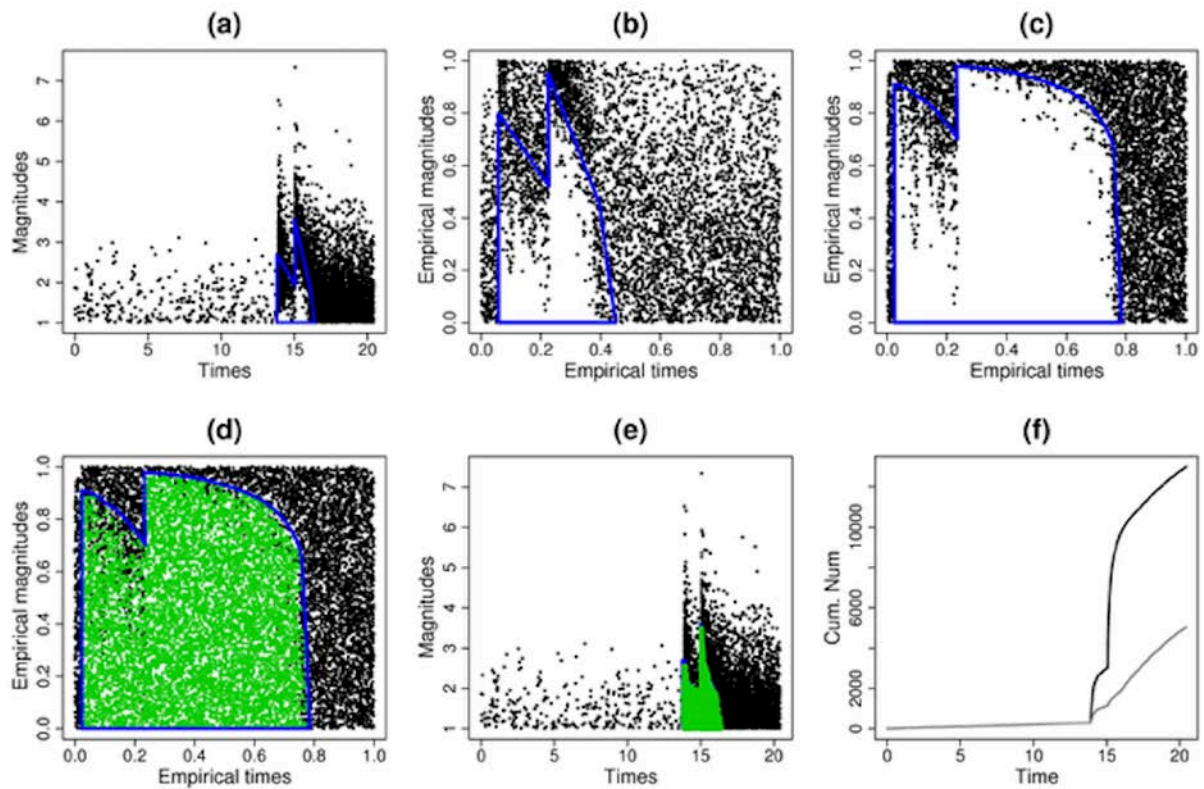


図9. バイスケール変換を用いた地震補充アルゴリズムを熊本地震余震域に適用した結果(東北大学 [課題番号: 1206])

a) 余震のM-T図, b) バイスケール変換後のM-T図, c) バイスケール変換後のM-T図 (bとは異なった領域を検討), d-e) カタログ欠損領域を補充した結果, f) 地震累積曲線 (灰色: オリジナルデータ, 黒: 補充されたデータセット). (Zhuang et al., 2017を改変)

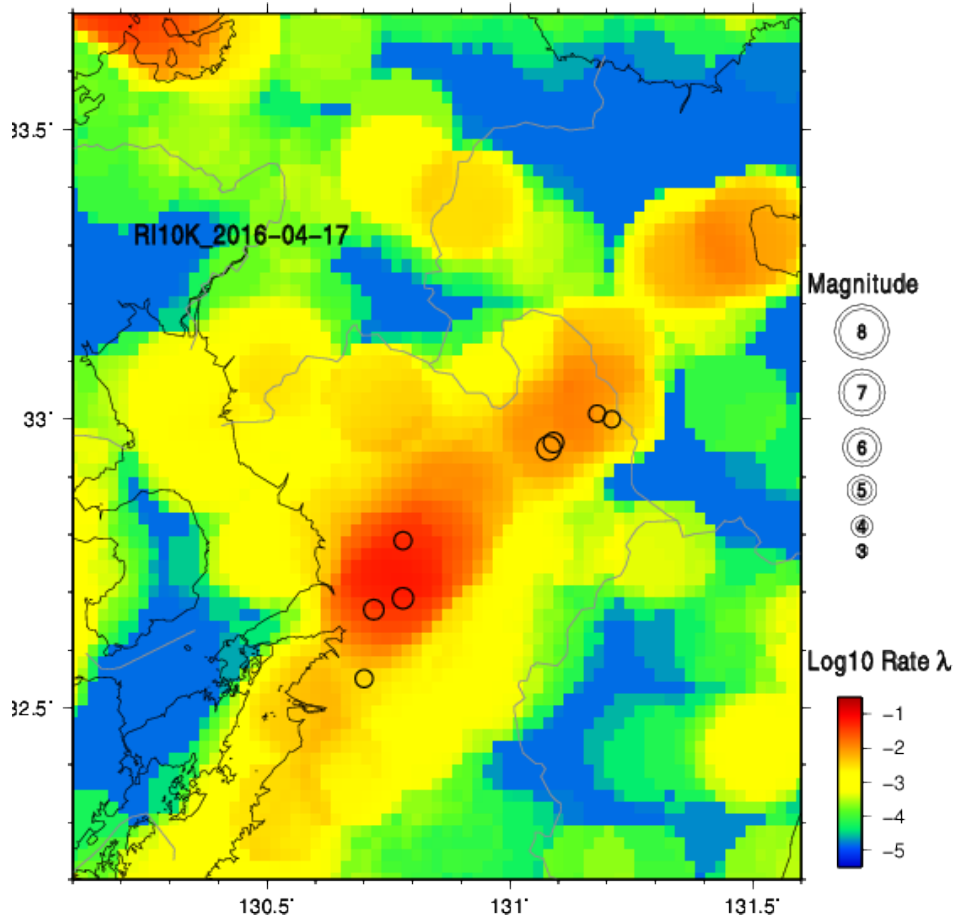


図10. 改良RIモデルによる一日予測（東京大学地震研究所 [課題番号：1511]）
 熊本地域で2016年4月17日に予測された地震発生率(0.1° x 0.1° あたりのM>4地震の数)と実際におきた地震の比較. 多くの地震(M=4)が, 前日までの活動から発生率が高いと予測された場所で発生した.

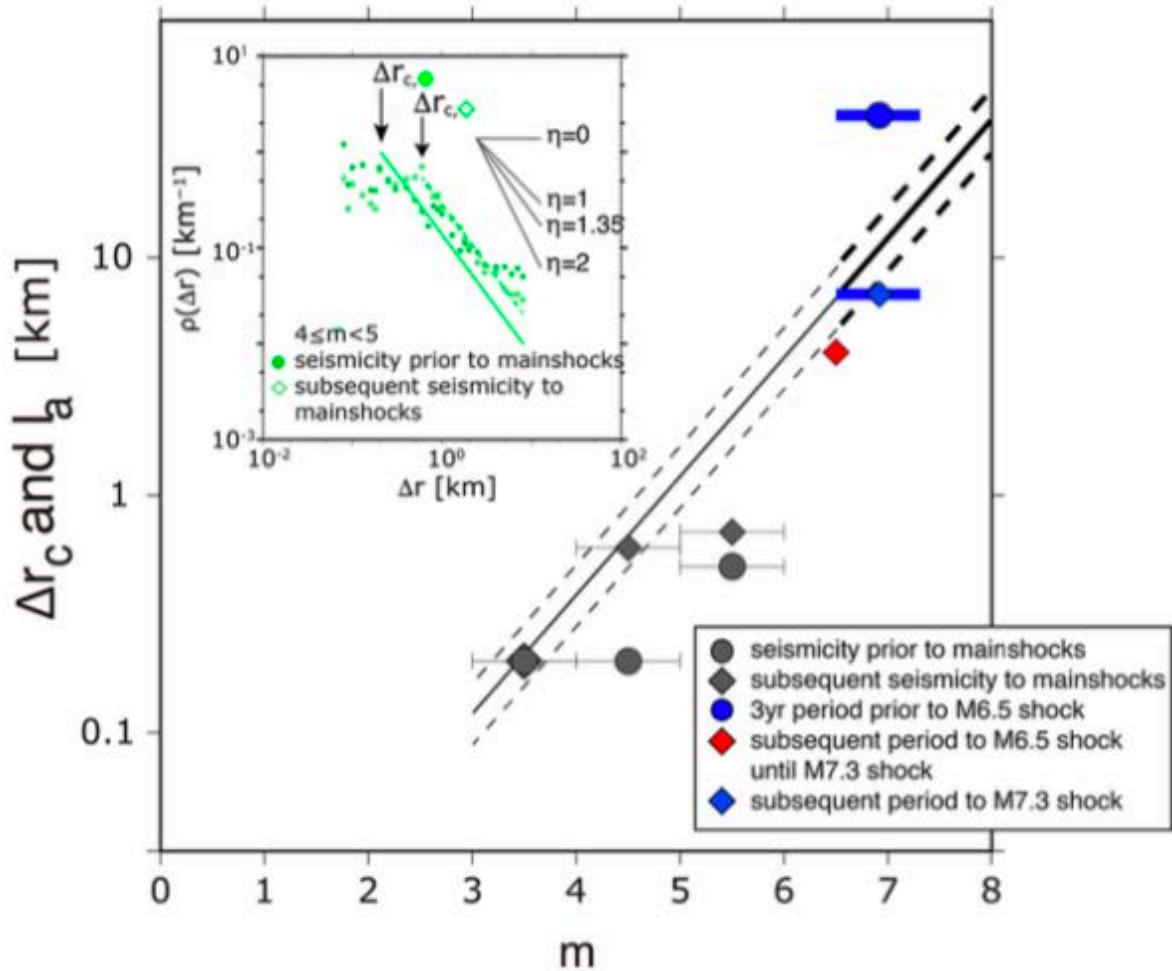


図11. 本震前後での周辺地震活動の密度分布の特徴的距離 Δr_c と本震のマグニチュード m の関係(公募研究 [課題番号: 2931])

丸印は本震より前の地震活動、菱形印は本震に引き続く地震活動。熊本地震は青色のデータで示す。青色の丸印はMj6.5の前震より前の地震活動、青色の菱形印はMj7.3の本震より後の地震活動。参考として、Mj6.5からMj7.3までの間の地震活動のデータも赤色の菱形印で示した。直線はアスペリティの半径と地震の m の関係 (Somerville et al. (2015))。挿入図は、本震($4 < m < 5$)からの距離 Δr と地震活動密度 ρ の関係。緑色の丸印は本震に先行する地震活動、緑色の菱形印は本震に引き続く地震活動。冪乗関係 $\rho(\Delta r) \sim \Delta r^{-\eta}$ をデータにフィッティングさせている($\eta=1.35$)。フィッティングから逸脱する距離を特徴的な距離 Δr_c として矢印で示す(Nanjo et al., 2016)。

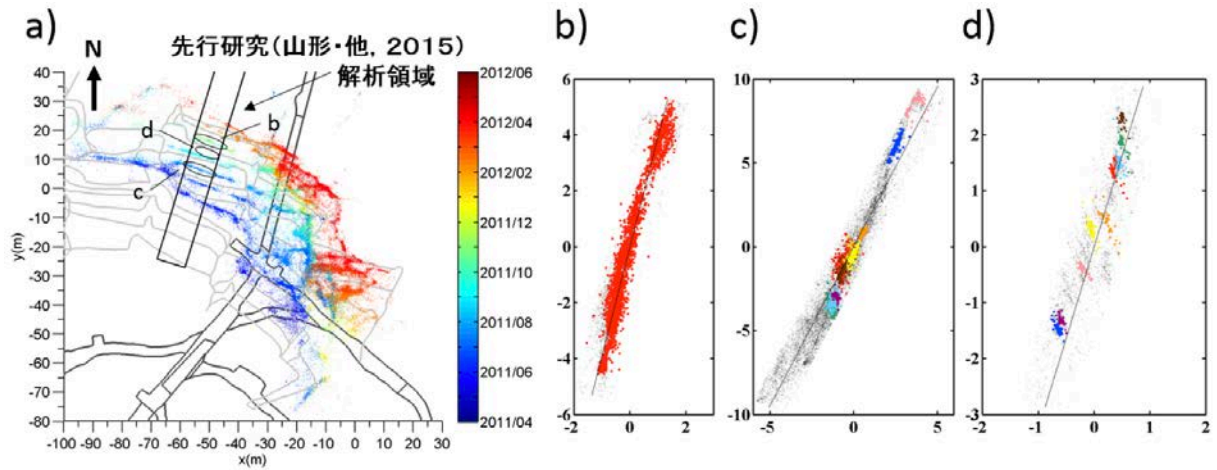


図12. 南アフリカ Cooke4 鉱山における微小破壊クラスタ (東北大学 [課題番号: 1206])

a) Collapsing 法によってクラスタリングを強調表示した微小破壊の震源分布. 採掘域沿い厚み 1 m の領域に震源が求まったものを, 発生時期ごとに色分けして示す. 採掘は南から北へ向けて進行しており, 薄い灰色の線が切羽を表す. b) 面状クラスタの類似波形グルーピングの例 (図 a 中の b のクラスタの断面図). c, d) 板状クラスタの類似波形グルーピングの例 (図 a 中の c, d のクラスタの断面図). ドットは微小破壊震源を表し, 類似波形グループを構成するイベントは同じ色で示している. b) では類似波形グループを構成するイベント数が最も多いものを, c), d) ではイベント数が多いもの 9 つを示している. 灰色はそれ以外の微小破壊震源を表す. 図中の灰色の線は, 面状, 板状クラスタの巨視的方位を示す. b), c), d) における軸の数値の単位はメートル.

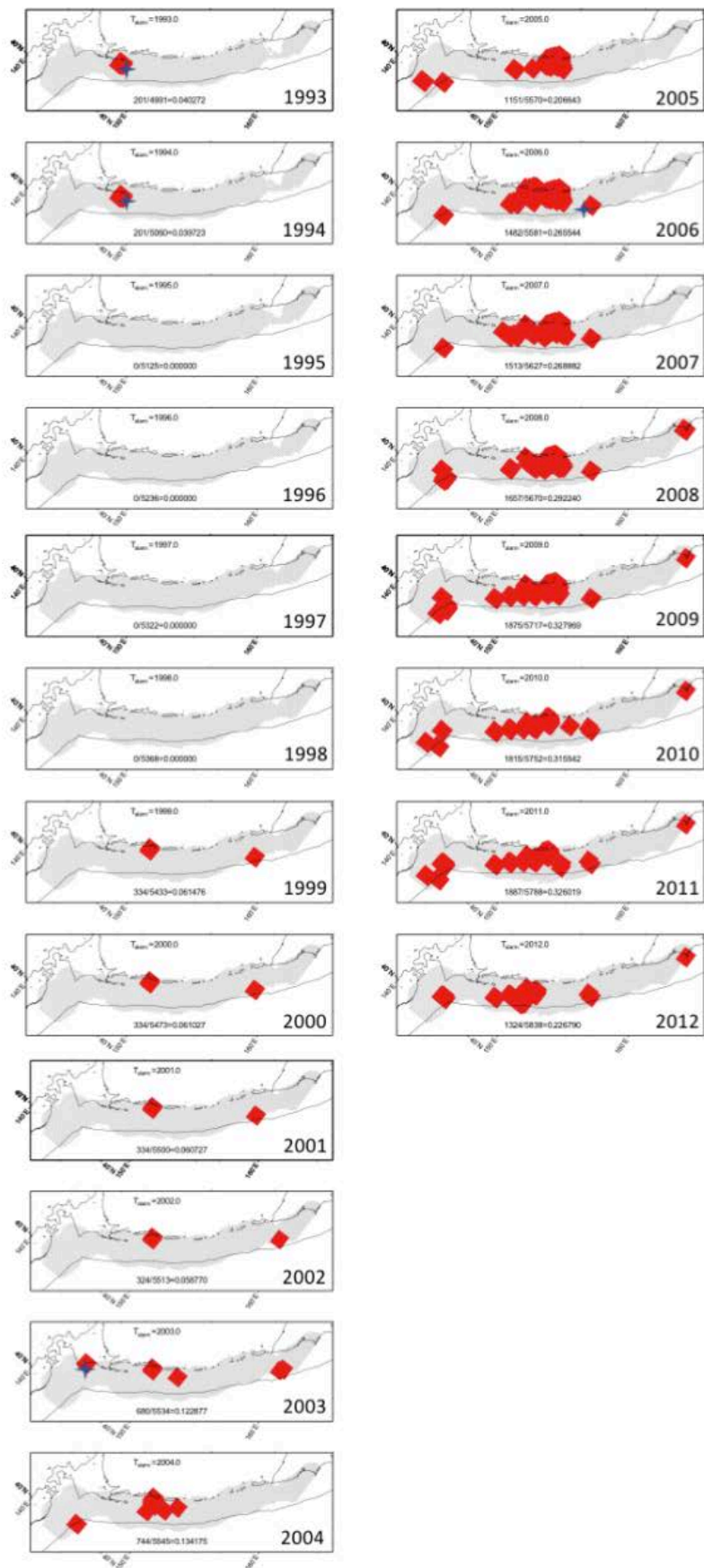


図 13. 長期静穏化にもとづく予測マップ(東海大 [課題番号 : 2501])

1年以内にMw8.3以上の地震が起きそうだと判断した領域を赤く塗った. 青星は実際におきた地震.

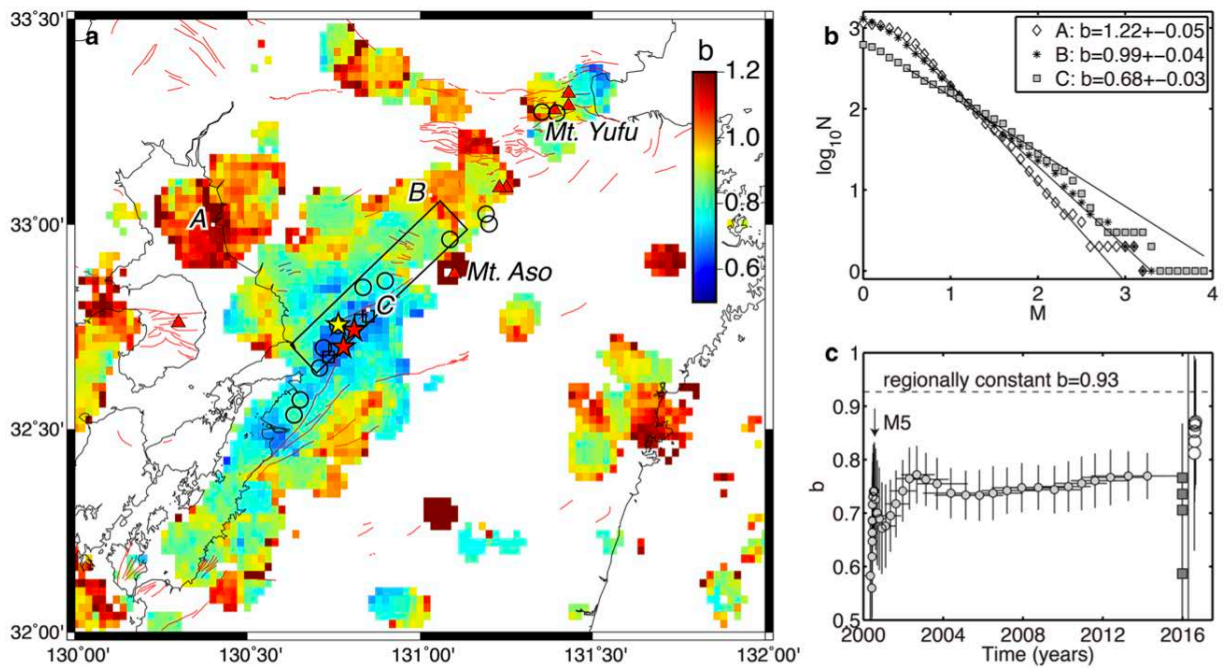


図14. 2000年1月から2016年熊本地震シーケンス開始(2016年4月14日21時26分, Mj6.5前震)直前までの九州中部におけるのb値解析(東海大 [課題番号: 2501])

(a)空間分布. (b) (a)図のA, B, C地点における規模別頻度分布. (c)本震から半径10km以内のb値の時間変化.

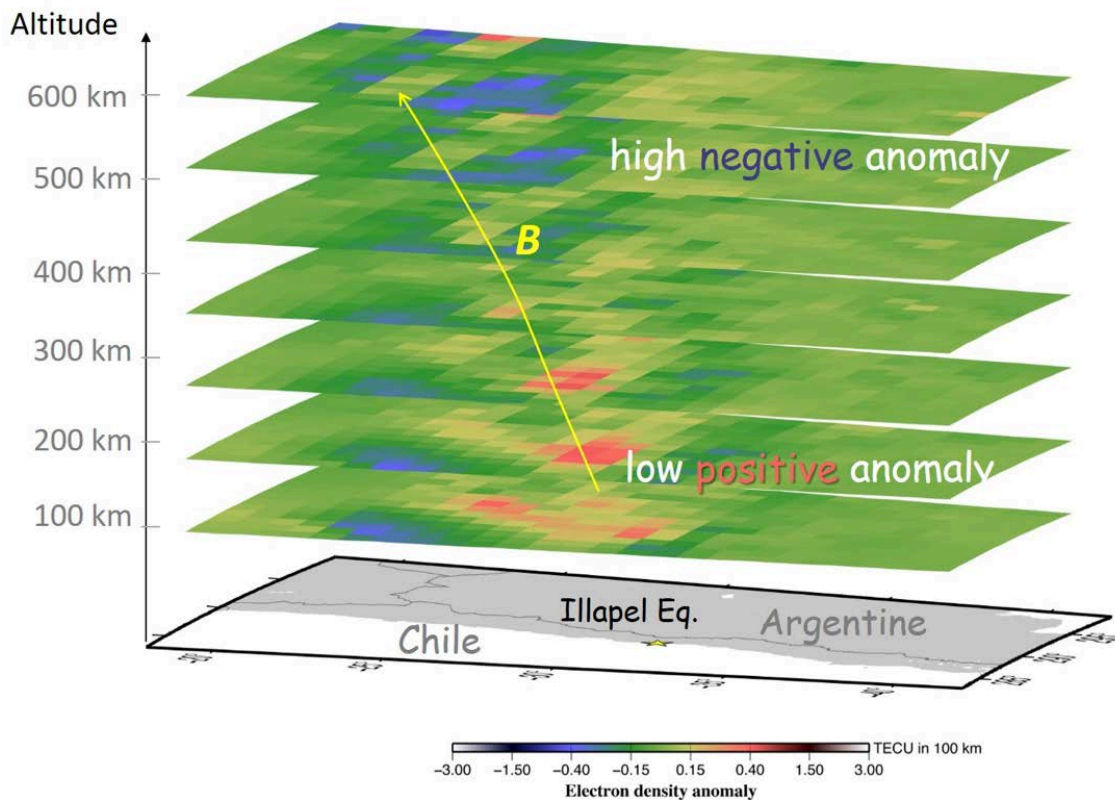


図15. 2015年I11ape地震(Mw8.3)直前のTEC異常(東海大学 [課題番号: 2501])

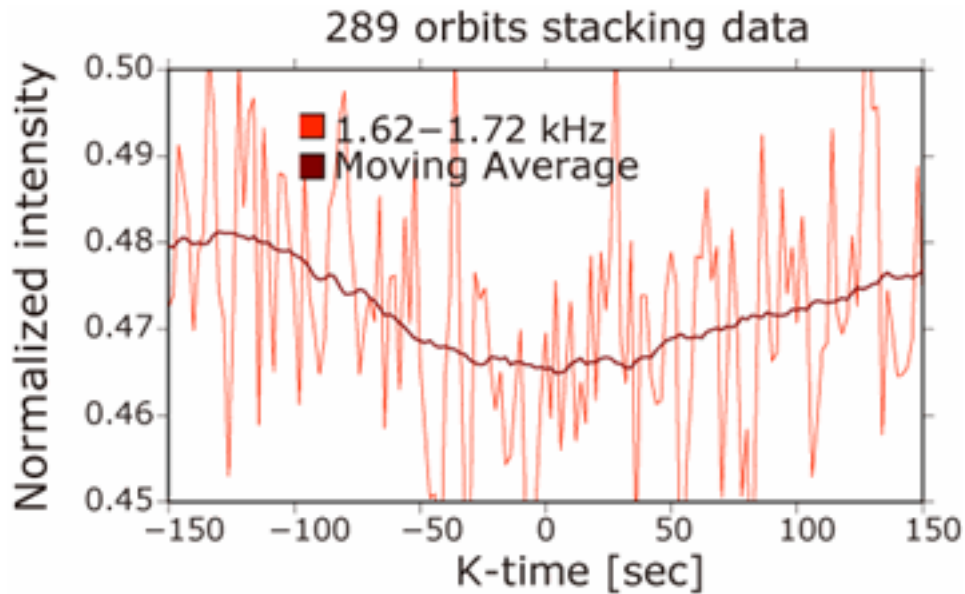


図16. 地震先行的変動がみられた289軌道の軌道上VLF電場データの平均値(公募研究 [課題番号: 2943])
太実線は±50秒の移動平均. 横軸は震央最接近時間を0とした軌道上時刻.



図17. 九州方向から到来したVLF帯パルス電磁波の例(東海大学 [課題番号: 2501])
2016年4月12日, 及び4月14日のMj6.5前震(21時26分)以前の時刻に, 熊本地震の震央方向から, 当該方面に空電がなかったにもかかわらず, VLF帯パルス電磁波が到来した. 例は2016年4月12日15時9分57秒のものである. 偏波からは到来方向に 180° の不確実性が残るが, 着波時刻が1msずれているので西から来たかと判断できる.

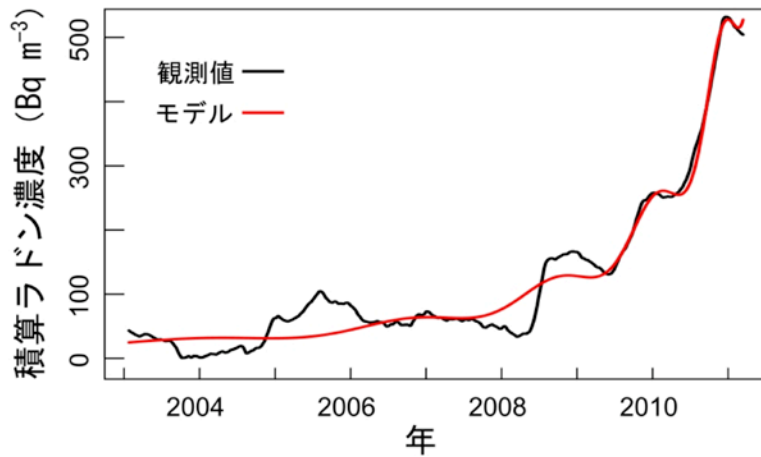


図18. 福島県立医科大学で観測された大気中ラドン濃度の残差の積算値(東北大学 [課題番号: 1207])
赤線は、対数周期振動を含む臨界現象のモデルによる回帰曲線を表す。

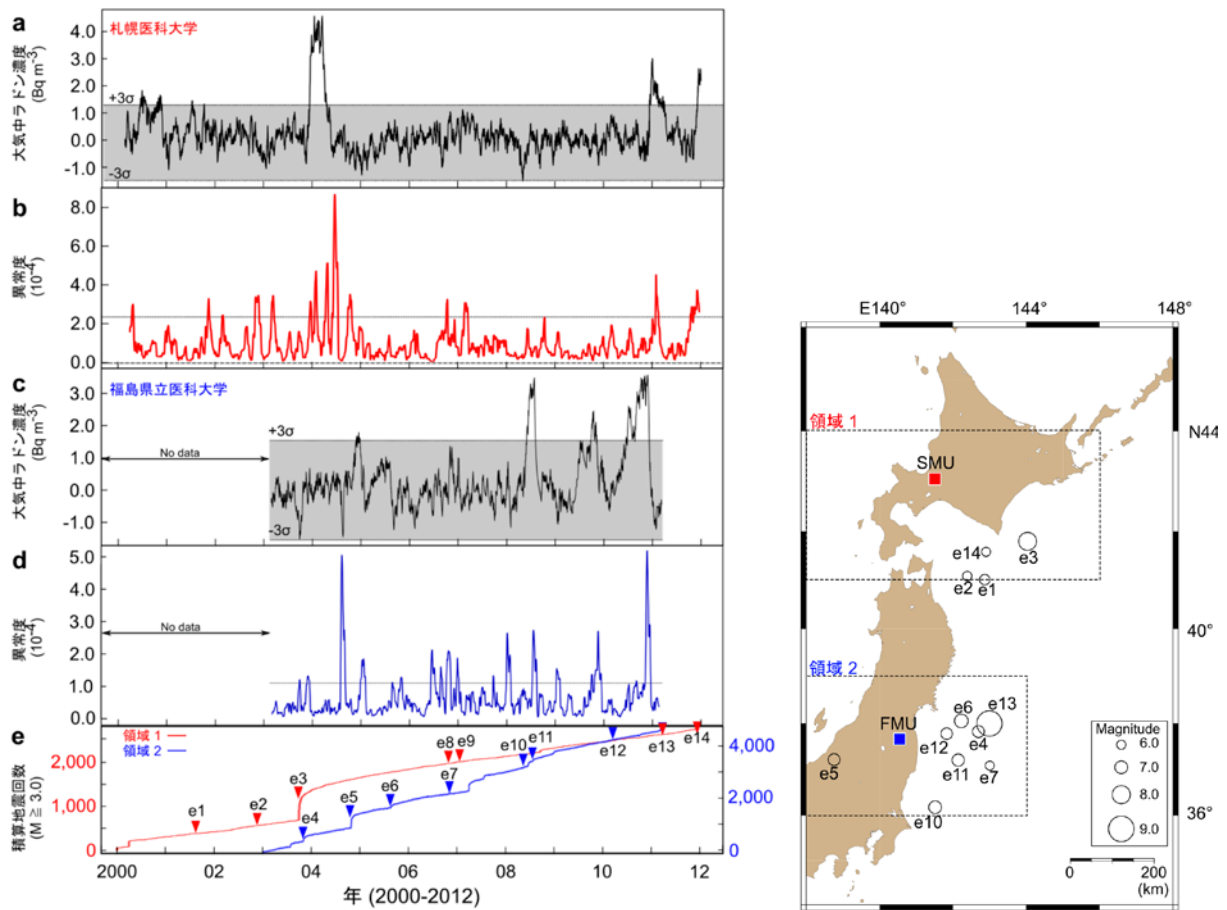


図19. 部分空間法による大気中ラドン濃度の異常変化検知(東北大学 [課題番号: 1207])

左パネル: (a) ラドン濃度の残差(札幌), (b) 異常度(札幌), (c) ラドン濃度の残差(福島), (d) 異常度(福島), (e) 積算地震回数(e1-e14は、右パネルの地震に対応する)。右パネル: 比較対象の地震。地震活動は気象庁データによる。

1 (5) 地震動・津波等の事前予測・即時予測

「地震動・津波等の事前予測・即時予測」計画推進部会長 香川敬生（鳥取大学大学院工学研究科）
副部会長 太田雄策（東北大学大学院理学研究科）

1. はじめに

地震、火山噴火に伴う地震動、津波、地すべり、山体崩壊、火山灰や溶岩の噴出などの災害誘因を、その発生前に高精度に評価しておくことは、これらの災害対策に資するために重要である。また、各種観測データの利用法や解析手法を開発、高度化し、地震・火山噴火発生直後に高精度かつ即時的に災害誘因の規模を予測して情報伝達することは、災害および2次災害の軽減にきわめて有効である。そのため本テーマでは、本計画で得られる地震発生や火山噴火の理解や構造モデルなど最新の研究成果を利用して、地震動・津波等の事前予測・即時予測を通じた災害軽減に資する研究を行う。同時に、事前予測・即時予測結果を効果的に社会に還元するため、防災工学や社会科学との連携、および防災に関する現業での活用を指向して研究を進める。

2. 平成28年度の成果概要

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

ア. 地震動の事前評価

○震源モデルの高度化

2016年熊本地震と一連の地震活動では、2016年4月14日21時26分に発生した $M_{\text{JMA}}6.5$ の地震（以下、最大前震と称する）の約28時間後の4月16日1時25分に $M_{\text{JMA}}7.3$ の地震（以下、本震と称する）が発生した。本課題では、マルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法を強震記録に適用し、最大前震と本震の震源破壊過程を推定した（図1）。最大前震については、直後の余震分布及び防災科学技術研究所F-netのモーメントテンソル解の情報から、日奈久断層帯北部に沿ったほぼ鉛直の断層面（走向212度、傾斜89度、長さ14km、幅13km）を仮定し、速度波形3成分（0.05～0.5Hz）のS波部分を解析した。深さ11.4kmの破壊開始点付近にすべりの大きな領域が見られたほか、北東側のやや浅い部分（深さ5km程度）にもすべりの大きな領域が推定された。地震モーメントは $2.04 \times 10^{19} \text{Nm}$ （ $M_w6.1$ ）、平均すべり量0.4m、最大すべり量1.2mであった。本震については、余震の空間分布の特徴、各機関の現地調査による地表地震断層の出現情報、国土地理院による地殻変動の解析結果などの関連情報を参考にして、日奈久断層帯北部（走向205度、傾斜72度、長さ14km、幅18km）と布田川断層帯（走向235度、傾斜65度、長さ28km、幅18km）に沿った2枚の断層面からなるモデルを設定し、速度波形3成分（0.05～0.5Hz）のS波部分を解析した。日奈久断層帯北部の深部から破壊が開始し、日奈久断層帯北端付近の浅部にもやや大きなすべりが生じた。その後、破壊は布田川断層帯深部に伝播し、北東方面に伝播しつつ、浅い方向へ広がっていった。すべりの大きな領域は阿蘇カルデラの内側（南阿蘇村付近）まで達している。地表に最も近いサブ断層のすべり量は1～3m程度である。また、断層面上のすべりのスナップショットと、布田川断層近傍の熊本県震度計観測点（益城町、西原村）の変位波形（インバージョンには使用していない）を比較したところ、観測点近傍の断層がすべる時刻に対応して、同程度の変位が観測されており、推定された破壊過程の妥当性を確認した。地震モーメントは $4.50 \times 10^{19} \text{Nm}$ （ $M_w7.0$ ）、平均すべり量1.9m、最大すべり量5.1mであった。以上のことから、日奈久断層帯北部での前震を伴い、本震時には日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて、連続的に破壊が伝播したものと考えられる。また、日奈久断層帯北部の断層面は、最大前震時はほぼ鉛直に近い断層面が破壊したのに対し、本震時は北西に傾斜した断層面であった。このことから、最大前震と本震ではお互いに近接しているが、異なる断層面がそれぞれ破壊したものと考えている。2016年熊本地震本震では、地表地震断層が出現し

たが、その直近の2地点（益城町および西原村）において強震記録が得られた。この加速度記録を基線のズレに注意しつつ積分して速度、および変位波形を得て、地震断層の運動に関する情報を取り出した。断層直交方向の動きの変化に着目することによって、地震断層の破壊伝播を直接見積もることができる（Aki, 1968）。この方法によって、約9km離れた2地点の見かけの破壊伝播速度は約4.5km/sとなった。この速度は周辺のS波伝播速度を越えているが、破壊が下方から上方へ進んでいる見かけ速度に対応していると考えられる。2次元的な震源断層面における破壊伝播の推定や評価には、水平方向のみならず深さ方向の破壊伝播特性も考慮した分析が必要である。（京都大学防災研究所〔課題番号：1903〕、浅野・岩田、2016；Asano and Iwata, 2016）

○地下構造モデルの高度化

2016年熊本地震（ $M_{\text{JMA}}7.3$ ）の発生に伴い、熊本地震震源域における減衰構造のトモグラフィー推定を行った。2016年熊本地震における一連の地震は、本課題で扱ってきた南西諸島から九州西方にまで延びる沖縄トラフの延長上にある、布田川断層帯および日奈久断層帯、別府-島原地溝周辺で発生している。本課題では、この地域の詳細な地震波減衰構造を調査するため、P波およびS波の3次元減衰トモグラフィーを実施した（図2）。データは、防災科学技術研究所のHi-netの波形記録（期間（2002/06～2012/05, $M_{\text{JMA}}3.0\sim6.0$, イベント総数743個）で、3.0～30.0Hzの帯域を使用した。使用した地震は、2016年熊本地震よりも前のものである。トモグラフィーのグリッドは、水平方向に0.125度間隔、深さ方向に5～50km間隔に設定した。トモグラフィーの結果と余震活動を比較することにより、以下の特徴が明らかになった。本震の震源周辺に集中した余震の発生域は南西側の強い低減衰領域と北東側の布田川断層帯の強い低減衰領域の両者に挟まれている。布田川断層帯側に水平幅10km程度の低減衰領域が分布しており、この領域では余震が少ない。この領域は、上記Asano and Iwata(2016)によって推定された震源過程において、最もすべり量の大きかった領域に対応しており、断層内で強く固着されていたと仮定することもできる。また、阿蘇や九重といった火山活動が活発な地域の周囲に、強い高減衰域があり、この領域の地震の震源は浅くなっている。地下での高温なマグマの供給により、地震発生層の下限が変化していると考えられる。さらに、深部のフィリピン海プレートからの脱水による上昇流を示していると考えられる高減衰域が熊本地震の震源域の直下まで認められる。これは、この上昇流による水の供給が地震発生に関与していることを示唆している。

近年のレーザ関数解析によるスラブ深部構造の調査や、スラブの物性・熱力学的研究、そして遠地地震波伝播・波形解析に基づいて、スラブ深部のおよそ410～660kmで相転移遅れによる低速度異常が薄いくさび形に伸びた状態で存在する（MOW: Metastable Olivine Wedge）ことが議論されている。北海道西方沖～ウラジオストックを震央とする、日本海下の深発地震（ $h=200\sim570\text{km}$ ）の広帯域地震波形を詳しく調べたところ、深さ400km以深の地震においてS波初動部の波形が変化し、低周波数の先駆波が見られることがわかった。後続の高周波数の到着時刻との時間差が震源の深さとともに増大する特徴は、スラブ内部に薄い低速度層（MOW）が存在し、先駆波はMOWの下面を屈折波として伝播し、後続相はMOW内部を遅く伝わることで良く説明できる。2010年2月12日に発生したウラジオストックの深発地震（ $h=578\text{km}$, $M_w6.8$ ）の地震波形を、こうした不均質なスラブ構造をモデル化した2次元差分法に基づき計算したところ、MOWの幅は100km（深さ410km）～10km（深さ660km）程度の大きさを持ち、P波速度は-5%、S波速度は-7%程度の低速度異常を考えたモデルが観測された地震波形を良く説明することを確認した（図2）。こうしたスラブ深部のくさび状の低速度異常は、およそ周波数2～4Hz程度の地震動をスラブ上部に向けて強く放射する効果があることも確認できた。その効果はMOW頭部の厚さが100km前後で最大となり、MOWが存在しない場合の3倍以上の導波効果がウラジオストックの深発地震の波動伝播シミュレーションから確認できた。また、この地震の地震波伝播の3次元数値シミュレーションから、深発地震がMOW内部で発生した場合には、スラブ深部にMOWが存在することで、北海度から関東にかけての太平洋岸では最大加速度が数倍大きく増幅され、かつS波の継続時間

が長く延びる強い異常震域が現れること、そして、これが観測を良く説明することを確認した。以上のように、スラブ内部を伝わる地震波は、スラブ内部の多様なスケールの不均質構造の影響を強く受けており、地震波の導波効果には強い周波数依存性と震源の深さ依存性があることが確認できた。従って、深発地震による、高周波数かつ長い継続時間を持つ強震動の予測には、スラブ内の不均質構造の把握と、スラブ内部構造を適切にモデル化した大規模数値シミュレーションが不可欠である。(東大地震研 [課題番号: 1516], 古村, 2016; Furumura et al., 2016; Kennett and Furumura, 2016; Yoshimitsu et al., 2016; Maeda et al., 2016; Noguchi et al., 2016; Takemura et al., 2016)

京都盆地では反射法探査、重力探査、微動アレイ探査といった物理探査が行われ、堆積盆地基盤に至るまでの堆積層の速度構造モデルが作られている。このモデルに対して、実地震波形記録を用いたモデル検証はほとんど行われていないことから、近地地震のP波部分のRadial成分とVertical成分によるレシーバ関数(以下R/Vレシーバ関数)を用いた検証を行った(図3)。京都盆地内外の各機関における強震・震度観測点42点の波形データを収集し、使用した。ここには本課題で継続している京都市内の強震観測点記録も利用している。各観測点におけるイベント毎のR/Vレシーバ関数は、震央方位や震源深さに依らず、類似していたので、観測点毎にR/Vレシーバ関数をスタックしたものを、観測R/Vレシーバ関数とし、その最大ピーク出現時刻を読み取った。観測R/Vレシーバ関数の最大ピーク出現時刻が、震源から観測点までの速度構造のうち、最も顕著な速度差をもつ盆地基盤上面と堆積層の境界におけるPS変換波と直達P波の走時差である観測PS-P走時差に対応すると考え、既存の京都盆地速度構造モデルから観測点直下の1次元速度構造を抜き出し、モデルによるPS-P走時差と、観測PS-P走時差と比較すると、多くの観測点ではよい対応を示しているが、盆地端部に位置するいくつかの観測点では両者の比が大きく、モデルの修正が必要であることがわかった。観測PS-P走時差説明のため、観測点直下の1次元速度構造モデルの基盤深度を変化させてモデルの修正を行った。この観測R/Vレシーバ関数の最大ピークが、盆地基盤でのPS変換波によるものかどうかを、離散化波数法による1次元成層構造モデルにダブルカップル点震源を与えた理論波形から得られる理論R/Vレシーバ関数と比較することで確認を行った。改良地下速度構造モデルによって得られた理論R/Vレシーバ関数は、観測R/Vレシーバ関数をよりよく再現していること、また観測R/Vレシーバ関数に現れている後続のピークがPPPS変換波(P波で境界から入射し、地表と境界で1回ずつ反射した後S波に変換)に対応するものであることがわかった。PPP-S時間差は一部の観測点で観測とモデルの対応していないことから、この点の修正を行うことで堆積層の速度構造モデルをさらに改良することができると考えられる。

大阪堆積盆地の地下構造モデルに関して、モデルの妥当性検証を地震動シミュレーションによって継続している。2011年東北地方太平洋沖地震時の大阪盆地での長周期地震動観測の解析と震源域から観測サイトを含むモデルシミュレーションを行い、大阪湾岸地域や東大阪(河内平野)での長周期地震動応答特性の再現を行った。この結果、大阪盆地での長周期地震動は、主として福島・茨城県沖の強震動生成域によって励起されたことがわかった。

地震時の断層すべり破壊において、破壊がどのように伝播するかは、地震波の特に短周期成分の生成状況に大きな影響を与える。地震動予測において妥当な短周期地震動を生成するためには、破壊伝播の妥当な不均質性を設定する必要がある。この設定方法を見いだすことを目的として、動力的シミュレーションによって得られた動力的震源モデルの破壊伝播の様相を調べた。用いた動力的震源モデルは、大阪平野に存在する上町断層帯の地震の震源過程を推定するために行われた動力的シミュレーションによって生成されたもので、初期応力場に断層面の幾何形状による長波長不均質および k^1 スペクトルを持つ短波長不均質を仮定している。この動力的震源モデルの破壊伝播速度、破壊伝播加速度、応力降下量、クラック抵抗の空間分布や、パラメータ間の相関を調べたところ、破壊伝播速度は k^1 スペクトル(振幅が波数に反比例)を持つこと、破壊伝播速度が大きいほど破壊伝播加速度の取る値の幅が狭まることがわかった。一方、破壊伝播

速度と他のパラメータとの相関については、応力降下量との相関はほとんど見られず、クラック抵抗との相関は見られたがばらつきが大きい。クラック抵抗から理論式を介して疑似動的に破壊伝播速度を導いている既往研究がある。しかし、ここで解析した動力学的震源モデルから得られたクラック抵抗の値は上記の既往研究事例とはオーダーで異なっており、その方法はここでは適用不能とわかった。

堆積盆地構造の地震応答を実測し、地盤構造モデルの改良に用いるため、京都盆地と関東平野の中川低地では、既設観測点の保守と観測継続を行い、強震データ蓄積を継続した。(京大防災研 [課題番号: 1911]、Iwata et al., 2016 ; Sekiguchi et al., 2016 ; 下村・他, 2016)

○強震動評価の高度化

2016年4月16日に発生した熊本地震の本震 ($M_{\text{JMA}}7.3$) では、震源断層沿いの益城町や西原村で震度7の激しい揺れを観測したほか、布田川断層沿いには熊本から阿蘇30kmの区間にわたって最大2mのズレを伴う明瞭な地表地震断層が現れた。住宅倒壊や土砂災害など大きな被害をもたらした熊本地震の強震動の特徴と被害の成因を探るために、断層近傍で記録された強震動を調査し、過去に震度7を記録した1995年兵庫県南部地震や、2004年新潟県中越地震の強震動と周波数特性を比較した。熊本地震では、震源断層に近い、西原村や益城町の震度計(加速度計)とKiK-net 益城観測点(KMMH16)の加速度記録には、強い揺れの時間は十数秒と短いものの、1G(重力加速度)を超える激しい強震動が確認された。これらの強震動の速度応答スペクトルには、木造家屋に大きな被害をもたらす、周期1~2秒の地震動成分が強く(>200cm/s)、そのレベルは、西原村では兵庫県南部地震($M_{\text{JMA}}7.3$)の鷹取地点や2004年新潟県中越地震($M_{\text{JMA}}6.8$)の小千谷地点と同程度、益城町ではそれを大きく上回っていた(図4)。こうした、この地震に含まれる周期1~2秒の強い地震動成分が木造家屋の被害に結びついた可能性が高い。一方、東北地方太平洋沖地震で震度7を記録した築館観測点(MYG004)の強震動には、こうした成分は弱く(<100cm/s)、震度の指標だけでは被害を正確に見積もることが難しい問題が再確認された。

熊本地震の本震では、周期3秒~10秒の長周期地震動も強く発生し、熊本と阿蘇地方において気象庁長周期地震動震度階級4(最大ランク)が発表された。益城町や西原村の疑似速度応答スペクトルには、前述の短周期強震動に加え、固有周期3秒~10秒の長周期帯でも200~300 cm/sの強い応答レベルが確認できた。これは、2003年十勝沖地震($M_{\text{JMA}}8.0$)において石油タンクがスロッシング被害を起こした苫小牧地点(HKD129)のレベル(固有周期7秒前後で120cm/s)の2倍以上になる。熊本地震では、長周期地震動が原因と考えられる被害は報告されていないが、仮に布田川断層沿いに長大構造物があったならば、大きな影響を受けた可能性が高い。布田川断層近傍の4観測点での加速度記録を積分して地動変位を求めると、断層ごく近傍のKMM005観測点と西原村では数秒をかけて緩やかに西方向に動き、最終的に1~2mの大きな静的変位が残った。この量は、地表地震断層のズレの大きさに相当し、動きの時間変化は立ち上がり時間が2.6秒のランプ関数で良く近似できた(図5)。すなわち、断層の極近傍の観測点での変位記録の動きにおいて、断層運動により放射された地震動よりも、断層の動きそのものの寄与が圧倒的に大きいと判断できる。なお、断層運動に伴う地震動(Far-field term; 遠地項)は、断層距離(D)とともに幾何減衰 $1/D$ のオーダーで緩やかに弱まるのに対し、静的変位(Near-field term; 近地項 + Intermediate term; 中間項)の幾何減衰はこれよりずっと大きく、 $1/D^2$ のオーダーで急激する。このため、断層ごく近傍で観測された、静的変位を含む断層運動に含まれる長周期地震動の成分は、断層から離れるにつれて急激に弱まる。これまで長周期地震動の特徴として、たとえば南海トラフ巨大地震(M8~9)地震において関東平野、濃尾平野、大阪平野などの大規模平野で何分間にもわたって長く続く揺れをイメージすることが多かった。だが、今回の内陸M7級地震で観測された、断層ごく近傍での長周期地震動は、揺れの継続時間は十数秒と短いものの、周期3~10秒以上の広い帯域で強烈なパワーを持つものであった。断層ごく近傍では、断層運動に伴う地震波放射のDirectivityによる断層直行方向の強震動だけでなく、断層の動き自体が作る断層平行成分も強い。こうした長周期地震動

成分は、最大 10m にもなる明瞭な地表断層を伴った 1999 年台湾集集地震 (M7.6) の石岡ダム (TCU068) 地点でも観測されるなど、断層が地表を切る浅い大地震で起きると考えられる。また、断層近傍長周期地震動の特性は、地震規模と断層運動の特性を強く反映する。台湾集集地震は規模が大きく、かつ断層滑り速度が遅かったため、長周期地震動のピークはより長周期側 (9.5 s) にあり、周期 2~5 秒では熊本地震の西原村より小さかった。(東大地震研 [課題番号: 1516]、Furumura, 2016)

イ. 地震動による構造物被害の事前評価

十万・百万のオーダーの建築建物や交通・ライフライン等の大規模社会基盤施設を有する都市に対して、巨大地震がもたらす災害・被害の評価のため、理学・工学・社会科学の各分野で培われた数値解析手法が適用できるような都市全体の解析モデルを構築し、実際に、巨大地震がもたらす災害・被害予測を行うことを目的とした研究を進めている。平成 27 年度に統合地震シミュレーション (Integrated Earthquake Simulation, IES) が共有された、東北大学・新潟大学・東京工業大学・山梨大学・神戸大学・香川大学・高知工科大学・九州大学と理化学研究所計算科学研究機構の協力により、仙台・新潟・東京・甲府・兵庫県下複数都市・高松・高知・福岡を対象とした IES の活用が行われた。このうち、兵庫県下複数都市および高松市では津波遡上、さらに高松市では避難シミュレーションの連成が実施されている (図 6)。(拠点間連携研究 [課題番号: 2977]、縣・他, 2065; 藤田・他, 2016)

ウ. 地震による地すべりの事前評価

航空レーザー計測データを活用したハザードマップ作成手法について、甚大な被害を引き起こす降下火砕物についての試案をとりまとめた。西南日本の海溝型地震による既往斜面崩壊分布を文献調査し、現地調査を開始した。関東地方南西部の降下火砕物には 1923 年関東地震などによって流動的崩壊が多数発生したことがわかり、また、西南日本外帯の付加体の堆積岩と変成岩の大規模崩壊には地質・地形的タイプがあることの見通しが得られた。昨年度末にインストールした新しい加速度・傾斜センサーによって 2016 年 4 月 1 日 11:39 に三重県の南東沖で発生したマグニチュード 6.5 の地震について、基盤から移動土塊、地表面に至る地震動の増幅過程を明らかにすることに成功した。

盛土における地震時の不安定度の危険度評価をおこなうため、kHz オーダーのサンプリング周波数を持つ計測システムを導入し、高感度加速度計を用いた屈折法探査を実施することにより、アスファルトに覆われた地盤でも簡便に地下水位を非破壊で推定することに成功した。

2016 年 4 月 16 日に発生した平成 28 年 (2016 年) 熊本地震による斜面災害の分布を調査し、さらに現地調査をおこなった。自然斜面の地すべり・崩壊は、カルデラ内の西部とカルデラ壁斜面において集中的に発生し、岩盤急斜面の崩壊とともに、傾斜 10 度前後の緩斜面でも急速な地すべりが発生したことがわかった (図 7)。後者の多くは草千里ガ浜軽石などの風化した軽石またはその近傍、および黒土にすべり面を持つことが明らかになった。阿蘇大橋西側の崩壊は、その前兆として、事前に斜面が重力によってずり下がり、小崖が形成されていたことがわかった (図 8)。軽石層からサンプルを採集し含水比、密度など各種パラメータを推定したうえで、リングせん断試験機を用いてせん断実験をおこなったところ、軽石層の強度や間隙水圧の発生メカニズムが明らかになった (図 9)。盛土斜面 (谷埋め部) において、亀裂分布から地すべりは旧谷地形と一致し、また、その領域で被害が卓越することがわかった。南阿蘇村の住宅地の地すべりにおいては、同定した地すべりブロック内を横切って地表 (分岐) 断層の変位が見られた。実施した表面波探査によっても断層が深部から地表まで続く低速度帯としてイメージされた (図 10)。(京都大学防災研究所 [課題番号: 1912]、Chigira and Suzuki, 2016; Wang et al., 2016; 千木良・他, 2017; 釜井・他, 2016; 王・他, 2016; 土井・他, 2015; 釜井, 2016)

エ. 火山灰や溶岩噴出の事前評価

2016 年 7 月 26 日桜島 (昭和火口) 噴火 (噴煙の高さ: 火口縁上 5000m) に伴う降灰予報について検証を行

った。総噴出量を降灰調査の結果に基づき、噴煙の高さが同じであった2013年8月18日噴火の1/10に設定して再計算した結果、予想降灰域は大きく変化しないが、予報過多であった予想降灰量は改善することを示した。

2016年10月8日阿蘇山噴火に伴う降灰予報について、噴煙高度を気象レーダー・衛星で解析された海拔11kmから14kmまで変えて再計算を行った。降灰の観測あり／なしに対するカテゴリ検証の結果、海拔13km付近の噴煙高度を供給源とした場合が降灰分布をもっとも再現することを示した。しかし遠地の予想降灰量は過多の傾向であり、移流拡散モデルで考慮していない凝集の影響が示唆された。

降灰予報で使用している領域移流拡散モデル本体について、次世代非静力学モデル (asuca) である気象庁局地モデルのモデル面GPVを直接入力できるように改修し、従来の非静力学モデル (NHM) 互換GPVを入力した場合と同等の予測結果が得られることを確認した。あわせて気象庁局地解析も入力できるように拡張した。

(気象庁気象研究所 [課題番号: 7010]、新堀, 2016)

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

ア. 地震動の即時予測

地震動の即時予測の新たな方法として、震源とマグニチュードの推定を介さず、リアルタイムの揺れの実況値から直接揺れの伝播を予測する方法の開発を進めている。この方法は、現在の緊急地震速報で取られている、震源とマグニチュードを決定し、震源を設定して震度の空間分布を推定する方法に比べ、安定した予測が可能になる。平成28年(2016年)熊本地震 ($M_{\text{JMA}}6.5, 7.3$) 等で観測された実波形データに適用し、散乱・減衰構造の導入を行うなど予測モデルの改良を行った。その結果、一様構造を用いた場合と比べて、遠い未来においても、正確な構造モデルを用いれば予測震度が概ね震度差1以内に収まる精度で行えることを確認した(図11)。また、現在業務への導入が検討されているPLUM法(本研究課題の手法の簡易版に相当する。伝播方向や距離減衰が入っていない簡易手法のため10秒以上遠い未来の予測には向かない)を熊本地震のデータに適用したところ、複数地震同時発生時にも安定した予測を行うこと、さらに、気象庁津波地震早期検知網(全国で約270観測点)に気象庁震度観測網(約400点)を加える効果などにより、おおよそ2~4秒早めることができること、を確認した。

従来手法における正確なマグニチュード推定のため、海底地震計の筐体の回転など強震入力時の挙動の解析を進めた(回転により加速度波形のゼロ点がずれ、変位波形に変換すると見かけ上の大振幅が現れる)。H27年度までの解析で、上下動成分には筐体の回転の影響が比較的現れにくいこと、また、地盤の増幅特性の地域性が(水平動に比べて)比較的小さいこと、が分かったので、H28年度は、この知見を実データに適用しながら、精度の良いマグニチュード推定の解析を進めた。(気象庁気象研究所 [課題番号: 7008], Ogiso et al., 2016; Kodera et al., 2016)

上記研究のように揺れの実況分布から揺れの伝播を予測するには、観測点密度が重要なため、気象庁観測点よりも高密度で配置されている自治体震度計の利活用を目指した検討を行っている。鳥取県管理の計測震度計にリアルタイム震度と最大加速度値の1秒パケット送信機能の付与を受け、鳥取県情報ハイウェイを介してその情報を安定的に受信、表示する受信側のシステム開発をおこない、常時接続状態での安定稼働を確認できるまでに至った(図12)。表示システムの作成が2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震以降になったことは残念であるが、上記パケットを受信し、表示するシステムも現時点では安定して動作している。計測震度観測点以外への面的な補間、伝播予測とデータ同化を活用した即時震度予測に向けて開発を継続している。震度計観測点における震度情報から周辺の非観測点での震度を予測することを想定し、常時微動を用いた地盤震動特性の稠密把握および地下構造モデルの構築を実施した。平成28年度は、既往観測点分布が粗な地域のうち、境港市、湯梨浜町羽合・東郷地区および鳥取市鹿野町・青谷町を対象とし、既往データを補間した卓越周期分布および浅層地下構造モデルを得ることができた。(鳥取大学[課題番号: 2001],

香川・野口, 2016 ; 野口・他, 2016 ; Noguchi et al., 2016)

輻射伝達理論に基づく Multiple Lapse Time Window 法によって九州地方の散乱減衰と内部減衰の同時推定を行った。昨年度より使用観測点を増やし、また、解析に用いる地震の条件を吟味するなどした結果、昨年度明らかになった活火山周辺に加え、一部の活断層周辺においても局所的に散乱及び内部減衰が大きいことが明らかとなった(図13)。加えて、地震動即時予測においても減衰構造とともに速度構造の影響が予想されることから、走時トモグラフィを用いた高解像度の速度不均質推定にも着手した。不均質な減衰構造の推定とともに地震動即時予測スキームの拡張も進め、不均質な散乱・減衰構造を取り込んだ計算が行えるようになった。この拡張したプログラムを用いて、平成28年熊本地震の一連の活動のうちの最大地震(4月16日1時25分、 $M_{JMA}7.3$)の地震動即時予測シミュレーションを行ったところ、不均質構造を取り込むことによって、震度予測残差の2乗平均平方根(RMS)が約10%程度(10秒後の震度予測の場合)改善されることがわかった(図14)。また、より未来の予測になると予測残差のRMSの改善度合いが向上することが分かった。これは、リードタイムの長い予測を行う場合には不均質構造を考慮することが必須であることを示している。また、地震動即時予測に不可欠な観測点のサイト特性を補正する時系列フィルタの推定を行った。(公募研究[課題番号:2935], Ogiso et al., 2016 ; 小木曾・他, 2016 ; 志藤・他, 2016)

関東平野の堆積層構造とプレート構造を考慮した3次元地下構造モデルを用いて、東周辺で発生する地震について、水平・鉛直方向に10km間隔でグリーン関数を計算し、データベース化した。1次元地下構造を仮定して求めたグリーン関数(3次元グリーン関数)との比較を行なったところ、波線が堆積層を通過し表面波の励起が強い地震や、プレート内を遠距離伝わる地震伝播経路で3次元地下構造の影響が大きく、グリーン関数の初動到着時刻、P波・S波振幅、後続相の継続時間の違いが大きくなることが確認された。また、3次元グリーン関数と1次元グリーン関数の違いは、地震波の周期帯が短いほど大きくなること、関東周辺で発生する地震においては、周期30~50秒の長周期帯でも差が見られることを確認した。次に、3次元グリーン関数をリアルタイムモーメント・テンソルインバージョンシステム(Grid MT)に導入し、関東周辺の地震活動モニタリングを行った。2016年11月~12月の1ヶ月間に11個の震源を求めたところ、半数以上において従来の1次元グリーン関数を用いたインバージョン結果より波形の説明が良いことを、波形の一致具合(Variance Reduction)から検討した。なお、モニタリングは継続中であり、推定結果の気象庁一元化震源による震源位置の確認やプレート上面深度との関係等からの結果の妥当性の検討を行うとともに、現在30秒までの解析周期帯を、より短周期に拡大するなど、リアルタイムモーメントテンソルインバージョンの精度向上をはかる。(東大地震研[課題番号:1516])

イ. 津波の即時予測

防災科学技術研究所は日本海溝・千島海溝に沿って約125の津波計(圧力計)と地震計がケーブル式ネットワークシステム(S-Net)として設置中である。震源域直上近傍にS-Netのように密な海底圧力観測網があれば、地震の震源過程や波源を推定せずとも、直接観測波形データから津波数値計算を開始する新しい手法を開発することが重要だ。ここで問題となるのが、震源域直上の海底圧力計の場合、地震による海底地殻変動により海底圧力計も隆起または沈降するため、実際の海底変動(津波初期波形)が記録できないことにある。昨年度はそれを解決する手法の開発に成功した、本年度はその手法を2011年東北地方太平洋沖地震の津波に適応し津波浸水域の予測を試みる。震源モデルを用いて津波を計算し約30km間隔に設置された場所で津波計算波形を出力した。その波形を用いて新しい手法で震源域での津波波高分布を推定し、その波高分布から津波を計算した。震源モデルから直接津波を計算した結果と30km間隔の観測波形から計算された波高分布を比較すると、短波長の津波はやはり上手く再現できていないが、長波長の津波は上手く再現できていることが分かる。さらに、Gusman et al.(2014)の手法を用いて、山田・釜石・陸前高田・南三陸・仙台平野での津波浸水域及び浸水高の予測を試みた(図15)。南三陸では津波浸水域・遡上高とも上手く予測

できているのが分かる(図16)。他の地点でもある程度上手く予測できることが分かった。つまり、2011年東北地方太平洋沖地震の発生前に30km間隔の海底圧力観測が実施されていれば、本手法とGusman et al. (2014)の手法を用いることで、地震の破壊過程終了後2~3分程度で津波浸水予測が出来ていたことになる。

2012年ハイダグワイ巨大地震(Mw7.8)がカナダ太平洋沖で発生し、その津波が太平洋を伝播した。当時米国オレゴン沖には10kmから50km間隔で海底地震計が設置されていた。これらの地震計網には海底圧力計も搭載されていたため、津波波形を観測することが可能となった。これらの津波波形をデータ同化により津波の伝播を直接計算するMaeda et al. (2015)の手法を用いて津波伝播を予測した。震源モデルから計算される津波と観測波形からデータ同化により計算される津波を比較すると、観測網に入った津波は多くの観測点を通過する毎に再現性が良くなっている様子が良く分かる。遠地の津波に対して観測波形のみを用いたデータ同化による津波予測がオレゴンの沿岸に到達するところには非常に上手く行っていることが良く分かる。津波即時予測の有効性が十分に確認された。(北海道大学[課題番号:1005]、Gusman and Tanioka, 2016; 谷岡・Gusman, 2016)

震源域内で観測される地震動・音波等の非津波成分に伴う圧力変動が津波予測精度に与える影響を、理論合成データを用いた数値実験により検証した。ローパスフィルタ適用後に残存する地震動に伴う圧力変化の影響で、観測波形が短い地震発生直後は精度が低下するものの、時間が経過して観測データが増えると、精度低下は大幅に改善することを明らかにした。沖合と海岸の観測点での津波高の関係について、沖合から海岸へと津波の高さが水深比の1/4乗に比例して増幅することが経験的に導かれていたが、2011年東北地方太平洋沖地震津波で得られた観測値から、大津波まで含めると増幅率が水深の1/5乗に比例することを見いだした。遠地津波の減衰過程だけではなく成長過程までを含めた全期間の振幅時間変化を説明するため、津波エネルギーの伝達過程を踏まえた考察に基づき、波源と二次波源(散乱源)、伝播経路、観測点付近の効果の3つに区分して、それぞれの段階ごとに数理モデル化した。遠地津波の観測事例にこの数理モデルを適用して、減衰定数などのパラメータの推定を進めた。(気象庁気象研究所[課題番号:7011])

津波生成磁場を陸上の磁場観測で検知することを目的として、高知県馬路村土川地区において地磁気観測を行っている。津波生成磁場は室戸観測点(国土地理院)と馬路観測点の磁場のベクトル差によって検出可能と考えられるが、馬路観測点での観測開始以降、津波の発生はなく、津波生成磁場検出の例はまだない。室戸観測点と馬路観測点の磁場のベクトル差を求めると、Z成分で差の変化が大きいことがわかった。これは室戸観測点が半島の先端に位置しており、外部磁場変化に伴い海水中に誘導された電流が半島を避けて流れることによるいわゆる半島効果で説明できることがわかった。

2011年東北地方太平洋沖地震では父島において地磁気Z成分に津波起源と考えられる1nT程度の明瞭な磁場変動が観測された。そこで2006年11月15日千島列島東方の地震(Mw8.3)による津波の例についても調査した。その結果、父島観測点において津波到達の20分前からZ成分に0.2~0.3nT程度の微弱な磁場変化が観測されていることがわかった。さらに、津波生成磁場の数値シミュレーションを用いて観測結果と比較したところ、観測結果をほぼ説明できることが確かめられた。(気象庁[課題番号:7007])

ウ. 地殻変動のリアルタイムモニタと震源断層の即時推定

平成28年度は主として3つの研究項目を実施した。1点目が平成27年度に実施したキネマティック精密単独測位法における最適対流圏遅延パラメータ決定の網羅的探索であり、2点目が精密可動台を用いた移動体におけるリアルタイム・キネマティックGNSS解析の精度評価である。また、3点目がゆっくりとした地殻変動場を捉えることを目的としたGNSS搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法の精度評価である。

平成27年度に実施した、キネマティックPPP解析における対流圏遅延に関する未知パラメータの推定時に使用するハイパーパラメータ(解析時に必要とするカルマンフィルタのプロセスノイズ)の最適値探索の時間

的な安定性を評価した。具体的には平成27年度に実施した座標時系列の擾乱がもっとも小さくなる(標準偏差がもっとも小さくなる) 天頂湿潤大気遅延量とその勾配量のグリッドサーチによる探索を、特定の観測点において1年間通じて行うことで、推定される最適対流圏遅延パラメータの時間変化を確認した。その結果、天頂湿潤大気遅延量とその勾配量ともに冬季は値が小さく、夏季は大きいという年周変化が確認された(図17)。特に、勾配量において年周変化の振幅が大きく、最適値の振幅が冬季と夏季で1桁異なる結果が得られた。さらにそれらの特徴は観測点毎に異なることも明らかになった。これらは、キネマティックPPP解析の高精度化において、各観測点、日付毎に最適対流圏遅延パラメータを推定することで座標値推定精度が向上しうることを示す重要な成果である。

平成27年度に開発した3軸精密可動台を用いたキネマティックGNSS時系列の精度評価を行った。特に移動体特有の動きを可動台に与え、その動きをGNSSでどの程度再現できるかについて検証を行った。今回使用した3軸可動台は水平1軸の移動に加えて、回転、傾斜を同時に駆動できる。可動台には海上のブイの動揺を模した動きを与えた。GNSSは10Hzサンプリングでデータを取得した。GNSSアンテナにはアンテナ位相特性がほぼゼロオフセットのTrimble社製のZepher Geodeticアンテナを用いた。解析にはきわめて短い基線長(～10m)での基線解析を採用した。GNSSデータで得られた解析時系列を確認すると、可動台で与えた動きをキネマティックGNSSはおおよそ再現できているものの、可動台に回転成分を与えた場合に、その一致度が低下することが明らかになった。そのため、可動台に周期20秒で±50度の回転成分のみを与えて、同様にキネマティックGNSS解析を行いその挙動を見た。その結果、本来であればほぼ変位が確認されないはずの条件下における実験にもかかわらず、周期が20秒程度で振幅が10mm程度の明瞭な変位がキネマティックGNSS時系列に確認された。可動台が持つ可動精度は十分高いことや、回転にのみ現れる変位であることから、当該の動きは実際のアンテナ位置の変位ではなく、GNSSアンテナの回転によるPhase wind up効果である可能性が高いと結論付けた。同効果は、特に海上等での移動体における高精度な測位におけるノイズ源となりうる。一方で、回転角度を別データから知ることができれば、これらの補正は可能であると考えられる。次年度以降、可動台に与えた回転角度データからPhase wind up効果の補正を試み、移動体におけるGNSS測位解精度の向上を目指す。

数日から1日以下程度の時定数を持つ地殻変動場を精密に捉えるためのGNSS解析の高精度化に係る研究開発を主として進めている。特にキネマティックGNSS解析では、対流圏遅延に起因する未知パラメータと座標値との分離が原理的に困難であり、その精度向上を困難にしている。さらに、そのようにして推定されたキネマティックGNSS時系列には、対流圏遅延に起因する誤差がその量の多寡は別として重畳し、最終的に求めたい地震・火山現象(例えば断層すべりの時間発展)の推定の妨げとなる。このような観点から、通常キネマティックGNSS解析を行って座標値を推定し、それを用いて断層すべりを推定する方法ではなく、GNSSの搬送波位相データから直接断層すべりを推定する手法が提案されている。同手法では対流圏遅延等の誤差を座標値に押し付けることなく、断層すべりを直接推定する。そのため、それら誤差を含めて一連の解析の中で推定することが可能である。本年度は、同手法の適用可能性を評価するために、まず地震時変位をどの程度正確に推定できるかの検証を実施した。対象とした地震は2016年熊本地震である。問題を単純化するために地震時断層面は先行研究(Kawamoto et al., 2016)で示されている1枚の矩形断層を仮定し、断層面上での地震時横ずれ成分のみを推定した。震源域周辺8点のGEONETデータを用いた。その結果、地震発生時刻を境として、約3.6mの地震時すべりが推定され、同手法によって一定程度地震時すべりを推定できることが明らかになった。その一方で、断層すべりの中長期的なふるまいを見ると、対流圏に起因すると考えられる長周期の誤差成分が卓越することも明らかになった。次年度以降は、こうした長周期の誤差成分がどのようなふるまいを示すかの検討をより詳細に進める。(東北大学[課題番号1209], Hirata and Ohta, 2016; Inazu et al., 2016; 井上・他, 2016; Kawamoto et al., 2016; 太田, 2016)

観測点周辺の地上構造物からのマルチパス誤差を、長期間の位相残差データをスタックし数値化することで、マルチパス誤差を定量的に評価する手法を開発した。また、得られたマルチパス誤差を補正值としてキネマティックGNSS解析に用いることで、精度の向上が見込めることを確認した。さらにGEONETリアルタイム解析システムで用いている有限断層モデル推定ルーチンの改良を行った。まず、海溝沿いのすべり分布モデルを、適用する地震の対象領域を絞ることで誤ったモデル推定を行う可能性を軽減した。また、矩形断層モデルの評価に用いるVariance Reduction (VR) の計算方法の見直しを行い、固定点で変位が発生した際にも適切なVRが算出されるよう改修を行った。さらに、すべり分布モデルにおける地震規模計算時に一定のモデル誤差を下回るすべりを除外する処理により、M7.5を超える地震で適切な地震規模が算出されるよう改修を行った。(国土地理院地殻活動研究センター [課題番号: 6004], 川元・他, 2016; Kawamoto et al., 2016)

地震直後に地震の規模や断層の広がりや断層の向きを推定する手法として、国土地理院との共同研究としてGNSSデータ 1 Hzサンプリングデータを用いた震源断層解析手法の開発を継続して実施し、2003年十勝沖地震に適用し手法の有効性を確認した(気象庁気象研究所 [課題番号: 7009])

エ. 火山灰や溶岩噴出の即時予測

2009年以降、ブルカノ式噴火の発生頻度がきわめて高い桜島を対象に、噴火に伴う噴煙の早期検知と粒子密度の推定を目的とした地上観測を実施した。地上からの観測で用いた手法はGNSS、XバンドMPレーダー、ライダー(Light Detection and Ranging)であり、この順に波長が短くなる。

2015年夏以降、桜島の噴火活動は低下しており、2016年は43回の爆発しか発生しなかった。そのうち、2016年7月26日の爆発は、噴煙高度5000mに達した2016年では規模の大きい噴火であるが、GNSSとXバンドMPレーダーでは顕著な変化を検出することができなかった。これは、噴煙高度は高いものの火山灰濃度が低いと考えられる。その理由は、噴火に伴う地盤の収縮量から火山灰量は600トン程度と推定されること、地上降灰量観測からも同程度と見積もられることによる。噴煙高度が5000mに達した2013年8月18日の爆発に伴う火山灰量は15万トンと見積もられており、2016年7月26日の爆発に伴う火山灰量は、はるかに少ない。このことは、噴煙高度をパラメータとして噴出量を見積もることの限界を示している。光学観測であるライダーでは火山灰を検知しており、高い偏光解消度が得られた。

ライダー装置から発射されるレーザーを2016年7月26日の爆発に伴う噴煙に照射することにより、散乱強度と偏光解消度(散乱粒子の扁平度を示すパラメータで、粒子が球形であれば、偏光解消度は0であるが、扁平になるにつれて偏光解消度は増加する)の時空間分布を調べた。散乱強度と偏光解消度の時間変化及び火口からの距離による低下から、爆発直後の火口上空では極めて高い散乱強度と偏光解消度が得られた(図18)。散乱強度は火口からの距離が離れるにつれ、また、時間が経過するにつれて減少する。散乱強度の現象は、散乱する粒子の濃度の低下を示すので、噴煙の拡散及び火山灰粒子の地上への落下による火山灰粒子濃度の低下がその原因と考えられる。一方、偏光解消度は、爆発直後の火口上空において0.7という極めて高い値が得られた。爆発発生から約9分間は0.5~0.7という高い値であったが、その後は、0.4~0.45程度の値で安定した。2016年7月26日の爆発以外についても調べたが、0.7程度の偏光解消度が観測されるのは、爆発直後の火口上空(距離500m程度)に限られることがわかった。火山から100km以上離れたライダーにより火山灰を捕捉した先行研究でも偏光解消度は0.4以下であり、今回得られた値は、ライダー観測による偏光解消度として世界最大の値が得られたといえる。微弱な火山ガス放出時においても、ライダーによって散乱体の検出ができた。散乱強度は火口からの距離が離れるに従い減少し、粒子数の低下を意味する。一方、偏光解消度は火口上空では0.1以下で小さいが、火口から離れるに従い、0.4程度まで増加する。火口上空の偏光解消度0.1程度の値は、火山ガスが冷却され、球形の水滴が形成されているものと考えられる。偏光解消度の増加は相対的に球形粒子に対して非球形粒子が増加していることを示す。散乱強度が低下して粒子数が減少していることを考慮すると、球形粒子である水滴が乾燥により減少していると考えるのが妥当であ

る。爆発直後の火口直上において、0.7 という高い偏光解消度が得られたことは、球形粒子が少ないことを示唆する。熱赤外映像観測によれば、爆発直後の噴煙の温度は表面においても 600°C であり、爆発後数分間は 200°C 以上の高温を示す。高温状態では、球形粒子は存在できないので、噴煙中の粒子は非球形である火山灰粒子のみで構成される。この状態は短時間しか続かず、偏光解消度は 0.5 付近まで急激に低下する。粒径の大きい火山灰粒子の落下と温度低下による水滴の形成が、非球形粒子数の減少と球形粒子数の増加という相対的な非球形粒子濃度の減少を引き起こしたと考えられる。

2016 年 10 月 8 日に阿蘇山で爆発が発生した。この爆発による噴煙柱形成は GNSS 解析の位相残差とその信号強度である SN 比の変化として検出できた (図 19)。GEONET703 観測点 (阿蘇：阿蘇山北側カルデラ内) では噴火発生直後から最大 10cm の LC 位相残差増大と 3~4dB の SN 比の低下が観測されたが、474 観測点 (久住：阿蘇山北東カルデラ外) では明瞭な変化がなかった。703 で変化を検出した衛星の高度と変化がなかった 474 観測点の火口方向の衛星の高度を考慮すると噴煙の高度は 8.0km~12.5km と推定される。より時間分解能を高めるために 1 秒サンプリングのデータの解析も行った。SN 比の減少は噴火後約 400 秒で終息したが、位相残差の増加は 600 秒程度まで続いた。4-6cm の位相残差の増加に対して 4dB-Hz 程度の SN 比の減少となった。SN 比変化の位相残差の増加に対する割合は、1~1.5dB-Hz/1cm となり、桜島南岳噴火時の位相残差の増加の割合 (5db-Hz/1cm) と比べると少ない。

噴煙粒子の形状と落下速度の関係を明らかにすることを目的として、桜島で採取した噴煙粒子のサンプルを、防災科学技術研究所の大型降雨実験施設内で自由落下させ、地上に設置した 2 次元ビデオディストロメータにより測定することで落下速度、形状、落下姿勢などの噴煙パラメータを求めた。得られた粒子の軸比と落下姿勢から、噴煙粒子の形状を球状、扁平楕円体の水平および鉛直、偏長楕円体の水平および鉛直の 5 種類に分類し、それぞれの粒子の落下速度を求めた。落下姿勢の観点からは、水平向きの粒子の終端速度は鉛直向きの粒子よりも遅いことが確かめられた。形状の観点からは、扁平楕円体の粒子の終端速度は偏長楕円体粒子の終端速度よりも遅いことがわかった。これらの情報は噴煙のふるい分け効果に伴うレーダー反射強度や反射因子差の水平分布などの時間変化の解釈や降灰のノウキャスト手法の開発に役に立つであろう。

(京都大学防災研究所 [課題番号：1913]、Elosson et al., 2016 ; Iguchi, 2016 ; Maki et al., 2016 ; Oishi et al., 2016 ; Tanaka et al., 2016)

2016 年 3 月 26 日桜島 (昭和火口) 噴火 (噴煙の高さ：火口縁上 2,700m) に伴う噴煙について、Ku バンド高速スキャンレーダーによる観測データの初期解析を行い、噴煙の 3 次元構造及び観測サイトにおける天頂方向のドップラー速度分布を得ることが出来た。この観測データは、世界で初めて、約 1 分毎に火山噴煙の詳細な 3 次元構造を捉えたものである。X バンド MP レーダーについても噴煙の観測を行い、複数の事例について、噴煙の二重偏波パラメータの取得に成功し、初期解析を行った結果、噴煙内部の二重偏波パラメータの空間的・時間的構造の定性的な変化傾向を掴むことが出来た。2016 年 10 月 8 日阿蘇山噴火に伴う噴煙の高さについて、気象研究所で開発した気象レーダーを用いた噴煙高度の確率的推定手法を用いて解析を行った結果、海拔 12,000±687m (1σ) となり、合成レーダーによるエコー頂高度である海拔約 15,000m を良く補正している。

気象庁レーダー観測網による日本国内における火山噴火噴煙の検知能力、各火山・高度別の検知時間間隔や高度分解能について調査し、小規模な噴火が検知困難な火山や、大規模噴火の検知高度分解能について明らかにした。近年、発生した火山噴火 (浅間山 2009 年、霧島山新燃岳 2011 年、御嶽山 2014 年、口永良部島 2015 年、阿蘇山 2016 年噴火) について気象庁レーダー観測網で観測されたエコー頂高度の時間変化より、噴出物総量を推定し、野外調査から求められている噴出物総量と比較した。両者は概ね一致し、気象レーダーにより噴出物総量を推測できることを示した。(気象庁気象研究所 [課題番号：7010]、佐藤, 2017 ; 高木・他, 2016)

3. これまでの課題と今後の展望

研究計画の3年目として、それぞれの研究課題において既往研究成果の高度化が進み、また新たな取り組みに関して成果が蓄積されており、地震・火山噴火の災害誘因の事前評価や即時推定における実用化に近づきつつある。実用化に向け、残る課題を追求するため、以下を当面の方針として次年度以降の検討をおこなう。また、これら事前・即時予測に関する情報を効果的に社会に伝達し減災に繋げるため、社会科学と連携した検討を模索する。

(1) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

震源モデルの高度化については、プレート境界巨大地震の強震動生成過程についての検討を継続するとともに、期間中に発生した被害地震等の震源モデリングを行う。2次元的な震源断面における破壊伝播の推定や評価には水平方向のみならず深さ方向の破壊伝播特性も考慮した分析が必要であることが2016年熊本地震で判明したため、その精度向上も視野に入れたい。

地下構造モデルの高度化に関して、観測記録に基づく堆積盆地地盤応答特性の抽出と分析を継続し、既往の地下速度構造モデルの妥当性検証と改良を継続する。広帯域強震動予測を目的とする巨大地震の震源モデル検討を行う。引き続き強震観測を行い、地盤応答特性把握のための記録の取得に努める。また、2016年熊本地震や鳥取県中部地震のデータ解析を通じて西南日本と東北日本の表面波伝播の地域性と地下構造との対応を明確化し、浅い地殻内地震による強震動と長周期地震動の伝播特性と予測精度の向上をはかる。南西諸島全体のシームレスな減衰トモグラフィを実施し、熊本地震等の震源域周辺の減衰構造との比較から、地震発生との関係を調査する。

南海トラフ地震等の巨大地震による長周期地震動の予測の高度化に向け、関東平野等の主要平野における長周期地震動増幅強度の方位性とその成因を、地震観測データ解析と地震波伝播の差分法シミュレーションに基づき検討する。得られた成果を、南海トラフ地震等の巨大地震による長周期地震動の予測の高度化に繋げる。また、深発大地震に伴う高加速度強震動の予測に向け、深発地震による高周波数かつ長時間継続する強震動の生成過程を、不均質なスラブ内部の地震波の伝播・導波特性と鉛直入射波の地殻での増幅特性の観点から詳しく検討する。

地震時地すべりの事前評価に関して、南海トラフおよび相模トラフの海溝型地震によって発生した深層崩壊について、航空レーザー計測データを用いて地形解析するとともに、現地調査を行い、それらの特徴を明らかにし、また、共通する地質・地形的特徴を抽出し、今後の海溝型地震による発生場所予測手法を検討する。また、これまで地震観測を展開してきた四国の受け盤大規模岩盤斜面、紀伊山地の重力変形斜面、東京都の盛土斜面、北海道の海岸地すべりにおいて継続して観測をおこなう。さらに、観測されたデータの解析や波動シミュレーションから、斜面の地震応答特性を見積もり斜面全体の揺れ方を把握し、斜面安定性に影響を与える地震動の特徴抽出をおこなう。また、水圧や傾斜、地表変位などの他項目観測との比較から、地震時の斜面内部で起こっている現象や斜面が不安定となる地震動の大きさを見積もる。

(2) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

地震動の即時予測について、実データへの適用を進め、未解決の問題を検討するとともに、減衰構造や速度構造の精緻化により予測モデルの構築を進める。自治体震度計からの毎秒パケットを受信、表示する基本システムに地盤増幅特性（観測点補正值）を適用し、即時予測システムへと拡張する。鳥取県中部の地震で得られた記録を用いて、システムの検証と運用のチェックをおこなうと同時に、実務でのシステムを試用試みる。また、鳥取県中部の地震で被害を生じた地域をモデル地区として、より詳細な地震動分布を把握するため、常時微動観測を主とした調査を実施する。

津波の即時予測については、これまでに開発手法の有効性が検証されたので、対象域を北海道太平洋沿岸

にも拡大し、沿岸主要地域での津波浸水予測データベースを作成し、その有効性を確かめる。

地殻変動データの利活用については、数日から1日以下程度の時定数を持つ地殻変動場を精密に捉えるためのGNSS解析の高精度化に係る研究開発を主として進める。特に平成28年に検討を開始したGNSS搬送波位相データから断層すべりを直接推定する手法の数日から1日以下程度の時定数を持つ地殻変動現象への適用可能性についての検討を主として進める。また3軸精密可動台を用いた可動試験をより多様かつ長時間のデータに対して適用し、精度評価を進める。また、こうした結果にもとづいて地殻変動を自動検知・推定するアルゴリズム(RAPiD)の高精度化を進める。さらに火山活動の変化に伴って観測される山体変形を準実時間で確実に把握し、その変動源の時空間変化を推定する技術開発を継続する。

火山灰や溶岩噴出の即時予測について、XバンドMPレーダー観測、ライダー観測、GNSS観測を継続し、地上降灰量や大気中その場観測と照合することにより、反射強度、散乱強度等のリモートセンシングパラメータを定量化する。また、地殻変動、地震観測データに基づいて、火山灰噴出率と噴煙高度のリアルタイム評価手法を開発し、拡散シミュレーションのさらなる即時化を試みる。

成果リスト

- 縣亮一郎・市村強・兵藤守・堀高峰・平原和朗・堀宗朗, 2016. 震源断層の想定高度化に関する基礎研究- 高 詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変形解析手法の開発-, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学).
- 浅野公之・岩田知孝, 2016. 強震記録による 2016 年熊本地震の震源破壊過程, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, MIS34-P61.
- Asano, K. and T. Iwata, 2016. Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth Planets Space*, 68, 147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9.
- Chigira, M. and Suzuki, K., 2016. Prediction of earthquake-induced landslides of pyroclastic fall deposits. In: Aversa et al. (eds.) *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. Associazione geotecnica Italiana, Rome, 93-100. Invited paper.
- 千木良雅弘・古木宏和・笠間友博・鈴木毅彦, 2016. 震生湖をつくった地すべりは神奈川から東京に広く 分布する東京軽石層内にすべり面をもっていた 日本地球惑星科学連合大会 2016, 幕張.
- 土井一生・釜井俊孝・佐藤朗・王功輝・千木良雅弘・小川内良人・川島正照, 2016. 加速度・傾斜一体型センサーの開発とクリープ斜面での観測事例, 日本地すべり学会第55回研究発表会高知大会, 1-35.
- 土井一生・釜井俊孝・村尾英彦・久保久彦, 2016. 平成28年(2016年)熊本地震に伴う阿蘇谷北西部における亀裂の分布と成因 -特異な地震波形記録との関連-, 2016年日本地震学会秋季大会予稿集, S3-P21.
- 土井一生・釜井俊孝・佐藤朗・王功輝・千木良雅弘・小川内良人・川島正照, 2016. 新しい傾斜計・加速度計一体型センサーの開発、平成28年度応用地質学会研究発表会予稿集、67-68.
- Elisson, J., Weber, K., Vogel, A., P lsson, T., Yoshitani, J., Miki, D., 2016. Investigation and separation of turbulent fluctuations in airborne measurements of volcanic ash with optical particle counters, *Jour. Disast. Res*, 11, 72-84.
- Eliasson, J., Yoshitani, J., Miki, D., Weber, K., B lke C., Scharifi, E., 2016. Measurements of particle distribution and ash fluxes in the plume of Sakurajima volcano with optical particle counter, *Jour. Disast. Res*, 11, 85-95.

- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Maddegedara Lalith Lakshman・田中聖三, 2016. 都市の高分解能な地震被害想定の高速度のための基礎的研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学).
- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Maddegedara Lalith Lakshman・田中聖三, 2016. 多数の地震シナリオに対する高分解能な都市震災想定のためのHPCによる基礎検討, 土木学会論文集 A2(応用力学).
- Furumura, T., 2016. Destructive near-fault strong ground motion from the 2016 Kumamoto Prefecture, Japan, M7.3 earthquake, Landslides, accepted.
- 古村孝志, 2016. 昭和南海地震から考える、次の南海トラフ地震と前後の内陸地震への備え、日本地震工学会 NewsLetter、16号、pp2.
- Furumura, T., BLN Kennett, and S. Padhy, 2016. Enhanced waveguide effect for deep-focus earthquakes in the subducting Pacific slab produced by a meta-stable olivine wedge, J. Geophys. Res., accepted.
- Gusman, A. R., A. F. Sheehan, K. Satake, M. Heidarzadeh, I. E. Mulia, and T. Maeda, 2016. Tsunami data assimilation of Cascadia seafloor pressure gauge records from the 2012 Haida Gwaii earthquake, Geophys. Res. Lett., 43, doi:10.1002/2016GL068368
- Gusman, A. R., A. F. Sheehan, K. Satake, M. Heidarzadeh, I. E. Mulia, and T. Maeda, 2016. Tsunami data assimilation of Cascadia seafloor pressure gauge records from the 2012 Haida Gwaii earthquake, 日本地球惑星連合大会.
- Hirata Y. and Y. Ohta, 2016. Spatial and temporal characteristics of optimum process noise values of tropospheric parameters for kinematic analysis of Global Navigation Satellite System (GNSS) sites in Japan, Earth, Planets Space, 68:203, doi: 10.1186/s40623-016-0578-y.
- Iguchi, M., 2016. Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash ? case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan ?, Jour. Disast. Res, 11, 4-14.
- Inazu, D., T. Waseda, T. Hibiya and Y. Ohta, 2016. Assessment of GNSS-based height data of multiple ships for measuring and forecasting great tsunamis, Geosci. Lett., 3(25), doi:10.1186/s40562-016-0059-y.
- 井上拓也・太田雄策・越村俊一・日野亮太・川元智司・檜山洋平・道家友紀, 2016. GNSSによるリアルタイム断層推定情報の津波解析への適用手法の検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72(2), doi:10.2208/kaigan.72.I 355, 355-360.
- Iwata, T., H. Kubo, K. Asano, K. Sato, and S. Aoi, 2016. Long-period Ground Motion Characteristics and Simulations in the Osaka Basin during the 2011 Great Tohoku Earthquake, Proc. 5th IASPEI/IAEE Int. Symp. on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Taipei, paper I101A.
- 香川敬生・野口竜也, 2016. 自治体震度計によるリアルタイム情報配信の試み-鳥取県の事例-, 日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会, SSS29-P05.
- 釜井俊孝・土井一生・稲垣秀輝, 2016. 谷埋め盛土を含む ” 街 ” の地震応答, 日本地すべり学会第 55 回研究発表会高知大会, 1-36.
- 釜井俊孝, 2016. 2016 年熊本地震による斜面災害, 日本地震工学会誌, 29, 27-32.
- Kawamoto S., Y. Hiyama, Y. Ohta and T. Nishimura, 2016. First Result from the GEONET Real-time Analysis System (REGARD): the Case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, Earth, Planets Space, 68 (190), doi:10.1186/s40623-016-0564-4.
- 川元智司・檜山洋平・古屋智秋・佐藤雄大・太田雄策・西村卓也・等々力賢, 2016. 電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)プロトタイプの開発, 国土地理院時報, 128.
- Kawamoto, S., B. Miyahara, Y. Hiyama, Y. Sato, T. Furuya, Y. Ohta, T. Noshimura, and M. Todoriki,

2016. Real-time GNSS positioning system REGARD for rapid earthquake moment estimates, Proceedings of FIG 2016.
- Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miya-gawa, 2017. REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, J. Geophys. Res., in press.
- Kennett, BLN, and T. Furumura, 2016. Multi-scale seismic heterogeneity in the continental lithosphere', *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, G3, vol. 17, no. 3, pp. 791-809.
- 気象庁, 気象研究所, 2016. 平成 28 年(2016 年)熊本地震. 地震予知連絡会会報, 96, 492-556.
- Kodera, Y., J. Saitou, N. Hayashimoto, S. Adachi, M. Morimoto, Y. Nishimae, and M. Hoshiba, 2016. Earthquake Early Warning for the 2016 Kumamoto Earthquake: Performance Evaluation of the Current System and the Next-Generation Methods of the Japan Meteorological Agency, *Earth, Planets and Space*, 68:202, DOI: 10.1186/s40623-016-0567-1.
- Maeda, T., H. Tsushima, and T. Furumura, 2016. An effective absorbing boundary condition for linear long-wave and linear dispersive-wave tsunami simulations, *Earth Planets Space*, 68, 63, doi:10.1186/s40623-016-0436-y.
- Maki, M., Iguchi, M., Maesaka, T., Miwa, T., Tanada, T., Kozono, T., Momotani, T., Yamaji, A., Kakimoto, I., 2016. Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke, *Jour. Disast. Res*, 11, 15-30.
- 中田健嗣・小林昭夫・平田賢治・対馬弘晃・山崎 明・勝間田明男・前田憲二・馬場久紀・一ノ瀬里 美・牛田 堯・石原昂典・稲村嘉津也・蓮澤 豪, 2017. 自己浮上式海底地震計観測によって推定された紀伊半島南方の南海トラフ軸南側の地震活動. *地震*, 69, 59-68.
- Noguchi, S, T. Maeda, and T. Furumura, 2016. Ocean-influenced Rayleigh waves from outer-rise earthquakes and their effects on durations of long-period ground motion, *Geophys. J. Int.*, 205(2), 1099-1107, doi:10.1093/gji/ggw074.
- 野口竜也・西川隼人・吉田昌平・香川敬生, 2016. 鳥取県内の地震観測点における地盤構造の把握とサイト特性の評価, *土木学会論文集 A1*, Vol. 72, No. 4(地震工学論文集第 35 巻), I 646-I 658.
- Noguchi, T., T. Kagawa, S. Yoshida, and H. Ueno, 2017. Estimation of Subsurface Structure based on Microtremor and Gravity Survey in the Shikano Area, Tottori Prefecture, Japan, 16th World Conference on Earthquake Engineering.
- 野口竜也・西川隼人・香川敬生・吉田昌平, 2016. レシーバー関数を用いた鳥取県内の地震観測点における地盤構造推定, 日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会, SSS25-P25.
- 野口竜也・池上終真・上野太士・中井翔・有村翔也・吉見和・香川敬生・吉田昌平, 2016. 鳥取県中部地域における地下構造探査および地震記録の分析, 日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会, SSS25-P26.
- Ogiso, M., S. Aoki, and M. Hoshiba, 2016. Real-time seismic intensity prediction using frequency-dependent site amplification factors, *Earth Planets Space*, 68:83, doi: 10.1186/s40623-016-0467-4.
- 小木曾仁・干場充之・志藤あずさ・松本聡, 2016. 減衰構造を取り入れた揺れから揺れの即時予測の試み: 2016 年熊本地震, 日本地震学会 2016 年秋季大会, S21-P08.
- Ogiso, M., M. Hoshiba, A. Shito, and S. Matsumoto, 2016. Real time numerical shake prediction incorporating attenuation structure: a case for the 2016 Kumamoto Earthquake, AGU Fall Meeting, S23A-2746.

- 太田雄策, 2016. リアルタイム・キネマティック GNSS データ解析の高度化およびそれにもとづく巨大地震の震源断層即時推定手法に関する研究, 測地学会誌, 62(1), 1-19.
- Oishi, S., Iida, M., Muranishi, M., Ogawa, M., Hapsari, R. I., Iguchi, M., 2016. Mechanism of volcanic tephra falling detected by X-band multi-parameter radar, Jour. Disast. Res, 11, 43-52.
- 佐藤英一, 2017. Kuバンド 高速スキャンレーダーによる降水コアの観測と気象レーダーを用いた火山噴煙の観測計画について, 気象研究ノート「気象レーダー 60年の歩みと将来展望」(印刷中) .
- Sekiguchi, H., K. Asano, T. Iwata, M. Yoshimi, H. Horikawa, H. Saomoto, and T. Hayashida, 2016. Construction of a 3D Velocity Structure Model of Osaka Sedimentary Basin, Proc. 5th IASPEI/IAEE Int. Symp. on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Taipei, paper P103B.
- 志藤あずさ・松本聡・清水洋・2016 年熊本地震合同観測グループ, 2016. 2016 年熊本地震震源域の 3次元地震波速度構造, 日本地震学会 2016 年秋季大会, S21-P28.
- 下村智也・浅野公之・岩田知孝, 2016. レシーバ関数を用いた京都盆地の地震基盤深度の推定, 2016 年地震学会秋季大会, S16-P12.
- 新堀敏基, 2016. 火山灰輸送:モデルと予測, 火山, 61, 399-427.
- 高木朗充・長岡優・福井敬一・安藤忍・木村一洋・土山博昭, 2017. 2013-2015 年西之島噴火のモニタリングに関する研究, 気象研究所技術報告(印刷中).
- Takemura, S., T. Maeda, T. Furumura and K. Obara, 2016. Constraining the source location of the 30 May 2015(Mw 7.9) Bonin deep-focus earthquake using seismogram envelopes of high-frequency P waveforms: Occurrence of deep-focus earthquake at the bottom of a subducting slab, Geophys. Res. Lett., 43, 4297-4302.
- Tanaka, H. L., Iguchi, M., Nakada, S., 2016. Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal from Kelud volcano in Indonesia on February 13, 2014, Jour. Disast. Res, 11, 31-42.
- 谷岡勇市郎・A. R. Gusman, 2016. 海底圧力観測波形から直接津波数値計算を実施し即時予測を行う手法開発 -2011 年東北地方太平洋沖地震により発生した津波への適応-, 日本地球惑星連合大会.
- Yoshimitsu, N., T. Furumura, and T. Maeda, 2016. Geometric effect on a laboratory-scale wavefield inferred from a three-dimensional numerical simulation, J. Appl. Geophys., 132, 184-192, doi:10.1016/j. jappgeo. 2016. 07. 002.
- Wang, G., Chigira, M., Suzuki, T., 2016. Post shear behavior of pyroclastic fall deposits and landsliding phenomena during the 1949 Imaichi earthquake Japan Geosciences Union Meeting 2016, Makuhari.
- 王功輝・土井一生・釜井俊孝, 2016. 平成 28 年(2016 年)熊本地震時に生じた南阿蘇村の流動性崩壊, 日本地すべり学会第 55 回研究発表会高知大会, 1-31.

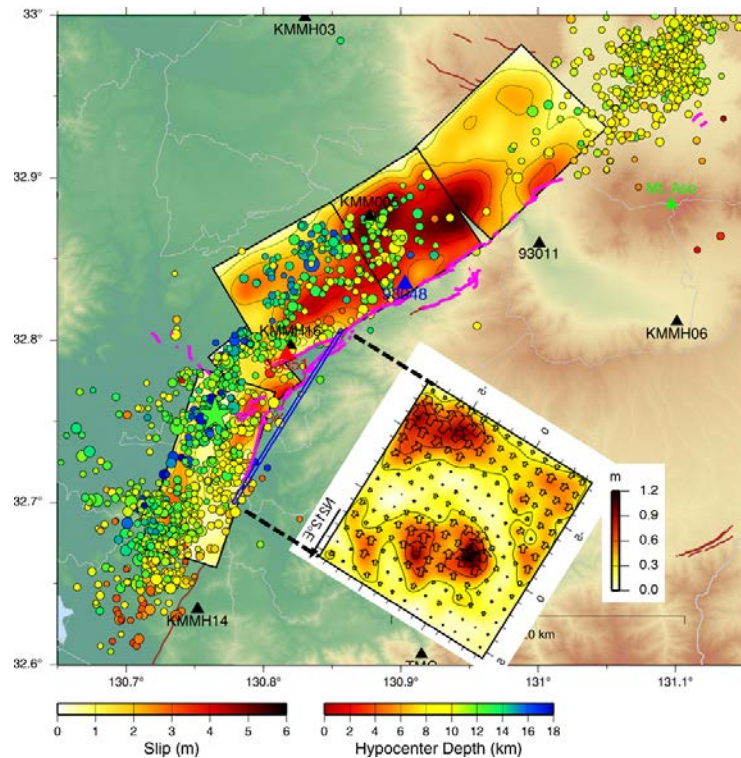


図1. 熊本地域で発生した2016年4月14日 (Mw6.1) および16日 (Mw7.1) の震源バージョン結果 (京都大学防災研究所 [課題番号: 1903])

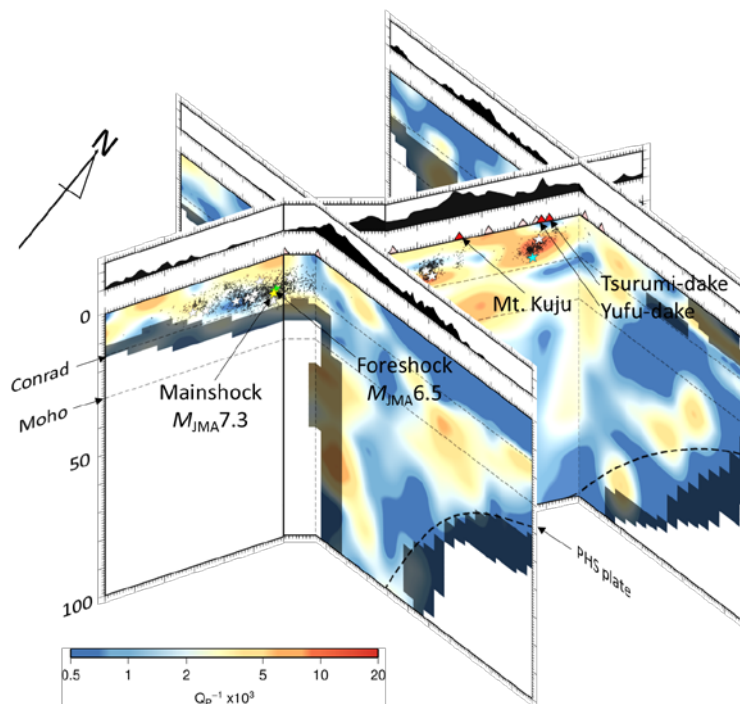


図2. 熊本地震震源域の鉛直断面およびフィリピン海プレートの走向に直行する断面における Q_p . 暖色系は高減衰, 寒色系は低減衰を表す. 黄色の星, 緑色の星, 白色の星は熊本地震本震, 前震, $M \geq 5.0$ の余震の震源をそれぞれ示す. 黒点と桃色三角, 赤三角は $M \geq 2.0$ の余震の震源と第四紀火山, 活火山を表す. (東京大学地震研究所 [課題番号: 1516])

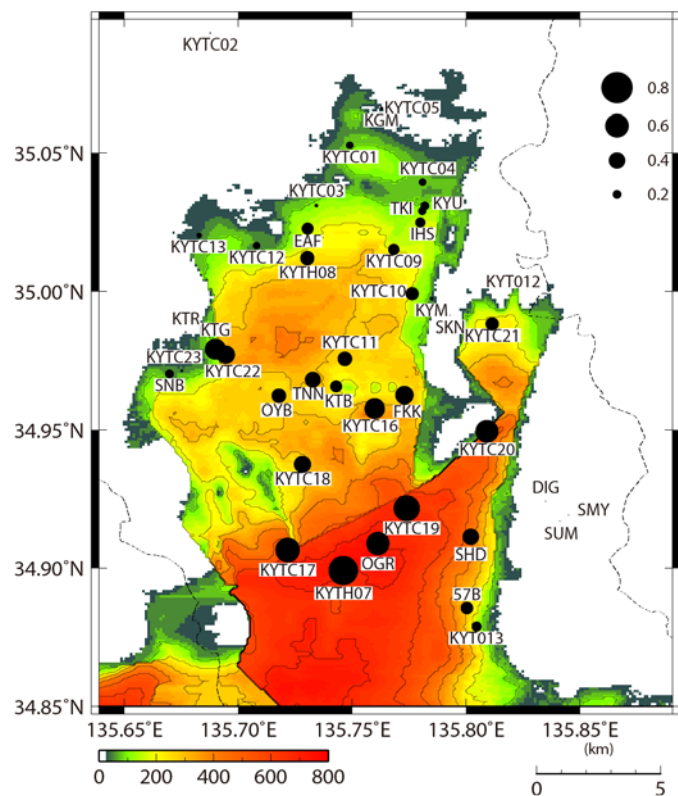


図3. 京都盆地内各観測点での観測PS-P走時差
 カラーコンターは京都盆地速度構造モデルの基盤深度（京都大学防災研究所 [課題番号：1911]）

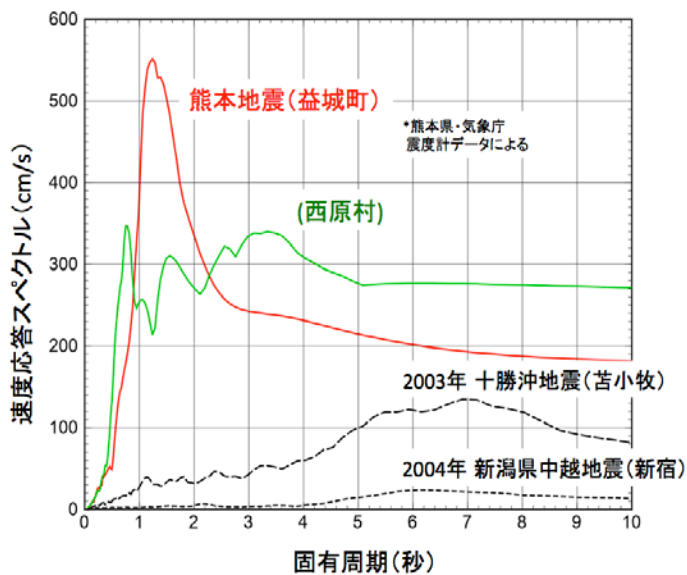


図4. 長周期地震動の速度応答スペクトルの比較（減衰定数5%）
 益城町や西原村では、固有周期2～10秒以上の広い範囲で、200～300cm/sの強い速度応答が見られた。これは、十勝沖地震において石油タンクのスロッシング火災が起きた苫小牧地点を2倍以上上回る（東京大学地震研究所 [課題番号：1516]）

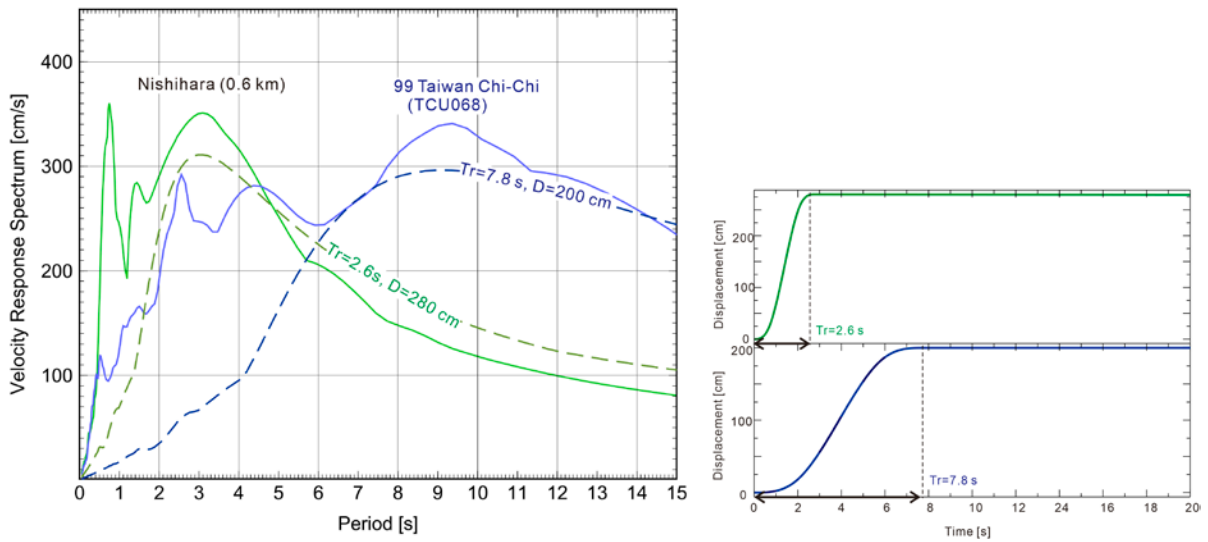


図5. 熊本地震（緑：西原村地点）と台湾集集地震（青：石岡地点）の断層ごく近傍の長周期地震動と、断層ずれうごき運動のランプ関数による近似（点線）の速度応答スペクトル
断層ごく近傍で観測された長周期地震動は、断層の動きそのもの（近地項）が持つ長周期成分によることがわかる。（東京大学地震研究所 [課題番号：1516]）

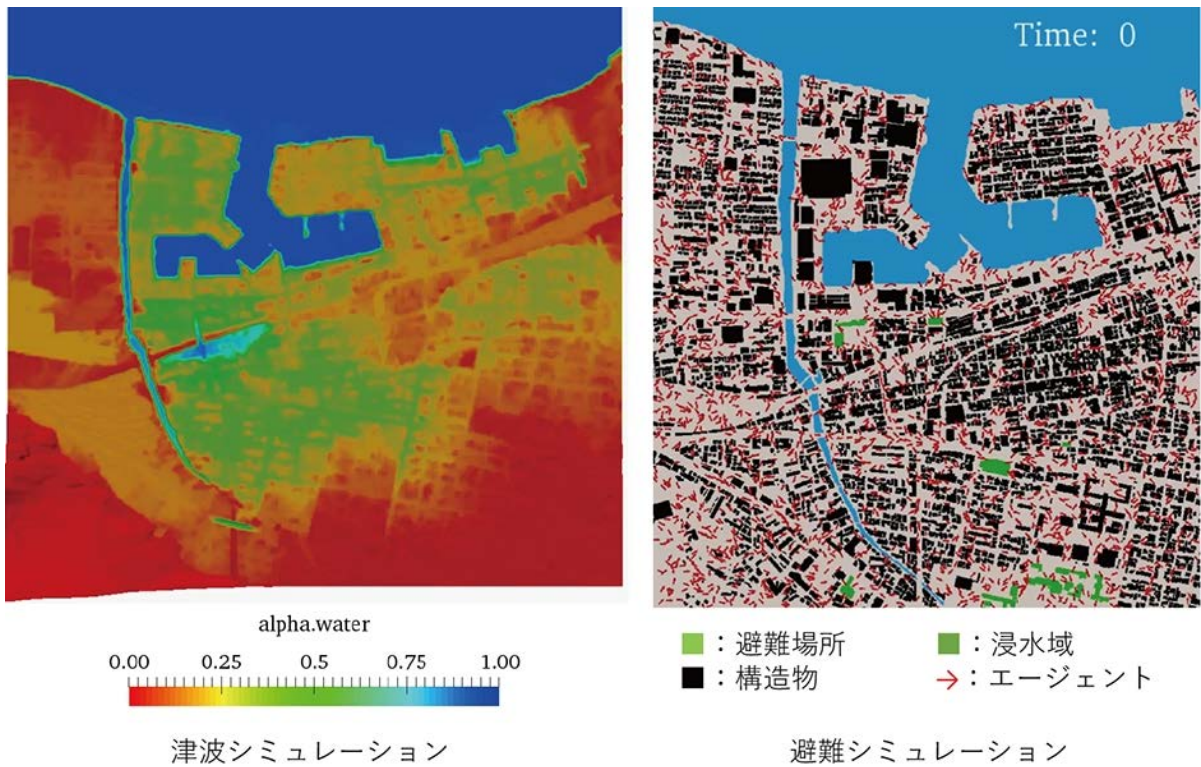


図6. 高松市の津波シミュレーションと避難シミュレーションの例(津波シミュレーションの出力を避難シミュレーションの入力とすることで連成)（拠点間連携研究 [課題番号：2977]）

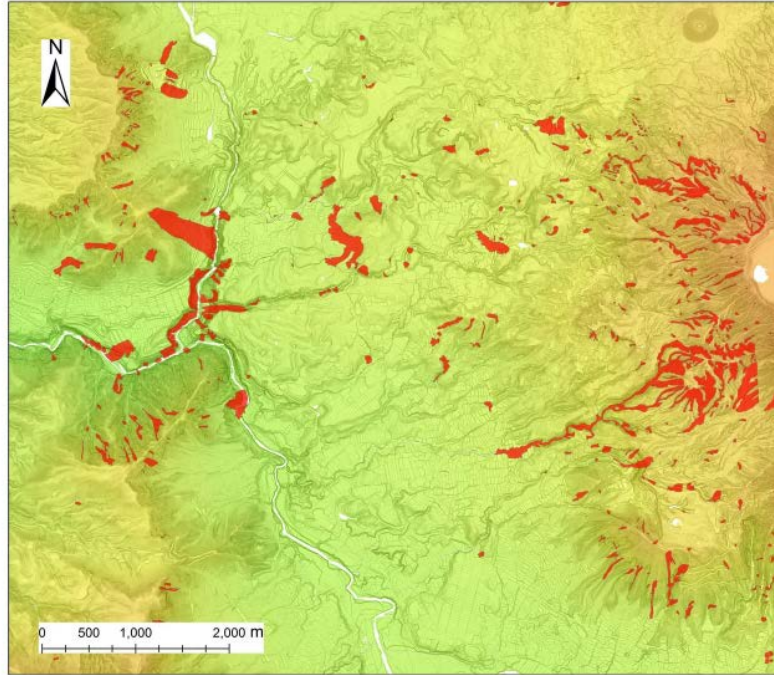


図7. 熊本地震によって発生した斜面崩壊の分布

国土地理院の 1mDEM から作成した傾斜・表構図にプロット。使用したデータ:Google Earth(4月15日, 4月16日, 4月19日画像取得)・地理院地図(京都大学防災研究所 [課題番号:1912])

(https://maps.gsi.go.jp/index.html#11/32.938963/131.060715/&base=std&ls=std&disp=1&lcd=20160414kumamoto_0416dol14&vs=c1j010u0f0&d=v1)

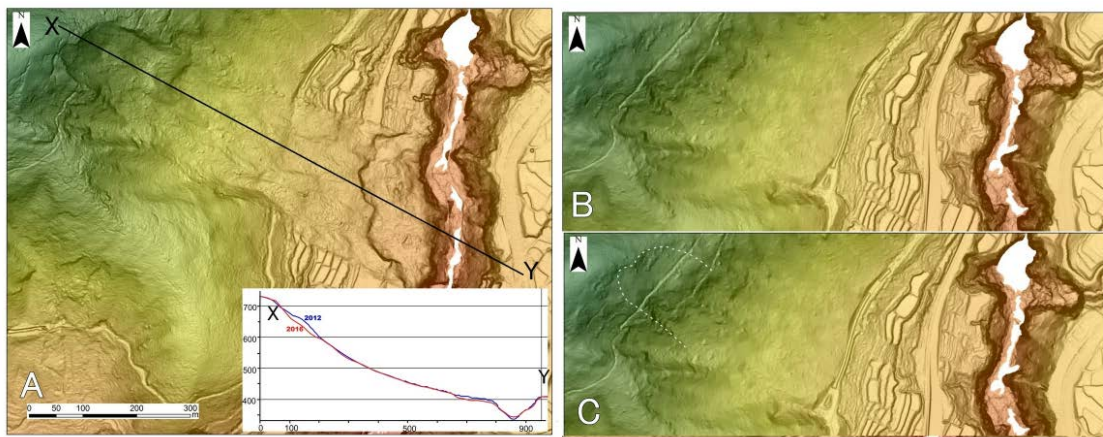


図8. 阿蘇大橋西側の斜面崩壊(京都大学防災研究所 [課題番号:1912])

A: 発生後の傾斜図。B: 発生前の傾斜図。C: 発生前の傾斜図に崩壊の輪郭を破線で図示。発生前に白線に沿うような小崖があったことがわかる。発生前の傾斜図は国土地理院の1mDEMから作成。発生後の傾斜図は、近畿地方整備局の1mDEMから作成。

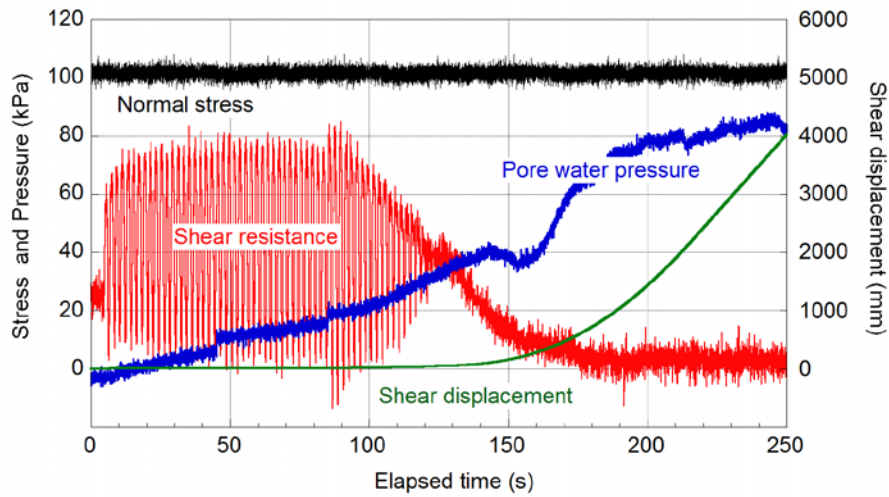


図9. 自然含水状態における降下軽石に対する繰り返しせん断試験結果
(京都大学防災研究所 [課題番号: 1912])

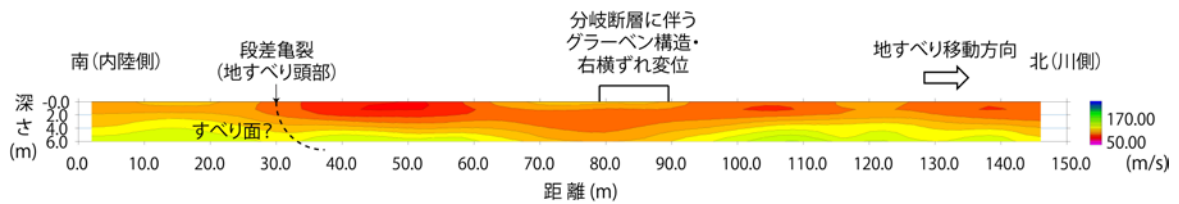


図10. 南阿蘇村の住宅地で見られた地すべりの縦断面における表面波探査の結果
地すべり内を本震分岐断層が横断し地表で右横ずれの変位とグラーベン構造を呈している(京都大学防災研究所 [課題番号: 1912])

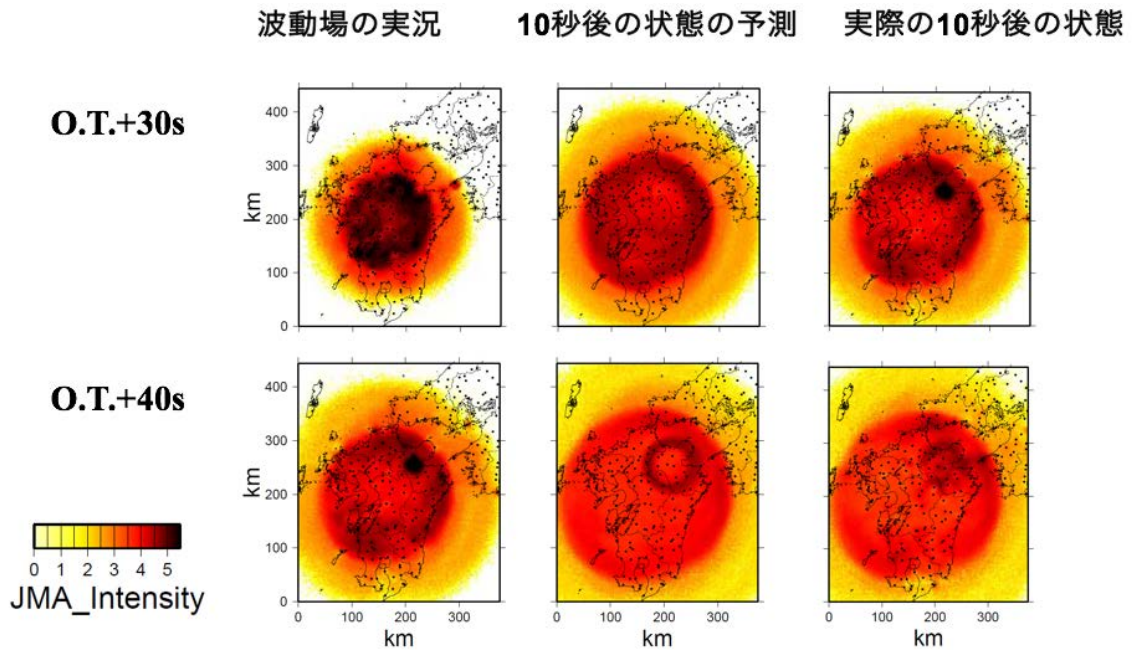


図11. 熊本地震 (M7.3) での“揺れの数値予測”
震源時から30秒と40秒の時点での、波動場の実況、10秒後の予測、実際の10秒後の状態.

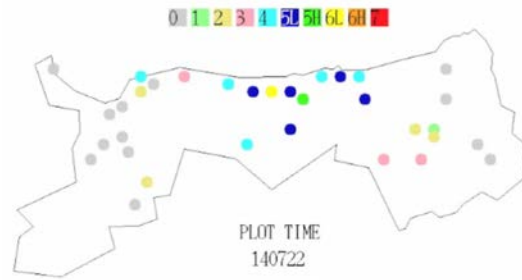


図12. 平成28年10月21日鳥取県中部の地震の自治体震度計における震度伝播スナップショット
(当日は稼働しておらず、観測記録を基に再現したもの)

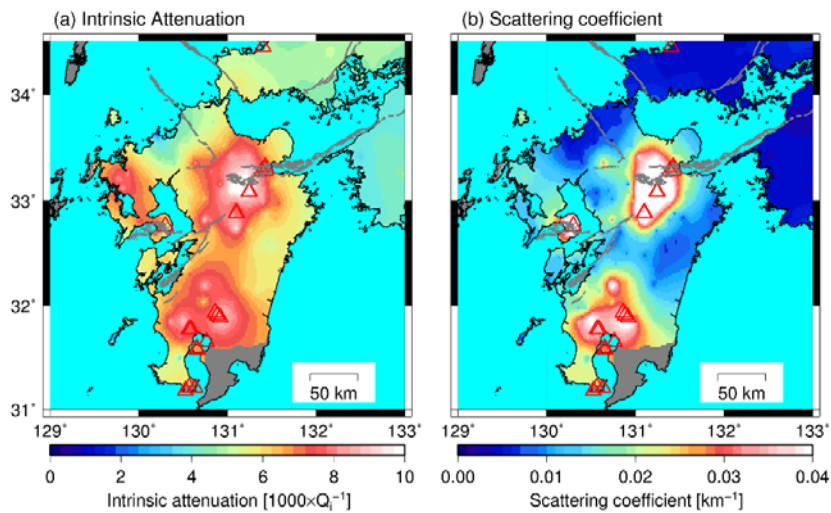


図13. 九州地域の減衰構造(左)と散乱減衰(右) (公募研究 [課題番号: 2935])

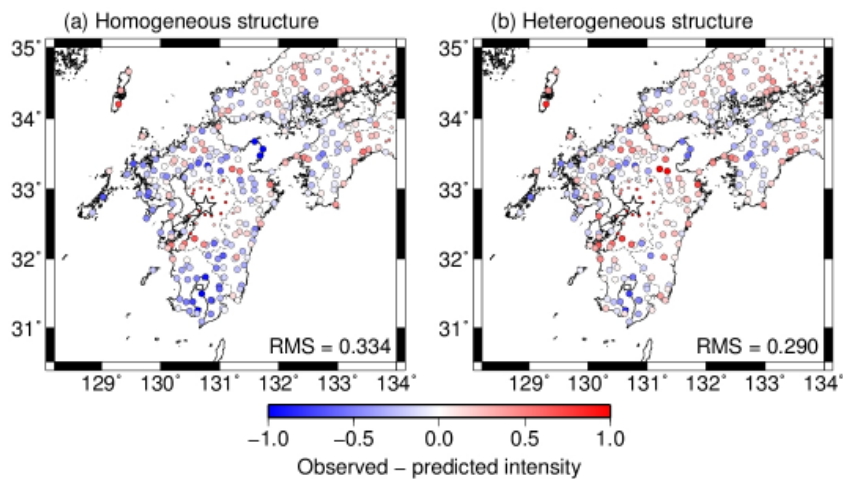
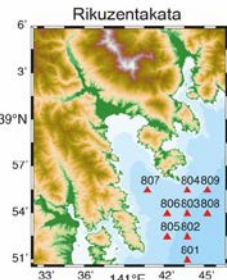
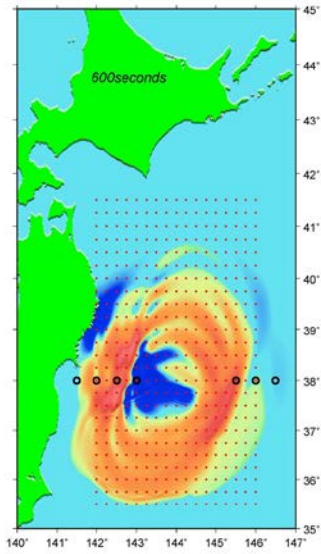


図14. 熊本地震の地震動即時予測シミュレーションを行ったときの、10秒後の予測震度と観測震度の残差分布。

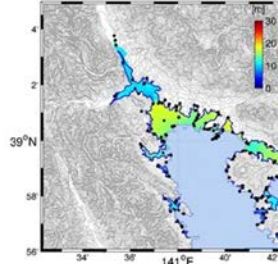
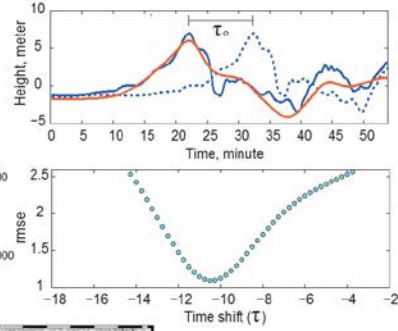
(公募研究 [課題番号: 2935])

(a) 一様構造 ($Q_i=200$, $g_0=0.005\text{km}^{-1}$) を仮定した場合と, (b) 図13の不均質構造を取り入れた場合をそれぞれ示す。震源の位置は星印である。また, 右下の震度予測残差のRMS値は震源距離が 50km以上300km以下の観測点について計算した。

1) Real Time tsunami simulation



2) Search Engine



Gusman et al. (2014)

図15. 本手法により計算された津波からGusman et al. (2014)のNearTifモデルを用いて津波浸水予測を実施。(北海道大学 [課題番号 : 1005])

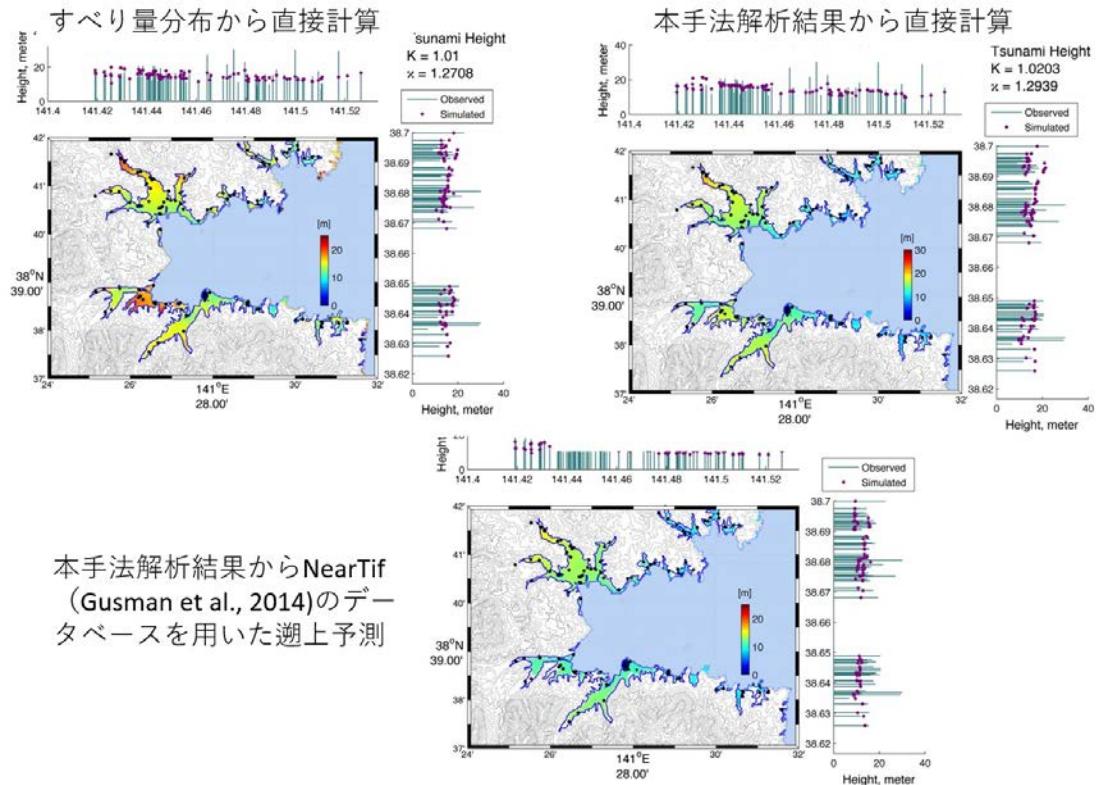


図16. 南三陸で調査された2011年東北地方太平洋沖地震の津波遡上域と津波高と、(左上)すべり量分布から直接計算された津波遡上の比較、(右上)本手法により観測波形からの津波計算から津波遡上まで計算した結果との比較、(下)NearTif(Gusman et al., 2014)により予測された津波遡上結果との比較 (北海道大学 [課題番号 : 1005])

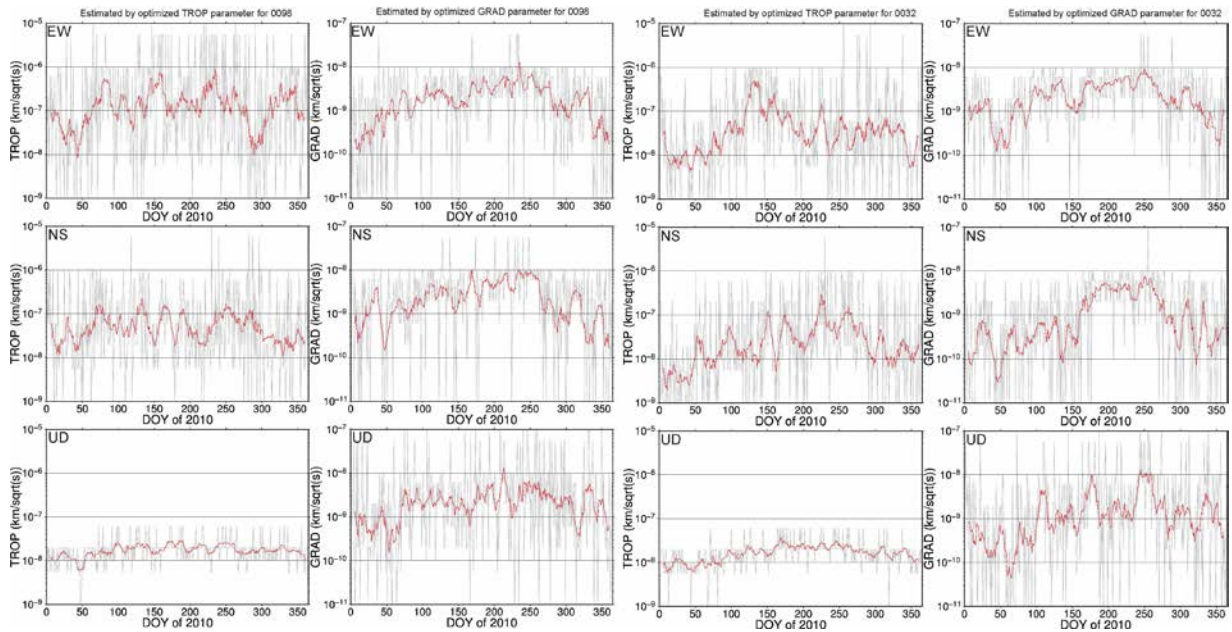


図17. 推定された各座標成分（東西、南北、上下）最適対流圏遅延パラメータの時間変化（東北大学 [課題番号：1209]）

左側のパネル6枚がGEONET 0098観測点、右側のパネル6枚がGEONET0032観測点の結果をそれぞれ示す。TROPが湿潤天頂大気遅延量推定用プロセスノイズ，GRADがその勾配量推定用のプロセスノイズをそれぞれ示す。灰色線が日々推定された最適値、赤色線が11日の移動平均を取ったものを示す。

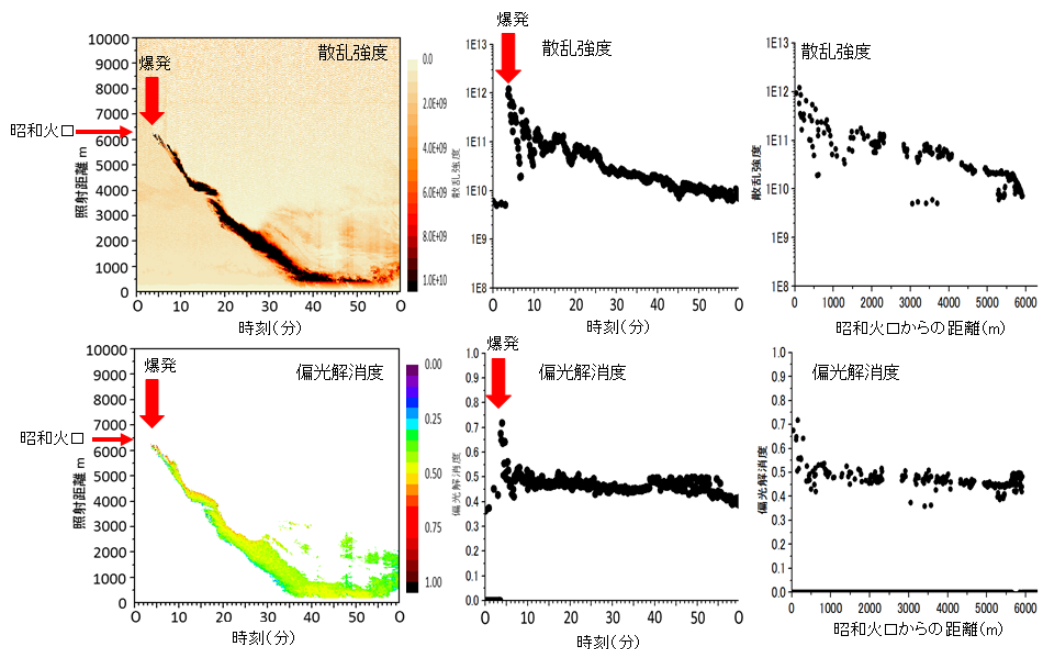


図18. 爆発発生時のライダー観測による散乱強度及び偏光解消度の時間変化及び空間分布（京都大学防災研究所 [課題番号：1913]）上図:散乱強度，下図:偏光解消度

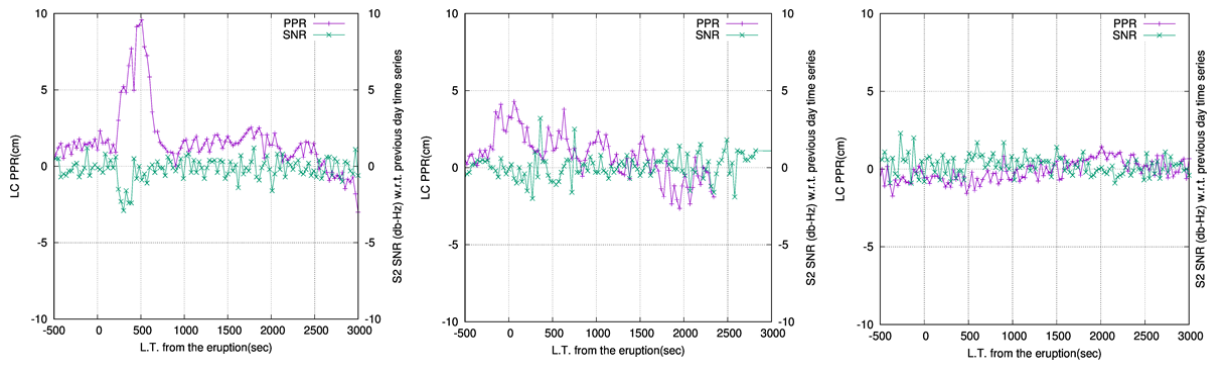


図19. 阿蘇山の2016年10月8日の爆発に伴う噴煙放出によるGNSSの位相残差及びSN比の時間変化（京都大学防災研究所〔課題番号：1913〕）

1 (6) 地震・火山災害

「地震・火山災害」計画推進部会長 木村 玲欧（兵庫県立大学環境人間学部）

副部会長 三宅 弘恵（東京大学大学院情報学環）

地震・火山災害部会は、災害科学の確立に資するため「災害」現象の解明に焦点がおかれた部会で、本計画『災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画』において初めて設置された部会である。防災・減災に対する社会の要請を意識しながら、理学、工学、人文社会科学などの研究者が連携することによって、地震・火山噴火の災害事例の実証、地震・火山噴火の災害発生機構の解明、地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成などを目指した研究を行うものである。

本研究計画を推進するにあたっては、地震・火山噴火などの自然現象に起因する災害誘因（外力: Hazard）だけでなく、地形・地盤などの自然環境や人間の持つ特性や社会の仕組みといった災害素因（脆弱性: Vulnerability）を解明することが必要である。災害は、災害誘因と災害素因との関係のものにその大きさや特徴が決定すると考えられているからである。

本研究計画を災害科学の一部として捉えた場合、これまで実施してきた災害誘因としての地震・火山噴火研究に加えて、災害素因との関係を意識して研究計画を推進することが必要となる。これは地震火山研究計画について災害誘因研究から災害素因研究へ移行することを意図しているわけではなく、災害の軽減に貢献するための総合的な災害科学の確立のためには、災害発生の要因である災害誘因・災害素因双方の解明が必要十分条件であることを意図している。

現時点における科学的研究成果を鑑みると、災害誘因については、自然現象そのものを消滅させることは不可能なため、現象・被害・影響の発生機構の解明や予知・予測といった現象の理解に研究の重きが置かれている。また災害素因については、構造物・ライフライン・情報システムなどのいわゆるハード面や、社会組織体制や人間行動などのいわゆるソフト面から、発生する被害・影響を小さくする（被害抑止）、そして防ぎきれずに発生した被害・影響をそれ以上大きくさせない（被害軽減）ことを目的とした研究が行われている。特に災害素因の研究について、防災研究もしくは、被害・影響の低減の観点から減災研究とも言われている。これらの研究を総合的な災害科学研究として推進するために、理学だけではなく、防災学・減災学に関連する建築学・土木工学・情報工学・農学などをはじめとする工学、心理学・社会学・福祉学・歴史学・法学・経済学・地理学などをはじめとする人文社会科学などの関連研究分野との連携を図りつつ、計画を推進するものである。

1. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

地震・火山噴火の災害事例の研究について、本年度は史料データベースを解析しながら、室町時代後期の明応七年に、近畿地方で記録された有感地震と地震・災害対応について検討した。特に同時代に記された信憑性の高い日記史料のみを用いて分析した場合に、明応七年の六月十一日と八月二十五日に発生した二つの地震の特徴に関して、どのような可能性が提示できるか検討した。当時京都に居住していた公家の近衛政家が記した『後法興院記』の記録によると、畿内で記された日記史料にみられる有感地震の記録に基づいた検討の結果、余震回数や被害様相などの地理的データによって、同じように「大地震」と記されている明応七年六月十一日と同八月二十五日の地震であっても、個々に異なる性質を有している可能性を提示した。また室町時代後期の朝廷での地震対応は、古代以来の陰陽道に基づいて地震の発生要因を検討し、地震発生を次なる災いの予兆と捉えて、過去の先例について中国の古典を調査するという形式的な内容であった。そのため朝廷では、この勘文に基づいて何らかの具体的な対応が実行されたわけではなく、打ち続く有感地震を鎮めるために社寺に対し

て祈禱を命じる程度であった。このような朝廷での地震対応は、それ自体が先例を重視する形式的な内容ではあるが、古代より朝廷だけが実施できる半ば儀礼的な対応であったことを明らかにした(図1)(東京大学地震研究所[課題番号:1513])。

また過去の災害事例の状況をふまえた地震・火山噴火に係る知見の発信技術プロトタイプについての検討を実施した。地震学会において発表された10年分の研究題目を事例として、形態素解析を通じた名詞抽出ならびに出現実態の統計分析を行い、テキストマイニングを行うことで、研究内容のトレンド変化を追求した。研究題目をKHCoder内に実装されている茶笥を用いて形態素に分解した結果、53,587個の名詞が抽出され、異なり語数は5,512件となった。これに基づき、KHCoderの標準機能である上位150の抽出語リストを作成し、どのような名詞が頻出しているかを把握した。地震学研究の一般用語と想定される「地震」「地殻」「強震動」「断層」という研究対象や、「予測」「観測」という手法にかかる名詞が頻出語として確認された。単語間のつながりを表す「共起」に着目し、年度ごとに共起分析を実施し、共起ネットワークを作成した。年度ごとに比較したところ、気象庁が名称を付与するような大規模な地震が発生した場合、発生年もしくは翌年に、その地震に関する事例研究が中心となっていた。2年が経過すると、その事例研究に関する名詞の共起性が低くなり、継続性がないことが明らかとなった。一方で、事例研究から得られた新たな研究課題を表す名詞は継続的に用いられており、研究分野の拡張状況が共起ネットワークの変遷から確認できた。新しい観測データや現象、解析手法などが収集・発見・開発されれば、それを元とした研究が発生し、研究の流れに影響を与えるため、本研究で作成した共起ネットワークの変化から、一定の研究変遷を把握できることが提案できる(図2)(新潟大学[課題番号:2702])。

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

地震の災害発生機構の解明について、堆積平野・堆積盆地における地震災害発生機構の解明を行うため、本年度は地震災害誘因の分析と地震災害発生機構の解明に向けた地下構造モデルの構築を行った。地震災害誘因の分析に関しては、国内の堆積平野において地震波干渉法を積極的に活用することにより、周期1秒までの首都圏の強震動シミュレーションに成功した。この成果は、観測とシミュレーションの応答分布の面的差分をとることで地下構造モデルの構築に役立てられる。また、国外の堆積盆地において、2015年ネパール・ゴルカ地震およびその余震を対象として岩盤観測点の特徴を生かした分析を行い、カトマンズ盆地の地震動増幅特性を明らかにした。地震災害発生機構の解明に向けた地下構造モデルの構築に関しては、南海トラフ海域の付加体に対する構造インバージョンを実施し、計算結果が過大となる従来のS波速度や層厚を修正した新たな地下構造モデルを構築した(図3)(東京大学地震研究所[課題番号:1515])。

また火山の災害発生機構の解明について、対策が未整備である「大量降灰」の災害に関して、噴火前に避難を終える事前広域避難について検討した。また、大規模噴火避難に関して住民の意向をアンケート調査したうえで、避難シミュレーションを行い、有効な避難施策を検討した。桜島周辺の大量降灰が予想される地域内の住民が全員車で最適避難した場合、避難終了までに最低でもどの程度の時間が必要かを見積もった。鹿児島市街地の降灰予測厚30cm以上の地域で、最適避難戦略(Daganzo, So, 2011)を用い、災害の中心地に近い高リスクの避難者を優先的に避難させるInF0戦略とし、下流ボトルネックを考慮した流入点における交通量制限による渋滞を排除した。また、道路ネットワーク表現は、巨視的交通流モデル、流体モデルの離散形とし、各矩形内の交通量を時間ごとに計算することで交通流を表現した。その結果、80万人の避難に約50時間かかることがわかった。したがって、この方法で全員を安全に避難させるためには50時間以上前に避難勧告などの情報を発表する必要がある。次に、実際住民がどのような避難意向を持っているのかを調べるためにアンケート調査を行ったところ、県内の降灰の少ない場所や他県に移動する長距離避難の意向をもつ住民は約20%であり、避難勧告がトリガーとなることがわかった。その結果、長距離避難の意向を持つ20%の住民が避難する場合は約5

時間を要する結果となり、少なくとも5時間前に避難勧告を出す必要があることがわかった(図4)(京都大学防災研究所[課題番号:1914])。

また「脆弱性」という概念について、これまでの課題研究で明らかになった「脆弱性は土地利用、災害対策、社会的凝集性、防災意識・災害文化の4つの次元で捉えることが妥当ではないか」という仮説のうちの一部について、南海トラフ巨大地震での震度は6弱～7弱、津波による浸水深度は1～3m程度が予想されている地域を対象として質的調査・量的調査による検証を行った。今年度は特に量的調査の実施・分析を行ったところ、1)自分が住んでいる場所の海拔と南海トラフ巨大地震の危険度認知(震度・津波到達時間・最大浸水深・倒壊率・液状化率・道路閉鎖・火災延焼)に学区間で有意差がなかったこと、2)危険度認知(建物倒壊・液状化・道路閉塞・火災延焼)はハザードマップの活用、防災訓練への参加、学区の行事への参加によっては改善されないことなどが明らかになった。特に「ハザードマップを活用しても、また防災訓練に参加しても、それが危険性認知の向上にストレートにつながるわけではない」という結果について、調査対象地域の背景・実情を質的調査によって明らかにしたところ「防災訓練をルーティンワークとして行うのではなく、住民各層に呼びかけ、工夫を凝らすことによって、危険度認知の向上が見込めるのではないか」という解決策が提案できることが明らかになった(図5)(名古屋大学[課題番号:1704])。

(3) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

地震の災害軽減のための情報の高度化について、災害の人文社会学的研究の側面から、地理空間情報(G空間情報)、GIS(地理情報システム)、衛星測位(GPS、準天頂測位システムなど)の統合的活用方法の開発を行っている。今年度は、津波想定域人口が北海道で最大となる釧路市を対象とし、人口、土地利用、津波浸水想定だけではなく、避難施設と避難圏域に関するデータの収集と分析を行った。その際には避難施設や避難ルートなど、住民避難に関する地理空間情報も取り込み、空間データベースを構築した。この分析により、生活レベルのミクロな視点で、各自治体のもつ「災害に対する社会的脆弱性」に関する分析を行った。具体的には、本研究は積雪寒冷地における高齢者福祉施設の津波避難の現状と課題を運営面と移動面から明らかにした。その中で、釧路市の津波浸水想定が大幅に変わった東日本大震災以前と以後の津波避難対策の変化や、積雪期特有の津波避難の課題についても検討した。特に自治体から望まれる支援に関して考察すると、避難移動に関しては、歩行困難な高齢者が多いこととそれを介助する職員が不足することから自動車避難の検討が課題であり、待機時に関しては、体調管理や地域住民との関係性の維持のための職員不足から高齢者が集団待機することができる場所を予め確保することの検討が課題であることを提案した(図6)(北海道大学[課題番号:1006])。

火山災害情報およびその伝達方法のあり方について、2014年9月27日の御嶽山噴火にともない、地域住民、観光客といった情報の受け手や、自治体職員等の情報伝達の担い手にとって有用な災害情報の内容や伝達方法のあり方について検討・提案を行っている。今年度は、昨年度に実施した火山災害情報のあり方についての住民向けアンケート(御嶽山の岐阜県側に位置する下呂市小坂地区(旧小坂町)の全1258世帯を対象に実施)の分析を進めるとともに、本調査結果を地域へ還元するための住民説明会を行い、さらに地区防災計画の策定を主な目的とした住民ワークショップを開催した。主な参加者は区長、組長、自主防災組織の関係者および行政関係者であり、ワークショップは平成28年11月から平成29年3月まで実施した。またアンケートに対する異なる火山間での回答の違いを整理するため、口之永良部島でのアンケート実施に向けた準備のため、復興状況も含めた現地視察を行った(名古屋大学[課題番号:1706])。

(4) 研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成

地震予測を行う専門家が評価の不確実性を述べることによって、住民の地震リスク認知や専門家に対する信頼がどのように変化するかについて、2016年熊本地震の発生に伴って、益城町などで建物被害や避難状況

の現地調査を緊急で行った。聞き取り調査では、4月14日の地震で避難したため、16日の地震による建物全壊で人的被害を受けることを免れた例があった。また、地震動予測における震源断層の想定に関する研究を行い、事前に震源断層の面積を予測することは困難であるが、地表地震断層の長さを予測することはある程度可能であることがわかった。我々の生活においてリスクとなるものとしては、地震や犯罪、環境汚染や食品など様々なものが存在する。地震予測が防災の実現へと結びつくためには、地震に対する人々のリスク認知の特徴を明らかにし、その特性に応じた地震予測を提示する必要がある。本年度は、主に犯罪に対する人々のリスク認知と地震に対する人々のリスク認知の比較を行うため、アンケート調査を実施した(図7)(東京大学地震研究所[課題番号:1517])。

火山の災害軽減のための情報の高度化について、火山情報などの防災情報とリンクするインターネットを通して入手可能な関係機関の各種観測情報の準リアルタイムな収集と統合表示を通して、北海道内の地方公共団体が現況を総合的に把握し、的確な防災対応を行うための支援システムを構築を目指した研究を行っている。今年度は、既知の不具合を修正し、二次サーバー機能の実装や細かな修正を残して、当初に計画したクライアントプログラムの開発は完了した。また、セキュリティ対策のため導入した暗号化ファイルの編集や、WINデータ等を配信用のユーティリティプログラムを開発した。更にプログラムをパッケージ化し、それを配布するためのホームページを開設した。一方、4月に熊本地震が起り、8月には北海道に被害をもたらした台風が相継いで来襲し、11月には倶多楽火山地獄谷で異常地熱活動など開発システムの有効性を問われる出来事がおこりその検証を行った。その中で、平時において「チラ見」は行われているものの担当者により使われ方が大きく異なるために、防災対応の有用なツールとしてシステムが根付くためには、二次サーバー機能の実装より、GUIの改良を進め、より使い易い、使い勝手の良いシステムとする必要がある。同時に緊急時に活用されるためには、担当者がシステムに習熟していることが重要な要素であり、平時における活用の掘り起こしを進めていくことの必要性が明らかになった(図8)(北海道大学[課題番号:1009])。

これまでの課題と今後の展望

現行計画では、災害科学の確立に資するため「災害」現象の解明に焦点をあて、防災・減災に対する社会の要請を意識しながら、全国の大学における理学、工学、人文社会科学の研究者が連携することによって、地震・火山噴火の災害事例の実証、地震・火山噴火の災害発生機構の解明、地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化、研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成などを旨とした研究を実施してきた。

具体的には、地震・火山噴火の災害事例の研究において、近代観測開始以前の史料データベースなどを通して被害地震における地震対応についての検討および、過去の災害事例の状況をふまえた地震・火山噴火に係る知見の発信技術プロトタイプについて研究内容の意味ネットワークに着目したデジタル支援ツールの開発も行った。地震・火山噴火の災害発生機構の解明において、国内外の堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースの増強をしたり、噴火災害においてとくに対策が未整備である「降灰被害」について避難計画策定のための想定を検討したり、脆弱性という概念的整理について東日本大震災を事例とした人文社会科学的検討を行った。地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化において、北海道を事例に地理空間情報・GIS・衛星測位を統合的に活用した避難支援システムの構築を行い、住民側の火山災害に対するリスク認知や情報ニーズについても社会調査などで明らかにした。研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成については、住民の地震リスク認知や専門家に対する信頼性についての検討および、GUIに特化した準リアルタイム火山情報の配信システムの構築と使用されるための課題を実証によって明らかにした。

今後は、この3年間の研究成果で明らかになった仮説などを検証させていきながら、体系化・理論構築を図っていくことが重要である。具体的には、地震・火山噴火の災害事例の研究においては、史料データベ

スや研究データベースなどの資料に基づき、地震・津波・火山災害などの自然災害の災害事例について更に収集を行い、当時の人々の対応や教訓、復興過程、災害研究の全体像などについて検討を続け、複数災害間の検討などを進める。地震・火山噴火の災害発生機構の解明においては、引き続き国内外の堆積平野・堆積盆地における強震記録データベースを増強し、地震災害誘因の自然素因への作用の解明と地下構造モデル化手法の国際展開を開始することや、脆弱性概念の検討についてはこれまでの研究によって明らかになった仮説の検討・検証を、量的調査・質的調査の実施とともに進めていく。地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化においては、整備を続けている地理空間情報データ等をもとに、GISに取り込んで空間データベースを構築し、町内会レベルもしくは個人レベルなど多様なレベルにおいての避難に関する分析に進化させていくことや、火山災害における住民の火山災害情報の受けとり方について、火山間の比較などを通して総合的な検証をはじめ。研究者、技術者、防災業務・防災対応に携わる人材の育成については、住民の災害リスク認知や専門家に対する信頼について調査分析を行い、火山情報の配信システムについて自治体等の活用実績をもとに受信者側のニーズについての検証を続けていくことが重要である。

成果リスト

- 阿部光樹・井ノ口宗成・加藤尚之・森田裕一・田村圭子・木村玲欧・中野敬介, 形態素解析を用いた地震学研究の動向把握に資する研究 ～ 地震学会10年間の研究題目を事例として ～, 信学技報, vol. 116, no. 422, ICTSSL2016-61, pp. 145-150, 2017年1月.
- Bijukchhen, B., N. Takai, M. Shigefuji, M. Ichiyangi, and T. Sasatani, 2017, Strong-motion observation and damage assessment in rock and soil sites of Kathmandu, Nepal after April 25, 2015 Gokha earthquake, Proceedings of the 16th World Conference of Earthquake Engineering, Paper No. 1581.
- Guo, Y., K. Koketsu, and H. Miyake, 2016, Propagation mechanism of long-period ground motions for offshore earthquakes along the Nankai Trough: Effects of the accretionary wedge, Bull. Seismol. Soc. Am., 106, 1176-1197, doi:10.1785/0120150315.
- 橋本雄一編, 2016, 四訂版 GISと地理空間情報—ArcGIS10.3.1とダウンロードデータの活用—, 古今書院, 180pp.
- 橋本雄一, 2016, 地域の防災計画にGISを活かす, 地理, 61(4), 18-25.
- 橋本雄一, 2016, 学界展望—数理・計量・地理情報, 人文地理, 68, 317-320.
- 橋本雄一, 2016, オープンデータとGISを活用し地域防災力を強化する, 測量, 33(3), 4-5.
- 橋本雄一, 2016, 空間と情報の地理学, 田山忠行(編)「空間に遊ぶ 人文科学の空間論」, 北海道大学出版会, 173-193.
- 橋本雄一, 2016, 災害とGIS, 関 孝敏・松田光一(編)「北海道南西沖地震・津波と災害復興—激甚被災地奥尻町の20年」, 北海道大学出版会, 237-257.
- 深田秀実・橋本雄一・沖 観行, 2016, 津波避難における個人行動シミュレーション分析の試み, 日本災害情報学会第18回学会大会予稿集, A5-3, pp. 46-47.
- Koketsu, K., 2016, Scientific aspects of the Tohoku earthquake and Fukushima nuclear accident, Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-13645-1.
- Koketsu, K., 2016, “Strong Ground Motion Assessment Scheme for Specified Source Faults” and the Kumamoto earthquake, 11th Asian Seismological Commission General Assembly, Paper ID 90.
- Miyake, H., 2016, Long- and short-period characteristics of megathrust source models and ground motions (invited), UK-Japan Disaster Research Workshop: Cascading Risk and Uncertainty Assessment of

Earthquake Shaking and Tsunami.

- Miyake, H., 2016, Strong motion observation during and after the 2014 Northern Nagano earthquake, 5th IASPEI/IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, P213H.
- 西山昭仁・原田智也, 2016, 明応七年(1498)の畿内における地震記録の検討, 2016年 前近代歴史地震史料研究会講演要旨集, 6-7.
- 奥野祐介・塩崎大輔・橋本雄一, 2016, GNSSを用いた津波集団避難行動に関する移動軌跡データ分析, 地理情報システム学会講演論文集, 25, CD-ROM.
- 大島弘光・宮村淳一・棚田俊収, 2016, 準リアルタイム火山防災情報表示システムの開発, 日本火山学会2016年度秋季大会講演予稿集, 63.
- Shigefuji, M., N. Takai, S. Bijukchhen, M. Ichiyangi, and T. Sasatani, 2017, Features of long-period ground motion on the Kathmandu valley for the 2015 Gorkha Nepal earthquake sequence, Proceedings of the 16th World Conference of Earthquake Engineering, Paper No. 4566.
- 塩崎大輔・橋本雄一, 2016, ニセコ町におけるICTを用いた除排雪車位置情報システムの運用と課題, 地理情報システム学会講演論文集, 25, CD-ROM.
- 塩崎大輔・橋本雄一, 2016, 地方自治体におけるICTを用いた除排雪車位置情報システムの課題, 情報処理学会研究報告「情報システムと社会環境」, 12, 1-6.
- Takahashi, M., Muroi, K. and Tanaka, S., eds., International Comparative Study on Mega-earthquake Disasters: Collection of Papers Vol.1 .
- Takai, T., M. Shigefuji, S. Bijukchhen, M. Ichiyangi, and T. Sasatani, 2017, Characteristics of strong ground motion in the Kathmandu valley during the 2015 Gorkha, Nepal earthquake, Proceedings of the 16th World Conference of Earthquake Engineering, Paper No. 4590.
- Viens, L., K. Koketsu, H. Miyake, S. Sakai, and S. Nakagawam, 2016a, Basin-scale Green's functions from the ambient seismic field recorded by MeSO-net stations, J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, 2507-2520, doi:10.1002/2016JB012796.
- Viens, L., H. Miyake, and K. Koketsu, 2016b, Simulations of long-period ground motions from a large earthquake using finite rupture modeling and the ambient seismic field, J. Geophys. Res. Solid Earth, 121, 8774-8791, doi:10.1002/2016JB013466.



日記史料が残されている
場所は京都と奈良のみ。

● 明応七年六月十一日の地震

- ◆ 有感地震は一ヶ月程度で減少.
- ◆ 京都盆地や奈良盆地の周辺で目立った被害は確認できない.
- 京都盆地や奈良盆地の周辺よりも遠地で発生した中規模の地震であった可能性がある.

● 明応七年八月二十五日の地震

- ◆ 有感地震は一ヶ月以上継続.
- ◆ 京都では六月十一日の地震より倍ほどの揺れであった.
- ◆ 奈良では小規模な被害があった.
- 京都盆地や奈良盆地の周辺よりも遠地で、奈良盆地よりも南方で発生した大規模な地震であった可能性がある.

図1. 明応七年（1498年）の地震の発生場所の検討（東京大学地震研究所[課題番号：1513]）

抽出語	出現回数	抽出語	出現回数	抽出語	出現回数
地震	3479	南海	149	堆積	81
年	953	検討	147	火山	80
構造	889	動	141	壱	79
観測	751	海溝	140	試み	78
沖	748	液形	140	スロー	76
波	714	次元	138	深い	76
断層	670	南東	135	南	76
震源	628	放射	134	アイ	75
地殻	545	北部	134	紀伊半島	74
推定	498	新島	131	寺	74
用いる	490	余震	131	付近	74
活動	448	境界	130	向ける	72
速度	396	減衰	129	被害	72
発生	390	時間	129	近傍	70
地方	387	イン	127	形状	70
東北	374	バージョン	126	比較	70
モデル	365	開発	125	イベント	69
変動	354	抽出	125	干渉	69
解析	346	関係	122	結果	69
太平洋	305	地盤	121	列島	69
変化	304	調査	118	スペクトル	67
分布	303	強	115	西南	67
高度	292	システム	109	東	67
海面	273	特産	109	測定	66
プレート	268	均質	107	適用	66
日本	263	フィリピン	106	動的	66
データ	262	スラブ	104	北海道	66
地震	242	見る	103	構造	65
周辺	235	巨大	101	防災	65
過程	225	マントル	100	線	64
月	225	空間	100	考察	63
応力	220	広帯域	99	精度	63
地域	220	手法	99	速報	63
地震動	213	関東	95	メカニズム	62
変動	213	実験	95	異	62
調査	203	影響	94	散乱	61
宮城	201	研究	93	グリーン	60
破壊	186	内陸	93	効	60
予測	182	中陸	92	深い	60
周期	181	沈む	91	東	60
記録	180	伝播	91	依存	58
深部	180	異常	90	沖の	58
特性	174	東海	88	水	58
評価	173	スリッパ	86	計算	57
シミュレー	166	重力	84	数値	56
基づく	163	摩擦	84	能登半島	56
海	161	活	83	応答	55
伴う	156	弾性	83	検証	55
地下	153	決定	82	微小	55
関連	149	震度	82	変形	54

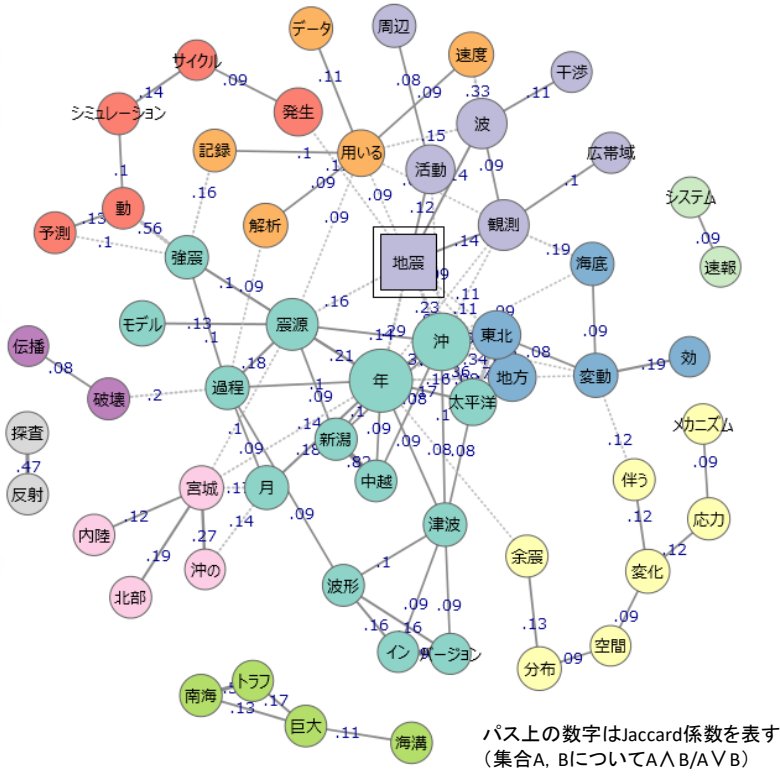


図2. 上位150の頻出語（左）と、「地震」を中心とした研究の共起ネットワーク（新潟大学[課題番号：2702]）

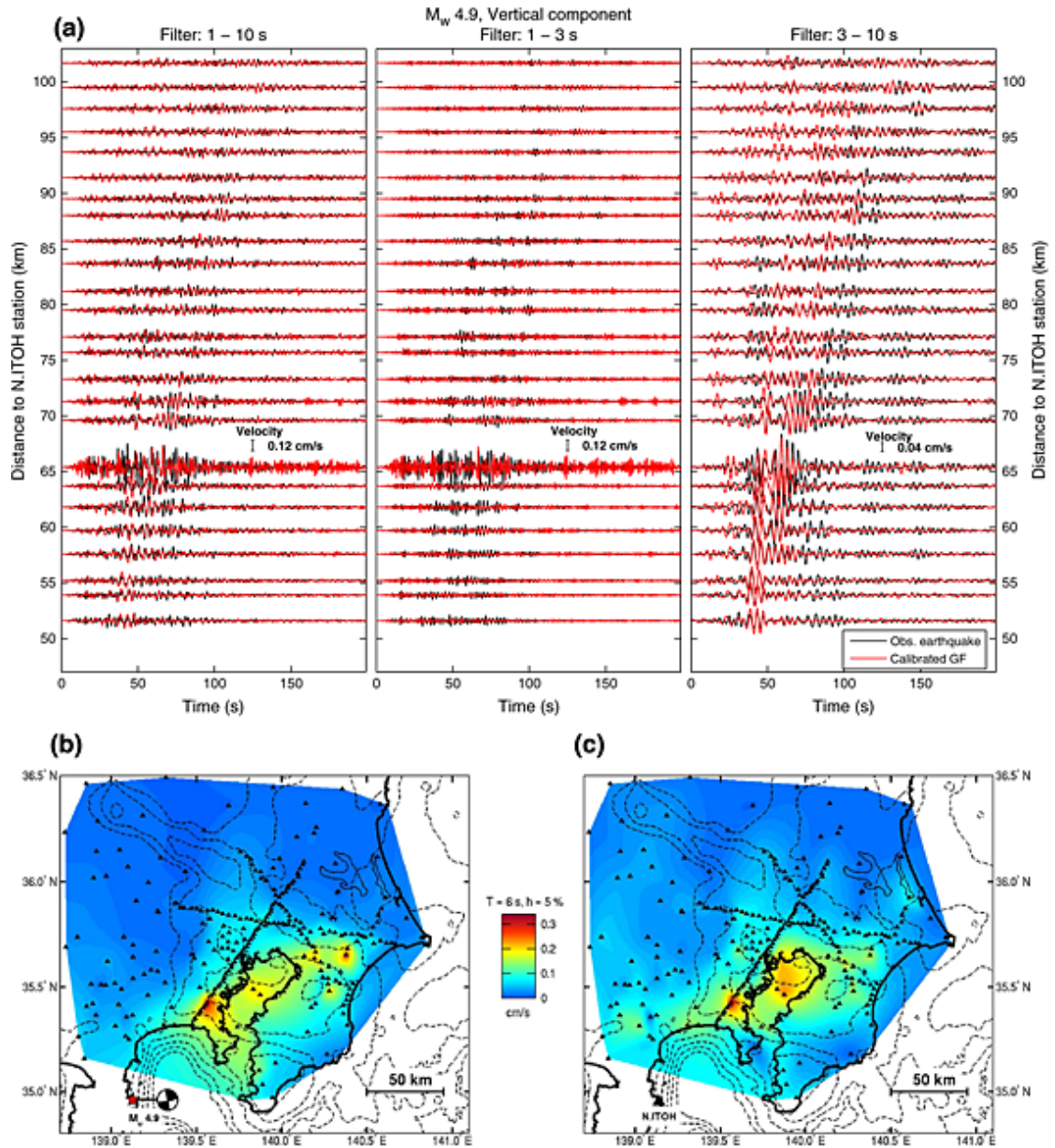


図3. 地震波干渉法による首都圏の強震動シミュレーション (Viens et al., 2016a)

地震波干渉法を用いることにより、周期1秒までの強震動シミュレーションが可能となった。(a) 観測 (黒線) とシミュレーション (赤線) の速度上下動の波形比較。(b) 伊豆半島の中規模地震による MeS0-net および周辺観測点の観測地震動の擬似速度応答分布。(c) 地震波干渉法による同地震の強震動シミュレーションの擬似速度応答分布。Hi-net 伊東を仮想震源とした。(東京大学地震研究所[課題番号: 1515])

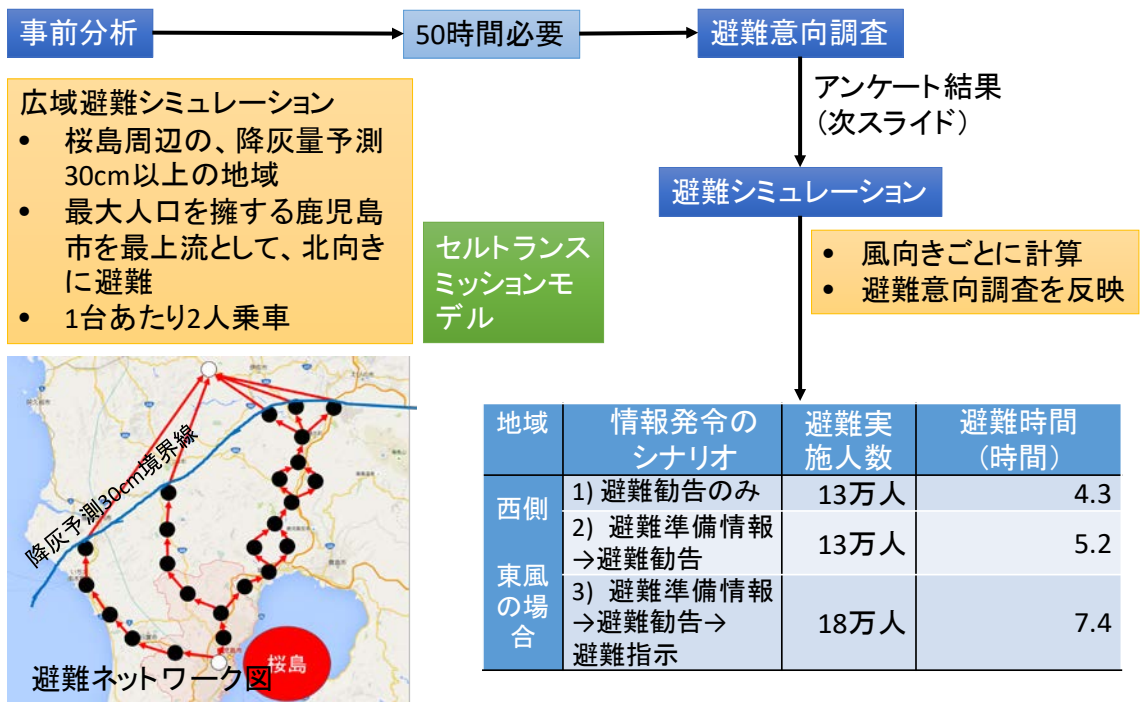


図4. 桜島の大規模火山噴火を想定した事前広域避難計画のための方法論 (京都大学防災研究所[課題番号: 1914])

質的調査による各学区の脆弱性

	道徳学区	星崎学区	柴田学区
土地利用	戦前開発の住宅地	村落+高度成長期後の住宅地	高度成長期に社宅+住宅地開発
災害対策	河川堤防+ハザードマップ+防災訓練	河川堤防+ハザードマップ+防災訓練	河川堤防+ハザードマップ
社会的凝集性	地域住民組織と防災組織が相互浸透	強い地域住民組織と強い防災組織が協力	地域住民組織も防災組織も弱体化
災害文化	伊勢湾台風集合的記憶活性化	伊勢湾台風経験の継承	伊勢湾台風経験の風化
脆弱性	比較的低い	両極化、村落は低く住宅地は高い	全体として高い、特に新住民層

まとめ

- 自然現象としてのハザードリスクは比較的良好に認知されているが、全体として字面の知識に留まっている
- 身の危険に直接かかわるリスクの認知度は低く、災害への備えに結び付かない
- 社会的凝集性が高いコミュニティでは、個人の経験や活動がリスク認知度を上昇させる可能性がある



リスク認知度との関係

脆弱性の異なる3学区間では個人のリスク認知度に有意な差異は見出しがたいが、社会的凝集性の高い2学区では(三層クロス分析)、個人の被災経験や防災活動とリスク認知度とに有意な関係がある(低い1学区では関係が不明瞭)

個人の経験・活動	リスクの認知度				
	震度	海拔	建物倒壊率	津波最大浸水深	津波到達時間
伊勢湾台風被災経験	○	○	○	○	○
ハザードマップ活用	○	○	—	○	○
防災訓練参加	○	○	—	—	—
学区行事参加	○	○	—	○	○

(○: カイ2乗検定によるProb. < 0.05)



多変量解析: ロジスティック回帰分析等 (現在解析中)

今後の課題

- 量的データの充足: 他地域におけるデータ収集
- 質的調査の深化: アクションリサーチ等による要因分析

図5. 量的調査・質的調査による「脆弱性」の検討 (名古屋大学[課題番号: 1704])

分析手法：GISによるネットワーク
バッファ（NTB）分析
ネットワーク空間上で施設からの等距離帯を設定。冬季の歩行距離としては、路面凍結や積雪による道路幅減少など減速要因を考慮。

1. 冬季における避難距離の減少

- 積雪や路面凍結による歩道幅が減少
- 防寒対策の準備時間が発生

↓

各高齢者福祉施設の避難距離の減少

2. 冬季における他の課題

<避難移動における課題>

- 路面凍結や積雪による転倒
- 積雪による車椅子の使用不可

<避難先における課題>

- 防寒対策の必要性
- 寒さによる高齢者の体調悪化

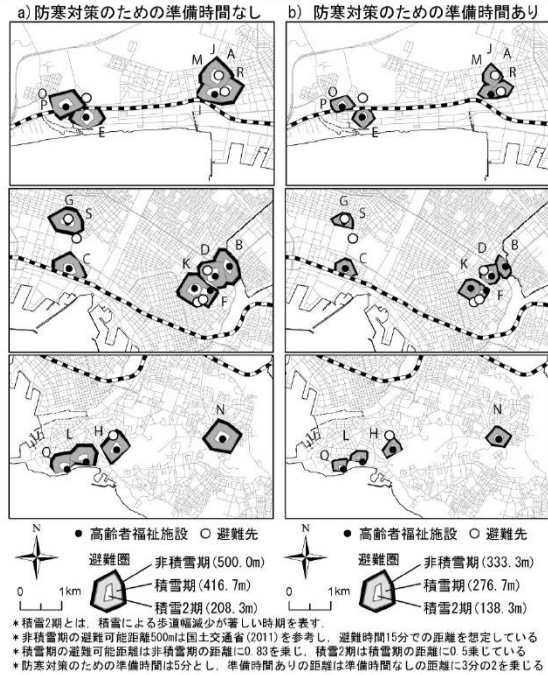


図6. 積雪寒冷地域特有の災害時避難における課題（北海道大学[課題番号：1006]）

2016年4月の熊本地震は活断層で発生した固有地震であり、かつ事前に地震調査委員会の「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」(以下、「予測手法」)による予測が行われていた初めての地震。2009年に確定した「予測手法」が初めてゼロから検証できることになった。「予測手法」の最初の部分には(ア)と(イ)、ふたつの選択肢がある。

<検証結果>

- 詳細な調査が行われたとしても、活断層や地震発生層の調査から将来の地震の震源断層の面積を精度よく推定することは困難であることが、熊本地震の実例で明らかになった（熊本県が1996年と1998年に詳細な調査を実施）。
- そのため、震源断層面積から予測を始める(ア)より、活断層調査で精度よく求まると言われる地表地震断層の長さなどから予測を始める(イ)の方が安定的である。
- 地震本部の全国地震動予測地図では活断層の地震に対して(イ)のみを用いているが、他機関では(ア)が用いられることが多い。震源断層には事前に地表に現れない部分が必ず存在するから(右図)、(ア)の方法による地震動予測は必ず過小評価になる。

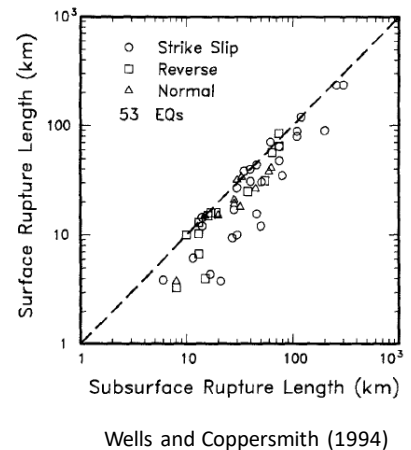
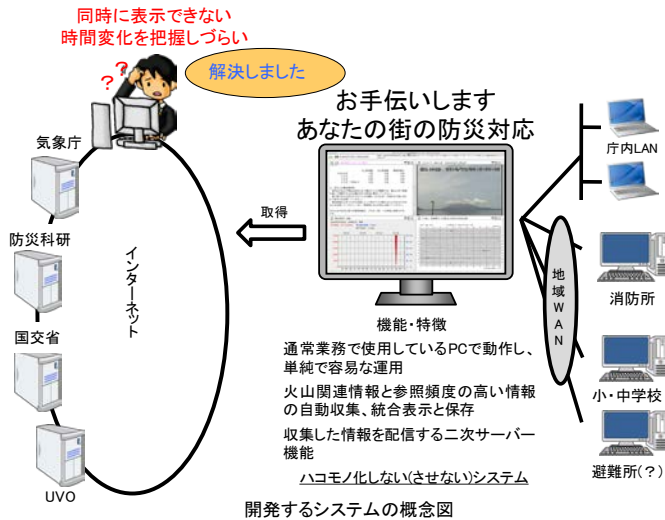


図7. 住民の地震リスク認知や専門家に対する信頼に関する社会調査（東京大学地震研究所[課題番号：1517]）

目的：活動的な火山を有する地方自治体と共同して、インターネット上にある火山防災情報と関連情報の準リアルタイムな収集と統合表示により地方自治体における防災対応を支援するシステムの開発



- 最新バージョンで取得・表示可能な情報は、火山関係9が、気象関係が10、汎用掲示板を加えて総計で20種類
- システム導入機関は道内が22機関、道外が1機関。新設された十勝岳望岳台のシェルター内にシステム設置
- 庁内LANへの接続、自前PCや専用回線の導入など活用に向けた環境整備が進展。



2016年10月19日にオープンした十勝岳望岳台の避難シェルター内に設置された開発システム

○ 主な活用事例

4月の熊本地震を始めに、8月に台風が北海道に来襲し、11月には倶多楽火山地獄谷で異常地熱活動の再開など開発システムの有効性を問われる事例が発生

1. 想定外な緊急な監視システム

熊本地震により機能喪失した阿蘇火山研究センターで地震等のモニターシステムに流用された。流用できた要因は被災から逃れた、復旧の早い低速な携帯電話回線に対応していたことであり、防災情報システムは災害に強いインフラのうえに構築する必要のあることを再認識させられた。

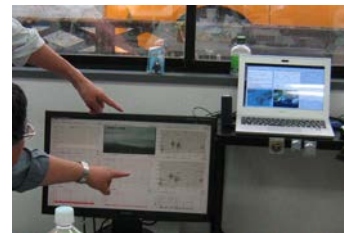
2. 8月に北海道に來襲し、被害をもたらした台風の防災対応

住民避難にまで至らなかった釧路市では町村合併で拡大した行政区内の気象監視に活用されたが、被害が発生した足寄町や、台風10号で大きな被害を受けた新得町では、防災対応に追われ、活用されなかった。人的資源に乏しい市町村では、切迫した条件下、また発災直後は防災対応に追われ、観測データによる状況把握の余裕がなくなることは想定されていた。その一方で、開発システムが目指した**統合表示の有効性**を裏付けるメールが釧路市から届いた。

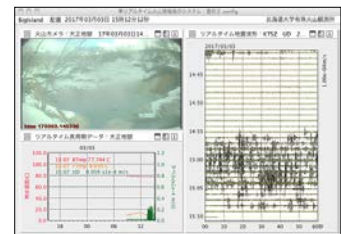
plumeが無ければ気象庁のHPでそれぞれの観測地点の情報を確認しなければなりません、**必要な地点を登録すると複数地点の状況が画面上で確認ができ**、今回の台風における対応ではplumeの活躍に……

3. 観測データのリアルタイムな共有と監視

2016年11月の登別大正地獄の熱泥水噴騰活動の再開に際し、現地観光業者、現地の見えない登別市、室蘭地方気象台、札幌管区火山センターの間で観測データのリアルタイムな共有と監視に使用され、3(4)機関が共通の観測基盤に立った防災対応が行われた。これは、このシステム開発が目



阿蘇火山研究センターの大阪事務所にて東北大学の協力を得て設置されたシステム。ノートPCのディスプレイ(右上)には気象情報、外部ディスプレイ(左下)には火山カメラ画像、地震波形が表示されている。



○ Todo

活用を更に進めるために、GUIの改良や要望に応じた改良を進めるほか、研究機関終了後のシステム運用について検討を始める。

図8. 準リアルタイム火山情報表示システムの概要(上)と活用事例(下)(北海道大学[課題番号:1009])

1 (7) 史料・考古

「史料・考古」計画推進部会長 榎原雅治（東京大学史料編纂所）

副部会長 佐竹健治（東京大学地震研究所）

将来発生する地震や火山噴火について知見を得るためには、現在だけでなく過去に発生した事象についても調査・研究する必要がある。地震や火山噴火は日本列島とその周辺域で有史以前から発生しているが、日本において地震の近代的な機器観測が開始されたのは明治初期以降に過ぎず、全国的な機器観測の実施は大正末期以降に過ぎない。そのため、それ以前に発生した地震や火山噴火について知るためには、歴史学や考古学で用いられている史料や考古資料等に基づいた調査と研究が必要になってくる。特に、一度発生すると甚大な被害をもたらす低頻度大規模の巨大地震や大規模噴火については、機器観測が実施されている期間に比べて発生間隔が長いために、機器観測によるデータは少ない。そこで史料や考古資料等に基づくデータと近代的な観測データとの比較・検討を通して、巨大地震や大規模噴火の再来間隔や、その前後に発生する中・小規模の地震や火山噴火等の全体像の把握に努めていく必要がある。

平成 26 年度より開始された本研究計画ではそれまでの計画とは異なり、地震及び火山噴火における低頻度大規模災害について、史料や考古資料を用いた研究の必要性が提示されている。当部会はこのような新たな研究分野を主体的に推進する立場にある。そこで当部会では、個別の研究課題の成果に基づいて「災害の軽減に貢献する」ことができるような方向性を導き出し、本研究計画が切り拓く文理融合研究の新たな学術的展開に寄与していく必要があると考える。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理

歴史学や考古学における研究の基礎である史料や考古資料について、地震や火山噴火現象及びそれに起因する災害の研究に活用するためには、地震関連史料集や考古遺跡の発掘調査報告書等といった既存の媒体だけでは不十分である。そこでこれらの史資料のデジタルデータ化と分析が必要であり、不足している部分については新たな史資料の収集や分析も実施しなければならない。史資料を使用する際の利便性の向上を目的として、平成 28 年度も引き続き、史資料の調査・収集及びデジタルデータ化を実施し、これらの作業の進め方について検討した。また、個別のデータベースの試作版を基にして、史料・考古統合データベースの試作版を構築した。

ア. 史料の収集とデータベース化

・地震関連史料の調査・収集とデータベースの構築

地震・火山噴火史料データベースの構築に向け、『増訂大日本地震史料』や『新収日本地震史料』といった既刊地震史料集に所収されている史料について、データベース構築のための XML データ化作業を継続して行っている。史料本文を XML データ化する際に、歴史的に信頼できる原典に遡って間違いの修正や省略部分の補足を行う校訂作業について、平成 28 年度は集中的に実施した。既刊地震史料集全 33 冊（合計約 26,800 頁）のうち、校訂作業等データベース化の作業に着手しているのは全体の約 23.5%にあたる。加えて、XML データ化した地震関連史料にある当時の地名を示す箇所位置情報（緯度・経度）を付与し、試作版地震関連史料データベースの検索結果から、国土地理院の地図上に地震による被害発生場所を表示できるシステムの試作版を構築した。

また、既刊地震史料集に未収録の地震関連史料についても調査・収集を行い、東海地方において長期間に

わたる日記が残存する三河国田原藩（愛知県田原市）の「田原藩日記」の調査・撮影を実施した。平成 28 年度は特に、1854 年（嘉永七年・安政元年）安政東海地震とその津波被害に関する史料記述について調査・分析を行った。

さらに、平成 28 年度に開催された「東京大学史料編纂所第 37 回史料展覧会」において地震史料のコーナーを設け、安政東海地震等に関する新史料を展示して、展示図録『史料を後世に伝える営み』に解説を掲載した（東京大学史料編纂所〔課題番号：2601〕）。

・日本海沿岸地域とその周辺及び熊本での地震・火山噴火関連史資料の収集と分析

主に日本海沿岸地域における地震・火山関連史資料を収集し分析するために、各地の史料保存機関に所蔵されている史資料の原本調査を行った。また、平成 28 年度は熊本地震の発生を受けて、熊本での史資料の調査も行った。更に、既刊の地震・火山噴火史料集に所収されている史料について、原本調査に基づく校訂作業を実施した。これらの原本調査と校訂作業による史料の分析から、次のような成果が得られた。

1828 年（文政十一年）の越後三条地震における新発田藩の対応については、江戸の幕府への報告と手当の下付の必要が強く意識されていた点を指摘できた。善光寺大本願所蔵の「江戸青山善光寺奥御用所日記」の地震記事に関する検討からは、1847 年（弘化四年）の善光寺地震の時に越後高田（現新潟県上越市）でも大地震があり、その 5 日後の高田での大地震によって、高田城下の瑞泉寺の御堂は倒潰しなかったものの住居や蔵は潰れた、という被害状況を明らかにできた。1710 年（宝永七年）の伯耆国・美作国（現鳥取県西部・岡山県北東部）を中心とした地震と、1711 年（宝永八年）の伯耆国に被害を与えた地震について、既刊地震史料集に所収されている史料の再検討及び新史料の収集を行い、信頼性の高い史料に基づいて被害地域や家屋倒壊数・死亡者数を明らかにした。1855 年（安政二年）の安政江戸地震における武蔵国幸手領・川崎領（現埼玉県・同神奈川県）の家屋被害を対象として、従来の家屋倒壊率を導き出す方法の再検討を行い、幸手領の家屋倒壊率（家屋全壊率）は 0.3%、川崎領は同 1%であることを明確にした。

また、史資料と地形・地質とを組み合わせた調査の成果は次のとおりである。1964 年新潟地震の佐渡島両津における被害範囲について、佐渡市両津夷地区で GPS 測量実施して地盤高を調査した結果、津波は砂碓の頂上を越えることはほとんどなく、舗装された道路伝いに越えただけであった実態を明らかにした。四国東部の鳴門南断層の活動については、1596 年（文禄五年・慶長元年）の内陸地震に伴う地盤の隆起によって新たに開発可能な空間を得て、瀬戸内地域で醸成されていた入浜式塩田の技術が、その後急速に拡大した点を明らかにした。地震による地形変化については、負の側面である「災害」が強調されがちであるが、16 世紀末におけるこのような事例からは、新たな生業の場を人々に提供するという側面が指摘できる。但し、生業空間の拡大は、将来の地震・津波にとって新たな被災地域を作り出すという側面も考慮の必要がある。さらに、史料と考古資料とを組み合わせた調査については、1828 年の越後三条地震における震源域と想定される椿沢村他 6 ヶ村の墓地を悉皆調査し、新たに 3 ヶ所で 4 基の墓標を発見した。今後、これらの墓標の分析により、震源域の村落での地震による死者数を明らかにできる可能性がある。

一方、2016 年 4 月の熊本地震の発生を受けて、歴史時代に熊本地域で発生した地震について履歴を調査し、地震被害の実態を明らかにするために、熊本での地震に関する史資料を収集・分析した。特に、1625 年（寛永二年）の熊本地震について、新たな地震関連史料の確認及び、この地震に起因すると考えられる遺構や遺物を含む遺跡が確認できた（新潟大学〔課題番号：2701〕）。

・東海地方を中心とする地震関連史資料の収集と分析

徳川林政史研究所所蔵の「道徳前新田御用留」を解読し、道徳前新田（現在の名古屋市南区の一部）とその周辺での 1854 年安政東海地震による津波について被害情報を抽出した。また、現地を調査して当時から現

在に至るまでの地形改変等の情報を収集し、土地利用の変化や人々の居住域の拡大といった、今後の地震・津波防災に資する知見を得た。豊橋市美術博物館所蔵の『柴田家文書』の解読に着手し、主に中部地方から関東地方にかけての地域について、1854年安政東海・南海地震による被害情報を抽出した。この他に、三重県の自治体史についても同地震の被害情報を調査・収集した。さらに、昨年度作成した地震史料名等のデータ検索システムについて、データの修正や機能を追加した。

平成28年度は2016年4月の熊本地震の発生を受けて、熊本県の自治体史や郷土史等約300冊について調査を行った。その中から、1707年（宝永四年）の宝永地震や1854年の安政南海地震等における被害状況等について抽出した。併せて、1889年（明治22年）の熊本地震について官報や新聞等を収集して震度を推定し、その詳細な地理的分布を求めた。この地震については、すでに武村（2016）において、今村（1920）による家屋被害状況から推定震度分布が求められている。これに対し、本研究では、家屋だけでなくあらゆる建造物の被害状況を調査し、より詳細に推定震度分布を求めた。武村（2016）の結果と比較すると、得られた震度とその分布はおおむね一致するが、推定震度が2～3段階程度異なる地点も幾つか見いだされた。また、国土地理院の旧版地形図や防災科学技術研究所による表層地盤増幅率分布との比較から、推定震度に違いが認められた地点では、家屋が地盤条件の良いところに建てられているために被害は少ないが、本研究で新たに明らかとなった橋脚や地盤等の被害では、地盤条件の悪いところの情報も加えているために、推定震度が大きくなったことがわかった。現在では、居住域の拡大によって地盤条件の悪いところにも多くの家屋が建てられており、歴史時代には被害が少なかった地域でも、今後は大きな被害が出る可能性がある。このように、歴史地震における史料に基づく推定震度は、得られる被害情報の分布域が土地利用の地盤選択性といった影響を大きく受けることがある。そのため、史料に基づく歴史地震の推定震度を取り扱う際には、どのような土地にあるどのような建造物で生じた被害情報に基づいて推定された震度であるか、個別に確認して活用する必要がある（名古屋大学〔課題番号：1701〕）。

・岩手県の旧気仙郡地域における歴史地震・津波に関する災害史料の収集

平成28年度の調査では、2011年3月の東日本大震災による歴史資料の被害状況について、地元郷土史家が以前に調査した古文書所蔵者のリストを手掛かりに、旧気仙郡にあたる岩手県大船渡市盛地区・大船渡地区で調査を実施した。その結果、大船渡地区では、古文書所蔵者が所有していた史料7件が流失し、存在が確認できたもの5件、うち2件では従来把握されていたものではない新たな古文書群であることが確認された。

新出史料のデータ化・分析としては、釜石市唐丹地区の『旧唐丹村役場文書』について、東北大学災害科学国際研究所において整理・目録化とデジタルカメラ撮影を実施した。『旧唐丹村役場文書』には、1913年（大正2年）から、唐丹村が釜石市に合併する1955年（昭和30年）までの行政文書群が存在し、これらの総点数は550点にのぼる。特に、1933年（昭和8年）3月3日に発生した昭和三陸地震津波に関する史料が多数含まれており、その前後の村会会議録や災害復旧工事の契約書類綴り等からは、当時の町村の段階における被災後の対応を知ることができる。

1933年の「唐丹村村会会議録」には、「臨時海嘯復興委員」と呼称される名誉職の推薦、政府所有米払下げ、罹災農家の農具購入・納屋新築に関する助成、住宅適地造成や簡易水道等各種復旧事業に関する決議の様子が記録されている。また、1933年7月23日開会の第11回村会では、各集落間を連絡する私設電話の開設や、避難道路の設置の諮問が行われた上、いずれも承認されており、津波被害を教訓とした対策が実施されていた状況がわかる。その他、住宅適地の造成に際し、地主との交渉が進捗しない場合には、やむを得ず土地収用を行うことを承認する答申があり、当時の唐丹村でも住宅適用地の確保が容易でなかったことや、土地収用を実行してでも早期に住宅適用地を準備する方針のあった様相が窺い知れる。この他に、この史料

群の中には昭和三陸津波後の災害復旧工事関連の記録や当時の集落地図も複数含まれている。これらを基にして今後さらなる調査を展開していくことで、唐丹村が津波の被害からどのように復旧・復興し、集落を再形成していったかを地図上に復元することが可能となる（公募研究〔課題番号：2944〕）。

・地震関連史料のデータベース化に関する研究

地図情報に統合した古地震研究ポータルサイトの作成のために、web GIS についてソフトウェアの仕様の検討を行った。また、昨年度作成したポータルサイト (<http://kozisin.info/>) について研究内容や研究成果等のコンテンツを充実させた。さらに、市民参加型のオンライン翻刻プロジェクト「みんなで翻刻」(<http://honkoku.org/>) を公開した。このプロジェクトでは、当面、東京大学地震研究所が所蔵する『石本文庫』のうち 114 点の史料の全文翻刻を目標としている。なお、「みんなで翻刻」は平成 28 年度の計画提出後に具体化したものである（公募研究〔課題番号：2945〕）。

イ. 考古データの収集・集成と分析

・考古資料の収集・分析とデータベースの構築

平成 28 年度は、全国の埋蔵文化財発掘調査報告書から、新たに熊本県（28 箇所）、大分県（22 箇所）、福岡県（41 箇所）、和歌山県（102 箇所）、香川県（37 箇所）の災害痕跡に関する地質・考古資料を収集し、データ整理を実施した。また、データベース項目の再定義を行い、既存の入力データの更新と新たなデータ約 10,000 件の入力を行った。一方で、災害考古情報データベースの GIS システムの改良を行い、産業技術総合研究所の地質情報システム、国土地理院の情報検索システム、東京大学史料編纂所の歴史地震史料データベースとのシステム連携を図り、来年度の早い段階に一部公開が可能な状態にまでシステム構築を進めた。

さらに、平城宮・平城京跡（奈良県）、青谷横木遺跡（鳥取県）、武久川下流条里遺跡（山口県）等の遺跡発掘調査現場において、地震痕跡等の地層資料を採取し、災害発生時期を示す考古資料との照合を実施して、地質・考古災害資料の整理・分析を進めた（奈良文化財研究所〔課題番号：9001〕）。

ウ. 地質データ等の収集と整理

・津波堆積物の調査及びデータベース化に向けての準備作業

津波堆積物に関する情報のデータベース化は、東北大学のプロジェクト研究に参加し、主に北海道の既存資料を整理した。成果は平成 29 年度中に公表される予定である。

ロシアの沿海州と北方領土における歴史津波と先史時代の津波痕跡について、ロシアの研究者と共同で調査を継続している。1993 年北海道南西沖地震の津波堆積物は沿海州のバレンティン湾周辺で面的に残されている。平成 28 年度はこの場所を集中的に調査し、砂層の層厚、粒度、比重の分布を求めた。北方領土では、1994 年北海道東方沖地震の津波が最も高かった国後島北東部の海岸にまで調査域を拡大した。歴史時代の津波痕跡の候補も発見したが、年代測定用の泥炭や鍵層となる火山灰といった試料はまだ分析できておらず、イベントの同定には時間を要している。

古地震に伴う地殻変動の痕跡となり得る海岸の隆起地形と生物痕跡について、2015 年 4 月 24 日に北海道の羅臼町幌萌海岸で発生した地すべりに伴う海岸隆起を、昨年度から調査している。隆起した礫に付着していた海草類の中では、石灰質の藻体を持つピリヒバのみ 1 年以上経過した後も明瞭に識別できた。ただし、隆起域の波浪による浸食は大きく、2016 年 10 月には最大隆起部分を含む大部分が消失していた。

地震や津波の痕跡がどのような場所、条件で保存されるかを確認するため、青森県三沢市の海岸において、2011 年東北地方太平洋沖地震津波で形成された津波堆積物を追跡調査した。その結果、2011 年 4 月に津波堆積物を記載した 13 測線上の 137 点のうち 65 点（47%）で、主に防砂林の中で堆積後に形成された数 cm の土

壤の下に、砂からなる津波堆積物が保存されていた。一方で、元の層厚が1cm以下の堆積物は、住宅地の敷地内では片付けられ、また防砂林内でも検出できなくなっていたものが多かった（東京大学地震研究所〔課題番号：1501〕）。

(2) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

史料や考古資料の分析に基づいて、機器観測開始以前に発生した低頻度で大規模な地震・火山噴火やそれによる災害を調査・研究することは、今後発生する災害の様相を予測し、その被害の軽減に貢献できると考えられる。歴史時代や先史時代の地震・火山による大規模災害について、様々な形態の史資料をデジタルデータ化し、同一の地図上に載せて被害分布図等を作成することによって、近代的な機器観測に基づく観測データとの比較・検討が可能になる。この被害分布図等を用いて過去の災害の実態を解明することは、特定の地域で今後発生する災害の予測に寄与できる。また、このような学際研究を進める上で、例えば地震災害について被害分布図等を作成する場合、信憑性の高い史料記述に基づいて被害発生の日月日と場所を調査・検討し、考古資料に基づいて先史・歴史時代の被害痕跡の位置と時期を分析する等、複数の分野からのアプローチが必要である。様々な視点からの調査・研究は、研究成果の学術的な妥当性を確保する上で重要である。

ア. 史料、考古データ、地質データ及び近代的観測データ等に基づく低頻度大規模地震・火山現象の解明 ・史料に基づく震度分布図の試作版の作成

前近代に発生した低頻度大規模災害である地震災害については、近代的な観測機器によるデータが存在しない。そのため、前近代の災害について調査・研究を行う際には、歴史学で使用されているのと同様の史料を用いて、個々の記述内容から被害の実像を検討する必要がある。その際には、現存する多数の史料から記述内容の信憑性が高い史料を選定し、それに基づいて被害の実態やその発生場所を分析しなければならない。

平成28年度は、京都盆地に被害を及ぼした近世の地震の中で、文禄伏見地震（1596年）、寛文近江・若狭地震（1662年）と文政京都地震（1830年）について、信憑性の高い史料記述を使用し、歴史学における既存の研究成果を援用して、被害地震ごとに推定震度分布図の試作版を作成した。これらの震度分布図は地理情報システムを基盤に作成しており、本研究課題で構築中である史料・考古データに基づく歴史地震火山統合データベースに、将来的に組み込まれる予定である。

地震によって建造物が受ける被害の程度は、推定されている震源断層・震央からの距離や地震の揺れの大きさだけでなく、建造物自体の特性にも依存している。そのため、史料記述にある被害状況だけでなく、被災当時の建造物について様々な条件を分析し、より多角的に被害を評価して震度を推定する必要がある。そこで本研究では、経年劣化による建造物の強度の低下と、屋根材の重量による倒れやすさに着目し、建造物の築年数と屋根材の種類による脆弱性の変化に基準をおいて、地震被害の評価を行った。得られた被害評価に基づいて、建造物の被害発生場所ごとに推定震度を導き出し、数値標高モデルを利用して地形との関係がわかる推定震度分布図を作成した。

1596年9月5日（文禄五年閏七月十三日）に発生した文禄伏見地震では、京都盆地の北部に位置する京都の市街地で震度の大きな場所が多いが、盆地南部の伏見城や八幡にも震度の大きな場所がある。また、1662年6月16日（寛文二年五月一日）に発生した寛文近江・若狭地震では、被害は京都盆地の東縁部に偏在しているが、盆地北部に位置する京都の市街地よりも、盆地南部の京橋町や淀城といった場所で震度が大きい。さらに、1830年8月19日（文政十三年七月二日）に発生した文政京都地震では、京都盆地北部の京都の市街地に震度の大きな場所が多いが、盆地南部の伏見奉行所や淀城にも震度の大きな場所がある。

これらのことから、京都盆地の近傍で大きな地震が発生した場合、京都の市街地が位置する京都盆地北部よりも、伏見や淀が位置する盆地南部の方が震度が大きくなる傾向がある。この要因として、近世の京都の

市街地は京都盆地北部の扇状地上に位置して地盤条件は比較的良好であるが、盆地南部は氾濫原や低湿地といった軟弱地盤地帯が占めており、これらの地盤条件の相違が震度に影響を及ぼしていると考えられる。なお、本研究で作成した推定震度分布図の試作版では、建造物の被害状況から震度を推定しているために、被害発生場所が当時の人々の居住域に偏在するという点に注意が必要である（東京大学地震研究所〔課題番号：1501〕）。

・文献史料の収集と分析による歴史災害の調査

1855年（安政二年）の安政江戸地震に関する史料の翻刻を実施した。また、他の内陸地震や南海トラフ沿いでの巨大地震についても、新史料の収集や現地調査を実施し、新史料の翻刻やそれを用いた既存史料の再検討を行い、得られた地震関連のデータを基に歴史地震の分析を実施した。さらに、幅広い異分野の学術交流を通じて、新たな視点からの歴史地震研究の有り様を検討した。

既存史料の再検討により、これまで行われてきた歴史地震の史料解釈の間違いについてその幾つかを指摘した。例えば、1847年2月15日（弘化四年一月一日）に越後高田で発生したとされてきた地震被害は実際には存在せず、1847年5月8日（弘化四年三月二四日）の地震（いわゆる善光寺地震）の間違いであったことを示した。このような事例は、これまでに蓄積されてきた地震史料の再評価によって、より正確な歴史地震カタログの作成が可能であることを示している。

一方、公募研究〔課題番号：2945〕と共同で市民参加型のオンライン翻刻プロジェクト「みんなで翻刻」を公開し、オンライン上での史料翻刻を開始した。このプロジェクトでは、当面のところ、東京大学地震研究所図書室が所蔵する『石本文庫』のうち114点について、オンライン上での史料の全文翻刻を目標としている。平成28年度は「みんなで翻刻」を活用し、歴史学の専門家の協力を得て、古地震に関する合宿形式の研究会を実施した（平成28年9月、平成29年3月）。その内容は、オンライン上での史料翻刻を主とした史料解析の実践及び歴史学に関する話題の講演である。史料翻刻に際しては、歴史学の専門家から、指導や史料の背景の説明を受けた。また、講演では、古文書解読の背景となる基本的な情報の解説が行われた。この研究会は、地震学のバックグラウンドを持ちながら史料の解読もできる人材を育成する端緒とするのみならず、歴史学、人文情報学、地理学、地質学、気象学、地震学といった幅広い分野の研究者及び学生、大学職員、一般市民の交流の場を提供することを目指すものである。「みんなで翻刻」の開発や歴史地震の史料解釈における間違いの指摘については、この研究会での学習、技術向上、情報交換によって生み出されたものである（京都大学防災研究所〔課題番号：1901〕）。

・文献史料を用いた雲仙寛政噴火と眉山崩壊の推移の解明

本研究では、長崎県（長崎歴史文化博物館、島原市松平文庫、諫早市立図書館、大村市立史料館）、佐賀県（佐賀県立図書館、佐賀大学、多久市郷土資料館）、福岡県（九州大学、久留米市立図書館）の他、国立国会図書館、国立公文書館、東京大学、筑波大学などにおいて原史料の複写・撮影を行った。既に活字化されている史料も多いが、本研究で改めて内容を確認して分析するとともに、新たな史料の分析を進め、雲仙寛政噴火と眉山崩壊の推移について検討を続けている。

雲仙寛政噴火に関する史料の数量は多く、収集と整理に時間を要している。また、史料の記録場所（観測点）は九州地方内の広い範囲にわたっている。これらの史料の成り立ちと信頼性を吟味した上で整理・分析を行い、噴火前・噴火時に発生した地震の震源位置・規模の変化と噴火推移を再検討して、より詳細な実態解明に向けて作業を進めている（公募研究〔課題番号：2946〕）。

これまでの課題と今後の展望

これまでの地震火山観測研究計画においては、近代的な観測が開始される以前の歴史時代や先史時代に発生した地震・火山噴火やその災害について、主に地球物理学の分野から研究が実施されてきた。近代的な観測記録が皆無の地震や火山噴火を対象とした研究を実施する際には、観測記録の代わりに史料や考古資料を用いる必要がある。史料や考古資料については、本来、歴史学や考古学の手法で取り扱われなければ学術的な妥当性を保持できないものであり、理学的な知見のみで取り扱われた場合には、誤った評価を導き出してしまふ危険性を有している。このような理由から、近代観測以前の地震や火山噴火に関する史料や考古資料を用いた理学的な研究には、学術的な手続き上看過できない問題が内在していた。

そのため、平成 26 年度から実施されている「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」においては、近代的な観測記録が存在しない地震や火山噴火について、地震学や火山学といった理学系の分野だけでなく、歴史学や考古学といった人文学系の分野の研究者も組織的に参加し、史料や考古資料を用いた研究が共同で実施されている。理学系と人文学系の分野が主体となった文理融合の研究は他にあまり類例がなく、学際的な研究としても特筆すべき研究計画である。当部会では今後、地震・火山学や関連諸分野との連携を強化し、他の部会と協力してこの研究計画を推進していくとともに、新たな学際的な研究分野の創出も視野に入れて研究の更なる深化と展開を目指していくべきと考える。

本部会では、文理融合の研究を進める上でデータの共有化が必須と考え、平成 26 年度以降、史料・考古それぞれのデータベース化に向けた研究を実施してきた。史料データは被害発生の時期は明確であるが場所は必ずしも明確ではなく、考古データは被害発生の時期に幅があるものの場所は明確である。平成 28 年度は、このような特徴を持った双方のデータについて、被害発生の時期と場所とを結合して連続したデータを作成し、時代・時間情報と位置情報の両方から検索可能なデータベースの構築に向けて、史料・考古統合データベースの試作版を作成した。

また、史料・考古統合データベースの構築に向けた研究とは別に、史料データや考古データを活用した歴史地震・火山噴火及び、それらによる災害の実態解明の研究にも取り組んでいく必要がある。特に、史料データにある地震記録に基づいて、特定期間の広域における有感地震の記録を集中的に分析し、巨大地震と大地震との関係だけでなく、その間に発生した有感地震（中・小規模地震）を含めた地震活動を解明する研究は、現行の地震学における地震活動の研究にとっても有益になると考える。そのため今後は、19 世紀中頃の西南日本から関東地方において、幾つかの被害地震（巨大地震と大地震）とその前後の有感地震の史料データを収集・分析し、一定期間の地震活動の推移について検討を試みる計画である。さらに、史料データに基づいて、地理情報システムを活用した歴史地震の推定震度分布図を作成する研究については、今後、地震学分野の強震動研究との連携を念頭において研究を進めていく予定である。

一方で、史料・考古部会としては、個々の研究課題において歴史地震・火山噴火の事例研究も進めていき、現行の地震学・火山学や災害研究に資する成果を積み重ねていく必要があると考える。

成果リスト

A. Nishiyama, 2016, The characteristic of the building damage from historical large earthquakes in Kyoto, EGU General Assembly 2016, D. 99 EGU2016-6067 (Poster), Vienna, Republic of Austria, Austria Center Vienna (ACV), 17-22 April, 2016.

原 直史, 2016, 文政 11 年越後三条地震からみる広域災害情報の集積, 災害・復興と資料, 8, 1-8.

橋本雄太, 加納靖之, 大邑潤三, 2016, Text Encoding Initiative ガイドラインに基づく古地震史料のマークアップ, 歴史地震, 31, 196.

服部健太郎, 中西一郎, 加納靖之, 渡辺周平, 2016, 京都大学に残る地震直後の調査記録と現地調査による

- 1925年北但馬地震の1927年北丹後地震被害への影響評価, 歴史地震, 31, 218.
- 堀 健彦, 新潟大学人文学部地理学研究室, 2016, 1964年新潟地震による佐渡両津における津波被害範囲について, 越後佐渡文化交流史研究 16, 1-6.
- 加納靖之, 2016, 弘化四年(1847年)越後高田の地震における年月日の取り違え, 地震 2, 69, 41-47, doi:10.4294/zisin.69.41.
- 加納靖之, 2016, 1882年(明治15年)2月の泥雨記事, 京都大学防災研究所年報, 59B, 72-75.
- 加納靖之, 服部健太郎, 中西一郎, 安国良一, 五島敏芳, 渡辺周平, 岩間研治, 福岡浩, 2016, 京都大学理学部に所蔵されている自然災害史料の解説と画像化, 歴史地震, 31, 206.
- 加納靖之, 2017, 古地震学とくずし字解説, アプリで学ぶくずし字 くずし字学習支援アプリ KuLA(クーラ)の使い方, 飯倉洋一(編), 笠間書院, 92pp.
- 加納靖之, 橋本雄太, 中西一郎, 2017, 「みんなで翻刻」市民参加型のクラウド翻刻 web アプリの公開, 日本地震学会ニュースレター, 69, NL-5-48.
- 加納靖之, 2017, 古地震学とくずし字解説, 加納靖之, アプリで学ぶくずし字 くずし字学習支援アプリ KuLA(クーラ)の使い方, 飯倉洋一(編), 笠間書院, 92pp.
- 村田泰輔・他, 2016, 常松菅田遺跡 2, 鳥取県教育文化財団.
- 村田泰輔, 2016, The Japan GIS Database of the Historical Natural Disaster and Hazards using research data of Archeological excavation, Geological survey and Historical documents, ポスター発表 T13-03P, The Eighth World Archaeological Congress.
- 村田泰輔, 神野恵・他, 2016, 右京一条二坊四坪・二条二坊一坪・一条南大路・西一坊大路の調査, 奈良文化財研究所紀要 2016, 奈良文化財研究所, 124-153.
- 村田泰輔・他, 2017, 大楠遺跡 2, 鳥取県教育文化財団.
- 小野映介, 佐藤善輝, 矢田俊文, 海津 颯, 徳島県撫養地区における塩田開発と1596年の地震との関連性, 歴史地理学 58-3, 2016, 24-34.
- 齋藤瑞穂, 齋藤友里恵, 矢田俊文, 坂上和弘, 米田恭子, パレオ・ラボ AMS年代測定グループ, 2016, 新潟県見附市田井町福順寺試掘調査報告—文政11年(1828)三条地震実態復原のための考古学・歴史学的研究—, 災害・復興と資料, 8, 48-72, 37-48.
- 佐藤孝之, 2016, イェール大学バイネキ図書館所蔵の地震史料について—安政江戸地震「なみ記」を中心に—, イェール大学所蔵日本関連資料研究と目録, 勉誠出版, 141-159.
- 佐藤孝之, 2016, 安政大地震の「地震ゆり状」をめぐって, 近世史叢, 8, 65-73.
- 武村雅之, 2016, 1889年明治熊本地震と今回の地震について, 熊本地震速報報告書.
- 都築充雄, 倉田和己, 平井 敬, 安政東海地震(1854)における愛知県の寺院被害状況の整理(その1)目的と碧南市における事例, 日本建築学会大会, 2016.
- 山中佳子, 2016, 4月16日熊本地震の震源過程, 熊本地震速報報告書.
- 矢田俊文, 2016, 一八五八年飛越地震の史料と家屋倒壊率—飛騨国を事例として—, 災害・復興と資料, 7, 1-30.

1 (8) データベースとデータ流通

「データベース・データ流通」計画推進部会長 鶴岡 弘（東京大学地震研究所）

副部会長 大見士郎（京都大学防災研究所）

データベースおよびデータ流通は、本計画を実行して行く上での、多点・多項目の観測データを安定的かつ継続的に生産し、かつ、それらの連続データをリアルタイムで流通させる研究基盤の運用・維持・管理を実現している。また、観測データ解析アルゴリズムの高度化も継続して実施している。さらに、研究成果をコミュニティで効率的に共有するシステム開発に着手した。

2. 平成28年度成果の概観

以下、平成28年度の主な成果について概観する。

1. 地震・火山現象の解明のための研究

(1) 低頻度大規模地震・火山現象の解明

気象庁は、火山噴火予知連絡会で中長期的に観測体制の充実が必要とされた47火山（平成28年12月に3火山が追加され50火山）について、地震計、空振計、GNSS等の観測データを常時収集するとともに、熱観測等の調査的な機動観測も実施し、観測データを蓄積した。そして、これらの蓄積された観測データを用いてデータ解析を行った。平成28年度に噴火が発生した阿蘇山及び桜島のほか、火山活動の高まりがみられた霧島山（えびの高原周辺（硫黄山））および薩摩硫黄島において、緊急観測により収集した火山活動の詳細なデータを解析し、蓄積した。これらのデータの蓄積にあたって、今後の活火山総覧の改訂に活用できるようにデータベースを構築した[課題番号7001]。

産業技術総合研究所においては、静岡県の一部（浮島ヶ原、掛川、元白須賀など）、三重県の一部（志摩市、南伊勢町など）、和歌山県の一部（新宮市、御浜町、日高町など）について柱状図のデータを整理しウェブを通して公開した[課題番号5001]。公表されている論文・報告書の中から活断層の活動性評価に関する重要な情報を含む資料を選定し、陸域8断層帯及び海域2断層帯についてのデータ化と入力作業を実施し、データベースのセキュリティ向上のための開発言語改修作業と、操作性・表示機能強化のための改善作業を実施した[課題番号5002]。さらに、監視・観測体制の充実が必要な活火山の地質図整備では、富士山地域の地質図を出版し、八丈島火山で地質図をとりまとめた。恵山及び御嶽火山で噴火履歴調査を引き続き実施し、日光白根火山では調査を開始した。阿蘇火山・始良火山のカルデラ形成期噴火に至る噴火履歴の詳細化のため、噴出物の分布・層序調査および岩石学的分析を行い、阿蘇カルデラにおいては複数の大規模噴火の間の噴火様式やマグマ組成の変化を解析した[課題番号5003]。

(5) 火山現象のモデル化

海上保安庁により、海上保安庁のGPS観測点において通年の観測を実施し、得られた成果について地震調査委員会、地震予知連絡会および火山噴火予知連絡会に報告した[課題番号8004]（図1）。

4. 研究を推進するための体制の整備

(2) 研究基盤の開発・整備

気象庁により、全国地震カタログの作成が実施されているが、「高感度地震観測データの処理方法の改善に関する報告書」（平成26年2月地震調査委員会、以下「報告書」）を踏まえた震源の決定等の処理の改善については、これまでのトリガ方式の地震検知に加えて新たな地震検知手法であるPF法（溜淵・他、2016）を取り入れ、自動処理による地震検出結果を検測処理の基本とする作業手順を確立した。新たな作業手順では、自動処理による地震の規模の推定値が、あらかじめ定めたM_{th}以上であれば、これまでと同様に人手により精査した結果を地震カタログに登録する。一方、M_{th}未満では波形を確認したうえで地震の相・振幅が正しく検出され良好に震源決定されていれば自動処理結果をそのまま、そうでなければ人手による簡易的な検測作業を行った結果を登録する。さらに、震源が決まらない場合も、地震検知の情報は登録する。波形を確認した結果、地震ではないと判定した場合には登録はしない。こうした作業手順により、必要十分な品質を確保しつつ、地震として検知されたイベントはもれなく登録されることになり、地震カタログの充実が図られる。この新たな処理を平成28年4月1日より開始した。この改善により、地震カタログに登録される地震数は改善前の約2倍となり、自動震源の活用により地震直後に気象庁が発表する防災対応のための資料や地震調査委員会での評価に寄与した〔課題番号7019〕。また、地震観測、地殻変動観測、潮位観測、全国の火山観測が継続的に進めた。潮位データの伝送においては二重化（衛星回線によるバックアップ）や、予備電源による稼働時間の長時間化（72時間以上）が実施された〔課題番号7014、7015、7016、7017〕。柿岡、女満別、鹿屋、父島の4地点に、祓川を加えた5観測点における地磁気4成分連続観測データを、引き続き統一的な形式に整理し、月毎に地磁気観測所データベースに登録、公開した。さらに、活動的な火山を対象とする全磁力精密観測データについて、継続してデータベースに登録した。過去の紙媒体による地磁気アナログデータをスキヤナでデジタル画像に変換し、計算機で利用可能な高時間分解能のデジタルデータに変換する作業を進めた〔課題番号7018〕。

国土地理院により、GEONETによる地殻変動連続観測が実施され、日本列島全域の地殻変動・火山活動のモニタリングが着実に進められた。地震については、東北地方太平洋沖地震後の継続的な余効変動、2016年4月14日以降に発生した平成28年（2016年）熊本地震に伴う一連の活動（M7.3、M6.5など）（図2）、2016年10月21日に発生した鳥取県中部の地震（M6.6）、2016年11月22日に発生した福島県沖の地震（M7.4）、2016年12月28日に発生した茨城県北部の地震（M6.3）等に伴う地殻変動を検出した。火山についても、硫黄島、桜島周辺等における火山活動に伴う地殻変動を検出する等、防災や地震発生・火山活動のメカニズムに関する研究等に寄与した。また、これらのモニタリング結果は、速やかにホームページ等で公表するとともに、地震調査委員会、火山噴火予知連絡会等に報告した〔課題番号6005〕。全国25験潮場の潮位連続観測を安定的に実施し、観測データをホームページで公開した。また防災情報の発信への活用のため、潮位データの共有化を進めた〔課題番号6006〕。地殻変動の観測結果（GNSS、水準、験潮）を地殻活動総合解析システムのデータベースに追加し、地図表示及びデータベース更新機能の改良を行った。GNSS連続観測データに関する所在情報検索システムの更新を実施した〔課題番号6011〕。火山性地殻変動の力源について、粒子フィルタないしはアンサンブルカルマンフィルタにより、力源の状態変化（位置、形状、圧力等）を逐次推定するソフトウェアを作成した。また、リアルタイムキネマティックGNSS時系列から火山性地殻変動の力源の状態変化を逐次推定するシステムを構築した〔課題番号6012〕。また、重力測量については、南海・東南海地域を含む全国で基準重力3点の絶対重力観測、一等重力点等146点で相対重力観測を実施し、日本重力基準網の基準となる重力値を得るとともに重力値の時間的な変化を把握した。日本重量基準網2016（JGSN2016）を構築し、約300点の基準・一等重力点の重力値を公開した。地磁気測量については、鹿野山測地観測所、水沢測地観測所、江刺観測場及び全国11点の地磁気連続観測点で地磁気連続観測を実施した。また、地磁気連続観測点10点及び一等磁気点3点で地磁気絶対観測等を実施し、日本全国の地磁気の時間変化及び地理的分布を把握した。さらに、富士山中腹において、全磁力の連続観測を実施し、「磁気図2015.0年値」を2016年12月1

日に公表した [課題番号 6007]。だいち 2 号の SAR データを用いて北方四島を含む国土全域を対象に SAR 干渉解析を行い、平成 28 年熊本地震をはじめ複数の地震において変動を検出した。平成 28 年熊本地震では、地震前後のデータを解析した結果、地殻変動が布田川断層帯と日奈久断層帯を中心に広域に及んでいたことがわかった [課題番号 6008] (図 3)。2016 年熊本地震を撮像した ALOS-2 データに MAI 法を適用することにより、標準的な SAR 干渉解析では得られない衛星進行方向 (準南北成分) の地震時変位を抽出することに成功した [課題番号 6013] (図 4)。さらに、VLBI 観測を継続することで、東北地方太平洋沖地震前後の長期的な地殻変動を捉えた [課題番号 6008] (図 5)。火山基本図「秋田焼山」「焼岳」「桜島」「八丈島」「新島」の数値データを整備した [課題番号 6009]。屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯、鈴鹿西縁断層帯、別府一万年山断層帯、布田川・日奈久断層帯の調査を実施した [課題番号 6010]。

海上保安庁は、国土交通省水管理・国土保全局及び港湾局、国土地理院、気象庁と連携し、インターネットによるリアルタイム験潮データの公開を継続した [課題番号 8005]。沿岸海域での海底地形の調査が実施された [課題番号 8006]。

防災科学技術研究所は、Hi-net, F-net, KiK-net など基盤的地震観測施設を安定的に運用した。日本海溝海底地震津波観測網(S-net)の構築に関して、平成 28 年度については、海溝軸外側 (北海道沖～千葉県) の敷設工事を行った。平成 27 年度までに整備を行った海溝軸外側以外の 5 海域 125 観測点については、試験運用を開始し、気象庁にもデータの配信を開始した。海洋研究開発機構によって整備された地震・津波観測監視システム (DONET) は、平成 28 年 4 月 1 日より防災科研に移管された。重点的に観測を強化すべき火山に整備した基盤的火山観測網(V-net)に関しては、故障、老朽化した観測機器の更新を行い安定運用に努め、観測データの大学や気象庁への流通を図り、関係機関の研究や火山監視業務等に貢献した。熊本地震で被害を受けた阿蘇山の火山観測施設については速やかな復旧を行った [課題番号 3004]。

産業技術総合研究所は、東アジア地域地震火山災害情報図の作成を行い、2016 年 5 月に出版した (図 6)。この災害情報図には完新世火山の分布、大規模火山噴火 (VEI6 以上) の噴火による降下テフラ分布域、主要カルデラの位置、大規模火砕流の分布、大規模火山噴火による犠牲者数、M6 以上の地震の震源分布、大規模地震の震源域、主要活断層の分布、大規模津波の分布、津波の最大到達高度、地震の犠牲者数等が取りまとめられた [課題番号 5009]。

東京大学地震研究所において、長期連続データ解析のための大規模解析システムが構築され、過去の地震波形連続データの保存が進められた [課題番号 1518]。研究成果共有サーバにおいて、プレート構造モデルの公開を含むホームページコンテンツのアップデートを実施した [課題番号 1519]。北海道大学においては、地殻変動連続観測等データの全国流通・公開を継続した。傾斜計データの時系列表示の座標軸を任意の方向に回転できる機能を組み込んだ。また、歪観測値から面積歪を計算できるルーチンを実装し、CMT 解の情報から理論ひずみ波形を計算できるプログラムをシステムに搭載し、遠地地震のひずみ地震動波形の観測値と理論値の比較機能を加えた [課題番号 1009]。京都大学防災研究所においては、阿蘇の火山研究センターで保管されているウィーヘルト地震計の 1925 年～1935 年に記録された煤書き記録 450 枚をスキャンして、ハードディスクに格納した [課題番号 1915]。

これまでの課題と今後の展望

データベース・データ流通部会における課題は、(1) 各研究機関において蓄積されているそれぞれのデータおよびデータベースを有機的に統合化すること、(2) 研究成果共有システムの開発、(3) 安定かつ多点・多項目連続データのリアルタイム集配信システムの基盤整備である。今後はさらにオープンデータポリシーに対応した大規模・大容量のデータを効率的に公開できるシステムの開発の検討も必要である。また、データを公開する際の公開ポリシーの検討も重要な課題となってくると考えられる。

基礎データベースの GIS を活用した可視化システム, 地震解析ソフトウェアの整備・解析基盤の開発は, 着実に進められる項目であるので, これらの課題へ積極的に取り組むべきであろう。また, 情報学等の研究分野の進展に伴う斬新的なシステムの開発に着手すべき時期に差し掛かっており, 新システムの構築に関する議論を重ねていくことが必要であろう。日本海溝海底地震津波観測網(S-net)のデータを活用し, 海域の震源の精度向上を引き続き進める必要がある。

成果リスト

- Matsubara M., H. Sato, T. Ishiyama, and A. D. Van Horne (2016) Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophysics*, in press, doi:10.1016/j.tecto.2016.11.025.
- Nakano, M., T. Hori, E. Araki, N. Takahashi and S. Kodaira (2016) Ocean floor networks capture low-frequency earthquake event, *Eos*, 97, doi:10.1029/2016EO052877
- Suzuki, K., M. Nakano, N. Takahashi, T. Hori, S. Kamiya, E. Araki, R. Nakata and Y. Kaneda (2016) Synchronous changes in the seismicity rate and ocean-bottom hydrostatic pressures along the Nankai trough: A possible slow slip event detected by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET). *Tectonophysics*, 680, p. 90-98, doi:10.1016/j.tecto.2016.05.012
- Takaesu, M., H. Horikawa, K. Sueki, N. Takahashi, A. Sonoda and S. Tsuboi (2016) Development of a Web Application System for Seismic Waveform Data Observed in Real Time With the Seafloor Seismic Network DONET, *Marine Technology Society Journal*, 50, 3, 87-91, doi:10.4031/MTSJ.50.3.14
- Yamamoto, N., S. Aoi, K. Hirata, W. Suzuki, T. Kunugi and H. Nakamura (2016) Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, *Earth, Planets and Space*, 68(1), 128, doi:10.1186/s40623-016-0500-7
- Yamamoto, N., K. Hirata, S. Aoi, W. Suzuki, H. Nakamura and T. Kunugi (2016) Rapid estimation of tsunami source centroid location using a dense offshore observation network, *Geophysical Research Letter*, 43(9), 4263-4269, doi:10.1002/2016GL068169
- Oikawa, T. et al., 2016, Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews. *Earth, Planets and Space*, 68: 79. doi:10.1186/s40623-016-0458-5.
- Kobayashi, T. (2017), Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (Mj 6.5 and Mj 6.4) revealed by conventional and multiple-aperture InSAR, *Earth Planets Space*, 69: 7, doi:10.1186/s40623-016-0594-y.
- Fujiwara, S., H. Yurai, T. Kobayashi, Y. Morishita, T. Nakano, B. Miyahara, H. Nakai, Y. Miura, H. Ueshiba, Y. Kakiage and H. Une (2016), Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry, *Earth Planets Space*, 68: 160, doi:10.1186/s40623-016-0534-x.
- Morishita, Y., T. Kobayashi, and H. Yurai ,2016, Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068293.
- Miyahara, B., Y. Miura, Y. Kakiage, H. Ueshiba, M. Honda, H. Nakai, T. I. Yamashita, Y. Morishita, T. Kobayashi and H. Yurai, 2016, Detection of Ground Surface Deformation Caused by the 2016 Kumamoto Earthquake by InSAR using ALOS-2 Data, *Bulletin of the GSI*, Vol. 64.
- 小林知勝, 2016, 数値気象モデルを用いた干渉 SAR の大気遅延誤差の低減効果について～2015 年桜島マグマ貫入イベントの解析を例に～, *測地学会誌*, 62, 79-88.

- Munekane, H., J. Oikawa, and T. Kobayashi (2016): Mechanisms of step-like tilt changes and very long period seismic signals during the 2000 Miyakejima eruption: Insights from Kinematic GPS, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1002/2016JB012795.
- 川元智司・檜山洋平・古屋智秋・佐藤雄大・太田雄策・西村卓也・等々力賢, 2016, 電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) プロトタイプの開発, *国土地理院時報*, 128.
- Kawamoto, S., Y. Hiyama, Y. Ohta, and T. Nishimura, 2016, First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, *Earth, Planets and Space*, 68, 190.
- Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. Nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miyagawa, 2017, REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, *J. Geophys. Res.*, in press.
- Yamamoto, K., M. Nosé, N. Mashiko, K. Morinaga, and S. Nagamachi (2016), Estimation of magnetospheric plasma ion composition for 1956-1975 by using high time resolution geomagnetic field data created from analog magnetograms, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 5203-5212, doi:10.1002/2016JA022510.
- 溜淵功史・森脇健・上野寛・東田進也, 2016, ベイズ推定を用いた一元化震源のための自動震源推定手法, *験震時報*, 79, 1-14.

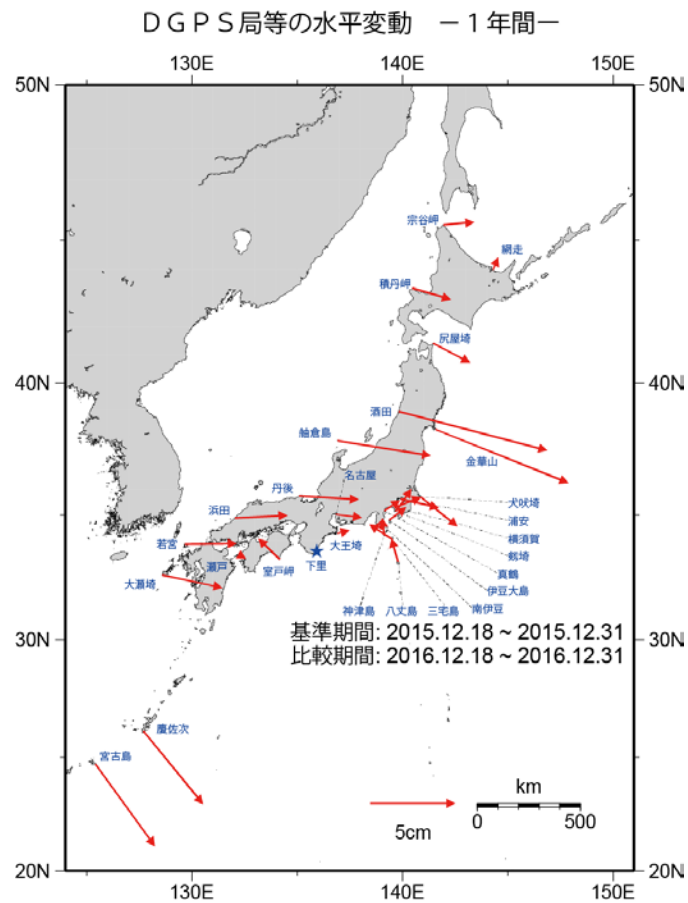


図1. DGPS 局等の GPS 連続観測から求めた水平変位 (下里局固定)。海上保安庁 「課題番号 8004」

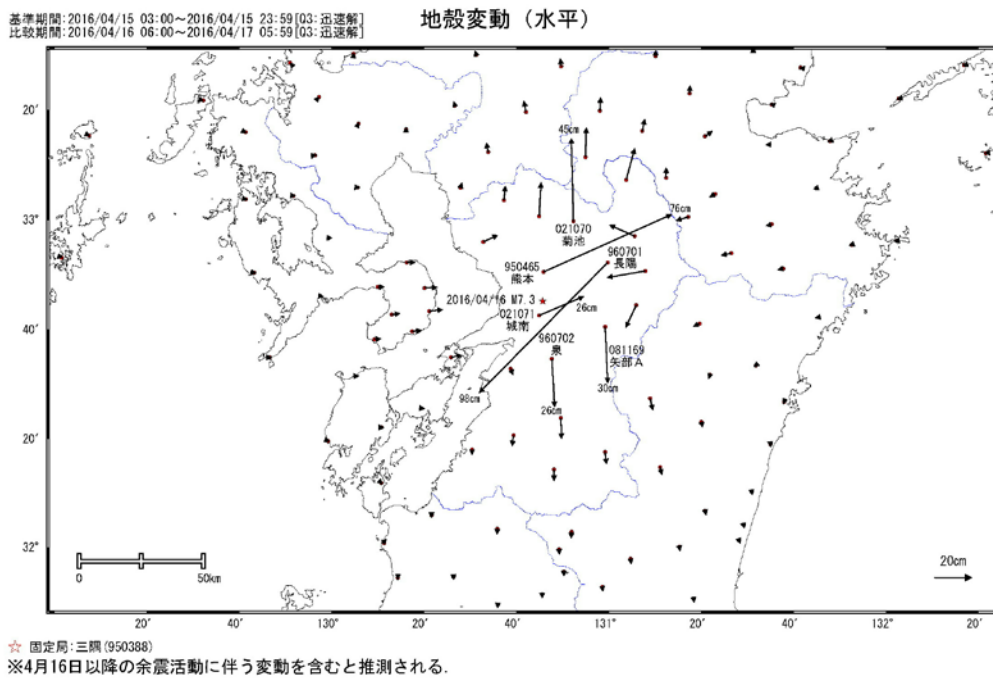


図2. 平成 28 年(2016 年)熊本地震(4 月 16 日 M7.3)前後の地殻変動観測データ (水平成分)。国土地理院 「課題番号 6005」

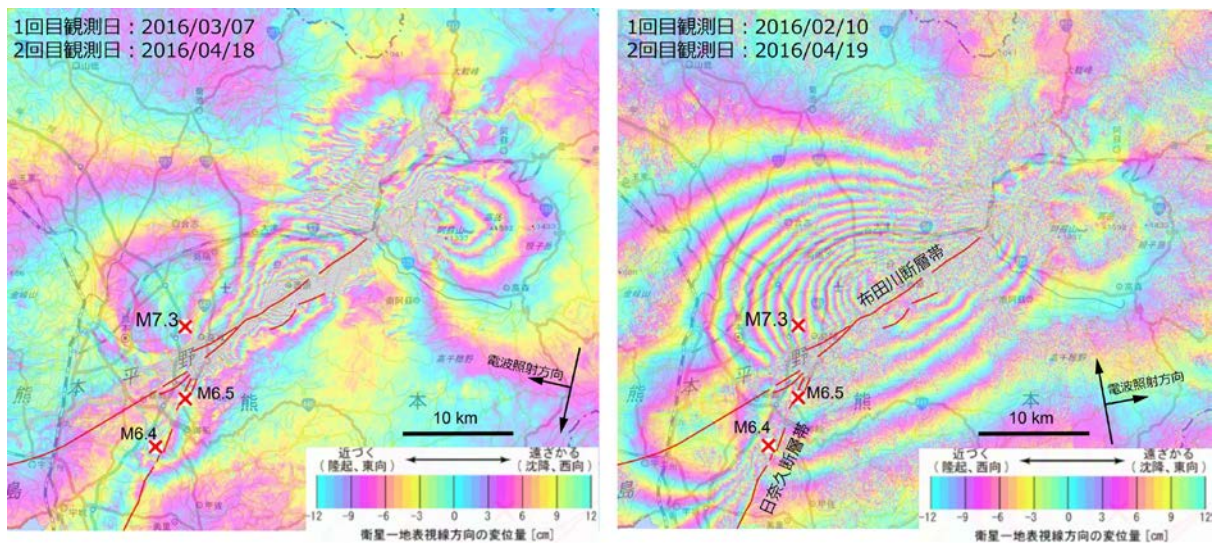


図3. SAR 干渉解析で捉えた平成 28 年熊本地震に伴う地殻変動。国土地理院 「課題番号 6008」

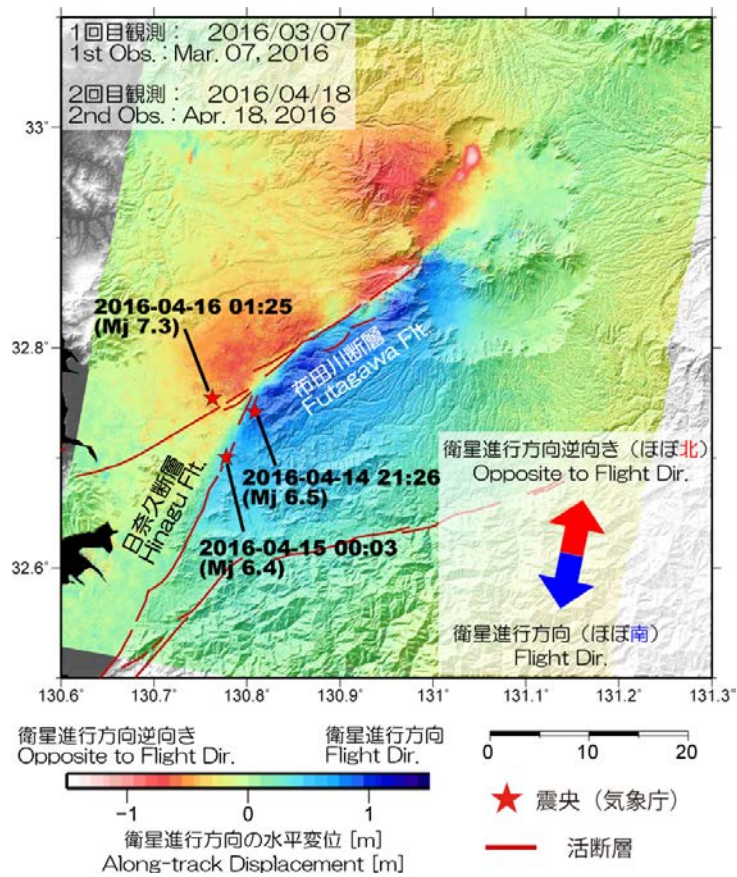


図4. MAI 法により捉えられた準南北方向の地表変位。国土地理院 「課題番号 6013」

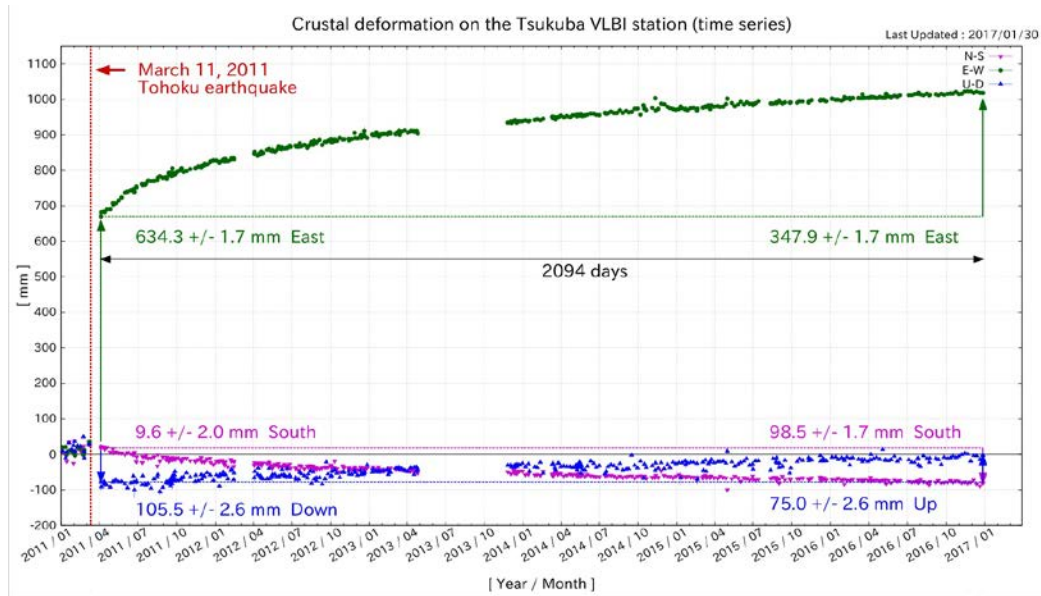


図5. 平成23年東北地方太平洋沖地震前後のつくばVLBI観測局の位置の変化。国土地理院「課題番号6008」

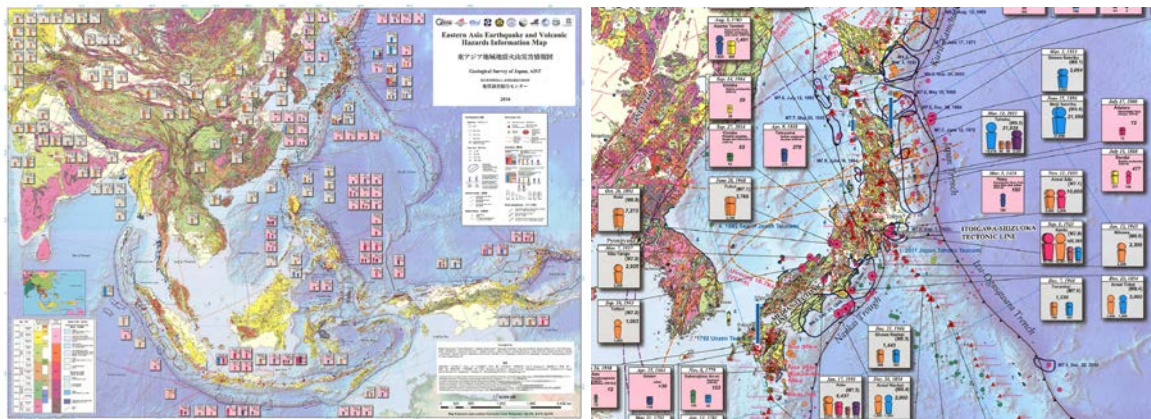


図6. 東アジア地域地震火山災害情報図。産業技術総合研究所「課題番号5009」

2 観測・解析技術の開発

技術開発担当 渡辺俊樹（名古屋大学大学院環境学研究科）

1. 本観測研究計画における観測・解析技術開発研究の位置づけ

平成21年から25年度まで実施した「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」（前計画）では、大項目のひとつとして「新たな観測技術の開発」が掲げられており、これに対応した「新たな観測技術の開発」計画推進部会において技術開発に特化した成果の報告や議論等を行った。平成26年度から実施している「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（現計画）では、「研究を推進するための体制の整備」（大項目：4.）の中で、「研究基盤の開発・整備」（中項目：(2)）の一環として「観測・解析技術の開発」（小項目：ウ.）を引き続き実施している。

開発された技術は研究の場で活用されてこそ意味があり、そのためには、開発された技術を使う側のニーズと開発側のシーズとのマッチングが重要である。このような考え方のもと、現計画では「観測・解析技術の開発」という項目に対応する計画推進部会を設けるのではなく、それぞれの計画推進部会の中で、すなわち“観測研究の場”において、技術開発に関する報告や議論が行われる体制が採られている。

その一方で、観測技術には特定の分野や対象に閉じたものは少なく、ある目的のために開発された技術が他の目的のために活用できる例が多い。さまざまな目的をもって技術開発に携わる専門家が集まれば、他の技術の問題点やその解決方法、および、地震・火山噴火研究における技術開発の方向性等について、特定の研究分野に捉われずに技術開発の立場から深い議論を進めることができる。このように、技術開発の高度な推進を図るためには、研究分野の枠を越えて技術開発に特化した議論や情報交換を行う場も必要であることから、技術開発コミュニティでは、本観測研究計画の推進の一環として技術開発に特化した議論の場を設けて活動を行っている。

2. 技術開発関係の研究課題の概要

現計画で推進する研究課題のうち17課題が「最も関連の深い次期研究計画の項目」として「観測・解析技術の開発」（4. (2) ウ）を掲げている。これは全体の中で最多の課題数を有する項目となっている。さらに、「その他関連する次期研究計画の項目」として「観測・解析技術の開発」を挙げた13課題も含めると、実に30課題が技術開発に関係した研究課題ということになる。この課題数の多さは、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究に観測・解析技術の発展が不可欠であることを示している。

本報告では、技術開発関連の課題を(1)海底における観測技術、(2)宇宙技術等を利用した観測技術、(3)地下および火山モニタリング技術に分類し、平成28年度に得られた主な成果を中心に報告する。

(1) 海底における観測技術

東北地方太平洋沖地震の最大すべり域付近の日本海溝において、2014年から2015年にかけて、海溝軸を跨ぐ形で海底間音響測距観測を行った。2015年からは、(1)ユニバーサルジョイントを廃止して姿勢の安定性を重視した脚形状、(2)音響コマンドで観測頻度の設定変更や計測データの随時吸い上げが可能、(3)高精度な外付け圧力・温度センサー（RBR）搭載、という新設計の機器5台を設置した（図1）。2016年9月にこのうち2台を回収し、往復走時データ、音速補正に使用する温度・圧力データ、装置の姿勢データからなる、ほぼ1年間の連続データを取得した。未回収の機器からも音響モデムによって一部のデータを吸い上げた。最も長い基線（ADM1A-3B間、長さ7240 m）でも、ばらつきで±1-2 cm、1年間の変位速度で±2 cm/yrの精度であることがわかり、その精度で海底局間の距離が計測できる見込みが立った（東北大学〔課題番号：1210〕）。

GPS-音響結合方式海底地殻変動観測では、南海トラフ沿いにおいて、アムールプレートに対する運動として求められた変動速度の測地学的インバージョンを行い、プレート境界のすべり欠損速度の分布を推定した（海上保安庁〔課題番号：8001〕）。南海トラフ軸付近の3観測点で2回の測定を実施し、フィリピン海プレートの運動の実測に成功し、プレート間の固着率を見積もることができた（名古屋大学〔課題番号：1703〕）。

海底での機動的地震・地殻変動観測に向けた観測技術の高度化においては、次世代型広帯域海底地震計（BBOBS-NX）の自律展開設置・自己浮上回収方式への機能高度化に向けた具体的機構設計を行い、実海域試験を実施した。海底に貫入させたセンサー部を回収時に引き抜く浮力を確保するための浮力体（ガラス球浮き）を追加した（図2）。ビデオカメラおよび加速度ロガーを装着し、水中降下から着底までの試験機の状態を記録したところ、記録部であるチタン球を投入後、降下中に生じる傾斜変動を大幅に抑制することが確認できた。定常的な海域観測網の高度化においては、新規開発し2015年に設置した海底光ケーブル式地震津波観測システム（OBCSTシステム）について、特に陸上システムの改良を実施した。OBCSTシステムの地震学的なノイズは、2 Hz より高い周波数帯域および10秒よりも長い波長域で十分に低く、海底における典型的なノイズレベルとほぼ同じであること、埋設された観測ノード（YOBI）は、他の観測ノードよりも低い雑微動レベルであること、埋設した観測点の水圧計の感度が、海底面の水圧計に比べて著しく変化していると認められないことがわかった（東京大学地震研究所〔課題番号：1521〕）。

(2) 宇宙技術等を利用した観測技術

GNSS観測・解析技術については、GEONETリアルタイム解析システムにおいて使用する衛星系を、これまでのGPSのみからGPS及びGLONASSを用いたマルチGNSSへと拡張した。そのシステムを運用し、2016年4月14日及び15日に発生した熊本地震の前震（M6.5, M6.4）ほかの地震について、地震時変動をリアルタイムで検出した。また、4月16日に発生した熊本地震（M7.3）について、地震後5分程度で矩形断層モデルを自動的に推定することに成功した。さらに、リアルタイムキネマティックGNSS時系列から火山性地殻変動の力源の状態変化を逐次推定するシステムを構築した（国土地理院〔課題番号：6012〕）。

新たな地表変動モニタリング技術として、地上設置型レーダー干渉計（GBRI: Ground-based radar interferometer）の研究を開始した。GBRIは地上に設置したアンテナからレーダー波を照射し、観測対象からの後方散乱波を受信するセンサーであり、得られたレーダー画像の各画素に格納される位相の時間変化から、アンテナと散乱点の間の距離の時間変化を面的に検出することが可能である。合成開口レーダー型と実開口レーダー型の2台のGBRIから構成されるGBRI観測システムを浅間山の山麓に設置した。植生がほとんどない火口周辺では、30日間のデータペアにおいても地殻変動検出が可能ほどの干渉性が得られることを確認した。一方で、樹林帯や悪天候時には、干渉性が著しく劣化し、地殻変動検出は困難であった。衛星SARの解析においては、陸域観測技術衛星「だいち2号」（ALOS-2）のデータを用いて、熊本地震に伴う地殻変動を検出した。得られた地殻変動は、布田川断層と日奈久断層の北端部、布田川断層の東端から北東に伸びる断層の右横ずれと、西原村付近の低角の断層の正断層成分を伴う右横ずれによっておおよそ説明することができる。この結果に基づき、熊本地震に伴う地殻変動が阿蘇山のマグマだまりに与える影響を見積もった。航空機搭載型光学センサーに関しては、小型単発航空機に搭載可能なセンサー：ARTS-SEの試験観測データを用い、ARTS-SEのカメラ型センサーデータの処理手法を開発し、各観測データよりDSMを作成することが可能となった（防災科学技術研究所〔課題番号：3005〕）。

航空機搭載合成開口レーダ（Pi-SAR2）については、地震・火山災害時の被害判読手法等の技術開発と、Pi-SARおよびPi-SAR2のデータ検索システムの公開・運用を進めた。熊本地震に関して、本震の翌日に被災地の観測を実施し（図3）、観測データの関係機関への配布とWebを通じた一般への公開を速やかに実施した（情報通信研究機構〔課題番号：0101〕）。

衛星赤外面像を用いた噴火推移の観測については、ひまわり8号 AHI 画像及びGCOM-C SGLI 画像処理システムの正式運用に向けたシステム開発を進めた。GCOM-Cの打ち上げが2016年12月から約1年間延期されることになったため、JAXAと共同でcalibration/validationの期間に行う予定であったSGLIデータ転送ルーチンのチェックは、来年度以降へ持ち越さざるを得なくなった。インドネシア、ラウン火山2015年噴火に関する噴火推移解析を進めた。ラウン火山(標高3320 m)は山頂部に直径約2 kmのカルデラをもつ火山であり、2015年6-8月にストロンボリ式噴泉を伴う規模の大きい噴出的噴火が発生した。この噴火が山頂カルデラ内で起きたため、地上から目視観測できず、詳しい噴火推移はこれまで不明とされてきた。昨年度までには、ひまわり8号AHIの10分間隔という超高頻度赤外面像を用い、噴火活動に伴う熱異常の時系列変化を解析し、噴火推移の推定を行っていた。今年度、この結果に高分解能衛星画像、ASTER-DEMの解析を組合せ、噴火の推移を詳細に明らかとすることができた(東京大学地震研究所[課題番号:1520])。

(3) 地下および火山モニタリング技術

光ベースの大深度ボアホール用地震地殻変動観測装置の設計を進めた。装置は地震計、傾斜計、温度計、歪計より構成される。地震計と傾斜計は板バネとマスを組み合わせた構造を持ち、高温用バネ材であるインコネルを用いている。マスに取り付けたコーナープリズムの動きを高温用レーザー干渉計ユニットで高精度に計測する。温度計および歪計は光ファイバグレーティング(FBG)を用いて、光ファイバーの微小伸縮をレーザー吸収波長の変化から計測する。すべての装置は通信波長帯1.55 μm のレーザー光源で動作できる構成としてあり、長距離の伝送や複数のセンサーをつないだネットワーク化に適している。(東京大学地震研究所[課題番号:1522])。

小型絶対重力計については、プロトタイプTAG-1の系統誤差の評価のため、石岡測地観測局(国土地理院、茨城県石岡市)において絶対重力計FG5との比較観測を実施した。両者の結果には30~50 μGal の差異が認められ、参照マスの自由落下時の反作用など複数の要因について検討している。また、火山の近傍において複数の絶対重力計を設置した観測網を構築することを想定し、長距離伝送の技術が確立している通信波長帯の光源(波長1.55 μm 帯)を用いた絶対重力計の動作検証を行った。絶対重力測定における変位計測の基準となる波長安定化光源1台を、複数の観測点に置かれた絶対重力計の光源として共通に使用し、光ファイバーで分配することで、効率的かつ安定的に計測することができる。TAG-1の光学素子を通信波長帯のものに交換したユニットを作成し、東北大・電気通信研究所で開発されたアセチレン安定化ファイバーレーザーを光源に用いて重力値を計測した(図4)。従来のHe-Neレーザーによる計測と比較したところ、計測誤差の範囲内で整合する計測値を得た(東京大学地震研究所[課題番号:1506])。

精密制御震源システム(アクロス)については、回転軸を水平にした第2世代震源装置(図5)の性能の検証を行った。震源基礎部分と地盤との間に生じたせん断滑りを抑えるために、基礎周辺地盤の補修作業を行い、その対策の結果を検証する振動測定実験を2015年度末に行った。データを解析したところ、補修の効果は認められるものの、十分な強度にまでは復旧しておらず、新たに基礎の補強を行った(名古屋大学[課題番号:1705])。

素粒子ミューオンを用いた火山透視技術については、桜島におけるミュオグラフィ長期観測点へカロリメータ方式を導入した(図6)。ミュオグラフィ観測装置を標高150 m、昭和火口から南に水平距離でおよそ2.8 kmの地点に設置し、ミュオグラフィ観測装置の有感面を昭和火口方向へ向けた。観測により桜島昭和火口近傍のミュオグラムを得た(図7)(東京大学地震研究所[課題番号:1523])。

火山ガス観測装置の開発においては、簡易型トラバース測定装置の測定プログラムの修正や装置全体のメンテナンスを行い、2014年11月末以降すでに2年以上継続して口永良部島火山の二酸化硫黄放出率モニタリング観測を実施している。この間、口永良部島の2015年5月29日の噴火前、噴火後の二酸化硫黄放出率推移を

測定し、貴重なデータを供給してきた。それらのデータは、特に気象庁の火山活動解説資料に採用され、口永良部島の火山活動の監視に役立っている。二酸化硫黄可視化モニタリング装置、ポータブルなガス放出率測定装置についても開発を継続している（東京大学 [課題番号：1403]）。

3. 研究集会

先に述べた、技術開発に特化した議論や情報交換を行う場として、技術開発コミュニティでは隔年で研究集会を実施している。本年度は「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画・技術開発に関する研究集会」と題した、オープンな形式の研究集会を下記の通り開催した。12名の参加を得て6件の話題提供があり、これまでの研究成果や今後の開発目標などが紹介された。

日時：2017年3月10日（金） 13:30～17:30

場所：東京大学地震研究所1号館2階 セミナー室

話題提供（発表順）：

- 短スパン伸縮計の開発と初期の地殻変動連続観測記録の活用（加納靖之：京都大学防災研究所）
- 空中マイクロ波送電技術を用いた火山観測・監視装置の開発（松島 健：九州大学）
- 小型絶対重力計と高温地震センサー、KAGRA伸縮計の開発の現状（新谷昌人：東京大学地震研究所）
- 海底地殻変動観測の最近の成果（田所敬一：名古屋大学）
- 海底地震観測の最近の進展（篠原雅尚：東京大学地震研究所）
- 機動的な海底地震・地殻変動観測の高度化（塩原 肇：東京大学地震研究所）

話題提供に続き、自由討論として、下記のような内容について活発な意見交換が行われ、問題意識の共有が図られた。

- 現在の技術開発における課題
- 将来の技術開発の目標や新技術の提案
- ユーザーサイドからの要望・提案
- 次期計画における技術開発課題の進め方

現計画の最終年度にも同様な研究集会を開催することを計画している。

4. これまでの課題と今後の展望

現計画において、技術開発課題は着実に成果を上げている。例えば、海域における地殻変動観測やSARなどの衛星測地観測においては、技術的進展により実用段階に達し、定常的な観測が可能となったことから、観測の成果が科学的な成果や新たな知見に結びついた。こうして、ユーザーのニーズを原動力として、機器開発からデータ取得、解析から科学的成果へとつなげる開発の方向性が明確になった。一方で、技術開発コミュニティの中では、技術開発者間の連携が、以前に比べやや弱くなったという意見もみられた。現計画では技術開発に関する計画推進部会を設けていないことも一因となっていると考えられる。

今後の目標として、これまで観測が十分ではない難観測地域・極限環境、特に深海域と地球深部（ボアホール）、火山における観測やデータの取得・転送の技術開発を進め、観測の空白地域を埋める必要がある。また、観測の高度化やリアルタイム化を進めるため、多種、多点、広域、連続、リアルタイムでのデータの取得とその解析技術の開発が必要である。それらの実現にあたっては、これまで地震火山研究で用いられていなかった新しい技術や発想を導入する必要もあると考えられる。技術開発関連課題においてはこれまでハードウェアの技術開発が主流であったが、今後は、ソフトウェア技術やシステム化技術も重要な課題となる。また、技術開

発の推進体制として、ユーザーと技術開発者が連携できる体制、例えば、技術開発のニーズとシーズをマッチングさせる仕組みや、ユーザーの技術開発を支援する仕組みがあることが望ましい。

成果リスト

- 新谷昌人, 2016, 光ファイバーネットワークを用いた地震・津波・地殻変動の計測技術に関する研究, 東北大学電気通信研究所研究活動報告, 22, 241-243.
- Furuya, M., K. Fukui, H. Iida, S. Kojima and T. Matsuoka, Experimental observations of two mountain glaciers on the eastern slope of Mt. Tsurugi by Pi-SAR2 airborne SAR, 2017, Bulletin of Glaciological Research, doi: 10.5331/bgr.16R04.
- 長谷川晟也, 佐藤利典, 河野昭博, 寺田麻美, 森大湧, 塩原肇, 八木健夫, 山田知朗, 篠原雅尚, 2016, 房総沖スロースリップ域での海底圧力計を用いた海底上下変動観測, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SCG59-P15.
- 香川敬生, 野口竜也, 2016, 自治体震度計によるリアルタイム情報配信の試み—鳥取県の事例—, 日本地球惑星科学連合大会2016年大会, SSS29-P05.
- 川元智司, 檜山洋平, 古屋智秋, 佐藤雄大, 太田雄策, 西村卓也, 等々力賢, 2016, 電子基準点リアルタイム解析システム(REGARD)プロトタイプの開発, 国土地理院時報, 128.
- Kawamoto, S., B. Miyahara, Y. Hiyama, Y. Sato, T. Furuya, Y. Ohta, T. Noshimura, and M. Todoriki, 2016, Real-time GNSS positioning system REGARD for rapid earthquake moment estimates, Proceedings of FIG 2016.
- Kawamoto, S., Y. Hiyama, Y. Ohta, and T. Nishimura, 2016, First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, Earth, Planets and Space, 68, 190.
- Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. Nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miyagawa, 2017, REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, J. Geophys. Res., in press.
- 小林知勝, 2017, 干渉SAR 時系列解析による国土の地盤変動の時間的推移の面的検出に関する研究(第3年次), 国土地理院調査研究年報(平成28年度)
- 久保田実, 浦塚清峰, 児島正一郎, 上本純平, 灘井章嗣, 梅原俊彦, 松岡建志, 小林達治, 三森麻衣子, 2016, 航空機搭載高分解能合成開口レーダー(Pi-SAR2)を用いた熊本地震の被災状況把握, 日本地球惑星科学連合2016年大会.
- 灘井章嗣, 上本純平, 梅原俊彦, 児島正一郎, 松岡建志, 小林達治, 久保田実, 浦塚清峰, 2016, 高分解能SAR Pi-SAR2で見た熊本地震による被災状況, 日本リモートセンシング学会学術講演会.
- Nagorny, V. D., S. Svitlov, and A. Araya, 2016, Improving absolute gravity estimates by the Lp-norm approximation of the ballistic trajectory, Metrologia, 53, 754-761.
- Ohta, K., Y. Ito, R. Hino, Y. Ohta, R. Azuma, M. Shinohara, K. Mochizuki, T. Sato, and Y. Murai, 2016, Seismic observations using ocean bottom seismometer arrays offshore Miyagi, northeast Japan, JpGU Annual Meeting, SSS02-P04.
- 太田和晃, 伊藤喜宏, 日野亮太, 太田雄策, 東龍介, 篠原雅尚, 望月公廣, 佐藤利典, 村井芳夫, 2016, 宮城県沖における海底地震計アレイ観測, 日本地震学会2016年度秋季大会, S04-01.
- Ozawa, T., E. Fujita, and H. Ueda, 2016, Crustal deformation associated with the 2016 Kumamoto Earthquake and its effect on the magma system of Aso volcano, Earth Planets Space, 68:186, doi:10.1186/s40623-016-0563-5.
- 篠原雅尚, 山田知朗, 望月公廣, 悪原岳, 仲谷幸浩, 村井芳夫, 平塚晋也, 日野亮太, 太田雄策, 東龍介, 佐藤利典, 伊藤喜宏, 中東和夫, 武林仁樹, 寺岡拓也, 八木原寛, 2016, 長期観測型海底地震計を用いた2011年東北沖地震震源域北部における地震観測, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SSS02-22.

- Shinohara, M., T. Yamada, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, 2016, Development and installation of new seafloor cabled seismic and tsunami observation system using ICT, OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, 1-4, 10.1109/OCEANS.2016.7761350.
- Shinohara, M., T. Yamada, S. Sakai, H. Shiobara, and T. Kanazawa, 2016, Installation of new seafloor cabled seismic and tsunami observation system using ICT to Off-Tohoku region, Japan, SubOptic 2016, WE2B-4.
- 篠原雅尚, 山田知朗, 酒井慎一, 塩原肇, 金沢敏彦, 2016, 新規開発したICT光海底ケーブル式地震津波観測システムの設置, 日本地球惑星科学連合2016年大会, STT51-05.
- 篠原雅尚, 山田知朗, 酒井慎一, 塩原肇, 金沢敏彦, 2016, 三陸沖における新規海底光ケーブル式地震津波観測システムの設置, 日本地震学会2016年度秋季大会, S02-06.
- Shiobara, H., H. Sugioka, A. Ito, and M. Shinohara, 2016, NX-2G : autonomous BBOBS-NX for a highly mobile broadband seismic observation at the seafloor, EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, April 21, 2016, EGU2016-3189.
- 田中愛幸, 2016, 重力ポテンシャル差計としての光格子時計の地球物理応用の可能性, 光学, 45, 259-263.
- Tanaka, H., 2016, Visualization of the internal structure of volcanoes with cosmic-ray muons, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 091016.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro & A. Asada (2016), Nature, doi:10.1038/nature17632

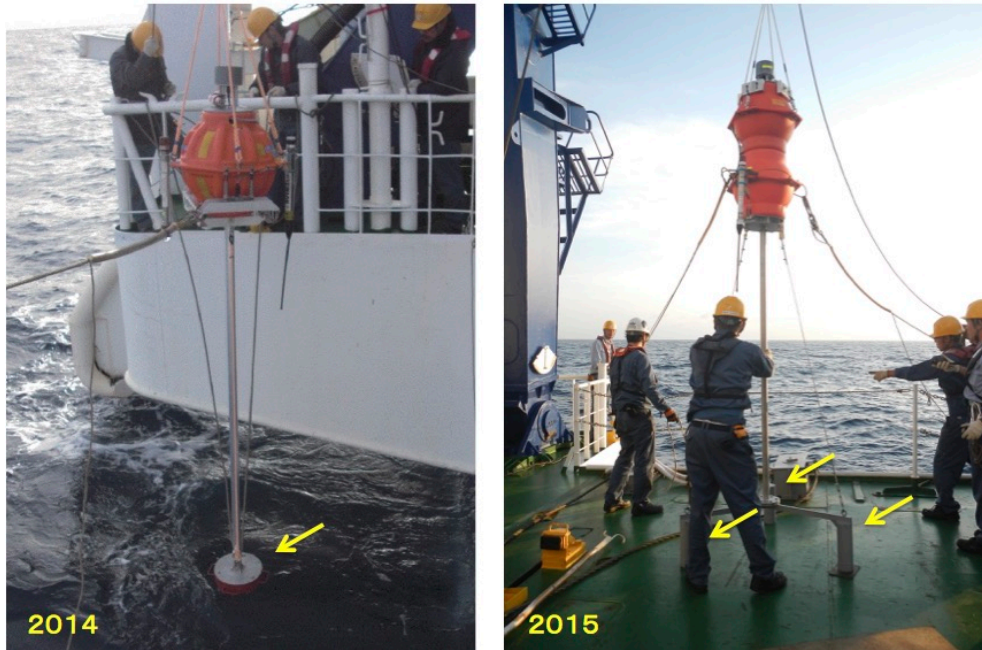


図1. 海底間音響測距装置（東北大学〔課題番号：1210〕）

2014年と2015年以降の観測でそれぞれ使用した機器の外観。2014年では、底層流に逆らわずに自由に傾けるよう一脚の下端に自在継手を装備した。2015年には、底層流に対して不動となるよう、脚の下端を3点支持とした。

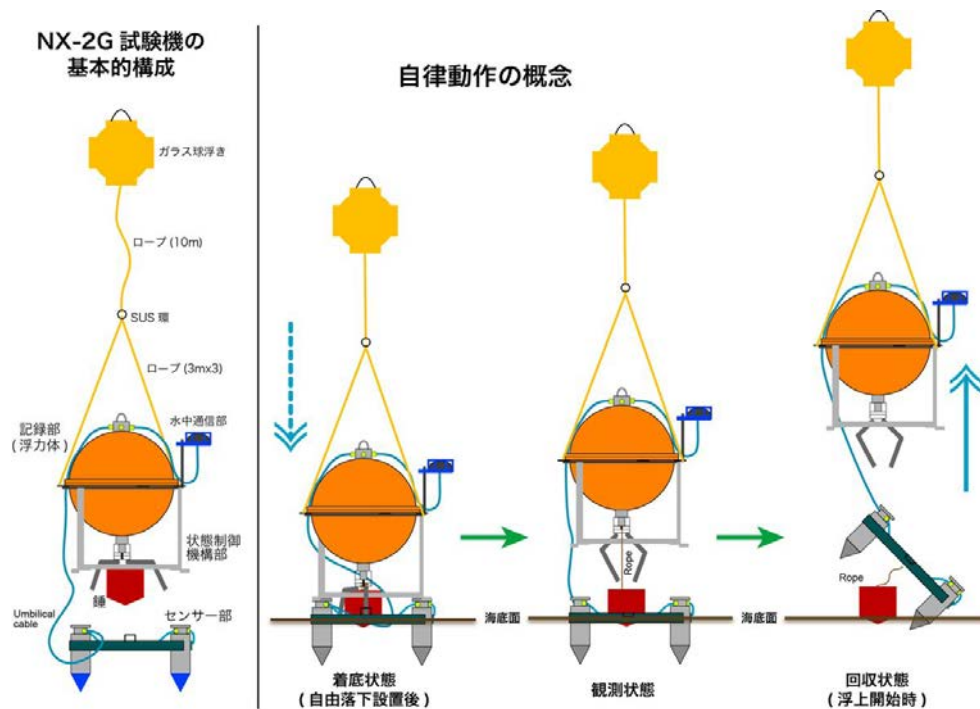


図2. 自律動作方式のBBOBS-NXの次期モデルの動作概念 (東京大学地震研究所 [課題番号: 1521])
 自律動作方式には着底・観測・回収の3つの状態を制御する2段階の遷移動作を必要とする。NX-2G試験機ではセンサー部を海底から引き抜く浮力を得るため、ガラス球浮きを追加したところ、引き抜き時に重要な効果があるだけでなく、降下時の姿勢傾斜を抑制する効果も認められた。

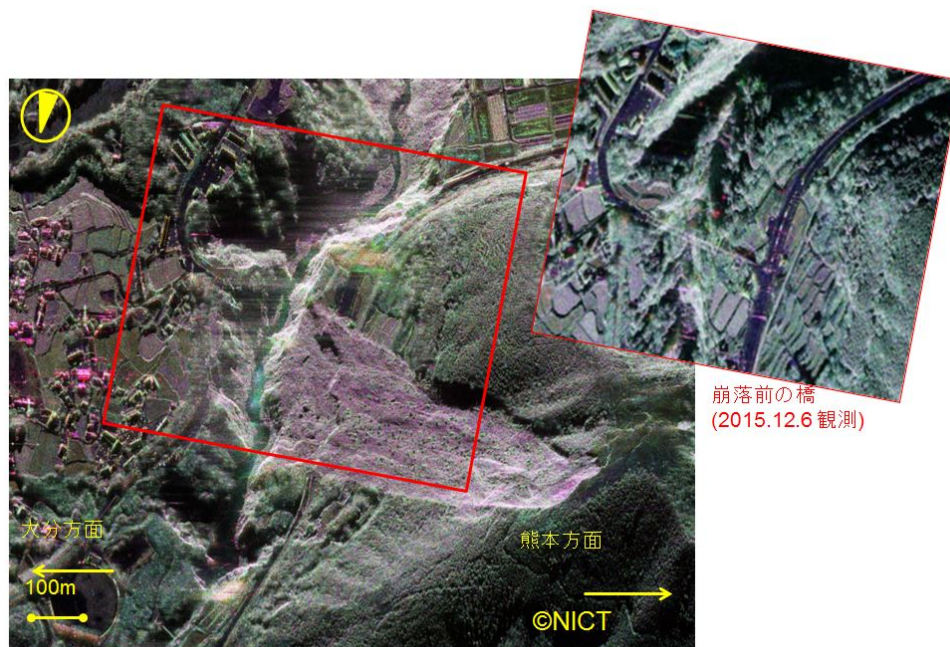


図3. 航空機SAR (Pi-SAR2) で2016年4月17日に観測した阿蘇大橋付近の画像 (情報通信研究機構 [課題番号: 0101])。
 ポラリメトリによる疑似カラー化が施されており、植生部分(緑色)と非植生(マゼンタ)の識別により土砂崩れ部分が抽出される。

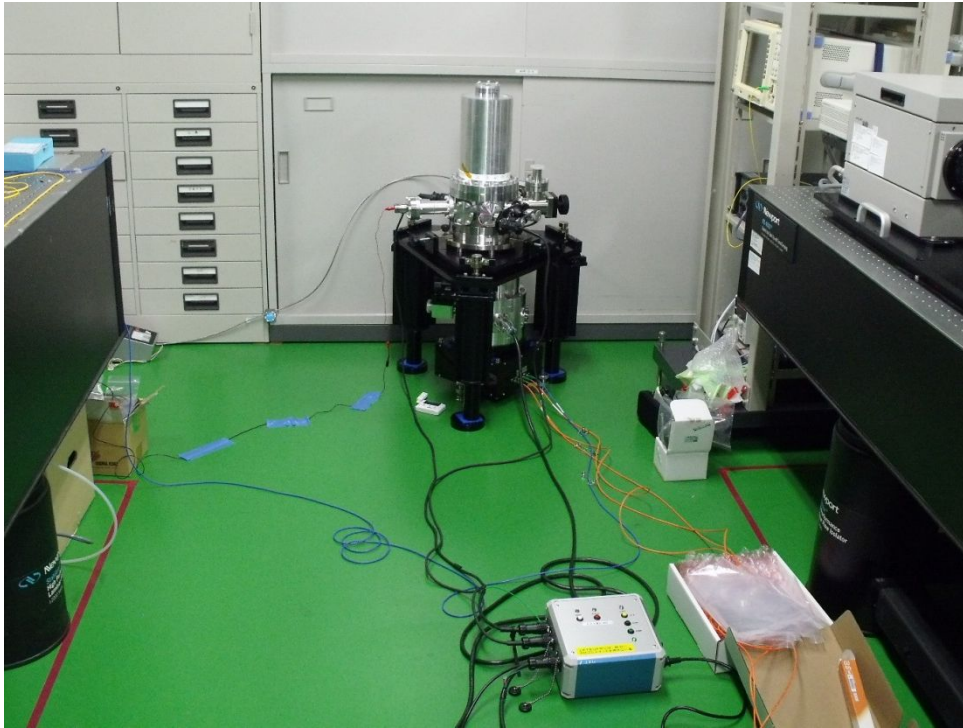


図4. 通信波長帯光源（波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯）を用いた絶対重力測定（東京大学地震研究所〔課題番号：1506〕）



図5. 第2世代アクロス震源装置（名古屋大学〔課題番号：1705〕）
振動測定実験の座標軸を合わせて示した。



図6. 桜島に導入したカロリメータ方式ミュオグラフィ観測装置（東京大学地震研究所〔課題番号：1523〕）

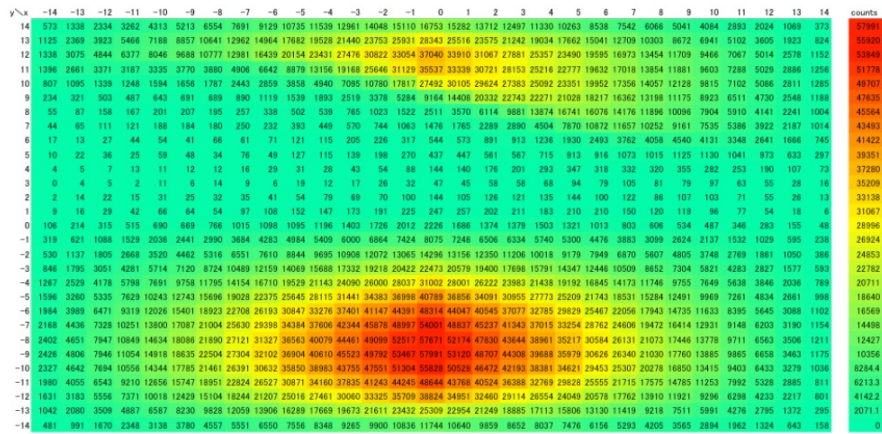


図7. 桜島に導入したカロリメータ方式ミュオグラフィ観測で得られたミュオグラム（東京大学地震研究所〔課題番号：1523〕）

3 (1) 東北地方太平洋沖総合研究

「東北地方太平洋沖」総合研究グループリーダー 松澤 暢（東北大学大学院理学研究科）

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）は、日本の観測史上最大の地震であり、約40万戸の家屋が全半壊し、死者・行方不明者が1万8千人を超えるという東日本大震災をもたらした。震災から6年が経過した2017年3月の時点でも、いまだ2千5百名以上の方々が行方不明のままである。これほどの大規模な地震にもかかわらず、我々はその地震の予知はおろか、その発生ポテンシャルを正しく推定することすらできなかった。今後、同じような失敗を繰り返さないためには、この地震およびその影響について詳しく調べ、将来の巨大地震の際の災害軽減に役立てることが極めて重要である。特に、この地震の発生により、日本列島はこれまで我々の知っているそれまでの日本列島とは別の状態になっている可能性があり、日本各地の地震や火山に及ぼす影響を詳細に調べる必要がある。

平成26年度から始まった「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」では、地震や火山の災害軽減のために様々な観測研究を実施している。ここでは、東北地方太平洋沖地震に関係の深い課題の成果を紹介し、それが災害軽減とどのように結びつくのかを論じることとする。

1. 災害の予測のための研究

新しい計画では、これまでの地震・火山噴火予知研究計画とは異なり、災害誘因（ハザード）の研究の推進に力を入れており、また、災害誘因の影響を正しく理解するために、災害素因（脆弱性）の研究も進めている。これらの研究においては東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携が重要な役割を果たしている。

巨大地震がもたらす災害・被害予測は、想定すべき複数の地震シナリオや、都市モデルの不確定性を考慮した計算が必要であり、その結果生じる膨大な量の解析結果の評価に関しても新しい方法論が必要である。このような観点から様々な都市を対象にした統合地震シミュレーション（Integrated Earthquake Simulation, IES）を実施した。仙台市を対象にしたシミュレーションでは、東北地方太平洋沖地震を含む1995年から2016年の間に発生した最大加速度100 gal以上の12の地震を対象とし、その結果を使って、各建物の被害状況と使用状況を基に、修復コストの算定を行った（拠点間連携 [課題番号：2977]）。

このような被害予測のためには、地震動に対する構造物の応答を非線形性も考慮して正しく理解する必要がある。このような観点から、東北地方太平洋沖地震の際の建物被害データと、その領域にあった強震観測点でのデータに非線形応答解析を用いた物理モデルによる被害予測の評価手法を用いて被害率を求めた結果と比較した。その結果、内陸地震を対象として構築された予測モデルは、海溝型地震の短周期に富む加速度の大きな波形に対して敏感に反応して過大な被害率を与えることが明らかになり、このような地震に対する非線形特性の見直しを行う必要があることが示唆された（拠点間連携 [課題番号：2979]）。

大地震によって生じる強震動は、場所によっては地滑りを生じ、これが新たな災害誘因となりうる。東北地方太平洋沖地震でも、実際に大きな地滑りが生じていた。どのような場所で地震時にどのような地滑りが生じやすいのかを明らかにするために、東京以西の過去の地震によって生じた地すべりの地質・地形的特徴の調査を開始した。箱根の東方では、1923年関東地震およびそれ以前の地震によって軽石が関与した地すべりが多数発生しており、将来的にも発生することが予測される。静岡・山梨では、堆積岩と変成岩のトップリング斜面の崩壊が6か所で発生しており、その地震時の脆弱性が確認された。また、地層の座屈（Buckling）に先行された崩壊も2か所で確認され、これらの構造が特に地震動に弱いことが予測される（京都大学防災研究所 [課題番号：1912]）。

被害予測において過去の事例研究は重要であるが、当時と現在の土地利用状況や地形の違いを正しく把握し、また開発によってどのような脆弱性が生まれるのかについて検討を行うことが重要である。本年度は岩手県釜石

市中心部と宮城県多賀城市周辺地区について、地形復元を実施し、地形の改変と被害状況との関係について検討を行った結果、釜石市で甲子川河口の干潟が埋め立てられている様子が確認でき、この大部分が東日本大震災時に津波被害を受けていることがわかった（拠点間連携 [課題番号：2982]）。

以上のように、大地震時に何が生じるのかということが次第に明らかになってきているものの、これらの災害の予測に関する情報が住民の防災意識向上に役立たなければ意味が無い。東日本大震災被災地の調査に基づき、科学的知識の有無や防災訓練への参加が必ずしも自己判断力に基づく避難行動に結びつかないとの仮説が生まれたため、その検証を南海トラフ地震の被害が予想される地域において行った。その結果、自然現象としてのハザードリスクは比較的良好に認知されているものの、身の危険に直接かかわるリスクとしての認知度は低く、災害への備えに結び付いていないことが明らかになってきた（名古屋大学 [課題番号：1704]）。このことは、自然現象としてのハザードの情報の提供だけでは被害軽減に結びつかない危険性を示しており、情報の提供の仕方を工夫しなければならないことを意味している。

一方、大地震発生時の強震動や津波について、より早く、より正確に情報を提供することは緊急対応に基づく減災にとって極めて重要である。このような観点から様々な機関で手法開発が進められている。

東北地方太平洋沖地震発生直後は、ほぼ同時に複数の余震が別の場所で発生することが多発し、このために緊急地震速報が結果的に「誤報」となってしまった例が少なからずあった。これに対応するため、気象庁は2016年12月からIPF法（Integrated Particle Filter法）を緊急地震速報に導入した。この手法では、少ない観測点でも多項目の情報を同時に用いるため、震源要素の信頼度を向上させることができる（気象庁 [課題番号：7014]）。

また、GNSSデータを用いて震源断層を即時に推定する手法の開発・改良がおこなわれており、今年度はマルチGNSSへの拡張、キネマティック解析の改良、ノイズに起因する滑り量の過大評価の改善、断層モデルの初期値の改善等が行われた（国土地理院 [課題番号：6004, 6012]、気象庁 [課題番号：7009]、東北大学 [課題番号：1209]）。

特に熊本地震（M7.3）については、本震の発震時刻から5分以内に、自動的に矩形断層モデルをリアルタイムで推定することに初めて成功し、布田川断層に沿った右横ずれのMw6.95の地震であったことを示すことができた。さらに、4月14日及び15日に発生した熊本地震の前震（M6.5, M6.4）、10月21日に発生した鳥取県中部の地震（M6.6）、及び11月22日に発生した福島県沖を震源とする地震（M7.4）においてはリアルタイムで地震時変動を検出することに成功した（国土地理院 [課題番号：6001, 6004, 6005]、Kawamoto et al., 2016, 川元・他, 2016）。

また、自動震源決定手法（PF法）の改良を行い、震源出力条件の見直し、複数の地震が発生した場合の最適化、走時残差が大きな相の取り扱いの改良を行った。その結果、島嶼部及び地震多発時における震源決定性能を向上させることができた（気象庁 [課題番号：7009]）。

さらに、津波予測の高度化のために、震源域内で観測される地震動・音波等の非津波成分に伴う圧力変動が津波予測精度に与える影響を、理論合成データを用いた数値実験により検証したところ、ローパスフィルタ適用後に残存する地震動に伴う圧力変化の影響で、観測波形が短い地震発生直後は精度が低下するものの、時間が経過して観測データが増えると、精度低下は大幅に改善することが明らかになった。また、遠地津波の減衰過程だけではなく成長過程までを含めた全期間の振幅時間変化を説明するため、津波エネルギーの伝達過程を踏まえた考察に基づき、波源と二次波源（散乱源）、伝播経路、観測点付近の効果の3つに区分して、それぞれの段階ごとに数理モデル化した。遠地津波の観測事例にこの数理モデルを適用して、減衰定数などのパラメータの推定を進めた（気象庁 [課題番号：7011]）。

2. 地震・火山噴火の予測のための研究

繰り返し回数が少ないときの小繰り返し地震の発生確率予測の精度を、日本海溝沿いで行った 2006 年から 2010 年の 4 回の確率予測実験データや対数正規乱数を用いたシミュレーションを用いて検討した。その結果、データが非常に少ない時は、事前分布に含まれる経験的な情報が予測精度の向上に大きく役立つことが明らかになった（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

宮城県沖のプレート境界の変動シミュレーションを、多数のシナリオで実施して、M9 クラスの巨大地震の発生前後の仮想宮城県沖地震の発生頻度について検討をおこなった。多くのシナリオでは、宮城県沖地震の平均再来間隔が、M9 クラスの地震の発生後に、より短くなることが示された（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]，Nakata et al., 2016）。

東北地方太平洋沖地震の発生直後には、日本の広い領域で地震活動が一時的に活発化し、それはとくに火山地域で顕著であった。この現象の一つの解釈としては、大振幅の地震波動によってマグマや深部高圧水が強制的に振動させられたために、地震が起りやすくなったということが考えられる。その後、このような本震発生直後の地震活動の活発化は収まってきたものの、蔵王山では、以前と比べて活動度の高い状態が続いているように見えるため、今後の活動の推移予測が重要となっている。平成 27 年度に全国の大学と合同で実施した人工地震構造探査のデータ解析を進め、火口湖御釜及び地熱活動域を対象としたファン・シューティング解析を行い、御釜と地熱活動域を結ぶ領域が地震波の減衰域となっていることを明らかにした。蔵王山の全磁力繰り返し観測を 2016 年 8 月にも実施し、これまでの観測結果をまとめた結果、御釜から北東へ約 700m、深さ約 350m の位置に長径と短径がそれぞれ 500m と 400m で厚さ 190m 程度の扁平楕円体シル状の消磁域が推定され、蔵王山の噴火ポテンシャルは御釜直下ではなく、現在噴気を上げている振子沢、丸山沢の直下付近にあることが示唆された。一方、蔵王山直下浅部で発生する低周波地震・長周期地震の解析を継続したが、長周期地震の振動特性に明瞭な時間変化は見られず、浅部の熱水系に顕著な温度変化や物性的変化はないと考えられる（東北大学 [課題番号：1202]）。

福島県立医科大学で観測された大気中ラドン濃度の残差の積算値を調べたところ、2003 年以降から大気中ラドン濃度の積算値がべき乗則に従い増加し、2011 年の東北地方太平洋沖地震まで継続していたことがわかった。2011 年の東北地方太平洋沖地震では 1990 年以降の M6 以上の地震の積算ベニオフ歪に關してもべき乗則の増加エネルギー散逸が報告されており（Xue et al., 2012）、大気中ラドン濃度の変動にも同様のエネルギー散逸則が認められたことになる（東北大学 [課題番号：1207]）。

3. 地震・火山現象の解明のための研究

（プレート境界）

東北地方太平洋沖地震の最大すべり域付近の日本海溝において、2013 年および 2014 年から 2015 年にかけて、海溝軸を跨ぐ形で 2 回の海底間音響測距観測を行い、さらに 2015 年からは、新しい仕様の 5 台の機器を同海域に設置した。本年度 2016 年 9 月にこのうち 2 台を回収し、ほぼ 1 年間の連続データを得た。温度・圧力補正後の見かけ基線長は、主に設置状態の過渡現象による姿勢変化を描いており、姿勢補正により基線長変化はなくなるセンスであることが予想される。これは、2013 年から実施してきた同海域での先行観測と整合する結果である（東北大学 [課題番号：1210]）。

2012 年から 2016 年 5 月までに実施した 6 回の GPS/音響方式海底地殻変動観測により、日本海溝近傍における 2011 年東北沖地震後の地殻変動を明らかにした（図 1）。観測された地殻変動の変位速度ベクトルは、海溝沿いに南北で大きくことなることが明らかとなった。東北沖地震で大きな地震時すべりがあった中部では粘弾性緩和による顕著な西向き変位が観測されるが、南部の広い範囲では逆に東向き変位が観測され、プレート境界線部で余効すべりが進行していることを示唆する。これに比べ、北部では地震後地殻変動による変位速度は非常に小さい（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

北緯 39 度付近の日本海溝陸側斜面で、東北沖地震発生前の 1996 年と 2001 年に実施した構造探査実験と同一測線での構造探査実験を 2013 年と 2014 年に実施し、東北沖地震前後において、ほぼ同じ記録断面を得ることができた。一方、プレート境界からの反射強度については、暫定的ではあるが、東北沖地震発生前に強度が強かった場所では発生後に強度が低下し、発生前に弱かった場所では発生後に強度が上がるといった傾向があるように見える結果となっている（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

房総沖スロースリップ領域において水圧計のデータ解析を進めた。2015 年度では観測点 2 点の差を取って海洋変動等を除去していたが、2016 年度は陸上の GNSS データに用いられている解析方法と同様に、線形成分、1 年と半年周期の周期成分、対数成分、ギャップ成分の 4 つの成分からなる関数をフィッティングして、データ解析を行った。その結果、水圧計による海底の上下変動は、各点において深さに換算して約 1cm の精度で観測できることが示された。2013 年 12 月から 2014 年 1 月の房総沖スロースリップに近い観測点で 2cm を超える有意な隆起が認められ、スロースリップから遠い観測点では有意な隆起はなかったことがわかった。この解析方法の開発によって、海底水圧計はセンチオーダーの変化を捉えられることができ、スロースリップのような小さな変化の観測にも有用であることを示すことができた（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

日本海溝プレート境界断層浅～中部の性質を理解するため、統合国際深海掘削計画第 343 次研究航海 (JFAST) によって採取された日本海溝付近のプレート境界断層試料の高温高圧摩擦実験を行い、プレート境界断層試料の摩擦特性が温度や変位速度によってどのように変化するか調べた。その結果、(a-b) 値は 50~100 °C でのみ 0 に近い負の値を取り、150 °C 以上では正となることがわかった。スロー地震は (a-b) 値が負でかつ小さな値をとるような条件で発生しやすいと考えられており、また東北沖沈み込み帯の温度構造から、スロー地震の下限はおよそ 150 °C だと推定されているため、本実験結果は観測結果とよく整合している（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

海底掘削孔 C0010 の孔内計測装置を DONET への接続をおこないリアルタイム計測を開始した。2016 年 4 月 1 日に三重県南東沖での地震 (Mw6.0) に伴い発生したゆっくり滑りに対応した孔内間隙水圧の変動を観測した。またゆっくり滑りは周辺で発生した超低周波地震の活動を伴うことを示した。DONET のデータの解析によるとこの地震の余震群や超低周波地震は本震の発生域とは空間的に離れた場所で発生しており、深部側と浅部側双方にひずみが伝播したことが示唆される（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]）。

陸上の GPS 観測網に加えて海底の GPS/音響測位結合方式による地殻変動データ、水圧計による地殻変動上下成分をデータとしてプレート境界上での東北沖地震後の余効すべりの分布を高分解能で推定した。得られた分布は東北沖地震の発生時のすべり領域とはほぼ重ならないことが示された（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]、Iinuma et al., 2016）。

琉球海溝南部では津波地震、低周波地震のようなゆっくりした地震の発生域が深部にまで隣接しており、測線構造探査においても発達した低速度 wedge の存在が確認され、プレート間の固着の弱い領域が支配的に存在することが明らかになった。更に自然地震の精緻な解析によりプレート間地震を抽出したところ、普通の地震とスロースリップや低周波地震との空間的な棲み分けがなされていることが判明した（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]、Arai et al., 2016）。

ブロック断層モデリングを時間変化も含めて解析できるようにし、東北地方太平洋沖地震前の日本列島の解析を行った。その結果、2003 年の十勝沖地震のアフタースリップが明瞭に捉えられた。2005 年の宮城県沖の地震のため、2006 年に宮城沖合のすべり欠損が小さくなる様子が捕らえられた。また 2008 年の茨城沖、福島沖の地震後の余効変動のために、2008 年以降、茨城沖、福島沖でのプレート境界のすべり欠損が小さくなっていることが推定された。西南日本のフィリピン海プレートと陸側プレート間の滑り欠損では、豊後水道の長期的なスロースリップ、東海の長期的なスロースリップ、九州東岸のスロースリップをとらえられた。2013 年以降の全国の解析でも、東海スロースリップ、紀伊水道のスロースリップ、豊後水道のスロースリップ及び九州東岸のス

ロースリップが検出され、本解析手法の有効性が確認された（国土地理院 [課題番号：6003]）。

摩擦実験における変位速度急変時に現れる摩擦強度の変化を表す量 a や b は、実験条件に依存する。その様な複雑な挙動を表現可能な摩擦構成則を定式化した上で、上述の日本海溝付近の JFAST 試料の摩擦実験から得られた摩擦の性質、及び実測された水理的性質と摩擦発熱による間隙水圧上昇を考慮した動的地震サイクルシミュレーションを行った。平時の有効垂直応力分布に関してパラメータスタディをする事により、スーパーサイクル挙動、海溝まで達する巨大地震の頻度、深部のみの大震災の頻度、巨大地震時のすべり量と発熱量、長期的摩擦発熱量の全てにおいて観測結果とよく一致するケースを実現する事に成功した（図2）。またこのモデルでは、再浅部のみが cm/s 程度の速度ですべるイベントが確認できた（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域で、前震による余効すべりと本震による高速すべりがオーバーラップしている領域が発見されたことに基づき、天然のプレート境界における摩擦強度の変位速度依存性の実証的な評価を行い、インバージョン解析により求めた変位プロファイルから応力変化を計算するとともに、その結果を速度と応力変化の関係としてコンパイルした結果、顕著な動的弱化現象が観察された。この結果は、従来の高速摩擦実験の結果（例えば Di Toro et al., 2011）とも調和的と言える（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

Brownian Passage Time (BPT) 分布更新過程から拡張した時空間更新過程モデル (Nomura et al., 2017) を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震までの太平洋プレート境界における準静的滑りの時空間的变化を小繰り返し地震を用いて推定した。その結果、十勝沖～釧路沖において 2003 年十勝沖地震後の滑り速度が長期にわたって以前より高い水準にあること、三陸はるか沖地震の余効滑りの減衰期間が深さにより異なること、三陸沖や福島沖では間欠的に M6 クラスの地震や群発地震に伴う滑り加速が見られることなどがわかった。さらに、GPS インバージョンによる同地域の滑り欠損分布の推定結果との比較を行い、全体的に同じ傾向が捉えられていることを示した（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

沈み込みプレート境界における小繰り返し地震のすべり方向の相対変化を精密に推定できる方法を開発し、東北地方太平洋沖地震前後のフィリピン海プレートの上面と下面の相似地震に適用した。すべり速度の時間変化の結果と組み合わせることで、東北地方太平洋沖地震後に太平洋プレート・フィリピン海プレートの両方の沈み込み速度が一時的に加速したことが推定された（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

南海トラフ沿いにおいて、海陸の測地観測データを用いてインバージョンを行い、プレート境界のすべり欠損速度の分布を推定した。東北地方太平洋沖地震の観測結果への影響は Iinuma et al. (2012) 及び Sun and Wang (2015) のモデルを用いて取り除いた。結果として、内閣府による南海トラフ巨大地震の想定震源域の全体は正のすべり欠損速度を持っていることがわかった。また、1940 年代の東南海・南海地震の震源域よりも外側にすべり欠損速度の高い領域が広がっていることも示された。逆にすべり欠損速度の低い領域は VLFE の分布と整合的であり、周辺に海山の沈み込みも見られることから、これらの現象とプレート境界のすべり欠損の状態は何らかの物理的相関を持つことが初めて示された（海上保安庁 [課題番号：8001], Yokota et al., 2016）。

2 つの速度弱化パッチの相互作用を考慮したモデルによる数値シミュレーションを行い、地震発生サイクルの複雑性を調べた。サイスミックカップリングが急変する時に多重周期や非周期的なサイクルが発生しやすいことがわかった。また、大規模な余効すべりをはじめとする、準静的なすべりの伝播過程について、小繰り返し地震解析結果を基に数値シミュレーションで再現した結果を参考に、摩擦構成則に基づいて摩擦特性と伝播速度の関係式を導出した（東京大学地震研究所 [課題番号：1510]）。

摩擦構成則に従う余効すべりと、地震時のすべり及び余効すべりによるマンタルの粘弾性応力緩和の双方を考慮した余効変動モデルを構築した。このモデルのパラメータは摩擦パラメータやマンタルの粘性率等であり、初期条件は地震時のすべり分布で決まる。このモデルを東北地方太平洋沖地震の余効変動に適用し、パラメータと初期条件が余効変動に与える影響について調査したところ、地震時のすべり分布によっては、モデルが余効変動の上下変動の観測値を説明できないことが分かった。この結果は、余効変動の観測データから余効すべり域の摩

擦パラメータを推定する際には、地震時のすべり分布も同時推定する必要があることを示すとともに、余効変動データから地震時すべり分布に拘束を与えることができることを示している（京都大学理学研究科 [課題番号：1803]）。

2011 年東北地方太平洋沖地震による津波堆積物の各種分析を通して、津波堆積物の識別手法や浸水域の復元手法などに向けた調査研究を各地で行った。青森県三沢市およびおいらせ町で珪藻分析を行った結果、この地震による内陸の津波堆積物には海生・汽水生の珪藻よりも淡水生の珪藻のほうが多く含まれており、また含まれている海生珪藻も現在の海岸の砂で優勢な珪藻とは異なる海生種が優勢であることがわかった。これは、珪藻分析に基づく古津波堆積物の同定においても注意すべき重要な結果である（Tanigawa et al., 2017）。さらに、 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比を調べたところ、東北沖地震の津波堆積物も、また千島海溝の連動型巨大地震による北海道東部沿岸の津波堆積物も、その周りの土壌よりも低い $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比を示すことが分かった。このことは、 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 比を津波堆積物研究における地球化学的指標として広く用いることができる可能性を示している（産業技術総合研究所 [課題番号：5004]）。

（内陸）

2011 年東北地方太平洋沖地震の発生から 5 年以上が経過しても、東北地方内陸での誘発地震活動は依然として継続しており、活動には時空間変化がある。これらの現象を東北地方太平洋沖地震発生時の応力変化だけで説明することは困難であり、誘発地震は流体の存在による地殻強度の低下によって発生し、地震活動の時空間変化は流体分布の時間変化を反映するという仮説が、一つの可能性として考えられる。森吉山周辺地域においては、単独観測点での平均的な S 波エンベロップを用いた back-projection 解析から、地震波散乱体が森吉山の北西約 5 km、深さ 13 km 付近に存在するという結果を得ている。本年度は、2012 年 11 月から 2014 年 5 月までの期間に実施した震源域周辺において 9 点の 3 成分地震計から成るアレイ観測データのセンブルランス解析から散乱体の位置推定を試みた。センブルランス解析の結果を震源に近い地震についてスタックすることで、散乱波の到来方向、見かけ速度、到達時刻を特定でき、上記の散乱体から到来したと考えられる後続波を検知することができた（弘前大学 [課題番号：1101]）。

2011 年東北沖地震後に誘発された仙台大倉における migration する群発地震活動について、気象庁一元化カタログデータに加えて、波形相関およびクロススペクトル法により得られた到達時刻差データに Double-Difference 法を適用して震源再決定を行った。得られた震源は、複数の面状に分布し、その面の方向はメカニズム解の片方の節面の方向とほぼ一致する（図 3）。この方向は広域応力場から見て unfavorably-oriented であり、その面の摩擦強度が著しく低下していたことを示唆する。震源の migration は流体拡散に伴う間隙水圧の増加で説明でき、摩擦強度の低下も同様に間隙水圧の増加により説明可能である（東北大学 [課題番号：1204]）。

福島県のいわき-猪苗代湖測線に約 1.5 km 間隔で臨時観測点 50 点を設置し地震観測を行った。2014 年 10 月～2016 年 6 月に発生した震央距離 $30^\circ \sim 90^\circ$ の Mw5.9 以上の地震を用いて観測されたレシーバ関数を計算し、S 波速度構造を与えて計算された理論レシーバ関数との間で最急降下法を用いて波形適合を行い、最も合う地震波速度構造を推定した。また、新潟-福島横断測線における MT 観測データに対して 2 次元断面の比抵抗構造を推定した結果、背弧側新潟平野の地下 10～20 km、前弧側郡山盆地と阿武隈高地との境にあたる領域の地下 10～30 km、島弧中央部西会津地下全般に低比抵抗域がそれぞれ推定された。2011 年の東北太平洋沖地震の直後から前弧側にあたる茨城県-福島県境付近で活発な誘発地震活動がおり、同地震の前に郡山盆地西側の奥羽山脈の地下浅部でもまとまった地震活動が起こっていた。これらの地震活動は、前弧側の低地震波速度-低比抵抗領域の浅部に位置する高地震波速度-高比抵抗域で起こっていることが分かった。ただ当該測線では、背弧側の日本海に面する領域ではその地下に低比抵抗域が捉えられているものの、顕著な地震活動は今のところ起きていないようである（東北大学 [課題番号：1203]）。

このように地震学的・電磁気学的に地下の流体の存在が示唆されているが、このような流体が地下に存在するためには、不透水層が形成されている必要がある。岩石-流体相互作用により、岩石の溶解と析出による地殻の透水-不透水層境界の形成について、実験的に明らかにした。その結果、350℃の温度付近では急激な溶解による流体貯留スポットの形成、400℃前後でのシリカの急激な沈殿による不透水層の形成を示すことが出来た（東北大学 [課題番号：1204]）。

また、含水岩石の電気伝導度がクラック密度 0.1 を境にして大きく増加することと、岩石試料内のクラックは主として開いた粒界であることを示す X 線 CT 観察を元に、立方体粒子の集合を考え、どれだけの割合の粒界が開くと連結した経路が形成されるのか、数値実験を行った。その結果、開いた粒界が全粒界の 20%を超えると規格化された最大長が 1 に達する（すなわち、系全体に渡る連結した経路が形成される）ことがわかった。このパーコレーションの閾値をクラック密度に換算すると 0.1 になるため、地殻内で観測されている電気伝導度の大きな空間変化は、地殻内のクラック密度がパーコレーション閾値付近にあることを示唆している（京都大学防災研究所 [課題番号：1905]）。

東北沖地震後に発生した内陸地震群について、稠密地震観測を実施し、定常観測網だけでは推定できない小さな地震についてもメカニズム解を推定し、応力テンソルインバージョンにより、東北沖地震後の応力場の時間変化について検討を行った。それぞれの地震群について、東北沖地震直後と 4 年程度経過した後で応力場は概ね同じであることが確認できた。GNSS 観測によれば本震直後と同様のセンスの余効変動が継続しており、大地震によって生じた応力場の変化は、短期間では解消しないことが明らかになりつつある（東北大学 [課題番号：1203]）。

2016 年 12 月 28 日に、東北沖地震の広義の余震と考えられる Mj6.3 の地震が茨城県北部で発生した。この地震による地殻変動を GNSS 連続観測および ALOS-2 衛星による SAR 干渉解析により検出した。最大の地殻変動が観測される領域では、長さ約 2 km の変位の不連続が認められた。矩形断層一様滑りの震源断層モデルを推定した結果、南西傾斜の断層面上における正断層運動が推定された。変位の不連続が見られた最大変位域では、直下のごく浅部に局所的な滑りが求められた（国土地理院 [課題番号：6001]）。

2000 年鳥取県西部地震域での稠密地震観測データによる震源断層周辺で発生した余震約 4000 イベントを詳細に調べた結果、余震は本震断層面から鉛直に 1.0~1.5km の幅で分布し、断層露頭観察から得られた断層破砕帯の幅よりも有意に広く、また、本震断層周辺の 9 割近くの余震が正の Δ CFF を持つことが分かった。以上の結果は、余震は本震断層の再破壊ではなくほとんどが本震断層の周辺で起きている現象であり、余震分布の幅は本震の破壊により生じた静的応力変化にコントロールされていることを示している（京都大学防災研究所 [課題番号：1905]、Yukutake and Iio, 2017）。

東北地方の 5 点及び北海道太平洋岸の 3 点、及び関東地方 2 点で、精度 1 マイクロガル程度の高精度絶対重力測定を実施した。そのうちの仙台と江刺について、2011 年以降の重力及び楕円体高の時間変化を図 4 に示す。2011 年~2014 年に見られていた隆起と重力減少の対応関係が、2014 年以降は消失していることがわかる。この傾向は関東地方（筑波山、東京）でも認めることができた。このことは東北地震後の粘弾性効果が次第に、afterslip の効果と同程度に成長していることを強く示唆する結果である。また、2016 年 5~7 月に、東北全域及び北海道の太平洋岸の約 60 点で、精度 10 μ ガル程度のハイブリッド重力観測を実施した。2012~2014 年と、2014~2016 年の 2 つの期間について 2 年間の重力変動を図 5 に示す。2014 年を境に空間的な重力変動パターンも大きく変わりつつあることが見出された（東北大学 [課題番号：1203]）。

2016 年 9~11 月に新潟県佐渡市から阿賀町における GNSS 繰り返し観測を実施した。新潟県周辺では、東北地方太平洋沖地震の余効変動により東西方向の伸張が卓越していたが、時間と共に伸張は小さくなってきている。2015 年 10 月~2016 年 10 月の 1 年間では、一部の場所において北西-南東方向の短縮が卓越し、面積歪では短縮になっている場所もあることが分かった（国土地理院 [課題番号：6001]）。

沈み込むプレート、脱水反応と流体移動、対流するマントルウエッジと流体の反応、流体濃度と温度に依存す

る粘性率を考慮した、沈み込み帯スケールでの2次元2相対流モデルを構築し、東北日本に適合する条件で計算を行った。その結果、含水量数%, 蛇紋岩およびカンラン岩に関する粘性率の水・温度依存性が実験推定値程度の場合に、地震波トモグラフィ、地殻熱流量、火山帯の位置と幅・安定性を再現するモデルが提案された(京都大学防災研究所 [課題番号: 1905], Horiuchi and Iwamori, 2016)。また、この沈み込み帯熱対流モデルを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震の余効変動を解析した結果、基準粘性を 10^{19} Pa s とし、海洋マンツルの粘性は Muto et al. (2016) で推定されたモデルの値を採用し、余効すべりを考慮すれば、海陸の観測データを概ね説明できることがわかった(東北大学 [課題番号: 1203])。

東北沖地震間における東北日本弧の上下変動のモデル化を有限要素法により行った。島弧内陸の不均質粘弾性構造とスラブを考慮した場合、沈降域が太平洋沿岸から火山フロント周辺まで拡大することがわかった。また、粘弾性モデルでも深部固着が必要であるが、弾性体に比べて深部の固着の割合は小さくても前弧の沈降を説明可能であることがわかった。観測から明らかにされているおよそ100年間における東北日本背弧での隆起は、東北沖地震震源域から深部までの固着の影響を受けていた可能性がある(東北大学 [課題番号: 1203])。

(他の沈み込み帯との比較)

国内で発生する巨大地震の頻度は低いため、巨大地震の研究を進め、減災のうえで何に注意すればよいのかを知るためには、国内の観測研究だけでは限界があり、海外の地震との比較研究が極めて重要となる。

世界および東北沖の地震活動と、朔望周期程度で変化する潮汐応力の振幅を比較したところ、振幅が大きいきには、地震のサイズ頻度統計が変化し、Gutenberg-Richter 則の b 値が小さくなることがわかった。地震の破壊過程が階層的であり、その階層進展確率が、潮汐によって変化すると考えるとこの結果は理解しやすい(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1402])。

2014年チリ Iquique 地震の発生に至るまでの地震活動解析を行った。2008年から2014年までの波形データと USGS 地震カタログを用いて、Matched Filter 法により震源カタログを新たに構築した。本震発生の約270日前から、地震活動度、小繰り返し地震から推定される非地震性滑り量、ETAS モデルの background rate が間欠的に増加し始め、その増分も時間とともに大きくなり、本震発生に至ったことが明らかとなった。また、震源移動現象の発生頻度も本震発生に向かって増加した傾向が見られた。これらの解析結果に基づくと、地震性すべりに加えて非地震性すべりもプレート境界面上で同時に進行し、本震破壊領域の端で固着が間欠的に緩み破壊域への応力集中が生じたことで本震の発生が促進されたと考えられる(東京大学地震研究所 [課題番号: 1510])。

2014年5月10日から2015年6月にかけて、ニュージーランド (NZ) 北島ギズボーン沖合にて日・NZ・米3か国で大規模海域地球物理観測を実施し、その海底圧力計のデータを調べたところ、2014年9月から10月にかけて観測網直下において発生した大規模なスロースリップに伴う1.5~5.4 cm の海底上昇を記録していることがわかった。この海底上昇は陸上のGPS観測網によってスロースリップが捕らえられる数日前から開始しているように認められ、したがってスロースリップのすべりはプレート境界の浅部から深部へと進行したことが示唆される。海底上昇量は海溝軸に向かって小さくなるものの、スロースリップによる断層すべりがほぼ海溝軸まで達したことを観測データは示している。ここで得られたスロースリップに伴う断層すべりについて、反射法地震波構造調査によって得られているプレート境界の形状と比較すると、沈み込んだ海山を避けるように分布していることがわかった。また、スロースリップに伴った微動と考えられる活動が認められ、その震源はスロースリップの断層すべりが及ばない沈み込んだ海山の基底部周辺に集中しているように見える(東京大学地震研究所 [課題番号: 1524])。

(災害軽減の基盤となるデータ・知見の流通・公開)

災害軽減のためには、予測のみならず、過去に起こったことと現在起こっていることをわかりやすく社会に伝

えることが重要である。そのような取り組みが様々な機関で進められている（例えば、気象庁〔課題番号：7012, 7020〕）。特に気象庁では、平成28年熊本地震を踏まえ、大地震発生直後においては、大地震と同程度の地震への注意も喚起するような防災上の呼びかけを行うことにした（気象庁〔課題番号：7012〕）。

また、災害軽減のための研究を効率よく、かつ多彩な視点から進めるためには、良質のデータが生産され、それが研究者に提供されることが重要であり、そのような取り組みも行われている（気象庁〔課題番号：7014〕、国土地理院〔課題番号：6005, 6006, 6008〕、防災科学技術研究所〔課題番号：3004〕、東京大学地震研究所〔課題番号：1518〕）。特に、地震観測データの一元的な処理に関して、平成28年4月より大幅に自動処理を導入した処理方法の改善を行った（気象庁〔課題番号：7014〕）。また、これらのデータを処理した結果は、地震調査委員会による地震活動の見通しの検討の際にも利用されており、この意味でも災害軽減に貢献している。

平成23年度から構築を進めている日本海溝海底地震津波観測網(S-net)については、平成28年度に海溝軸外側（北海道沖～千葉県）の敷設工事を行い、また、平成27年度までに整備を行った海溝軸外側以外の5海域125観測点について、試験運用を開始し、気象庁にもデータの配信を開始した。これらの海底下の観測点の本格運用が行われるようになれば、地震や津波の即時予測の迅速化と高度化ができ、さらに日本海溝沿いの地震・津波活動について重要な情報を提供してくれるものと期待される（防災科学技術研究所〔課題番号：3004〕）。

このような観測の一次データだけでなく、ある程度、成熟した研究領域については、一次データを加工して得られた二次データについても共有したほうが研究の進展を促すと期待される。たとえば、東北地方太平洋沖地震後の日本列島の挙動の理解にむけた研究を推進するためには、日本列島の基本構造モデルが共有されていることが望ましく、そのような観点からのモデルの構築が進められている（東京大学地震研究所〔課題番号：1505〕）。

4. これまでの課題と今後の展望

（今後の巨大地震災害の軽減のために）

今期の5ヶ年計画では、災害誘因（ハザード）までがターゲットであり、災害素因（脆弱性）までは大きく踏み込んでいない。しかし、将来的には、災害素因も十分検討する必要がある、今回の5ヶ年はそのための「準備期間」と位置付けるべきであろう。実際、社会科学者との連携も進んできており、次の5ヶ年ではさらに災害素因の研究も進展させることができると期待される。

1970年代末から1980年代にかけて「比較沈み込み帯学」が構築され、M9の巨大な地震は若いプレートが沈み込む場所や、付加体型の沈み込み帯で生じるものと考えられていた。海洋性プレートが若ければ浮力が働いて沈み込みにくくなり、その上の堆積物も海溝で削り取られやすくなって、付加体が形成されていく、ということから、このようなプレート境界で固着が強くなり、巨大な地震が起こりやすい、というのは、わかりやすい話であったため、このような考え方は多くの地震学者に受け入れられ、やがて「常識」になってしまっていた。しかし、このロジックの帰結は、古いプレートが沈み込む場所や、造構性浸食型沈み込み帯で、M9の地震が相対的に起こりにくいということであって、M9の地震の発生が不可能というわけではない。そのことに我々は、もっと慎重に考えるべきであった、というのが、東北地方太平洋沖地震の大きな反省であった。

しかし、そのようにM9の発生の「有無」ではなく、「傾向」を決めるパラメータは、いくつかあると考えられ、そのような「傾向」を把握して、新しい「比較沈み込み帯学」を構築する努力は、前にもまして重要となっている。その際には、くれぐれも、得られた「傾向」が、M9の地震の将来にわたっての「有無」を表すわけではなく、あくまでも統計的な「起こりやすさ」を表しているということに留意する必要がある。

東北沖でなぜM9が生じたのかについては、いくつかの仮説が提案されている。どれが主要原因であったのかについて、当初、いろいろと議論があったが、今となってみると、どれも何らかの寄与があったと考えるべきであろう。少なくとも、原因を絞り込みすぎないようにする必要がある。なぜなら、今回は主要原因にならなかったことが、次のM9の地震の主要原因になるかもしれないからである。今後、「想定外」を減らすためには、可

能性が低いと判断されてもむやみに切り捨てず、僅かな可能性であっても、「ありうる」として留意しておくことが重要である。

一方、今回の地震では、海溝付近が大きく滑って大きな津波を生じており、また、過去にM7の地震を生じていた場所で高周波サブイベントが生じていたようにも見える。このような傾向が他の沈み込み帯で、どのくらい共通の性質なのかを調べることは、将来の津波ハザードや地震ハザードを絞り込むために重要であり、今後、このような観点でも「比較沈み込み帯学」の研究を進展させることが重要である。

沈み込み帯の特徴を抽出するうえで留意すべき点として、プレート境界の性質の時間変化がある。東北沖地震の前の1ヶ月間くらいにスローイベントとして滑った場所が、本震のときにも大きな高速滑りを生じたことが明らかになっており、また、これまでプレート境界地震が生じていなかった場所でも、大きな余効すべりが生じている期間だけ地震が発生している例がかなりあることが分かってきている。したがって、これまでのような単純な「スローイベントと地震の棲み分け」は厳密には成立せず、「地震性滑りが卓越する場所・時期」があるという観点で、時空間的に変化に注意しながら特徴を抽出していく必要がある。

一方、東北地方太平洋沖地震では、スローイベントや余効すべりと地震性すべりが連鎖的に発生して本震に至ったということが明らかになっている。したがって、決定論的な短期予知は困難ではあるものの、地震のトリガしやすさを考慮した、「確率論的短期予知」はある程度可能と考えられ、今後、このような地震のトリガ源としての、スローイベント/余効すべりの時空間分布の研究が重要となっている。

(次の巨大地震災害の軽減のために)

東北地方太平洋沖地震のあと、その震源域の北と南のプレート境界、および沖合のアウターライズ領域でM8級の巨大な余震が起こることが、東北沖発生直後から心配されてきた。今のところ、それは発生していないものの、1986年の明三陸地震のあと、その沖合のアウターライズ域で1933年の昭和三陸地震が生じたことを考えれば、今後100年くらいは、そのようなことが十分起こりうると考えて警戒を続ける必要がある。

特に、北側でM8級の「最大余震」が生じれば、それは北海道の沖合まで連動して、次のM9地震まで成長する可能性もあり、今後、過去の北海道沖合の巨大地震の履歴の調査をさらに推進するとともに、GNSS観測や地震観測を通じて、プレート境界の固着状況や地震活動に変化が生じていないか、慎重にモニタリングを続けていく必要がある。

このような次の巨大地震の予測のためには、余効変動の正しい理解が重要である。これまでの研究により、M9の地震では余効すべりのみならず粘性緩和の影響が無視できないことが明らかになっており、このような余効変動の詳細なモデル化は、M9の地震発生サイクルを理解して、次のM9地震の予測にとって重要であるのと同時に、「最大余震」の発生予測にとっても、また、今後の内陸の地震・火山活動の予測のためにも、極めて重要な意味を持つ。したがって、今後、観測と理論、数値計算の集合知として、余効変動のモデル化を強力に推進していく必要がある。

成果リスト

- Ando, R., 2016, Fast Domain Partitioning Method for dynamic boundary integral equations applicable to non-planar faults dipping in 3-D elastic half-space, *Geophys. J. Int.*, 207, 833-847.
- Arai, R., T. Takahashi, S. Kodaira, Y. Kaiho, A. Nakanishi, G. Fujie, Y. Nakamura, Y. Yamamoto, Y. Ishihara, S. Miura, and Y. Kaneda, 2016, Structure of the tsunamigenic plate boundary and low-frequency earthquakes in the southern Ryukyu Trench, *Nature Comm.*, 7:12255, doi:10.1038/ncomms12255.
- Arai, R., S. Kodaira, Y. Kaiho, T. Takahashi, S. Miura, and Y. Kaneda, 2017, Crustal structure of the

- southern Okinawa Trough: Symmetrical rifting, submarine volcano and potential mantle accretion in the continental back-arc basin, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 622–641, doi:10.1002/2016JB013448.
- Burgmann, R., N. Uchida, Y. Hu, and T. Matsuzawa, 2016, Tohoku rupture reloaded?, *Nature Geosci.*, 9, 183–184, doi:10.1038/ngeo2649.
- Freed, A. M., A. Hashima, T. W. Becker, D. A. Okaya, H. Sato, Y. Hatanaka, 2017, Resolving depth-dependent subduction zone viscosity and afterslip from postseismic displacements following the 2011 Tohoku-oki, Japan Earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 459, 279–290, doi:10.1016/j.epsl.2016.11.040.
- Fukahata Y. and M. Hashimoto, 2016, Simultaneous estimation of the dip angles and slip distribution on the faults of the 2016 Kumamoto earthquake through a weak nonlinear inversion of InSAR data, *Earth Planets Space*, 68, 204, doi:10.1186/s40623-016-0580-4.
- Goto, M., Yasuoka, Y., Nagahama, H., Muto, J., Omori, Y., Ihara, H., Mukai, T., 2017, Anomalous changes in atmospheric radon concentration before and the after 2011 northern Wakayama Earthquake (Mj 5.5), *Radiation Protection Dosimetry*, 174 (3), 412–418, doi:10.1093/rpd/ncw142.
- Harris, R., L. Wallace, S. Webb, Y. Ito, K. Mochizuki, H. Ichihara, S. Henry, A. Trehu, S. Schwartz, A. Sheehan, R. Lauer, and D. Saffer, 2016, Investigations of shallow slow slip offshore of New Zealand, *Eos*, 97, 701–704, doi:10.1029/2016E0048945.
- Hashima, A., T. W. Becker, A. M. Freed, H. Sato, D. A. Okaya, 2016, Coseismic deformation due to the 2011 Tohoku earthquake: influence of 3-D elastic structure around Japan, *Earth Planets Space*, 68:159, doi:10.1186/s40623-016-0535-9.
- Hatakeyama, N., N. Uchida, T. Matsuzawa, T. Okada, J. Nakajima, T. Matsushima, T. Kono, S. Hirahara, and T. Nakayama, 2016, Variation in high-frequency wave radiation from small repeating earthquakes as revealed by cross-spectral analysis, *Geophys. J. Int.*, 207, 1030–1048, doi:10.1093/gji/ggw313.
- Hirata, Y., and Y. Ohta, 2016, Spatial and temporal characteristics of optimum process noise values of tropo-spheric parameters for kinematic analysis of Global Navigation Satellite System (GNSS) sites in Japan, *Earth, Planets Space*, 68:203, doi:10.1186/s40623-016-0578-y.
- Hirono, T., K. Tsuda, W. Tanikawa, J.-P. Ampuero, B. Shibazaki, M. Kinoshita, and J. J. Mori, 2016, Near-trench slip potential of megaquakes evaluated from fault properties and conditions, *Sci. Rep.* 6:28184, doi:10.1038/srep28184.
- 檜山洋平・川元智司・古屋智秋・甲斐玲子・山口和典・鈴木啓・菅富美男・嵯峨諭, 2016, GEONET による熊本地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 128, 163–168.
- 檜山洋平・川元智司・甲斐玲子・山口和典・高松直史・佐藤明日花・宮原伐折羅・三浦優司・山下達也・矢来博司・森下遊, 2017, GEONET 及び SAR 干渉解析による鳥取県中部の地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, 129, 印刷中.
- Horiuchi, S., and H. Iwamori, 2016, A consistent model for fluid distribution, viscosity distribution, and flow-thermal structure in subduction zone, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 3238–3260, doi:10.1002/2015JB012384.
- Ichimura, T., R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, and Y. Fukahata, 2016, An elastic/viscoelastic finite element analysis method for crustal deformation using a 3D island-scale high-fidelity model, *Geophys. J. Int.*, 206, 114–129, doi:10.1093/gji/ggw123.
- Ide, S., S. Yabe, and Y. Tanaka, 2016, Earthquake potential revealed by tidal influence on earthquake size-frequency statistics, *Nature Geosci.*, 9, 834–837, doi:10.1038/ngeo2796.

- Iinuma, T., R. Hino, N. Uchida, W. Nakamura, M. Kido, Y. Osada, and S. Miura, 2016, Seafloor observations indicate spatial separation of coseismic and postseismic slips in the 2011 Tohoku earthquake, *Nature Comm.*, 7:13506, doi:10.1038/ncomms13506.
- Inazu, D., T. Waseda, T. Hibiya and Y. Ohta, 2016, Assessment of GNSS-based height data of multiple ships for measuring and forecasting great tsunamis, *Geosci. Lett.*, 3:25, doi:10.1186/s40562-016-0059-y.
- 井上拓也・太田雄策・越村俊一・日野亮太・川元智司・檜山洋平・道家友紀, 2016, GNSS によるリアルタイム断層推定情報の津波解析への適用手法の検討, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 72(2), doi:10.2208/kaigan.72.I_355, 355-360.
- 石川正弘・谷健一郎・桑谷立・金丸龍夫・小林健太, 2016, 丹沢山地の地質:伊豆衝突帯のジオダイナミクス, *地質学雑誌*, 122, 291-304.
- 磯部渉, 2017, 稠密アレイを用いたレシーバ関数解析による東北南部前弧域の地殻・マントル構造の研究, 東京大学修士論文.
- Ito, A., H. Sugioka, K. Obana, R. Hino, D. Suetsugu, K. Nakahigashi, M. Shinohara, M. Nakano, and Y. Yamamoto, 2017, Upper boundaries of the Pacific and Philippine Sea plates near the triple junction off the Boso Peninsula deduced from ocean-bottom seismic observation, *Earth Planets Space*, 69:30, doi:10.1186/s40623-017-0608-4.
- Iwamori, H., K. Yoshida, H. Nakamura, T. Kuwatani, M. Hamada, S. Haraguchi, K. Ueki, 2017, Classification of geochemical data based on multivariate statistical analyses: Complementary roles of cluster, principal component, and independent component analyses, *Geochem. Geophys. Geosys.*, doi:10.1002/2016GC006663.
- Kato, A., J. Fukuda, T. Kumazawa, and S. Nakagawa, 2016, Accelerated nucleation of the 2014 Iquique, Chile Mw 8.2 Earthquake, *Scientific Reports*, 6, 24792, doi:10.1038/srep24792.
- Kato, N., 2016, Earthquake cycles in a model of interacting fault patches: Complex behavior at transition from seismic to aseismic slip, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 106, doi: 10.1785/0120150185.
- 川元智司・檜山洋平・古屋智秋・佐藤雄大・太田雄策・西村卓也・等々力賢, 2016, 電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD) プロトタイプの開発, *国土地理院時報*, 128.
- Kawamoto, S., Y. Hiyama, Y. Ohta, and T. Nishimura, 2016, First Result from the GEONET Real-time Analysis System (REGARD): the Case of the 2016 Kumamoto Earthquakes, *Earth Planets Space*, 68:190, doi:10.1186/s40623-016-0564-4.
- Kawamoto, S., Y. Hiyama, R. Kai, F. Suga, K. Yamaguchi, T. Furuya, S. Abe, and N. Takamatsu, 2016, Crustal deformation due to the Kumamoto Earthquake revealed by GEONET, *Bull. GSI*, 64, 27-33.
- Kawamoto, S., Y. Ohta, Y. Hiyama, M. Todoriki, T. nishimura, T. Furuya, Y. Sato, T. Yahagi, and K. Miyagawa, 2017, REGARD: A new GNSS-based real-time finite fault modeling system for GEONET, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 1324-1349, doi:10.1002/2016JB013485.
- 小林広明・越村俊一・下條真司・有吉慶介, 2016, 防災減災に資する Urgent Computing への挑戦, *ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム論文集*, vol. 2016, 128-129.
- 小菅正裕, 2017, 東北地方太平洋沖地震後の秋田県内の誘発地震活動の推移, *東北地域災害科学研究*, 53, 139-144.
- Kubota, T., R. Hino, D. Inazu, Y. Ito, T. Iinuma, Y. Ohta, S. Suzuki, and K. Suzuki, 2016, Coseismic slip model of offshore moderate interplate earthquakes on March 9, 2011 in Tohoku using tsunami

- waveforms, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 458, 241-251.
- Matsubara, M., H. Sato, T. Ishiyama, and A. V. Horne, 2016, Configuration of the Moho discontinuity beneath the Japanese Islands derived from three-dimensional seismic tomography, *Tectonophys.*, in press, doi:10.1016/j.tecto.2016.11.025.
- Mizoguchi, K., and T. Hirose, 2016, Transient water adsorption on newly formed fault gouge and its relation to frictional heating, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7921-7927.
- Muto, J., B. Shibazaki, T. Iinuma, Y. Ito, Y. Ohta, S. Miura, and Y. Nakai, 2016, Heterogeneous rheology controlled postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068113.
- Nakamura, H., K. Chiba, Q. Chang, N. Morikawa, K. Kazahaya, H. Iwamori, 2016, Origin of the Arima-type and Associated Spring Waters in the Kinki District, Southwest Japan, *J. Geol. Geophys.*, 5:240. doi:10.4172/2381-8719.1000240.
- Nakamura, W., N. Uchida, and T. Matsuzawa, 2016, Spatial distribution of the faulting types of small earthquakes around the 2011 Tohoku-oki earthquake: A comprehensive search using template events, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2591-2607, doi:10.1002/2015JB012584.
- Nakano, M., T. Hori, E. Araki, N. Takahashi, and S. Kodaira, 2016, Ocean floor networks capture low-frequency earthquake event, *Eos*, 97, doi:10.1029/2016E0052877.
- Nakata, R., T. Hori, M. Hyodo and K. Ariyoshi, 2016, Possible scenarios for occurrence of M7 interplate earthquakes prior to and following the 2011 Tohoku-Oki earthquake based on numerical simulation, *Sci. Rep.*, 6:25704, doi:10.1038/srep25704.
- 中田健嗣・小林昭夫・平田賢治・対馬弘晃・山崎 明・勝間田明男・前田憲二・馬場久紀・一ノ瀬里美・牛田 堯・石原昂典・稲村嘉津也・蓮澤 豪, 2017, 自己浮上式海底地震計観測によって推定された紀伊半島南方の南海トラフ軸南側の地震活動, *地震*, 69, 59-68.
- Nakatani, T., and M. Nakamura, 2016, Experimental constraints on the serpentinization rate of fore-arc peridotites: Implications for the upwelling condition of the slab-derived fluid, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, doi:10.1002/2016GC006295.
- Nomura, S., Y. Ogata, N. Uchida, and M. Matsu'ura, 2017, Spatiotemporal variations of interplate slip rates in northeast Japan inverted from recurrence intervals of repeating earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 208, 468-481, doi:10.1093/gji/ggw395.
- 太田雄策, 2016, リアルタイム・キネマティック GNSS データ解析の高度化およびそれにもとづく巨大地震の震源断層即時推定手法に関する研究, *測地学会誌*, 62(1), 1-19.
- Saito, Z., 2017, 3D magnetotelluric imaging of fluid distribution in a seismogenic region, Miyagi, NE Japan, 東京工業大学修士論文.
- Sawai, M., A. R. Niemeijer, O. Plumper, O., T. Hirose, and C. J. Spiers, 2016, Nucleation of frictional instability caused by fluid pressurization in subducted blueschist, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2543-2551.
- Shibazaki, B., T. Okada, J. Muto, T. Matsumoto, T. Yoshida, and K. Yoshida, 2016, Heterogeneous stress state of island arc crust in northeastern Japan affected by hot mantle fingers, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 3099-3117, doi:10.1002/2015JB012664.
- Suzuki, K., M. Nakano, N. Takahashi, T. Hori, S. Kamiya, E. Araki, R. Nakata, and Y. Kaneda, 2016, Synchronous changes in the seismicity rate and ocean-bottom hydrostatic pressures along the Nankai

- trench: A possible slow slip event detected by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET). *Tectonophys.*, 680, 90–98, doi:10.1016/j.tecto.2016.05.012.
- Takagi, S., and S Okubo, 2016, Internal deformation caused by a point dislocation in a uniform elastic sphere, *Geophys. J. Int.*, 208, 973–991.
- Takaesu, M., H. Horikawa, K. Sueki, N. Takahashi, A. Sonoda, and S. Tsuboi, 2016, Development of a web application system for seismic waveform data observed in real time with the seafloor seismic network DONET, *Marine Technol. Soc. J.*, 50, 3, 87–91, doi:10.4031/MTSJ.50.3.14.
- Tanigawa, K., Y. Sawai, and Y. Namegaya, 2017, Diatom assemblages within tsunami deposit from the 2011 Tohoku-oki earthquake along the Misawa coast, Aomori Prefecture, northern Japan, *Marine Geology*, doi:10.1016/j.margeo.2016.11.016.
- Uchida, N., T. Iinuma, R. M. Nadeau, R. Burgmann, R. Hino, 2016, Periodic slow slip triggers megathrust zone earthquakes in northeastern Japan, *Science*, 351, 488–492, doi:10.1126/science.aad3108.
- Uchida, N., Y. Asano, and A. Hasegawa, 2016, Acceleration of regional plate subduction beneath Kanto Japan, after the 2011 Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 9002–9008, doi:10.1002/2016GL070298.
- Uchida, N., S. Kirby, N. Umino, R. Hino, and T. Kazakami, 2016, The great 1933 Sanriku-oki earthquake: reappraisal of the mainshock and its aftershocks and implications for its tsunami using regional tsunami and seismic data, *Geophys. J. Int.*, 206 (3), 1619–1633.
- Wada, J., K. Kanagawa, H. Kitajima, M. Takahashi, A. Inoue, T. Hirose, J. Ando, and H. Noda, 2016, Frictional strength of ground dolerite gouge at a wide range of slip rates, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 2961–2979, doi:10.1002/2015JB012013.
- Wallace, L., S. C. Webb, Y. Ito, K. Mochizuki, R. Hino, S. Henrys, S. R. Schwartz, and A. F. Sheehan, 2016, Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand, *Science*, 352, 701–704, doi:10.1126/science.aaf2349.
- Watanabe, N., T. Numakura, K. Sakaguchi, H. Saishu, A. Okamoto, S. E. Ingebritsen, and N. Tsuchiya, 2017, Potentially exploitable supercritical geothermal resources in the ductile crust, *Nature Geosci.*, doi:10.1038/NGEO2879.
- Yabe, S., and S. Ide, 2017, Slip-behavior transitions of a heterogeneous linear fault, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 122, 387–410, doi:10.1002/2016JB013132.
- Yamamoto, N., S. Aoi, K. Hirata, W. Suzuki, T. Kunugi, and H. Nakamura, 2016, Multi-index method using offshore ocean-bottom pressure data for real-time tsunami forecast, *Earth Planets Space*, 68:128, doi:10.1186/s40623-016-0500-7.
- Yamamoto, N., K. Hirata, S. Aoi, W. Suzuki, H. Nakamura, and T. Kunugi, 2016, Rapid estimation of tsunami source centroid location using a dense offshore observation network, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4263–4269, doi:10.1002/2016GL068169.
- Yamamoto, Y., Y. Hamada, N. Kamiya, T. Ojima, S. Chiyonobu, and S. Saito, 2016, Geothermal structure of the Miura-Boso plate subduction margin, central Japan, *Tectonophys.*, doi:10.1016/j.tecto.2016.11.004.
- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, 2016, Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, 534, 374–377, doi:10.1038/nature17632.

Yukutake, Y., and Y. Iio, 2017, Why do aftershocks occur? Relationship between mainshock rupture and aftershock sequence based on highly resolved hypocenter and focal mechanism distributions, *Earth Planets Space*, 69:68, doi:10.1186/s40623-017-0650-2.

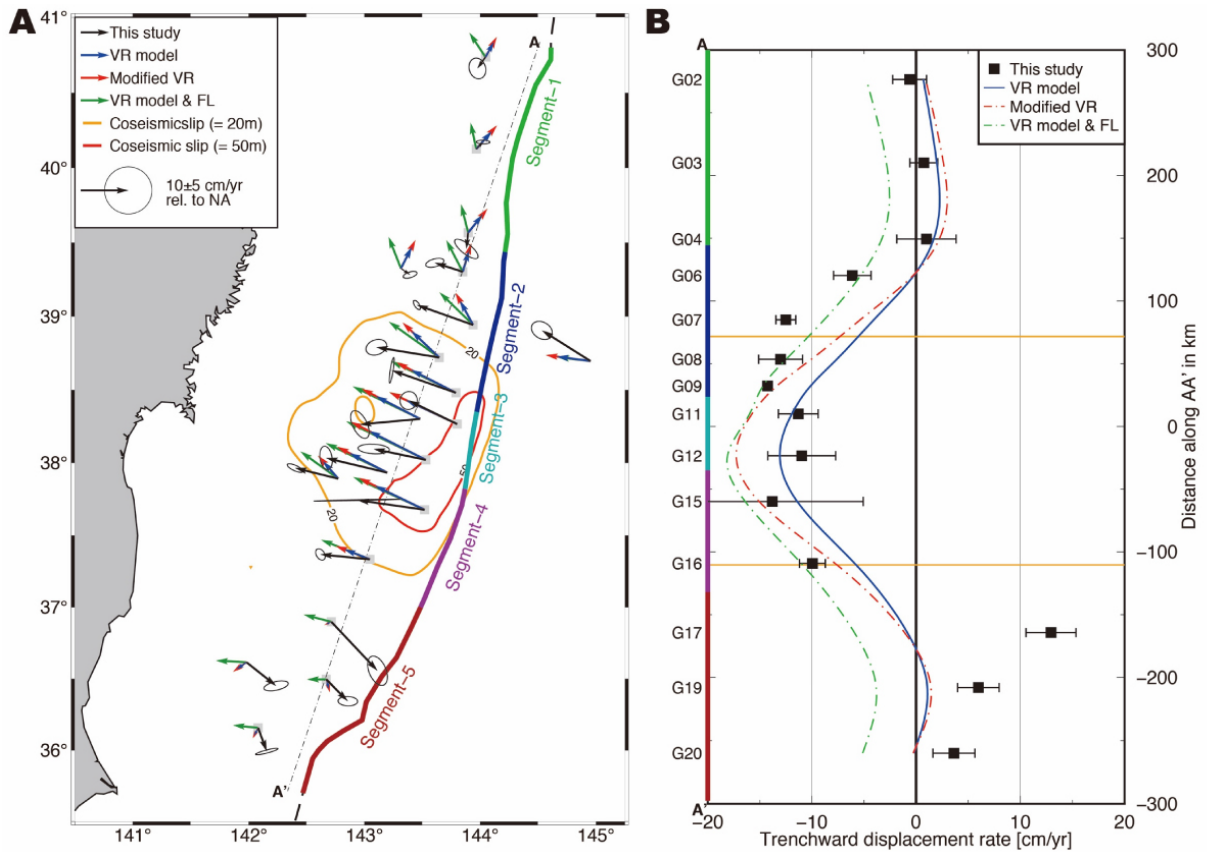


図1. 日本海溝近傍における2011年東北沖地震後の地殻変動。

A: 変位速度ベクトル。Inuma et al. (2012) による本震時すべりの等値線 (20m と 50m) とともに示す。B: 変位速度の海溝と直交する成分の南北変化。Sun et al. (2014) による粘弾性緩和変形モデル (青), 粘性係数を小さくしたモデル (赤), 粘弾性緩和に加えてプレート境界全面での100%固着を仮定した場合 (緑) のそれぞれにおける変位速度の計算値をあわせて示す (東京大学地震研究所 [課題番号: 1503])。

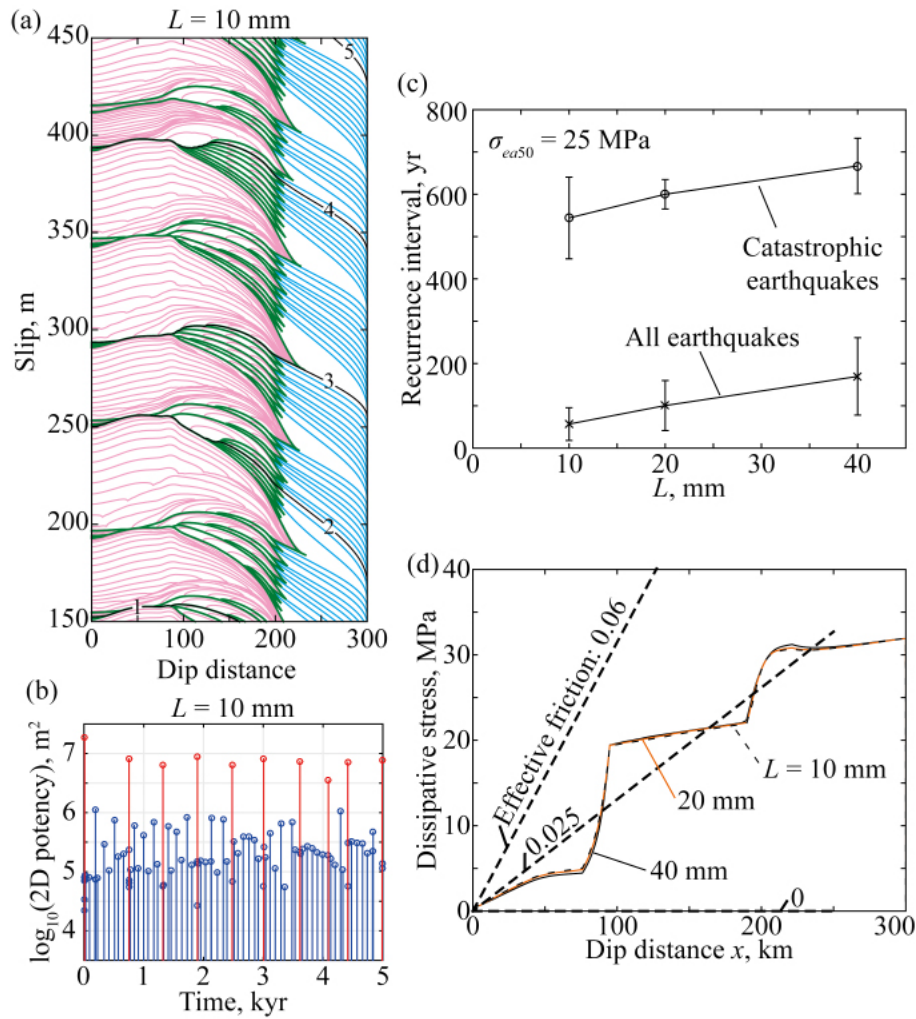


図2. (a) 地震サイクルシミュレーションの結果。累積変位量を一定の時間間隔でプロットしている。浅部（横軸 100 km 程度まで）には JFAST 試料、深部（横軸 100 km から 200 km 程度まで）には藍閃石片岩試料のそれぞれの摩擦特性を用い、浅部は摩擦発熱による間隙圧上昇の影響を組み込んでいる。黒：1000 年毎、青：50 年毎、ピンク：地震時 10 秒毎、緑：地震の初めと終わりのスナップショット。(b) (a) に示したケースの M-t 図。(c) 摩擦の状態遷移すべり量に関するパラメータスタディの結果による、海溝まで達する巨大地震の再来周期と、深部のみを割る大地震の再来周期。(d) 長時間平均の摩擦発熱量に対応する剪断応力レベル。採用した有効垂直応力分布では、試した範囲の L の値によらず Gao and Wang (2013) の見積もり（有効摩擦係数 0.025）によく一致する（東京大学地震研究所 [課題番号：1503]）。

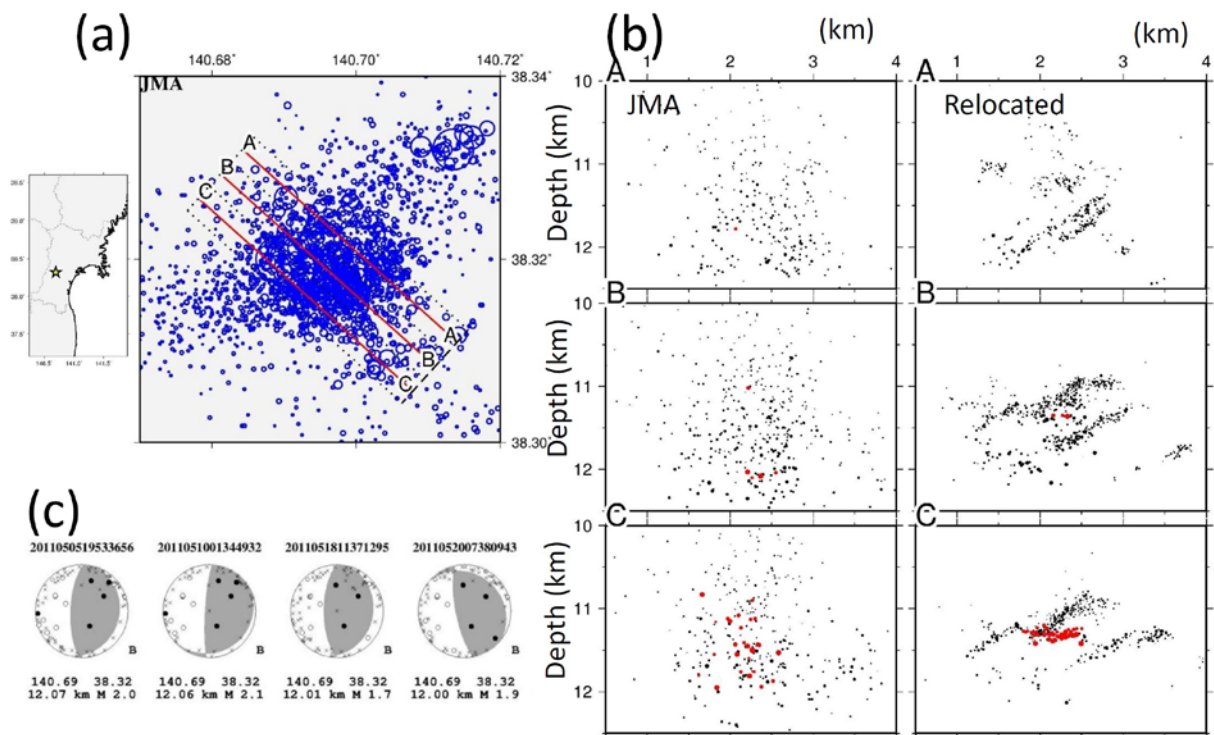


図3. 東北沖地震後に仙台市大倉ダム周辺で誘発されたmigrationする群発地震活動。

(a) 気象庁による震央分布。(b) 図(a)に示したA, B, Cの測線の断面図。気象庁による震源分布(左)と、波形相関およびクロススペクトル法により得られた到達時刻差データにDouble-Difference法を適用して震源再決定を行った結果(右)を示す。(c) 図(b)の赤丸で示した地震のメカニズム解の例。水平に近い節面が断層面と考えられる(東北大学[課題番号:1204])。

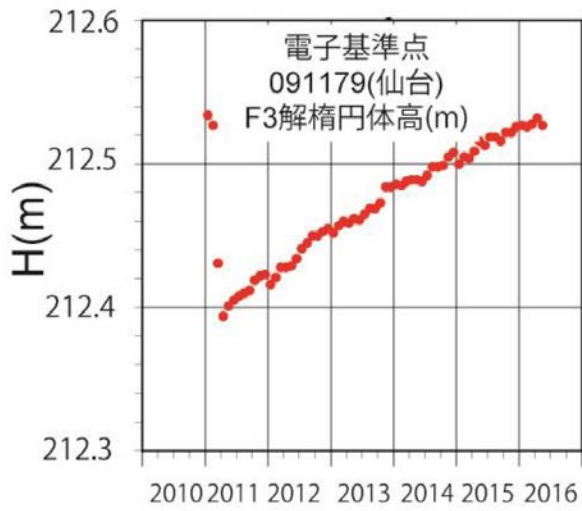
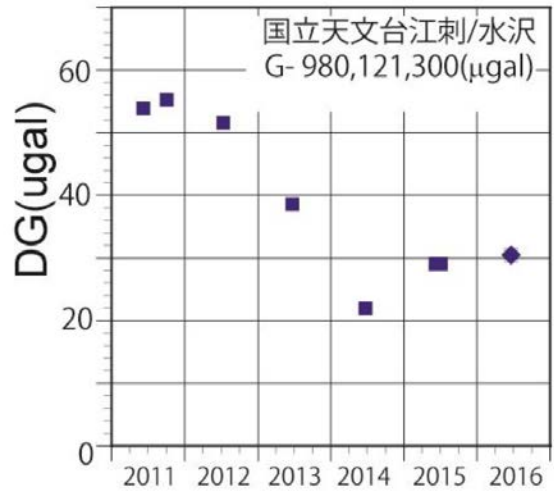
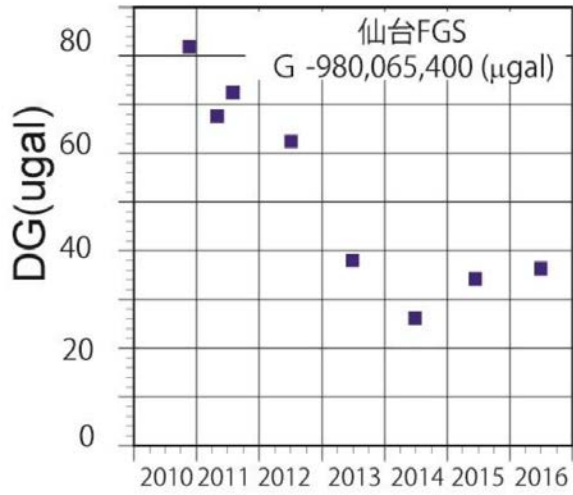


図4. 仙台(左図)と江刺(右図)における, 重力変化(上図)と上下変動(下図)(東北大学[課題番号:1203])。

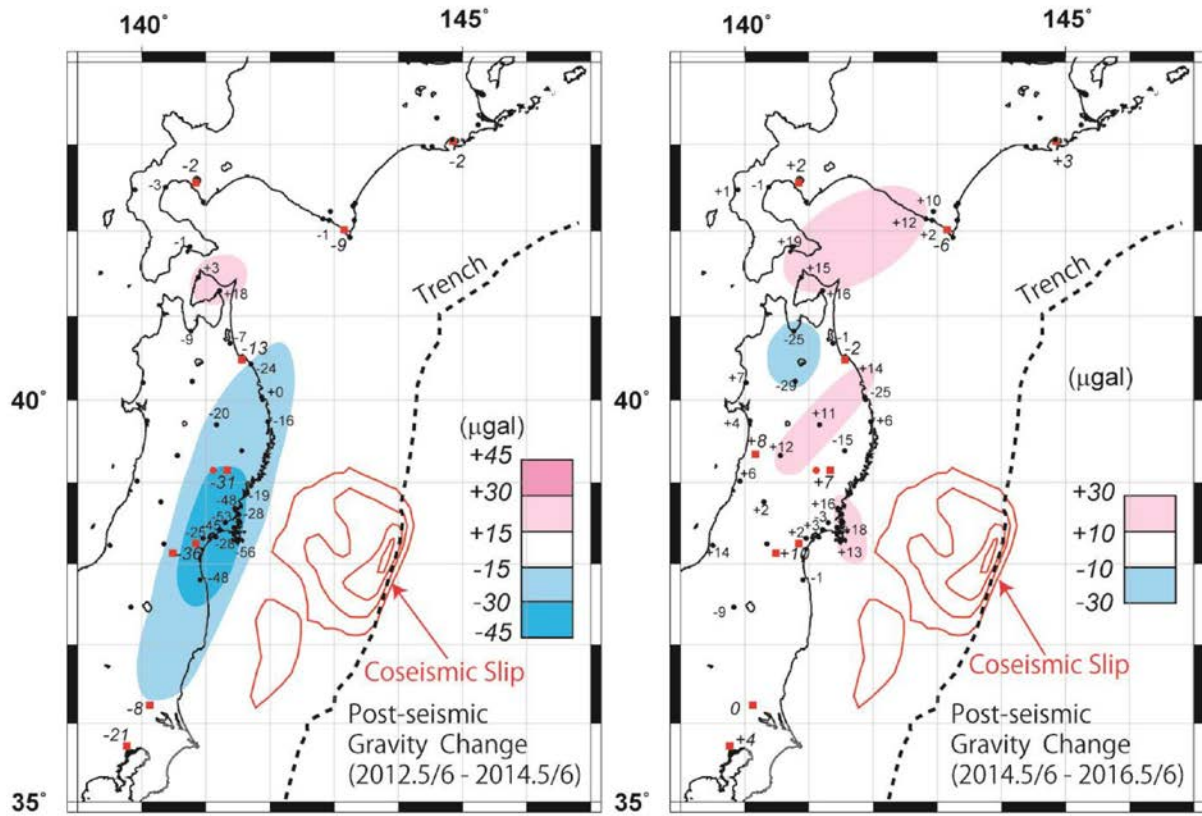


図5. ハイブリッド重力観測によって推定された東日本の重力の時空間変動。

左図：2012～2014年。右図：2014～2016年。図中の■は絶対重力点(10点)，●は相対重力点(約50点)，赤の等値線はIinuma et al. (2012)による東北地方太平洋沖地震時のすべり量(10, 30, 50, 70 m)を表す(東北大学[課題番号: 1203])。

3 (2) 南海トラフ巨大地震総合研究

「南海トラフ巨大地震」総合研究グループリーダー 澁谷拓郎（京都大学防災研究所）

本研究グループは、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」において、海溝型地震部会、データベース・データ流通部会、地震動・津波等の事前予測・即時予測部会、地震・火山災害部会、史料・考古部会、地震先行現象・地震活動評価部会等で行われている南海トラフ巨大地震に関する研究を、部会を横断する形でまとめ、総合的に推進することを目的とする。さらに、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間での連携共同研究における参加者募集型研究として実施される「巨大地震のリスク評価の精度向上に関する新パラダイムの構築」による南海トラフ巨大地震のリスク評価についての研究とも連携を図って、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」による南海トラフ巨大地震の現象解明、発生予測、災害誘因予測を目指した研究と拠点関連共同研究のリスク評価の研究との橋渡しを模索することも本研究グループの目的である。

本研究グループでは、南海トラフ巨大地震の災害軽減に資する研究のスキームとして、地震の発生、地震波の伝播という事象の時間経過およびそれらに伴う情報の伝達の方向性に従い、「震源・地震像」、「地殻構造・波動伝播」、「強震動・津波予測」、「地盤構造・地すべり」、「被害予測（建築物・構造物）」、「リスク評価」という研究項目が並び、これらを「基盤観測・データ流通・データベース・モニタリング」が支え、各研究項目から情報が社会に向かって発信されるという構図を考え、南海トラフ巨大地震に関連する研究課題の成果をまとめた。

1. 平成 28 年度の研究成果の概要

平成 28 年度の「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」における研究課題のうち、南海トラフ巨大地震に関する研究であることが自己申告されたもの、および研究成果報告からそう判断されるものは、61 課題であった。部会別には、「海溝型地震」が 20 課題、「データベース・データ流通」が 19 課題、「地震動・津波等の事前予測・即時予測」が 7 課題、「史料・考古」が 5 課題、「地震・火山災害」が 4 課題、「地震先行現象・地震活動評価」と「内陸地震」が 3 課題ずつであった。さらに、主な成果について、上述のスキームにおける研究項目で整理すると、「震源・地震像」が 30 課題、「地殻構造・波動伝播」が 9 課題、「強震動予測・津波予測」が 6 課題、「地盤構造・地すべり」が 2 課題、「リスク評価」が 1 課題、「基盤観測・データ流通」が 21 課題、「情報発信」が 2 課題であった。

(1) 震源・地震像

ア. プレート境界面の固着状態

海上保安庁〔課題番号：8001〕は、GPS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測から、2011 年東北地方太平洋沖地震の影響を取り除き、海底基準点のアムールプレートに対する移動速度を推定した (Yokota et al., 2015)。国土地理院〔課題番号：6005〕の GEONET による陸域の地殻変動データと合わせて解き、プレート境界のすべり欠損速度の空間分布を求めた (図 1)。南海トラフ巨大地震の想定震源域は、全体的に正のすべり欠損速度をもっていて、固着していることが確認された。昭和の東南海・南海地震の震源域の外側にすべり欠損速度の高い領域が広がっていることが分かった。すべり欠損速度の低い領域は、超低周波地震の分布と整合的であり、近くに海山の沈み込みが見られた (Yokota et al., 2015)。

東京大学地震研究所〔課題番号：1509〕は、プレート境界でのすべり現象のモニタリングからプレート間カップリングの解明を試みている。西南日本に発生するスロー地震の活動様式などをもとに、スロー地震が巨大地震に対して果たす役割を次の 3 つの可能性としてまとめた (Obara and Kato, 2016)。(1) Analog (類似現象)：スロー地震の活動様式が巨大地震と類似し、さらに高頻度で発生することから、巨大地震の

発生様式を理解するためのヒントを与える可能性。(2) Stress meter (応力状態を反映するインジケータ) : スロー地震は周囲の応力変化に敏感であるため、巨大地震震源域における応力蓄積の状況に応じて、スロー地震の活動様式が変化する可能性。(3) Stress transfer (周囲への応力転荷) : スロー地震の発生によってその周囲に応力を転荷することがあるため、隣接した巨大地震震源域における断層破壊を促進する可能性。今後もスロー地震の活動を継続的にモニタリングし、その活動様式や発生原因の解明を進めることにより、巨大地震の発生過程に関する理解の進展にも繋がることを期待される。

海洋研究開発機構〔課題番号：4002〕は、海底掘削孔C0010の孔内計測装置をDONETへ接続したリアルタイム計測により、三重県南東沖の地震(2016年4月1日、Mw6.0)に伴い発生したゆっくりすべりに対応した孔内間隙水圧の変動を観測した。またこのゆっくりすべりが周辺で発生した超低周波地震の活動を伴うことを示した。

イ. 歴史地震の地震像

歴史地震の地震像を探る研究では、東京大学地震研究所〔課題番号：1513〕が明応東海地震について、名古屋大学〔課題番号：1701〕、京都大学防災研究所〔課題番号：1901〕、東京大学史料編纂所〔課題番号：2601〕が安政東海地震または安政南海地震について、古文書の調査を行った。産業技術総合研究所〔課題番号：5004〕は、富士川河口断層帯のボーリング資料解析から過去3000年に5回の浸水イベントが起こったことを明らかにした。

(2) 地殻構造・波動伝播

ア. プレート形状・構造

名古屋大学〔課題番号：1703〕は、稠密地震観測記録で捉えた深発地震の地震波に地震波干渉法を適用して、静岡県東部地域のプレートの上部境界および地殻内の構造のイメージングを行った。プレート上面と考えられる構造境界および地殻内の地質境界(付加体内部の砂岩・泥岩相と海洋性地殻物質の境界)と見られる構造境界を検出することができた。

京都大学防災研究所〔課題番号：1904〕は、紀伊半島において2004年3月から2013年3月まで延べ6測線において行われたリニアアレイ観測の未読み取りであった33か月分のデータを追加してトモグラフィの再解析を行った。スラブ上面の深さ30~40 kmあたりの深部低周波イベントの発生域と同じ深さの海洋地殻でP波速度(V_p)とS波速度(V_s)の低速度異常域($\delta V < -5\%$, $V_p/V_s > 1.8$)がとても良い一致を示した(図2)。これは、深部低周波イベントの発生域付近の海洋地殻内で含水鉱物の脱水分解が進み、流体が放出されていることを示す証拠と考えられる(澁谷・平原, 2016)。

(3) 地盤構造・地すべり

ア. 京都盆地モデルの検証

京都大学防災研究所〔課題番号：1911〕は、近地地震のP波部分のRadial成分とVertical成分によるレシーバ関数(R/Vレシーバ関数)を用いて、京都盆地の堆積層の速度構造モデルの検証を行った。京都盆地内外の強震・震度観測点におけるR/Vレシーバ関数から盆地基盤上面と堆積層の境界におけるPS変換波と直達P波の走時差(観測PS-P走時差)を読み取り、京都盆地速度構造モデルによるPS-P走時差と比較すると、多くの観測点ではよい対応を示したが、盆地端部に位置するいくつかの観測点では両者の比が大きく、モデルの修正が必要であることがわかった(下村・他, 2016)。

イ. 地すべり発生ポテンシャル評価

京都大学防災研究所〔課題番号：1912〕は、西南日本の海溝型地震による既往斜面崩壊分布を文献調査

し、現地調査を開始した。西南日本外帯の付加体の堆積岩と変成岩の大規模崩壊には地質・地形的タイプがあることの見通しが得られた。昨年度末にインストールした新しい加速度・傾斜センサーによって2016年4月1日11時39分に三重県の南東沖で発生したマグニチュード6.5の地震について、基盤から移動土塊、地表面に至る地震動の増幅過程を明らかにすることに成功した。

(4) リスク評価

ア. 地域社会の脆弱性測定

名古屋大学〔課題番号：1704〕は、脆弱性の指標として、「土地利用」、「災害対策」、「社会的凝集性」、「防災意識・災害文化」を挙げ、名古屋市港区の異なる指標をもつ複数の地域において、防災活動と危険度認知との相関関係を調査した。戦前に開発され、社会的凝集性が高く、伊勢湾台風の経験者が多い地域では、防災活動が危険度認知を向上させる可能性があるのに対し、高度成長期に開発され、社会的凝集性が低く、伊勢湾台風の経験者が少ない地域では、防災活動が危険度認知に結び付かない懸念があるという結果が得られた。

2. 研究集会

本研究グループの2回目の研究集会を平成28年5月30日に京都大学宇治キャンパスにおいて開催した。南海トラフ巨大地震のもっともらしい地震像と発生予測をテーマとし、以下に示す5件の話題提供を受けた。「海底地殻変動観測による南海トラフ巨大地震の固着域の推定」（海上保安庁〔課題番号：8001〕）、「南海トラフ巨大地震のシミュレーション」（海洋研究開発機構〔課題番号：4002〕）、「スロー地震と巨大地震の相互作用」（防災科学技術研究所〔課題番号：3002〕）, および「海溝軸近傍での海底地殻変動観測」東北大学〔課題番号：1210〕）、「DONETによるモニタリングの現状と展望」（防災科学技術研究所〔課題番号：3004〕）。また、拠点間連携共同研究の南海トラフ巨大地震のリスク評価に関する研究からも2件の話題提供を受けた。

総合討論では、「もっともらしい地震像が必要か?」という問題提起から始まり、「もっともらしい地震像は、出口に近いところには関係ない?」、「命を守るための情報には、最悪のシナリオが必要である」、「何のための情報かによって、用意すべきシナリオは変わる」、「シナリオの確率密度分布を作れないか」というような議論がなされた。

これまでの課題と今後の展望

平成27年5月に開催した本研究グループの1回目の研究集会において、本研究のスキームでの各研究項目が、それぞれの上流と下流でなされている研究や必要とされるアウトプットを認識することの重要性が共有された。上述の第2回研究集会においても研究項目間のコミュニケーションの必要性が再確認された。総合討論での「もっともらしい地震像が必要か?」という議論は、出口に近いところで情報発信の研究をしている拠点間連携共同研究の研究者と入り口付近で震源・地震像を研究している研究者のコミュニケーションの一端である。このような議論が研究項目間で活発に行われることが望まれる。

成果リスト

- Yokota, Y., T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro, and A. Asada, 2016, Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone, *Nature*, doi:10.1038/nature17632.
- Obara, K. and A. Kato, 2016, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, *Science*, 353 (6296), 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512.

- Suzuki, K., M. Nakano, N. Takahashi, T. Hori, S. Kamiya, E. Araki, R. Nakata, and Y. Kaneda, 2016, Synchronous changes in the seismicity rate and ocean-bottom hydrostatic pressures along the Nankai trough: A possible slow slip event detected by the Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis (DONET), *Tectonophysics*, 680, 90-98.
- 西山昭仁・原田智也, 2016, 明応七年(1498)の畿内における地震記録の検討, 2016年前近代歴史地震史料研究会講演要旨集, 6-7.
- 都築充雄, 倉田和己, 平井敬, 2016, 安政東海地震(1854)における愛知県の寺院被害状況の整理(その1) 目的と碧南市における事例, 日本建築学会大会(福岡大学, 福岡市), 2016年8月.
- 佐藤孝之, 2016, 安政大地震の「地震ゆり状」をめぐって, *近世史叢*, 8, 65-73.
- 澁谷拓郎・平原和朗, 2016, 地震波走時トモグラフィから推定された紀伊半島下のスラブ起源流体の特徴, 日本地震学会2016年秋季大会(名古屋国際会議場, 名古屋市), S06-12, 2016年10月.
- 下村智也・浅野公之・岩田知孝, 2016, レシーバ関数を用いた京都盆地の地震基盤深度之推定, 日本地震学会2016年秋季大会(名古屋国際会議場, 名古屋市), S16-P12, 2016年10月.

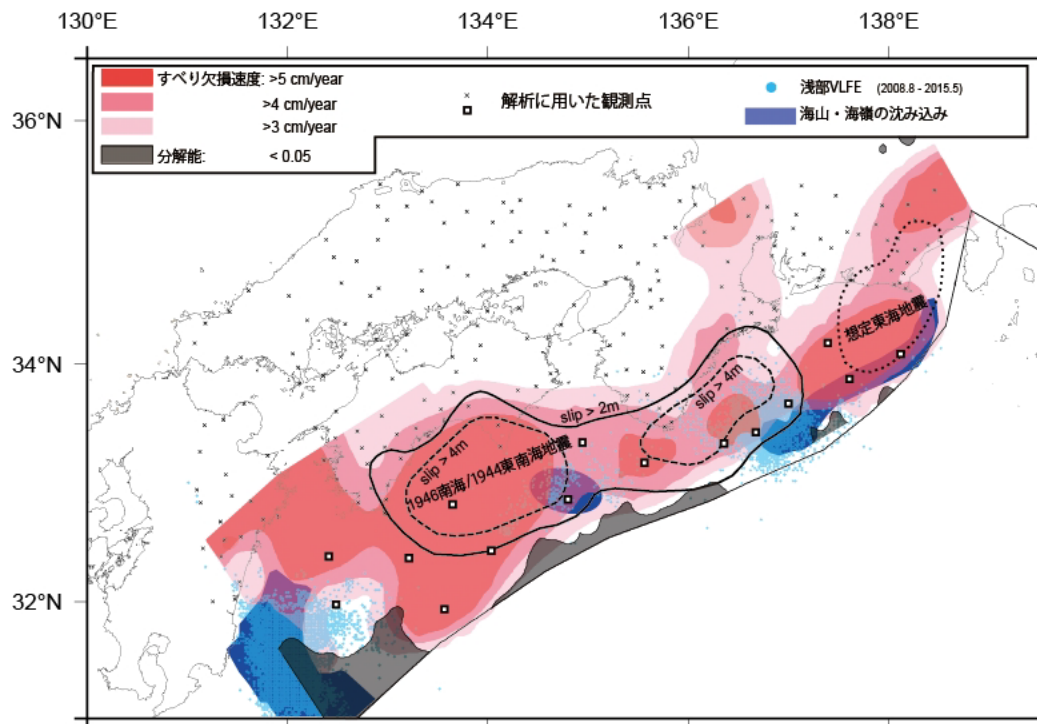


図1. 陸上及び海底の地殻変動データから推定されたプレート境界のすべり欠損分布 (海上保安庁 [課題番号 : 8001])

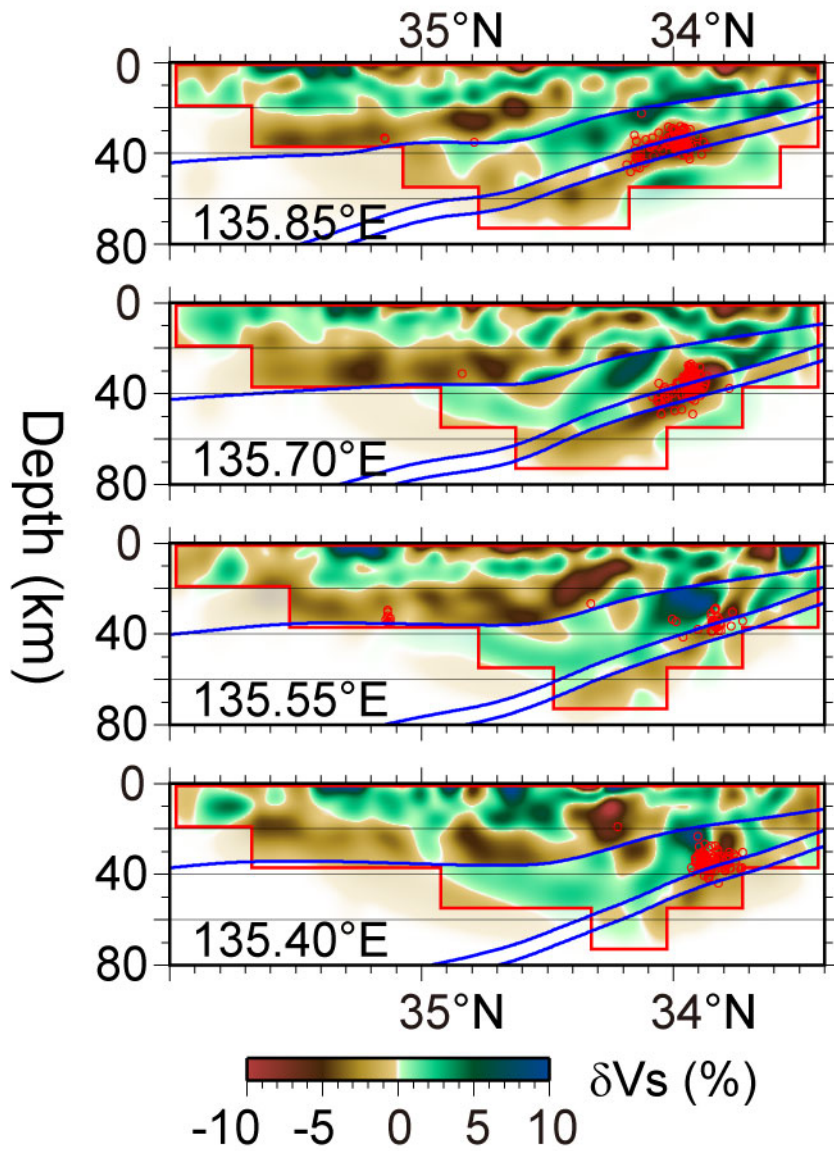


図2. 紀伊半島～近畿地方北部の南北断面におけるS波速度の初期モデル（水平成層構造）からのずれ（京都大学防災研究所〔課題番号：1904〕）

3 (3) 首都直下地震総合研究

「首都直下地震」総合研究グループリーダー 酒井慎一（東京大学地震研究所）

1. はじめに

首都直下地震については「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）」の中で、災害科学の発展に着実に貢献できることや、発生した場合の社会への影響の甚大さを考慮して、総合的な研究として優先して推進するとされている。そのため、首都直下地震を対象とした研究課題は、地震・火山現象の解明のための研究、地震・火山噴火の予測のための研究、地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究の3分野にまたがって広く存在している。これらの幅広い研究の成果を統合し、社会的にも重要である首都直下型地震による災害の軽減につなげることが本総合研究グループの目標である。

2. 平成28年度の成果概要

首都直下地震の解明のための研究、首都直下地震の予測のための研究、首都直下地震の災害誘因予測のための研究に必要な基盤となる観測網の維持・拡充を進め、データを継続的に取得すると共に、膨大なデータを効率的に流通させるためのシステムを構築してきた（東大地震研 [課題番号:1518]、国土地理院 [課題番号:6005, 6006, 6012]、気象庁 [課題番号:7012, 7014, 7020]、海上保安庁 [課題番号:8001, 8002, 8004]）。

首都直下地震は、関東地方の平野部に存在する活断層で発生するもの、沈み込むプレートの境界部分で発生するもの、沈み込むプレート内で発生するものが考えられている。プレート境界部分で発生する地震に関しては、観測された地震活動や地殻変動を詳細に検討することによって、プレート間の固着状態をモニタリングしようとする試みがなされている。千葉・茨城県内の太平洋沿岸で行われているGNSS連続観測では、今年度は新たなスロースリップイベント（SSE）による地殻変動は見られなかったが、SSE発生域で地震活動及び相似地震活動がいくつか見られ、小規模なSSEが生じた可能性を示している。これまでと同様に活動が推移するならば、このSSEが終了した後1年程度地震活動の低調な時期が続く、その後次に次のSSEが発生すると考えられる（東大地震研 [課題番号:1509]）。

過去に発生した房総SSEのメカニズムの理解に向けて、GNSSデータから推定されたSSE発生時のすべりや応力の時空間発展を速度・状態依存摩擦構成則に基づいてモデル化した。今年度は1996年のSSEを対象とした。昨年度までに報告したGNSSデータのインバージョン解析により、SSE発生時のすべり速度とすべりの時空間変化が推定されている。そのすべりの推定結果に基づきプレート境界面上における応力の時空間変化を計算した。次に、すべり速度をインバージョン解析からの推定値に固定し、摩擦構成則の式を数値的に計算し、インバージョン解析から求められた応力の時空間変化を再現できるように摩擦パラメータ等を推定した。応力の時空間変化は速度・状態依存摩擦構成則で良く説明でき、推定されたパラメータからSSE発生域における臨界断層長（半径）は30～50km程度と見積もられた。インバージョンから推定されたSSEのすべり域の半径は臨界半径と同程度かそれよりもやや小さい。これはSSEの発生が条件付安定の摩擦特性に支配されていることを示唆する（東大地震研 [課題番号:1509]）。

災害誘因予測のための研究として、将来発生が予想されている首都直下地震による強震動や長周期地震動の事前予測の高度化を図った。航空レーザー計測データを活用したハザードマップ作成手法について、甚大な被害を引き起こす降下火砕物についての試案をとりまとめた。関東地方南西部の降下火砕物には1923年関東地震などによって流動的崩壊が多数発生したことがわかった（京大防災研 [課題番号:1912]）。関東平野に広がる首都圏での地震動予測を高度化するため、複数の地方都市（新潟市、甲府市、仙台市）において、地理情報システムと都市デジタル情報を導入した。そこで得られるシミュレーション結果を防災・減災に結び付けるため、自治

体への提供等の展開を検討している（東大地震研 [課題番号：2977]）。

歴史資料や地質情報等に基づくことで、地震計による観測以前の時代に発生した地震災害に関して検討し、現代とは異なる社会状況の下で発生した災害の対応から、今後の防災・減災施策や復興計画などの検討に資する材料を提示することができる。房総半島南部千倉低地の海岸段丘について、ボーリングコア試料の解析から離水年代の再検討を行った結果、従来知られていた年代よりも全体的に新しくなり、その形成時期の間隔が非常にばらつくことが明らかになった（産総研 [課題番号：5004]）。

3. これまでの課題と今後の展望

首都直下地震はその地震像が統一されていないが、プレート境界部分で発生する地震に関しては、地震活動や地殻変動を詳細に観察することによって、プレート間の固着をモニターしようとする試みがなされてきた。房総半島沖 SSE は、東北地方太平洋沖地震の発生以降、その間隔に乱れが生じ、今後の地震発生サイクルを考える上で重要な問題が指摘された。ただ、首都直下地震として想定される震源域は、房総半島沖だけではない。首都圏の他の地域で発生する地震についても研究を進め、地震像を明確にする必要がある。首都直下地震の実像が明確でないため、それによる災害やその被害の軽減という視点の研究課題が足りていない。首都圏は丘陵地帯を切り拓いて作った造成地に多くの住居があり、そのような地域での増幅特性には、大きな問題をはらんでいる。例えば、谷埋め盛土では、新旧の地形図判読、既存ボーリングデータ、現地踏査等を総合的に解析することによって、特定の周波数帯における上下動の顕著な増幅がみられた。これは、盛土内の地下水面や旧河川の沖積層底部といった不連続面における変換波が原因として考えられている。ただ、首都圏は丘陵地帯だけでなく、河川沿いの低地や海岸近傍の埋め立て地など、堆積層が厚い地域が広がっていて、強固な地盤はほとんど存在しない。様々な地盤構造をもつ関東平野において、地震動がどのような挙動を示し、地表の被害にどの程度の影響を与えるのか、さらに研究を進める必要がある。

一方、首都圏は、政治・経済の中心地として、江戸時代から400年以上の歴史があるため、地震災害に関する史料が数多く残されている。それらを検討し、現代とは異なる社会状況の下で発生した災害の対応から、今後の防災・減災施策や復興計画などの検討に資する材料を提示することができる。歴史資料や地質情報に基づく地震災害の研究は、地震計による地震観測が始まる以前の地震活動を知ることができ、地震発生サイクルを考える際の重要な情報になりうるため、今後も研究の進展が期待される。

いくつかの課題で部分的に進展がみられるが、総合研究としての進捗は不十分である。首都圏という人口の密集地・経済の中心地での大地震が、どんな複合的な被害を引き起こすのか、首都圏が被災するということが、どのように日本全体に影響するのかといった視点での課題もスコープに入れるべきであろう。具体的には「首都直下地震の地震像を解明する研究」「首都直下地震を予測するための研究」「首都直下地震による災害誘因の予測のための研究」を統合・推進することを研究戦略として掲げ、その中で、これまでに成果を上げつつある課題を進展させると共に、不十分な研究分野を拡充する課題を提案し、理学だけでなく様々な研究分野を総合的に推進させるような体制づくりが必要であろう。

成果リスト

千木良雅弘, 古木宏和, 笠間友博, 鈴木毅彦, 2016. 震生湖をつくった地すべりは神奈川から東京に広く分布する東京軽石層内にすべり面をもっていた 日本地球惑星科学連合大会2016, 幕張.

3 (4) 桜島火山噴火総合研究

「桜島火山噴火」総合研究グループリーダー 井口正人（京都大学防災研究所）

桜島噴火総合研究グループは、桜島火山におけるマグマ活動発展過程の研究を中核として、ミュオンなどの新手法を適用しつつ、火山現象を解明し、低頻度大規模現象の再考も含めた事象分岐論理の構築と火山灰拡散予測研究を行うことにより最終的に火山災害軽減研究を推進する。

桜島の昭和火口における噴火活動が活発化した2009年以降、顕著なマグマ貫入が、2009年10月～2010年3月、2011年11月～2012年4月、2015年1月～6月、2015年8月15日と4回起こっている。最後のマグマ貫入イベントは、圧力源の体積変化は200万 m^3 程度と絶対量において少ないが、貫入速度が速く、顕著な火山性地震活動と急速なダイク貫入的な地盤変動を伴った。このイベントについて詳細な解析が行われた。P波初動の着震時を用いた震源決定では決定地震数が少ないので、決定率を向上させるために、振幅を用いて震源を決定するASL法で位置の同定を試みた。決定できた震源はダイクの付近に走向（北東-南西方向）に沿って分布することが明らかとなった（京都大学防災研究所〔課題番号：1908〕）。地盤変動の時間変化を再検討したところ、粘弾性遅延的な特徴が検出でき、ダイクの中心から離れるほど遅延量が大いこと、ダイクの開口方向の方が割れ目の走向方向に比べ遅延が少なく弾性的に応答していることがわかった。これは8月18日以降に始まる緩和過程でもみられる特徴である（京都大学防災研究所〔課題番号：1908〕）。ダイク貫入後の緩和率の減少過程は、干渉SARによる解析によって面的に捉えられている（防災科学技術研究所〔課題番号：3005〕）。桜島の西部に設置されたアクロスによってマグマ貫入イベント発生前後で伝達関数が変化していることが示され、地下構造にも変化があることが検証された（名古屋大学〔課題番号：1705〕）。

一方、2006年に58年ぶりに再開した昭和火口の噴火活動も、2015年7月以降、噴火回数が減少しており、一連の活動の特性をまとめる時期にある。1915年以降、始良カルデラでのマグマの蓄積が進行している状況において、2003年から火山構造性地震の増加と震源域の拡大、桜島島内での地盤の隆起・膨張、2006年の活動直前においては昭和火口周辺での熱活動の活発化という経過を経たのち、2006年の噴火活動再開に至った。2006年と2007年の活動はマグマ水蒸気噴火であったが、2008年にはマグマ性噴火に移行した。2009年のブルカノ式噴火多発初期においては、温泉ガス濃度と火山灰付着水溶性成分における塩素イオンが硫酸イオンに対して相対的に増加し、また、噴出物のガラス中の二酸化ケイ素の組成は低下したことから、玄武岩マグマの関与が指摘され、物質科学的パラメータに大きな変化があった。一連の噴火活動は水蒸気噴火的な特性からマグマ性噴火に移行しており、前駆期における地震・地殻変動から決まる力学的パラメータ、移行期における物質科学的パラメータの変化というスタンダードな経過を示した。その後、貫入量増大期には噴火活動が活発化し、開口火道に特徴的な推移を示した。現行計画における研究は、その推移を連続または高頻度の精密観測で示したことに意義がある。

噴火に伴う噴煙の早期検知と粒子密度の推定を目的とした地上観測を実施した。2016年7月26日の爆発に伴う噴煙をライダー装置により観測した。ライダー装置は、レーザー光を対象物に照射することにより、エアロゾルのような微小な粒子からの後方散乱波を観測する装置であり、これを用いて散乱強度と偏光解消度（散乱粒子の扁平度を示すパラメータで、粒子が球形であれば、偏光解消度は0であるが、扁平になるにつれて偏光解消度は増加する）の時空間分布を調べた。爆発直後の火口上空では極めて高い散乱強度と偏光解消度が得られた。散乱強度は、火口からの距離が離れるにつれ、また、時間が経過するにつれて減少する。散乱強度の減少は、散乱する粒子の濃度の低下を示すので、噴煙の拡散及び火山灰粒子の地上への落下による火山灰粒子濃度の低下がその原因と考えられる。一方、偏光解消度は、爆発直後の火口上空において0.7という極めて高い値が得られた。火山から100km以上離れたライダーにより火山灰を捕捉した先行研究でも偏光解消度は0.4以下

であり、今回得られた値は、ライダー観測による偏光解消度として世界最大の値が得られた（京都大学防災研究所〔課題番号：1913〕）。

1914年噴火級の大規模噴火を可能とするマグマはすでに始良カルデラ下に蓄積されていることは地盤変動観測から示されている。この規模の噴火の広域事前避難について検討した。まず、シミュレーションにより、桜島周辺の大量降灰が予想される地域内の住民が全員車で最適避難した場合、80万人の住民の避難に約50時間を要することがわかった。次に、住民の避難意向に関してアンケート調査を行ったところ、県内の降灰の少ない場所や他県に移動する長距離避難の意向をもつ住民は約20%であること、避難勧告がトリガーとなることなど新たな知見が得られた。そこで、風向、降灰予想地域、避難対象地域と対象者、住民の長距離避難意向の割合を考慮して、広域避難シミュレーションをやりなおし、長距離避難の意向を持つ20%の住民が避難する場合は約5時間を要する結果を得た。分析結果は鹿児島市など自治体の避難計画に活用することが可能である（京都大学防災研究所〔課題番号：1914〕）。

これまでの課題と今後の展望

昭和火口において噴火活動が活発化した2009年以降、4回の顕著なマグマ貫入があったが、2015年8月のダイク貫入は、顕著な地震活動と地盤変動を伴った貫入速度が極めて大きいイベントであったため、噴火警戒レベルは4に引き上げられ、現実的な防災対応として住民の避難まで行われた。このようなダイク貫入が起こりうる条件とマグマの由来は依然として未解決の問題である。その直前のマグマ貫入である2015年1月～6月の火山活動の特性を再検討しておく必要がある。この活動期については、玄武岩質マグマの関与の高まりや桜島南西部のやや深部で発生する火山構造性地震の活発化はすでに指摘されているところであるが、地盤変動の時空間特性を再解析し、2015年8月のダイク貫入に至るまでのマグマの移動について再検討する必要がある。

始良カルデラでの地盤の隆起は依然として続いており、今後、10～20年で1914年噴火時に沈降した地盤は、噴火直前の状態に回復すると予想される。噴火ポテンシャルとしては、すでにVEI5級の噴火の発生が指摘できるので、大規模噴火の直前の変化を捉えることが最も重要である。1914年噴火の前には、南九州における地震活動が活発化したとされており、噴火が近づくにつれ、異常現象が把握される範囲が局在化し、強度を増した。始良カルデラから50km程度の範囲の下部地殻・上部マンツルの深さまでの地震活動の推移の検討や、桜島北東部および南西部における詳細な地盤変動の観測が必要である。

成果リスト

Eliasson, J., Weber, K., Vogel, A., Pálsson, T., Yoshitani, J., Miki, D., 2016, Investigation and separation of turbulent fluctuations in airborne measurements of volcanic ash with optical particle counters, *Jour. Disast. Res.*, 11, 72-84.

Eliasson, J., Yoshitani, J., Miki, D., Weber, K., Bölke C., Scharifi, E., 2016, Measurements of particle distribution and ash fluxes in the plume of Sakurajima volcano with optical particle counter, *Jour. Disast. Res.*, 11, 85-95.

Hickey, J., Gottsmann, J., Nakamichi, H., Iguchi, M., 2016, Thermomechanical controls on magma supply and volcanic deformation: application to Aira caldera, Japan, *Scientific reports*, 6, 32691.

Hotta, K., Iguchi, M., Ohkura, T., Yamamoto, K., 2016, Multiple-pressure-source model for ground inflation during the period of high explosivity at Sakurajima volcano, Japan - Combination analysis of continuous GNSS, tilt and strain data -, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 310, 12-25.

Hotta, K., Iguchi, M., Tameguri, T., 2016, Rapid dike intrusion into Sakurajima volcano on August

- 15, 2015, as detected by multi-parameter ground deformation observations, *Earth Planets Space*, 68, DOI 10.1186/s40623-016-0450-0.
- Iguchi, M., 2016, Method for real-time evaluation of discharge rate of volcanic ash - case study on intermittent eruptions at the Sakurajima volcano, Japan -, *Jour. Disast. Res.*, 11, 4-14.
- 風間卓仁・栗原剛志・山本圭吾・井口正人・福田洋一, 2016, 2015年8月15日桜島膨張イベント時にCG-3M重力計で観測された相対重力および傾斜の連続的な時間変化, *火山*, 61, 593-604.
- Kazahaya, R., Shinohara, H., Mori, T., Iguchi, M., Yokoo, A., 2016, Pre-eruptive inflation caused by gas accumulation: Insight from detailed gas flux variation at Sakurajima volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 11, 219-11, 225.
- Maki, M., Iguchi, M., Maesaka, T., Miwa, T., Tanada, T., Kozono, T., Momotani, T., Yamaji, A., Kakimoto, I., 2016, Preliminary results of weather radar observations of Sakurajima volcanic smoke, *Jour. Disast. Res.*, 11, 15-30.
- 松本亜希子・中川光弘・井口正人, 2016, 火山灰中の本質ガラスの石基組織からみる桜島火山 2012年7月24日南岳山頂火口噴火—特にマイクロライトの特徴について—, *火山*, 61, 545-562.
- Nishimura, T., Iguchi, M., Hendrasto, M., Aoyama, H., Yamada, T., Ripepe, M., Genco, R., 2016, Magnitude-frequency distribution of volcanic explosion earthquakes *Earth, Planets and Space*, 68:125, DOI 10.1186/s40623-016-0505-2.
- Oishi, S., Iida, M., Muranishi, M., Ogawa, M., Hapsari, R. I., Iguchi, M., 2016, Mechanism of volcanic tephra falling detected by X-band multi-parameter radar, *Jour. Disast. Res.*, 11, 43-52.
- Tanaka, H. L., Iguchi, M., Nakada, S., 2016, Numerical simulations of volcanic ash plume dispersal from Kelud volcano in Indonesia on February 13, 2014, *Jour. Disast. Res.*, 11, 31-42.
- Tsutsui, T., Iguchi, M., Tameguri, T., Nakamichi, H., 2016, Structural evolution beneath Sakurajima Volcano, Japan, revealed through rounds of controlled seismic experiments, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 315, 1-14.

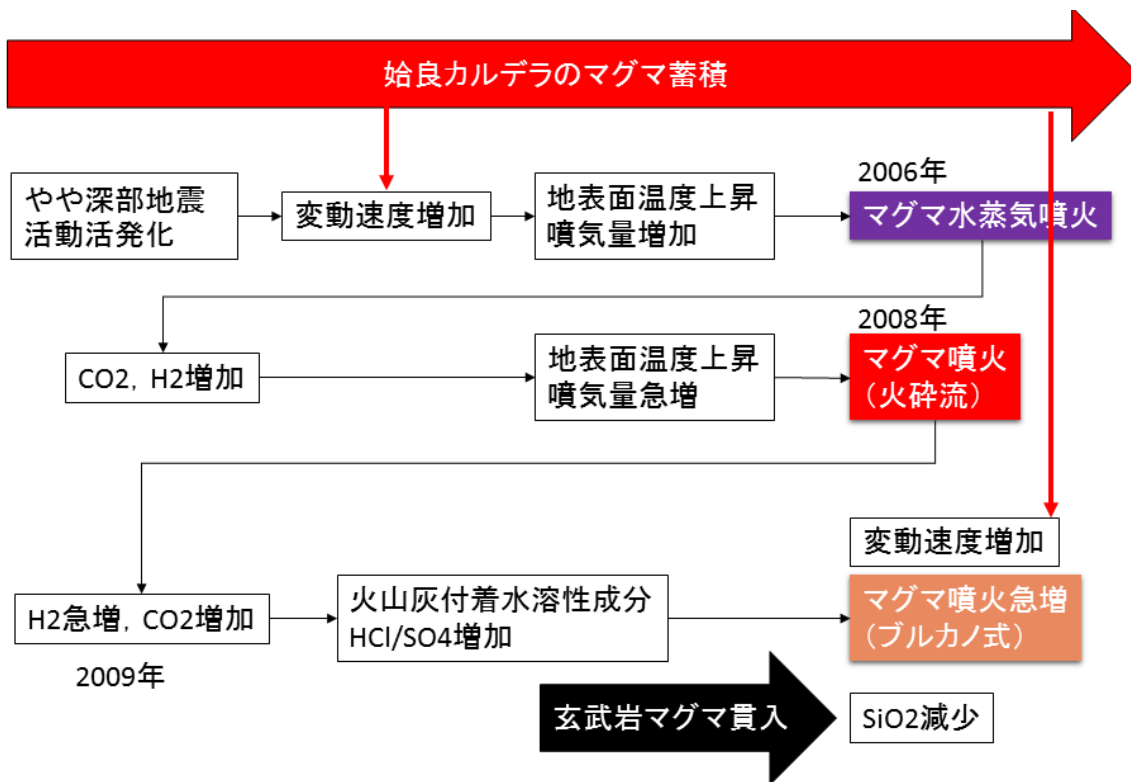


図1. 桜島昭和火口噴火活動期における事象推移

4 拠点間連携共同研究

東大地震研・京大防災研拠点間連携共同研究委員会 委員長 川瀬 博（京都大学防災研究所）
副委員長 森田裕一（東京大学地震研究所）

これまでの地震・火山観測研究計画では、地震や火山噴火の発生の予測を最大の目標とし、それにより地震や火山噴火による災害の軽減を目指してきた。しかし、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の発生により多くの犠牲者が出たことを踏まえ、地震や火山噴火の科学的な予測が極めて困難であっても、現在の地震学や火山学には災害軽減に役立てられる多くの知見が集積されていることから、平成26年度から開始された「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」（建議）において大きく方針を変更した。即ち、地震や火山噴火の発生予測の実現を重点とした方針から、それらの予測を目指す研究を継続しつつも、地震・火山噴火災害をもたらす誘因の予測研究も組織的・体系的に進める方針に転換した。そのため、地震学や火山学を中核としつつも、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの分野の研究者が参加して、協働して推進することになった。

これまでの建議に基づく観測研究計画では、自然現象である地震発生や火山噴火現象の理解に基づきそれらの科学的な予測を目指すという考え方から、「地震・火山科学の共同利用・共同研究拠点」である東京大学地震研究所が中核となって計画を推進してきた。しかし、災害や防災に関連する研究者と協働して計画を推進するためには、東京大学地震研究所と「自然災害に関する総合防災学の共同利用・共同研究拠点」である京都大学防災研究所とが連携して、計画を進めることが有効であるとの結論に至り、両研究所が協働し、それぞれの分野の共同利用・共同研究拠点として、連携して共同研究を進めることとなった。具体的には、両拠点の研究者が中核となって、建議に沿ったテーマを決めて具体的な研究計画を立て、全国の研究者の参画を募集して全国規模の共同研究を進める「参加者募集型研究」と両拠点がそれぞれ関連が深い地震火山研究コミュニティと自然災害研究コミュニティの2つの学術コミュニティに呼びかけ建議の主旨を踏まえたボトムアップ研究を公募する「課題募集型研究」を平成26年度から開始した。

1. 参加者募集型研究

参加者募集型研究については、主として両研究所の中堅研究者からなるワーキンググループで議論し、南海トラフで発生が懸念される巨大地震のリスク評価の精度向上を目指した色々な分野の研究を推し進めることに決め、平成26年10月6日～7日に地震研究所で研究集会「地震・火山科学と総合防災学の両共同研究拠点主催シンポジウム 南海トラフ巨大地震の災害リスク評価 ―社会の影響から地震発生まで振り返り、評価の不確実性と影響評価について考える―」を開催した。そこでは、巨大地震の震源過程、震源から居住地域までの深部地下（地殻）構造・波動伝播、強震動、浅部地下構造、津波、構造物等の特性をそれぞれの分野の専門家が議論して、それぞれの部分の想定や評価における精度や不確かさを議論するとともに、それらがどのように関連し、最終的な被害につながるかの科学的なリスク評価方法の確立を目指すことを確認した。さらに、リスク評価に基づき、事前の災害情報、災害発生後の対応等のあり方など、巨大災害の発生から災害発生後の対応まで、巨大地震に伴い予測される一連の事象に関して、防災・減災に向けて機能するための研究を発展させることを目指すことになった。全体の研究を、(1) 想定される南海トラフ地震の震源過程、(2) 深部地下（地殻）構造とそれが波動伝播に及ぼす影響、(3) 強震動予測手法の高度化、(4) 浅部地下構造が地震動に及ぼす影響、(5) 津波予測モデルと津波被害予測手法、(6) 構造物の被害予測手法の高度化、(7) 災害のリスク評価と意思決定、(8) 災害情報の外部発信とステークホルダの関与、(9) コンピュータシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発、の9分野に分け、それぞれの分野で研究を深化するとともに、各分野の相互連携を図

ることを目指した。

平成27年度は、上記9分野のうち、(7)災害リスク評価と意思決定および(9)コンピュータシミュレーションを用いた新たな地震リスク評価手法の開発を重点項目とし、それぞれの分野の全国の研究者と協力して研究を進めるとともに、それ以外の分野については総括研究として推進し、定期的に情報交換およびリスク評価手法の構築に努めることとなった。

平成28年度は、前述の2分野に加え、(4)浅部地下構造が地震動に及ぼす影響および(6)構造物の被害予測手法の高度化も重点項目とし、4つの分野について全国の研究者と協力して研究を進めるとともに、総括研究を推進することとなった。

(1) 総括研究

総括研究（拠点間連携研究〔課題番号：2975〕）は「巨大地震のリスク評価の精度向上に関する新パラダイムの構築」と題し、平成27年度に引き続き、(1)震源過程、(2)伝播・深部地盤構造、(3)強震動予測、(4)浅部地盤構造、(5)構造物被害予測、(6)リスク評価の研究グループに分かれ、それぞれの分野におけるリスク評価の不確かさの要因についての検討を進めるとともに、これらの知見を統合するための(7)プラットフォーム構築グループおよび(8)ステークホルダの参画に関する研究グループにおいて、リスク評価およびその不確かさに関する検討を行った。

震源過程グループでは、南海トラフで発生すると考えられる巨大地震の震源モデルを検討するにあたり、南海トラフにおける最新の研究成果について情報収集し議論を行った。測地学的手法により求めることのできるプレート間のすべり欠損分布と、そこで発生する巨大地震のすべり領域との関係を明らかにすることが、将来発生する巨大地震の考え得る震源像を明らかにするために重要であると認識した。

伝播・深部地盤構造グループでは、これまで実施されてきた地震観測データのトモグラフィ解析や人工震源地震波構造調査で得られた、南海トラフに沿った地震波速度構造についてコンパイル作業を進めた。また、現在進められている地震波減衰構造解析について調査を行い、その構造を用いた減衰量の見積もり計算に関して検討を行った。

強震動予測研究グループでは、今後考慮しなければならない問題点を議論した。その中で、地震動予測式については、地震の規模がM8.3を境に地震動が頭打ちとなる問題について指摘した。この件がプラットフォーム構築グループにおいて取り上げられ、リスク評価結果に与える影響についての研究がなされた。

浅部地盤構造グループでは、これまでに提案されている地盤増幅率について調査を行った。その際、増幅率の評価方法を、観測記録に基づく方法（リファレンスサイトを用いる方法と用いない方法の2種類）および数値解析による方法に分類することとした。観測記録に基づく方法では中小地震のデータが用いられることが多く、また数値解析による方法でも地盤の強非線形性が考慮されることは稀であることが調査から明らかとなった。

構造物被害予測グループでは、木造構造物の経験的な被害関数の現状の研究をレビューし、その経験的被害関数を導くのに用いられている観測データの被害率分布に著しい偏りがあることが、被害関数の信頼性を低くしていることを指摘した。少ないデータに依存した評価の変動を減らすためには最小二乗法よりも最尤法による推定の方が適しているとの指摘を受け、被害関数導出の拘束条件として用いられている観測データを収集して最尤法推定と最小二乗法推定の結果を比較することとなった。

リスク評価グループは損失評価モデルを修正し、建物の直接損失だけでなく、人的被害も同時に考慮するために、棟死亡率関数を導入した。ここに、棟死亡率は損傷度と周辺全壊率の関数として定義される。人的被害を算定するための損傷度（D-LEVEL）の被害区分を導入し、平成27年度に用いた建物被害率とD-LEVELとの関係を分析して、両方の関数を対応させた。また、建物被害率の値の適用方法も上限値と下限値を考慮した従来の

2モデルではなく、一様分布を仮定した方法に修正した。

プラットフォーム構築グループは点での評価から面での評価を行えるようにし、地図上で不確実性の幅を表現する方法について検討を行った。

これらの検討によるリスク分析の結果、損失額の平均値および棟死亡率の平均値（図1左）は、高知県では震源からの距離と地盤増幅特性に特に大きく依存した。また、損失額の不確実性および棟死亡率のばらつき（図1右）は、高知県では高知平野で特に大きく、室戸岬と足摺岬で大きかった。感度解析の結果、損失額、棟死亡率とも、強震動予測式が大きく影響した。

(2) 特定分科研究

特定分科研究（その1）「経時変化を考慮した地震災害リスク評価手法の構築に関する研究」（拠点間連携研究〔課題番号：2976〕）では、地震リスクの暴露人口の変化のみならず、その年齢構成の変化を考慮した地震リスク評価を行うため、社会科学の分野でよく用いられる人口分布の将来予測モデルの1つであるCohort要因モデル（Cohort component model）を用いて、将来の建物の建築年代分布の予測を試みた。地震時の建物倒壊はその建築年代に依存し、建物倒壊に起因する死者・負傷者数を高精度に予測するためには、建物内の年齢構成を把握することが不可欠であるためである。高知県の南国市を対象に検討を行い、国立社会保障・人口問題研究所によるCohort要因モデルを用いた人口分布の将来予測に倣い、2010年から2040年までの南国市の人口分布の将来予測を確認した。その上で、2014年時点の南国市における建物年代分布と人口年齢分布の関係を調べ、この時点での人口年齢分布と建物年代分布が将来にわたって不変であると仮定し、将来の建物年代分布を予測する方法を構築した。その結果得られた予測の例として、予測された2015年と2040年の建物年代と人口年齢の対応を図2に示す。今後は、これらの関係から、将来の建物の面的分布から人口年齢分布を予測した上で、地震リスク評価を行う。

特定分科研究（その2）「巨大地震リスク評価のための都市モデルの構築と高分解能の災害・被害予測の試行」（拠点間連携研究〔課題番号：2977〕）では、過去の地震被害データの相関関係に基づく経験式には精度に限界があることは否めないため、理学・工学・社会科学の各分野で培われた数値解析が適用できるような都市全体の解析モデルを使い、巨大地震がもたらす災害・被害予測を行うことを目的とした。これは、地震動増幅や地震応答の物理過程という因果関係に基づく数値解析が研究開発され、容量・速度が増加する計算機と、多様な都市情報を利用することで、従来不可能であった都市全体の数値解析を、経験式の代替として行うことが現実味を帯びていることを背景に設定したものである。目的の達成のため、平成28年度は、本研究に参加する大学・研究機関で基盤となる統合地震シミュレーション（Integrated Earthquake Simulation, IES）のプログラムの活用を進めた。IESは平成27年度に共有されたプログラムであり、試行運用がされている。利用したのは、連成した地震動増幅と建築物地震応答の解析である。大学・研究機関が位置する都市に対して実際に都市モデルを構築し、多様な地震シナリオを考慮して地震動と建築物の応答を計算し、その結果となる地震動と被害の程度を静止画や動画で表示し、さらに津波避難の解析を行った。東北大学・新潟大学・東京工業大学・山梨大学・神戸大学・香川大学・高知工科大学・九州大学と理化学研究所計算科学研究機構の協力により、仙台・新潟・東京・甲府・神戸・高松・高知・福岡を対象としたIESの活用が行われた。また、兵庫県立大学と連携しながら、兵庫県の複数の都市におけるハザードマップを作成した。明石市・芦屋市・西宮市・尼崎市の4都市においてIESを用いた各建物のモデル化および地震動解析を実施し、内閣府が想定している想定南海地震（陸側）を対象として地震動と建物応答の可視化図を作成した（図3）。一方、高知県・高知市・香川大学と連携しながら、IESへの2次元差分法を使う津波遡上解析による津波シミュレーションの実装を進めた。内閣府が想定している南海トラフ地震に対し、異なる条件にて津波遡上解析を実施し、街区まで遡上する過程を計算した（図4）。

特定分科研究（その3）「巨大地震の災害リスク評価のための震源モデルの構築」（拠点間連携研究〔課題番号：2978〕）では、多様性を反映した南海トラフ地震の震源モデル構築（図5）にあたり、各シナリオの重要構成要素として3～4種類のエキスパート・オピニオンを収集してロジックツリーの分岐を作成した。測地シナリオとして、陸域のGNSSデータまたは海陸両域GNSS・GPS/Aデータから推定されたすべり欠損分布のモデルを収集した。構造シナリオとして、海山地形、分岐断層の詳細位置、およびプレートの地質環境を反映し、震源の応力降下量に寄与すると考えられるスメクタイトの影響に関する研究成果を収集した。地震活動シナリオとして、スロー地震分布、繰り返し地震分布、通常地震活動分布に加え、日向灘浅部微動と周囲の相似地震・大地震破壊域に関する研究成果を収集した。歴史シナリオとして、過去の南海トラフ巨大地震の震度分布、史料に基づく津波高のほか、史料解釈と繰り返しの新しい見方に関する情報を収集した。以上のシナリオを、それぞれ単独あるいは等しく重みづけた場合のシナリオを作成し、南海トラフ地震の震源像を検討した。

特定分科研究（その4）「建造物の被害予測手法の高度化」（拠点間連携研究〔課題番号：2979〕）では、東北地方太平洋沖地震の際の建物被害データとその領域にあった強震観測点での地震動レベルとの関係について、既往の文献を調査し、それを整理した。またその元データを収集し、既往の建造物の非線形応答解析を用いた物理モデルによる被害予測の評価手法を用いて被害率を求め、観測結果と比較した。その結果、内陸地震をターゲットに構築された予測モデルは海溝型地震の短周期成分に富む加速度の大きな波形に対しても敏感に応答し、過大な被害率を与えることがわかった。そこで、モデル構築の際には含まれていなかった高振動数成分をフィルター処理で除去することによって計算被害率を観測被害率に近づけられないか、パラメトリックスタディを行った。その結果、通常考えられる範囲のカットオフ周波数では十分に被害率を低下させることは困難であった（表1）。このことは、短周期成分が多く含まれる波形に対して被害率が過大にならないようにするために、非線形特性の見直しを行う必要があることが示唆された。さらに、2016年熊本地震での被害調査データを収集・整理するとともに、その情報と近傍での観測波形の最大値について取りまとめた。同様に、計算で求める被害率予測モデルを適用し、概ね妥当な結果が得られることを確認した。

2. 課題募集型研究

課題募集型研究では、地震や火山噴火の発生から、それによって引き起こされる災害の発生や推移を総合的に理解し、それを防災・減災に活かすための研究課題を広い視野から募集することとし、以下の分類で公募した。(1)地震・火山噴火の災害事例の研究、(2)地震・火山噴火災害発生機構の解明、(3)地震・火山噴火災害誘因の事前評価手法の高度化、(4)地震・火山噴火災害誘因の即時予測手法の高度化、(5)地震・火山噴火災害軽減のための情報の高度化、(6)地震・火山噴火災害時の災害対応の効率化、(7)実践的人材育成の仕組みに関する研究の7項目である。

平成28年度は、東大地震研・京大防災研拠点間連携共同研究委員会により、11件の新規課題が採択された。

(1) 地震・火山噴火の災害事例の研究

「17世紀以降に形成された歴史津波堆積物の放射性炭素年代推定法の高度化」（拠点間連携研究〔課題番号：2980〕）では、北海道大樹町の生花苗沼と湧洞沼、浜中町の霧多布湿原において歴史津波堆積物の掘削調査を実施し、そのうち歴史時代の堆積物が最も良好に保存されている霧多布湿原の堆積物について重点的に分析した。採取した試料はCT画像の撮像とITRAXを用いた非破壊分析を行い、津波堆積物の認定を試みた。その後、放射性炭素年代測定を行い、津波堆積物の堆積年代を推定した。放射性炭素年代は層序順に連続的に測定し、その層序関係から年代測定結果に制約を設けた。その結果、TS2の堆積年代は19世紀～20世紀前半と推定された。TS1については1950年以降の大気中の¹⁴C濃度のピークを利用することで、1950年代に堆積した可能性が高いことが推定された（図6）。

「詳細地盤構造と活動セグメントの新たな解釈に基づく歴史被害地震の断層モデル構築に関する研究」(拠点間連携研究[課題番号:2985])では、1896年(明治29年)陸羽地震(M7.2)を対象として検討を行った。この地震では、横手盆地断層帯南部付近に位置する現横手市において、震源域から離れているにもかかわらず住家全壊率が10%以上になった地域があり、潰家により死者が出た。現横手市でも人的被害が出た原因は地盤構造による影響も考えられることから、横手盆地断層帯南部で地震が発生した場合はその地盤構造による影響が大きくなることが推測される。このため、本研究では、横手市における活断層と地盤構造の関係を把握するために、常時微動観測を行った。図7左に示すように、秋田県横手市において横手盆地断層帯南部を挟んで東西方向に2つの測線を配置し、観測点は計12地点とした。得られた測線1の常時微動水平上下スペクトル比(MHVR)を図7右に示す。MHVRの特徴から、横手盆地ではY1-3~Y1-4の比較的狭い範囲(幅1~2km)で基盤が深くなる構造が存在していることが推測された。

(2) 地震・火山噴火の災害発生機構の解明

「地震及び津波による建物倒壊に伴う人的被害の発生機構解明並びに評価手法の提案」(拠点間連携研究[課題番号:2964])は、地震動及び津波に伴う災害の内、特に人的被害に焦点を当て、次の3点を目的として検討を行った:(1)現状の人的被害評価式の問題点の洗い出しとあるべき評価式の検討、(2)特に負傷程度評価に災害医療関係で用いられている死傷程度評価尺度(ISS)を導入することで評価内容をより豊かに、被災プロセスを詳細に追跡するモデルを導入することで評価単位をより詳細に、さらに社会動態に基づく本邦の人口基盤変化が災害時に及ぼす影響のシナリオ評価を試みた人的被害の新評価式の構築、(3)提案式を具体的地域において被害評価を行い、新たな問題の提示、である。その結果、(1)既往の人的被害評価式(内閣府中央防災会議の方法)の問題点の洗い出し、(2)ISSを導入した新評価式の提案、(3)社会動態が地震災害に及ぼす将来的影響の評価、が得られた。その検証のために、釧路市(北海道)を事例として詳細検討を行った結果、高齢化による被災者救助支援者の大幅減少が見込まれ、津波に対する避難不能者の増大という新たな問題点が見えてきた。

(3) 地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化

「緊急地震速報を利用した建物地震災害誘因のリアルタイム予測」(拠点間連携研究[課題番号:2981])では、地震発生直後から社会・経済活動の復旧開始に至るまでの時間に、緊急地震速報情報と地震計を設置した建物(ここでは防災拠点建物と称する)の構造モニタリング情報を併用し、建物ごとの被災予測をリアルタイムで正確に情報発信するシステムの開発と実証を目指している。平成28年度は、防災拠点建物周辺の建物群の最大応答推定の高度化に取り組んだ。なお、本研究では、最大応答推定とは地震動収束後に地域の建物群の応答情報を提供することを意味し、その対象は構造モニタリングを行う防災拠点建物の周辺建物群とした。防災拠点建物の観測記録から周辺建物の最大応答を推定する手法を提案し、実際の建物観測記録を用いてその精度を検証した。緊急地震速報情報による応答スペクトルに、防災拠点建物での観測記録を用いた補正をかけることで応答推定の精度を格段に向上できることを確認した(図8)。

「ダム湖に隣接する地すべり土塊の南海トラフ巨大地震に対する危険度評価と斜面の不安定土塊の位置検出法の開発・高度化」(拠点間連携研究[課題番号:2986])では、ダム湖に隣接する斜面に存在する既往の地すべり土塊、あるいは空中写真判読で見落とされている地すべり地、さらに地震あるいは豪雨によって崩壊する可能性のある不安定土塊を検出・抽出することを目的として、詳細数値地形図を用いて、これらの不安定土塊を抽出する方法を開発した。その方法を適用して得られた、風屋ダム湖に隣接する既往地すべり土塊(茶色矢印)と不安定土塊(赤矢印)を図9に示す。開発した手法は、平成28年(2016年)熊本地震にも適用され、立野地区において地震によって生じた斜面上の亀裂や地表に出現した地表断層検出にも有効であることが示

された。

「長周期地震動予測のための深部地盤構造モデル化手法の高度化に関する共同研究」（拠点間連携研究〔課題番号：2988〕）では、足柄平野北西部の南足柄地域をテストサイトとして深部地盤構造を明らかにすることを目的とした共同現地観測を実施した。主として、図10左上に示すように、9地点での地震観測、5地点での微動アレイ観測、57地点での微動単点観測を行った。観測結果の速報として、図10右上にはMAG(L1)と東の2つのアレイ(L3&L4)で観測された位相速度の分散曲線が示されている。周期1秒付近では、位相速度は地点毎の差異が大きいことがわかる。強震観測の結果の速報として、図10下には、MAGである3日間に観測された記録の振幅スペクトルの時間変化を示している。この図には、2017年1月22日に発生したソロモン諸島の遠地地震(Mw7.9)に伴う地震動の記録も認められ、周波数0.1Hz程度まで微小なレベルの記録が解析に使用でき、上記の微動データと合わせて検討することができると考えられる。以上の地震および微動データは、共同研究参加者で共有され、今後、多様な視点から深部地盤構造との関係の検討を各自が実施する。

(4) 地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化

「地震波動伝播シミュレーションのための基盤的コミュニティ・コードの開発」（拠点間連携研究〔課題番号：2984〕）では、これまで開発してきた差分法に基づく並列地震波動シミュレーションで用いられた計算コードをもとに、コミュニティ・コードを開発した。このコミュニティ・コードは「京」コンピュータや地球シミュレータ等のスーパーコンピュータにおいてその計算機性能を最大限に引き出すことのできるものであったが、コード記述内容が各スパコンの計算機構造に特化しており、かつ計算効率を最優先するために多くのパラメタがコード内に埋め込まれるなど汎用性が低くなっていた。このため、数値シミュレーションの専門家でも容易に扱えるよう、抜本的に改修した。また、利用法について詳細に記述した日英両言語のマニュアルを整備した上で、公開リポジトリ(<https://github.com/takuto-maeda/OpenSWPC>)にてオープンソースライセンスの一種であるMITライセンスに基づいてコードを公開し、利用される手法や技術の透明性を担保した。一連の開発により、微細スケールから日本列島スケールまでの様々な環境における地震波数値シミュレーションがきわめて容易に実現できる素地が整った。

(5) 地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化

「東北地方太平洋沿岸の歴史地形の復元・可視化に基づく歴史災害研究」（拠点間連携研究〔課題番号：2982〕）では、現代的な測量で作成された地図や航空写真のみならず、明治時代の地籍図や江戸時代の国絵図・村絵図といった前近代の絵図史料から、現代の開発による改変以前の古地形を復元し、可視化することを目的とした。岩手県釜石市中心地区および宮城県多賀城市周辺地区において地形復元を実施した。両地域を選定したのは、近代の産業振興により海岸線の人工改変が顕著にみられること、また過去の歴史津波についての伝承が残されている場所であることを重視したからである。釜石市は、明治中期以降の製鉄業の振興を発端として製鉄の町として栄えた都市である。陸地測量部作成の「5万分の1地形図」に基づいた復元地形と今日の海岸線を比較すると、港湾施設の発達にともない、海岸や河口が埋め立てられるとともに、甲子川河口の干潟が埋め立てられている様子を把握することができる。これに2011年の東日本大震災の津波浸水範囲を重ねると、これらの人工構造物のほとんどが津波被害を受けていることが確認できる(図11)。

巨大災害の想定情報は、科学的不確実性および不定性を伴いつつも、政府や地方自治体、企業や団体、また住民がその災害被害について見当をつけ、減災に活かされるために提供されている。しかしながら、科学的不確実性および不定性を内包する想定は、行政の被害想定や災害対策などの基礎となっているものの、住民心理への影響、社会的影響については知見が非常に乏しいのが現状である。そのため、「巨大災害想定のコミュニケーション戦略に関する研究」（拠点間連携研究〔課題番号：2983〕）では、巨大災害想定を防災・減災のた

めに有効に活用するために、①現状の市民の受容の様態に関する意識調査を行い、②社会的な影響事例を収集・整理することで、現状としての巨大災害想定への理解のされ方、社会的影響、課題について明らかにし、巨大災害想定への情報提供のあるべき姿、巨大災害想定への防災・減災のための活用策に関する知見を提供するために、首都直下地震、南海トラフ巨大地震、日本海地震、津波を中核に据え、(1)「巨大災害想定」の理解と受容に関する調査、(2)巨大災害想定への社会的インパクトに関する調査の2種類を行うが、本年度は主として(1)を行った。(1)における先行研究のレビュー、ヒアリング、ディスカッションなどから、今後巨大災害想定への受け止め方を分析するにあたり必要な計測項目を抽出した。

富士山周辺の市町村においては、火山防災行政担当者が2～3年で異動し、これらの担当者は異動当初、数日のみの引き継ぎが行われ、基礎的な知識等については、火山防災パンフレットや短時間の講演会を聴講するのみであり、知識の伝達や対策の継続性がしばしば滞ることがある。これまでも研修会や図上訓練などを実施することにより、火山防災担当者のスキルを向上させる試みは数多く行われているが、効果が上がっていない場合も多い。図上訓練の効果を上げるには個々の火山や火山防災特有のさまざまな知識を必要とするが、それらを簡単に提供できる仕組みはない。そこで、「実践的人材育成のための防災担当者研修プログラムに関する研究」(拠点間連携研究〔課題番号:2987〕)では、行政担当者が、継続的に知識を取得し、共通課題を共有し、地元の火山噴火に的確に対応できる人材育成を目指した研修プログラムの構築を試みた。研修プログラムの作成に当たっては、災害の傾向や対応策が火山毎に異なり、対策をより現実を考えるため、研修すべき項目として「火山噴火と災害の基礎的な知識」、実際にあった「噴火対応事例」、現時点で作成されている「噴火に係わる防災計画」、「火山防災情報」を抽出した。これらの座学を定着させるために、図上訓練を取り入れることとした。また、日程については、ヒアリング結果から、個別に開催するよりも火山防災会議協議会等の会議にあわせて半日程度で実施することが望ましいと判断した。上記をもとに、本年度は、山梨県の富士山噴火対策に係る関係者を対象に、富士山火山防災会議協議会山梨県コアグループ会議の開催に合わせて、1月11日の午後に研修プログラムを試行した。

「東日本大震災の実経験からの学びを活かした人材育成プログラムの開発と実践」(拠点間連携研究〔課題番号:2989〕)は、以下の4つのステップについて検討した。ステップ1:国内外において先行している人材育成の仕組みに関する調査・研究、ステップ2:研修コンテンツの検討・人材育成プログラムの開発、ステップ3:研修テキストの作成とトライアル研修の実践、ステップ4:研究の進捗および研究成果の情報発信。神戸まちづくり会館では、神戸防災技術者の会(K-TEC)から神戸で学ぶ防災学習プログラムについて、また、人と防災未来センターでは災害対策専門研修プログラムの概要と発展経緯等について、さらに、神戸新聞では被災地の新聞社の営業局が主導し、阪神淡路大震災から20年を機に発足した「117KOBEぼうさいマスタープロジェクト」について、それぞれヒアリング調査を実施した。これらのヒアリング調査とその分析により、被災地外を対象とした災害伝承ツーリズム、全国の自治体職員を対象とした防災スペシャリスト育成研修、被災地内での若い世代への災害体験の伝承など、多様なアプローチについて理解を深める事ができたと同時に、防災人材育成に対する多様で、かつ高いニーズを確認することができた。また、仙台市や宮城県の防災・危機管理部局や教育委員会等、国土交通省東北地方整備局、防災教育日本連絡会、米国CERTプログラム等との連携を図りながら、防災・危機管理を担う多様な人材育成のための研修コンテンツの検討を行い、枠組みや制度を含めた人材育成プログラムの開発を行った。さらに、東日本大震災の被災市町村の防災行政担当者を主な対象としたトライアル研修を、2016年12月19日(月)～20日(火)、東北大学災害科学国際研究所と国土交通省東北地方整備局の共同主催、宮城県と仙台市の後援により、災害科学国際研究所2階演習室にて「市町村・インフラ系企業防災関連担当者研修会～3.11からの学び塾～」として開催した。一方、東北大学災害科学国際研究所の防災教育国際協働センターのウェブページを活用し、研究の進捗および研究成果の情報発信を積極的に行った。

これまでの課題と今後の展望

現行計画では、東大地震研と京大防災研の両拠点の研究者が中核となって、建議に沿ったテーマを決めて具体的な研究計画を立て、全国の研究者の参画を募集して全国規模の共同研究を進める「参加者募集型研究」と、両拠点がそれぞれに関連の深い地震火山研究コミュニティと自然災害研究コミュニティの2つの学術コミュニティに呼びかけ、建議の主旨を踏まえたボトムアップ研究を公募する「課題募集型研究」を実施してきた。参加者募集型研究では、南海トラフ巨大地震の地震リスク評価を行う方法とその不確実性についての検討や新たなデータに基づくモデル化などの検討を行ってきた。一方、課題募集型研究では新しい課題を掘り起こし、新しい課題の解決に向けた検討を行ってきた。

今後は、参加者募集型研究で得られた成果を統合して地震リスク評価および不確実性評価を行うことで、不確実性を減らすためにはどの研究分野により多くの投資をすべきかなどの評価を行うとともに、南海トラフ地震総合研究グループなどにより一層の連携を深めて、地震リスク評価手法の高度化を図る必要がある。また、課題募集型研究で提示された課題およびその成果を、災害の軽減に貢献するための地震火山観測計画全体としてどのように活かしていくかを検討する必要がある。

成果リスト

- Lee, S.H, K. Nishijima, S. Matsushima, 2016, Investigation of possibilities to reduce uncertainties of seismic risk evaluation for Nankai Trough earthquakes, 5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, August 15-17, 2016.
- Lee, S.H., K. Nishijima, S. Matsushima, M. Miyazawa, K. Mochizuki, T. Iidaka, K. Ueda, H. Kawase, N. Maki, 2017, Issues and Challenges in Seismic Risk Evaluation and its Uncertainty Reduction for Nankai Trough Earthquake, 京都大学防災研究所 平成28年度研究発表講演会 特別セッション.
- 縣亮一郎・市村強・兵藤守・堀高峰・平原和朗・堀宗朗, 2016, 震源断層の想定高度化に関する基礎研究—高詳細な三次元地殻構造モデルを用いた地殻変形解析手法の開発—, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) .
- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Madgededara Lalith Lakshman・田中聖三, 2016, 都市の高分解能な地震被害想定の高速度のための基礎的研究, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学) .
- 藤田航平・市村強・堀宗朗・Wijerathne Madgededara Lalith Lakshman・田中聖三, 2016, 多数の地震シナリオに対する高分解能な都市震災想定のためのHPCによる基礎検討, 土木学会論文集A2 (応用力学) .
- 古村孝志, 2016, 昭和南海地震から考える, 次の南海トラフ地震と前後の内陸地震への備え, 日本地震工学会 JAE NEWSLETTER, 5(3), 2.
- Obara, K. and A. Kato, 2016, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes, Science, 353 (6296), 253-257, doi:10.1126/science.aaf1512.
- 原田智也・西山昭仁・佐竹健治・古村孝志, 2016, 明応七年六月十一月(ユリウス暦1498年6月30日)の大地震に関する『九州軍記』の被害記述の検討, 日本地球惑星科学連合2016年大会, SSS31-12.
- Miyake, H., 2016, Long- and short-period characteristics of megathrust source models and ground motions (invited), UK-Japan Disaster Research Workshop: Cascading Risk and Uncertainty Assessment of Earthquake Shaking and Tsunami.
- Guo, Y., K. Koketsu, and H. Miyake, 2016, Propagation mechanism of long-period ground motions for offshore earthquakes along the Nankai Trough: Effects of the accretionary wedge, Bull. Seismol. Soc. Am., 106, 1176-1197, doi:10.1785/0120150315.
- Kawase, H., S. Matsushima, F. Nagashima, Baoyintu, and K. Nakano, 2017, The cause of heavy damage

concentration in downtown Mashiki inferred from observed data and field survey, *Earth, Planet, and Space*, 69:3, DOI :10.1186/s40623-016-0591-1.

- 松島信一・佐藤啓太, 2017, 横手盆地の盆地境界の推定のための地下構造調査, 京都大学防災研究所研究発表講演会, P61.
- Okada S., T. Nakashima, A. Iida, M. Kitahara, 2017, A NEW CAUSALITY MODEL FOR EVALUATING THE PROBABILITY OF HUMAN DAMAGE FROM INJURY TO DEATH IN COLLAPSED BUILDINGS, 16th World, Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2938, pp.1-10, Santiago Chile, January 9th to 13th 2017.
- Iida A., S. Okada, T. Nakashima, M. Kitahara, 2017, Volumetric Loss Estimation for Collapsed Buildings during Earthquakes, 16th World, Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2938, pp.1-11, Santiago Chile, January 9th to 13th 2017.
- 村口紗也・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震災害素因の時間変動性を考慮した宅地供給に関するリスクマネジメントの考え方 —札幌市を事例として—, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 89, 63-66.
- 松本将武・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震破壊シミュレーションによる建物内死者発生推定のための建物ボリュームロス評価法の検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 89, 83-86.
- 松本将武・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震破壊シミュレーションによる建物内死者発生推定のための建物ボリュームロス評価法の検討, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 村口紗也・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 地震災害素因の時間変動性を考慮した宅地供給に関するリスクマネジメントの考え方 —札幌市を事例として—, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 中嶋唯貴・岡田成幸, 2016, 少子高齢化の進展が地震時建物倒壊による推定死者数へ及ぼす影響, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 高橋遥・岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 居住環境を考慮した地震時室内変容による人的被害の地域精算評価手法の提案, 日本建築学会大会(九州)梗概集.
- 岡田成幸・中嶋唯貴, 2016, 震後復旧費用個人負担の地域格差, 日本地震学会2016年度秋季大会(名古屋), S15-18.
- 岡田成幸・中嶋唯貴, 2017, 社会動態が地震災害に及ぼす将来的影響の定量評価, 平成28年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- 倉田真宏・新本翔太・和田拓也・山田真澄・楠浩一・柏尚稔・溜淵功史, 2017, 緊急地震速報と建物モニタリング情報を利用した地震災害誘因の同定, 京都大学防災研究所年次発表会梗概, OSK4.
- 津野靖士・地元孝輔・三宅弘恵・佐藤浩章・松島信一・重藤迪子・高井伸雄・神野達夫・瀨瀬一起・山中浩明・川瀬博, 2017, 足柄平野西部における地盤震動特性の評価, 平成27年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- 地元孝輔・津野靖士・東貞成・佐藤浩章・重藤迪子・高井伸雄・松島信一・早川崇・山中浩明・川瀬博, 2017, K-NET日立近傍における地震と微動観測による地盤震動特性の評価, 平成27年度京都大学防災研究所研究発表講演会.
- Maeda, T., K. Nishida, R. Takagi, and K. Obara, 2016, Reconstruction of a 2D seismic wavefield by seismic gradiometry, *Prog. Earth Planet. Sci.*, 3, 31, doi:10.1186/s40645-016-0107-4.
- Maeda, T., H. Tsushima, and T. Furumura, 2016, An effective absorbing boundary condition for linear long-wave and linear dispersive-wave tsunami simulations, *Earth Planets Space*, 68, 63, doi:10.1186/s40623-016-0436-y.
- Noguchi, S., T. Maeda, and T. Furumura, 2016, Ocean-influenced Rayleigh waves from outer-rise earthquakes and their effects on durations of long-period ground motion, *Geophys. J. Int.*, 205(2),

1099-1107, doi:10.1093/gji/ggw074.

関谷直也, 2016, 企業の防災対策におけるBCPとCSR : 大企業に対する実証調査より, Nextcom25, 4-15.

関谷直也・田中淳, 2016, 避難の意思決定構造—日本海沿岸住民に対する津波意識調査より—, 自然災害科学
J. JSNDS 35 特別号 91 -103, 91.

表 1. 熊本地震本震における非線形解析モデルによる被害率評価（拠点間連携研究 [課題番号：2979]）

Event	Site	Component	Maximum Acc	Damage ratio for construction age category			
				~1950	1950~1970	1970~1981	1982~
4/16 01:25 Mainshock	IIS Mashiki	NS	776cm/s ²	0.555	0.481	0.330	0.105
		EW	825cm/s ²	0.711	0.481	0.423	0.154
	KMMH16	NS	651cm/s ²	0.473	0.386	0.332	0.11
		EW	1156cm/s ²	0.637	0.423	0.555	0.144

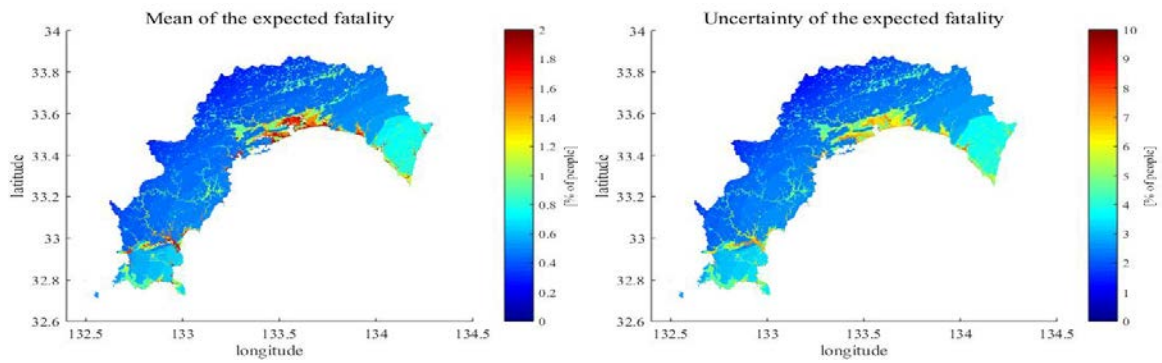


図1. 南海トラフ巨大地震による高知県での地震リスク (拠点間連携研究 [課題番号: 2975])
 左: 棟死亡率の平均値, 右: 棟死亡率のばらつき

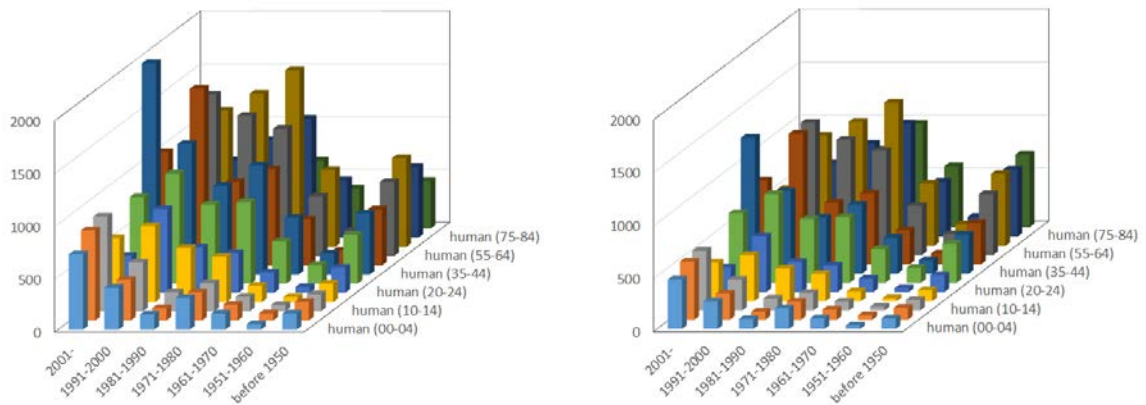


図2. 南国市の建物年代分布と人口年齢分布の関係の予測結果 (拠点間連携研究 [課題番号: 2976])
 左: 2015年時点, 右: 2040年時点

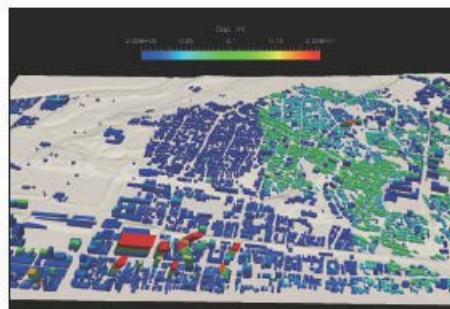
都市の概要				
	明石市	芦屋市	西宮市	尼崎市
面積	49.42km ²	18.47km ²	99.96km ²	50.72km ²
人口	294,040人	94,925人	488,873人	451,708人
人口密度	5,940			



対象都市の俯瞰 (出典: Google Earth)



都市モデル



地震シミュレーションの可視化の例

図3. 兵庫県下複数都市の IES: 構築された都市モデルと内閣府想定南海トラフ地震シナリオに基づく地震シミュレーションの可視化 (拠点間連携研究 [課題番号: 2977])
 左上: 都市の概要, 右上: 対象都市の俯瞰図, 左下: 都市モデル, 右下: 地震時の建築物応答シミュレーション結果の可視化例 (カラースケールは被害の程度を示す (赤が被害大))

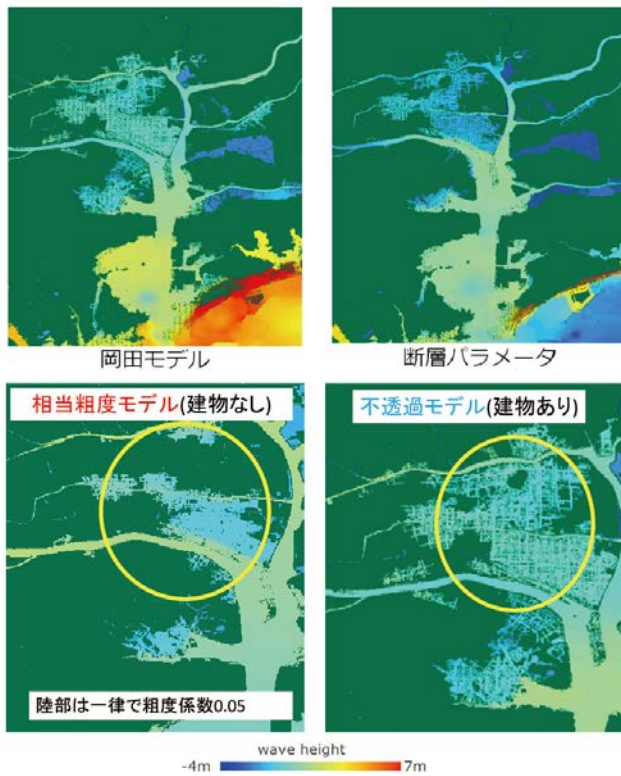


図4. 高知市を対象とした、IESを用いた津波シミュレーションによる津波高の推定結果の違い（拠点間連携研究〔課題番号：2977〕）

上) 岡田モデル（左）と断層モデル（右），下) 建物モデルの異なる取り扱い

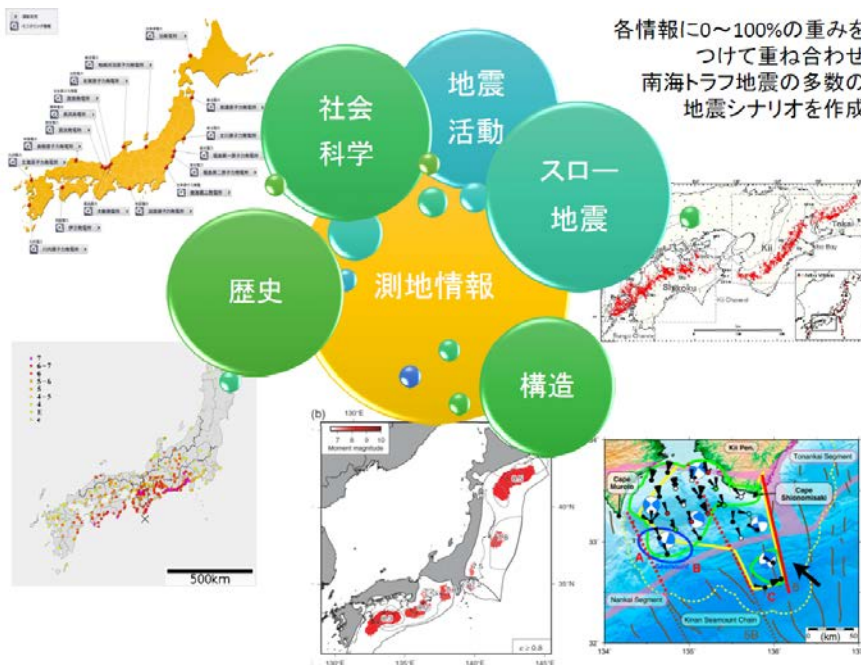


図5. 特定分科研究（その3）で目指す、多様性を反映した南海トラフ地震の震源像（拠点間連携研究〔課題番号：2978〕）

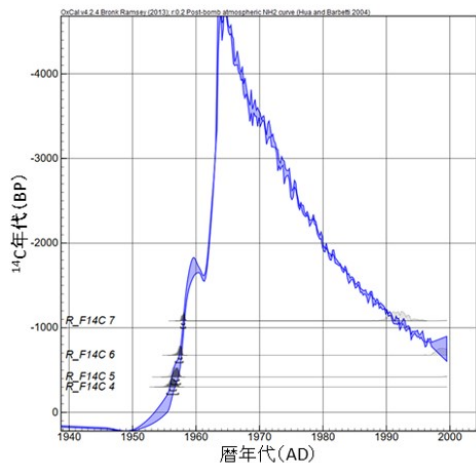


図6. 1950年以降の年代推定に用いる¹⁴C濃度と暦年の関係（拠点間連携研究〔課題番号：2980〕）

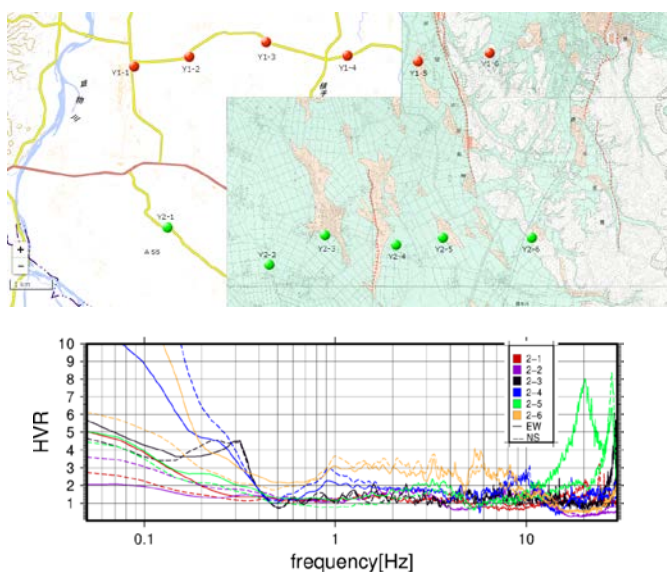


図7. 横手盆地における微動観測（拠点間連携研究〔課題番号：2985〕）

左：横手盆地における微動観測点の配置，右：測線1における観測微動水平上下スペクトル比（実線がEW/UD，破線がNS/UD）

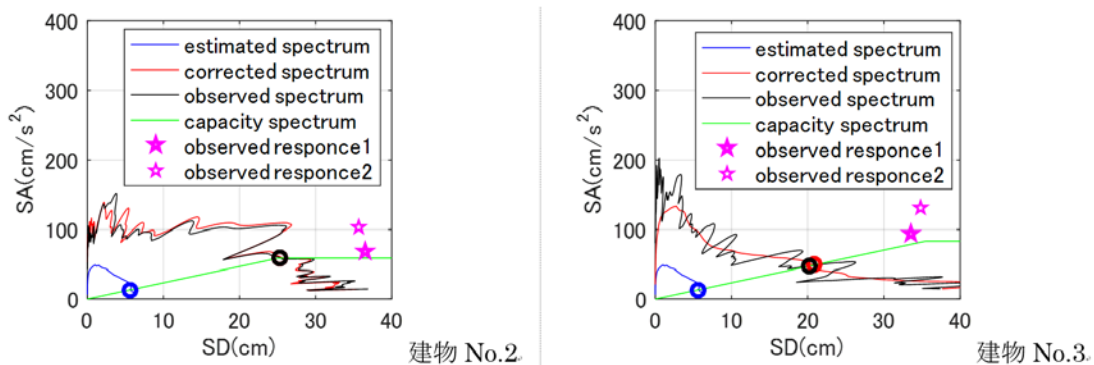


図8. 周辺建物の最大応答を推定する手法を適用した例（拠点間連携研究〔課題番号：2981〕）



図9. 詳細数値地形図を用いて抽出された、風屋ダム湖に隣接する既往地すべり土塊(茶色矢印) と不安定土塊(赤矢印)

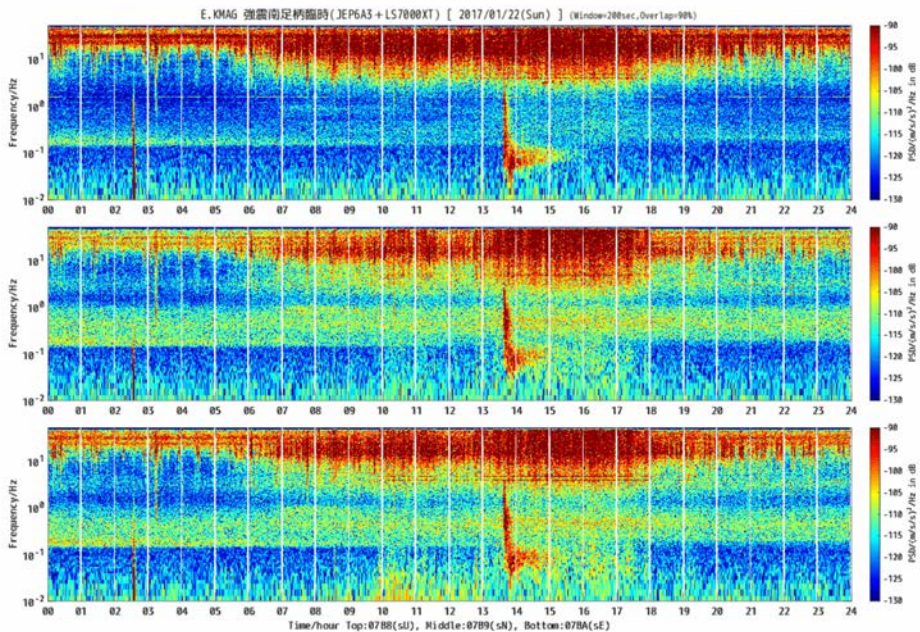
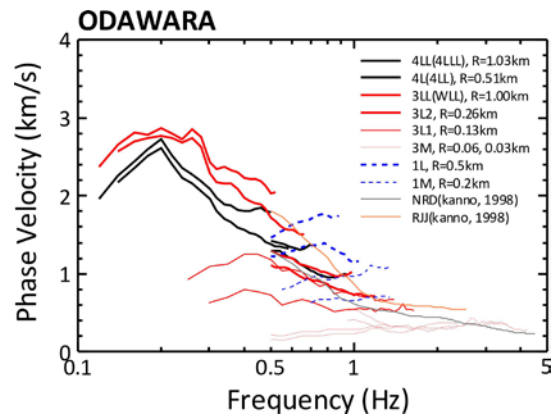
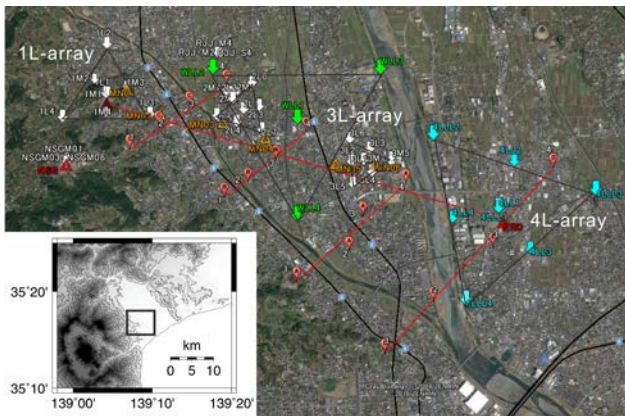


図10. 足柄平野北西部の南足柄地域における強震・微動観測(拠点間連携研究 [課題番号: 2988])
 左上: 強震観測点(△印)と微動観測点の位置, 右上: MAG強震観測点付近のレイリー波の位相速度の分散曲線, 下: MAGでの強震記録の振幅スペクトルの時間変化の例(上UD, 中NS, 下EW)

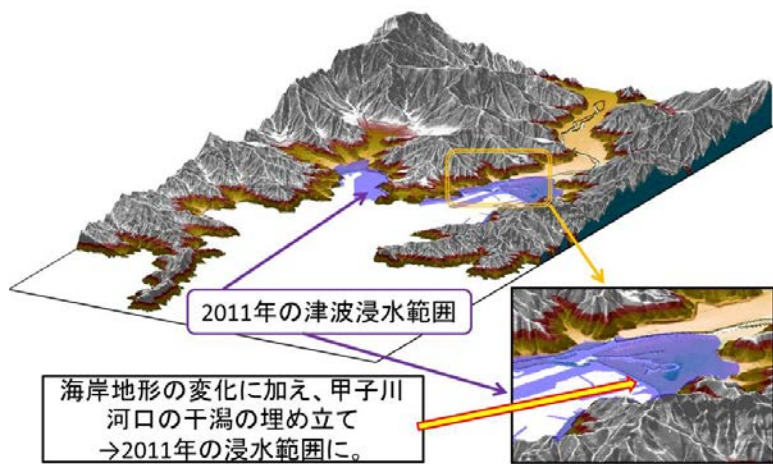


図1 1. 復元地形した釜石市の地形と2011年東北地方太平洋沖地震での浸水域（拠点間連携研究〔課題番号：2982〕）

Ⅱ. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画の推進について（建議）の概要

- 地震・火山噴火の現象を理解し、地震と火山噴火の予知を目指すこれまでの方針から、それらに加え、災害を引き起こす地震動・津波・火山灰や溶岩の噴出などの予測にも力を注ぎ、地震・火山災害の発生・推移を総合的に研究することにより、防災・減災に貢献する災害科学の一部として計画を推進する方針に転換。
- 地震予知研究は昭和 40 年、火山噴火予知研究は昭和 49 年から、科学技術・学術審議会が建議する計画に沿って、全国の大学や関係機関が協力・連携して推進。平成 21 年度から両計画を統合して「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」を実施。平成 23 年東日本大震災を受け、平成 24 年に計画の見直しを実施。計画が平成 25 年度末で終了することから、平成 24 年に実施状況の総括的自己点検及び外部評価を実施。外部評価などの指摘を受けとめ、社会の要請を一層踏まえて計画を策定。
- 低頻度・大規模な地震・火山現象の解明や、地震・火山災害の事例研究、発生機構の解明、地震動、津波、降灰、溶岩流の事前評価と即時予測、体系的な災害情報発表方法の研究を新たに開始。そのため、地震学・火山学を中核に工学、人文・社会科学等を含む総合的かつ学際的に研究計画を推進。

一. 現状認識と長期的な方針

1. 地震及び火山噴火予知のための観測研究に関する現状認識

- ・ 我が国は世界有数の地震・火山国であり、これまで地震や火山噴火による災害が度々発生し、多数の被害を経験。
- ・ 東日本大震災（平成 23 年東北地方太平洋沖地震）について、その震源域でマグニチュード 9 に達する超巨大地震の発生の可能性を事前に追究できなかったことを反省し、計画の見直しを実施し、平成 24 年に建議。
- ・ 現行の計画が平成 25 年度までであることから、平成 24 年に実施状況について総括的自己点検評価、及び外部評価を実施。外部評価や「東日本大震災を踏まえた今後の科学技術・学術政策の在り方について（建議）」などの指摘を踏まえ、また、これまでの計画の経緯と成果を鑑み、研究計画を策定。
- ・ 従来は、自然現象としての地震・火山噴火の予知に基づいて災害軽減への貢献を追求。今後は、地震・火山噴火による災害の発生を、地震動、津波、火山灰や溶岩の噴出などの外力（災害誘因）が、人の暮らす社会・自然環境の脆弱（ぜいじゃく）性（災害素因）への作用との認識し、地震・火山噴火の発生から、災害発生やその推移までを念頭に災害誘因の予測を行い、地震・火山災害の軽減に貢献する方針に転換。

2. 地震及び火山噴火予知のための観測研究のこれまでの経緯と成果

- ・ 地震予知研究は約 50 年間、火山噴火予知研究は約 40 年間、地震・火山噴火の災害軽減に資すべく継続的に実施。平成 21 年度から、両計画の統合的かつ効率的な進捗を目指して統合。これまでの成果は、以下のとおり。
- ・ プレート境界での滑りの多様性を世界に先駆けて解明し、巨大地震の発生を含むプレート境界での滑り現象のシミュレーションの手掛かりを獲得。プレート境界の繰り返し地震の中で、発生時期・規模の予測が可能な事例を発見。

- ・ 高密度で多項目の観測や火山噴出物の高精度な解析より、噴火に至るまでの現象、マグマの移動、噴火発生や噴火後の過程の理解が進み、火山噴火機構の総合的理解が進展。噴火に先行する多数の観測事象が集積。
- ・ これまでの計画で開発された三陸沖のケーブル式地震・津波計は、平成 23 年の三陸大津波の襲来 20 分前に巨大津波を観測。その技術は、政府が設置を進める津波観測網へ応用。
- ・ これまでの成果に基づいた有珠山や三宅島などでの火山噴火予知の実践を踏まえ、住民の避難計画と連動した噴火警戒レベルを気象庁は順次運用開始。
- ・ 地震の発生予測や火山噴火の規模や様式、活動推移の予測手法は現時点では未確立であるが、予測につながる地震や火山現象に関する理解が一層深化した。

3. 観測研究計画の長期的な方針

- ・ 地震や火山噴火による災害の発生を、地震動、津波、降灰、溶岩流などの災害誘因が外力となり、社会・自然環境の脆弱（ぜいじゃく）性である災害素因への作用と認識。災害誘因を予測して、それに備えることが地震・火山噴火の災害軽減の基本。
- ・ 災害の根本原因である自然現象である地震や火山噴火の発生から、災害誘因の予測、災害発生とその推移を含めて総合的に理解し、それを防災・減災に生かす災害科学の一部として計画を推進。災害に備えることを念頭に、地震や火山噴火の発生とそれに伴う災害誘因から災害を予め（あらかじめ）知り（災害の予知）、それにより災害軽減に貢献することが目標。
- ・ 発生すると甚大な災害となる低頻度・大規模な地震・火山現象について、過去の事象や海外の事例を取り入れて研究を推進。歴史学・考古学・地質学などとの連携や国際共同研究を強化。
- ・ 成果を社会の防災・減災に効果的に役立てるため、政府の施策、行政機関との連携を強化。

二. 本計画の策定の基本的な考えと計画の概要

1. 本計画の基本的な考え

- ・ 計画の目的が地震・火山災害の軽減への貢献であることを一層明確にし、地震や火山噴火の発生予測を目指す研究を継続しつつ、災害誘因予測研究を体系的・組織的に始め、国民の生命と暮らしを守る災害科学の一部として研究を推進。
- ・ これまでよりも広い知の結集が必要であることから、地震学や火山学を中核とし、災害や防災に関連する理学、工学、人文・社会科学などの研究者も加わり、専門知を結集し、総合的かつ学際的な研究計画として推進。
- ・ 災害の根源である地震と火山噴火の仕組みを自然科学的に理解する「地震・火山現象の解明のための研究」、地震や火山噴火を科学的に予測する手法を研究する「地震・火山噴火の予測のための研究」、地震動、津波、火山灰や溶岩の噴出など災害の誘因となる自然現象の事前評価・即時予測を研究する「地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究」を実施。長期的な取組で計画を推進し、成果が防災・減災に効果的に活用される仕組みをつくるため「研究を推進するための体制の整備」を実施。
- ・ 東北地方太平洋沖地震、南海トラフ地震、首都直下地震、桜島火山等の優先度の高い地震や火山の研究については、上記の区分を横断して、総合的に実施。

2. 本計画の概要

本計画の基本的な考えに沿って、以下の研究を実施。

2-1. 地震・火山現象の解明のための研究

地震や火山噴火を科学的に理解するための基礎的な観測研究を推進。特に、低頻度で大規模な現象の理解のため、史料、考古データ、地質データ等も活用。

《地震・火山現象に関する史料、考古データ、地質データ等の収集と整理》

古い年代の地震・火山噴火に関する史料の解説・解釈、考古学的な発掘痕跡の集約、地質調査データの調査・分析。その成果のデータベース化。

《低頻度大規模地震・火山現象の解明》

観測データや史料、考古データ、地形・地質データの解析・分析から地震学・火山学の知見に基づき、低頻度・大規模の地震・火山現象解明の研究を推進。特に、東北地方太平洋沖地震、南海トラフ地震の発生機構に関する観測研究を推進。

《地震・火山噴火の発生場の解明》

地震及び火山噴火の発生場の構造、ひずみ・応力の時空間分布と地震・火山活動の関連を研究。特に、東北地方太平洋沖地震とその余効変動による影響に注目。

《地震現象のモデル化》

日本列島域の構造モデル、複雑な破壊現象を表現できる断層の物理モデルを構築。両者を利用し、地震発生機構の定量的な理解やプレート境界での多様な滑りを再現する数値シミュレーション実験を推進。

《火山現象のモデル化》

多項目観測データや火山噴出物の解析から、噴火先行現象やそれに続く多様な火山現象の物理・化学過程を解明。マグマの発泡・脱ガス・破碎などに関する理論・実験研究の成果も取り入れ、火山現象の物理・化学過程のモデル化を推進。

2-2. 地震・火山噴火の予測のための研究

地震や火山噴火現象の科学的理解を踏まえて、地震発生や火山噴火、地震活動や火山活動の予測研究を推進。

《地震発生長期評価手法の高度化》

数値シミュレーションなどを利用した地震発生の長期評価手法を開発し、史料、考古・地質データなどから推定された地震の発生履歴に基づき、地震発生の長期評価手法を高度化。

《モニタリングによる地震活動予測》

観測データと数値シミュレーションの結果を比較し、地殻内の応力やひずみなどの状態を評価し、地震発生や地殻活動の理解の深化を推進。地震活動の統計的性質に基づく地震活動の予測を行い、その性能を評価。

《地震先行現象に基づく地震活動予測》

地震の先行現象の捕捉のための観測を実施。先行現象と地震発生の関係を統計的に評価。統計的に有意な

先行現象は、その発生機構の物理・化学的な根拠を探究。

《事象系統樹の高度化による火山噴火予測》

噴火履歴から、近い将来に噴火が懸念される火山の活動や噴火現象の時系列をまとめた噴火事象系統樹を作成。研究成果を利用して事象系統樹の分岐条件の導出とその判定法を探究し、火山噴火予測を試行。

2-3. 地震・火山噴火の災害誘因予測のための研究

防災・減災に貢献するために、地震や火山噴火の発生から災害に至るまでの過程を史料、調査・観測記録から理解し、地震動、津波、降灰などの災害誘因の予測の研究を推進し、災害を予め（あらかじめ）知って対応できる（災害の予知）ことを目指した研究を推進。

《地震・火山噴火の災害事例の研究》

地震・火山噴火による災害の特性を、事例研究に基づいて把握。歴史記録から社会環境の時代的变化に留意して過去の地震・火山災害の特性を知り、地域特性も踏まえ、自然現象としての災害誘因と社会・自然環境としての災害素因を抽出。

《地震・火山噴火の災害発生機構の解明》

地震・火山噴火による災害誘因が、自然・社会環境の脆弱性などの災害素因に与える作用力、波及効果を解明し、災害発生機構を探究。二次災害の抑止、社会混乱の防止などの新たな災害研究の分野を複合学術領域で構築。

《地震・火山噴火の災害誘因の事前評価手法の高度化》

地震・火山噴火が引き起こす地震動、津波、地滑り、降灰、山体崩壊などの災害誘因の発生可能性を事前に評価する手法の高度化を目指す研究を推進。

《地震・火山噴火の災害誘因の即時予測手法の高度化》

地震・火山噴火が引き起こす災害誘因を、地震・火山噴火発生直後に即時的に高精度に予測するための観測データの利用法や解析手法の高度化を目指す研究を推進。

《地震・火山噴火の災害軽減のための情報の高度化》

確率表現の有無、確度の高低など様々な地震・火山噴火予測情報を、それに見合った活用法で災害軽減に役立てる方策を検討。災害啓発情報、災害予測情報、災害情報、災害関連情報などの高度化のための研究を推進。

2-4. 研究を推進するための体制の整備

本計画を達成するための体制の整備。

《推進体制の整備》

国民の生命と暮らしを守る災害科学として計画を実施し、成果が効果的に防災・減災に役立つような計画推進体制を構築。地震・火山防災行政の中で、どのように貢献するべきかを踏まえ、地震調査研究推進本部など関連機関との連携を強化。

総合的かつ学際的に研究計画を推進することから、その進捗状況を把握、達成度の評価、問題点と今後の課題の整理などを行う計画推進体制を整備。

《研究基盤の開発・整備》

行政官庁、研究機関、全国の大学が協力し、地震・火山の活動評価や研究に必要な観測基盤、データを効率的に処理・流通するシステムを維持・拡充。

本計画で得られる成果をデータベース化し、研究者間で共有する仕組みを構築。

新たな観測技術の開発、地殻活動モニタリング手法高度化などの研究を推進。

《関連研究分野との連携の強化》

本計画が災害科学に貢献すべきという観点で、過去の地震・火山噴火の事例調査、災害の発生に至る過程の研究の推進のため、理学だけではなく工学、人文・社会科学などの関連研究分野との連携を強化。

《研究者・技術者・防災業務・防災対応に携わる人材の育成》

関連機関が協力して、若手の研究者、技術者、防災・減災に関わる行政・企業・教育機関などで活躍する人材を育成。

《社会との共通理解の醸成と災害教育》

関連機関が協力して、研究成果を社会にわかりやすく伝え、社会との共通理解の醸成のための取組を強化。地震・火山科学が社会に発信する情報を含め、災害情報の在り方について検討。

《国際共同研究・国際協力》

大規模な地震、津波、火山噴火の災害は世界各地で発生し、海外の事例を研究する必要から、国際共同研究を促進する体制を整備。

災害科学の先進国である我が国の責務として、開発途上国における地震・火山噴火災害の防止・軽減に貢献する体制を維持・整備。

Ⅲ. 災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画 実施機関

総務省	国立研究開発法人情報通信研究機構
文部科学省	国立大学法人等
	北海道大学大学院理学研究院
	弘前大学大学院理工学研究科
	東北大学大学院理学研究科
	秋田大学大学院工学資源学研究科
	東京大学大学院理学系研究科
	東京大学地震研究所（共同利用・共同研究拠点）
東京大学大気海洋研究所	
東京大学史料編纂所	
東京工業大学火山流体研究センター	
新潟大学災害・復興科学研究所	
名古屋大学大学院環境学研究科	
京都大学大学院理学研究科	
京都大学防災研究所（共同利用・共同研究拠点）	
鳥取大学大学院工学研究科	
高知大学理学部	
九州大学大学院理学研究院	
鹿児島大学大学院理工学研究科	
立命館大学総合科学技術研究機構	
東海大学海洋研究所	
	国立研究開発法人防災科学技術研究所
	国立研究開発法人海洋研究開発機構
	独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所
経済産業省	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
国土交通省	国土地理院
	気象庁
	海上保安庁
都道府県	地方独立行政法人北海道立総合研究機構環境・地質研究本部地質研究所
	山梨県富士山科学研究所