

## 2. 顕著な火山噴火及び南海トラフ巨大地震に関して得られた重要な成果

### 2-1. 草津白根山（本白根山）鏡池北火口からの噴火

草津白根山（群馬県）は最高所付近に白根山・逢ノ峰・本白根山等の火砕丘群が並び、白根山山頂部付近には湯釜等3つの火口湖がある。2018年1月23日10時02分に本白根山鏡池北火口からの噴火が発生した。この噴火では新火口列を生じると共に人的な被害が発生した。

有史以来の噴火は本白根山ではなく、湯釜火口湖周辺に集中し、本白根山の噴火は3000年前のマグマ噴火しか知られていなかった。そのため、主に湯釜を対象とした各種観測が20年以上にわたって継続されてきたが、それによって2011年に本白根から湯釜への流体の移動を示唆する地殻変動が観測された。その後、本白根山を対象とした地質調査や地球物理学的観測も行われるようになり、近年の地質調査では本白根山の最新のマグマ噴火が1500年前に発生したことが判明するなど、活動史の更新が進められていた<sup>[2942]</sup>。

草津白根山の湯釜火口周辺では、2014年3月から2015年8月にかけて、地震活動の活発化・山体膨張・火山ガス中の $\text{H}_2\text{S}$ （硫化水素）の減少・湯釜火口湖の温度上昇・湯釜直下の熱消磁<sup>\*</sup>が観測され、これらの一連の活動は、熱化学的研究に基づき、湯釜付近に釣り鐘状に存在している透水性の悪い粘土層下への高温の火山ガス・熱水流入が続いたことによるものと解釈された。また、2017年には熱活動の低下に対応する地磁気変化や噴気ガスの成分変化が観測されていた<sup>[1601]</sup>。

草津白根山に関する理解が進む中で、本白根山の噴火が発生した。噴火により観測網の伝送・電源系統が被害を受けたが、2015年度の本研究計画や2016年度の国立大学法人設備整備費補助金等により複数の系統を整備していたため、観測を継続することができた。噴火直後には臨時地震観測点の設置も実施した。これまでの主な注目対象は湯釜であったとはいえ、草津白根山城で多項目の観測を長期間継続的に実施していたことで、この噴火イベントの推移や噴火前の活動状況などの重要な知見を得ることができた。以下に、関連する知見を簡単にまとめる。

湯釜火口周辺5カ所に設置された傾斜計では、噴火直前の1月23日09時58分58秒頃から湯釜南方が隆起する傾斜変動が観測され、10時02分08秒～10時02分12秒の間に反転した（図1）。新火口列から1.1kmのレストハウスに設置した空振<sup>\*</sup>計に10時02分13秒頃から顕著な高周波振動が観測されていることから、噴火開始は10時02分10秒頃であり、噴火直前まで地下浅部で圧力が増加（膨張）し、噴火と共に圧力緩和（収縮）が進行したと考えられる。傾斜変動源を新火口列直下の鉛直クラック<sup>\*</sup>と仮定すれば、火口直下の海拔1000m（地表面下1000m）において約2分間で $42.5\text{m}^3$ の体積増加が起き、その後約8分間で $30\text{m}^3$ の体積減少が起きたと計算される。

GNSS<sup>\*</sup>連続観測によると、湯釜周辺で2014年春の隆起変動以降、緩やかな沈降が継続していた。2018年1月23日の本白根山噴火に先行する地殻変動は不明瞭であるが、これは、サンプリング間隔が粗いGNSS観測では捉えられなかったためと考えられる。地震活動については、2017年には本白根周辺地域で月1-2個程度の地震の震源が決定されていた。震源分布の中心は2018年に生成した新火口列の北方約500mに位置し、その深度は地殻変動源の鉛直クラックとほぼ一致する。本白根火砕丘では、群発地震活動が年に2-3回程度の割合で観測されていたが、噴火直前の地震活動の活発化は認められなかった。噴火の3か月前に実施した空中赤外観測でも、北鏡池火砕丘周辺の地表面温度に異常は認められていなかった<sup>[1601]</sup>。

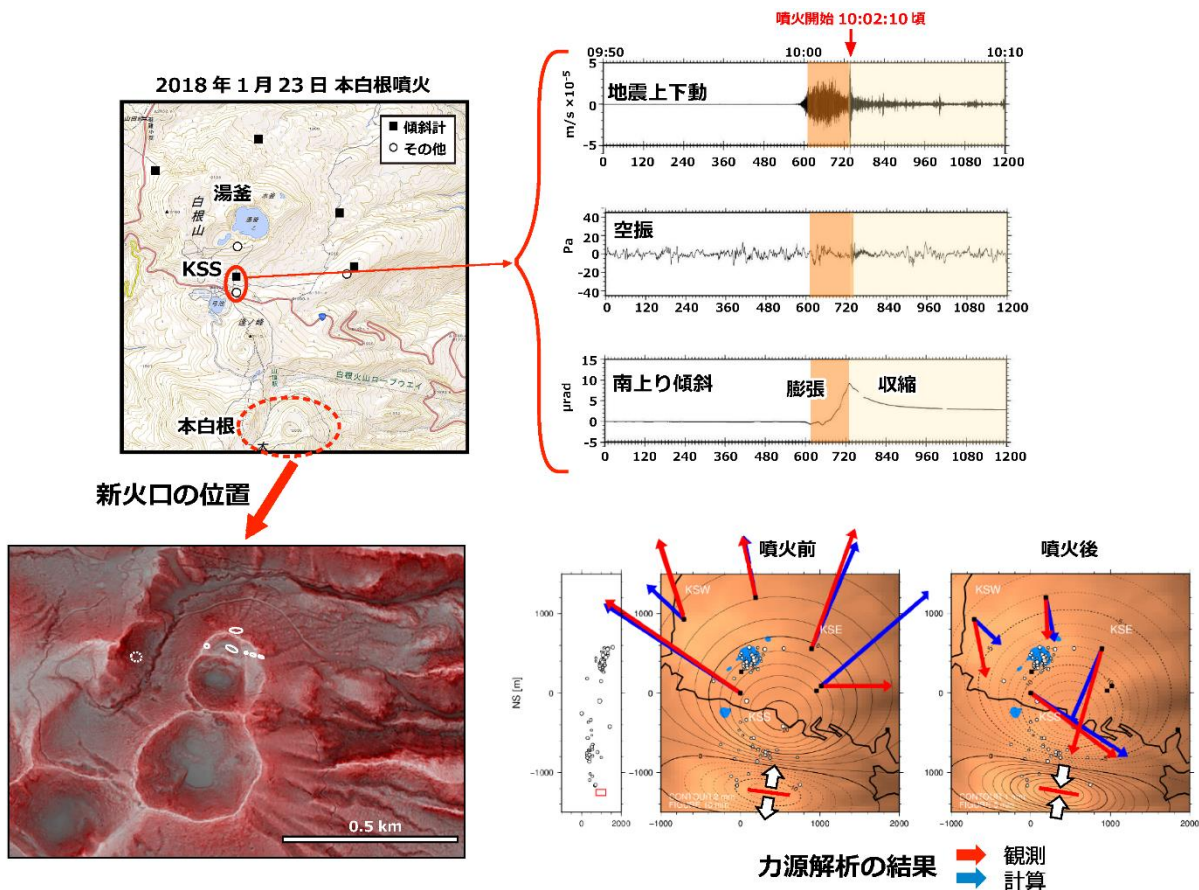


図1. 草津白根山（本白根山）鏡池北火口からの噴火前後の傾斜変動

2018年1月23日10時02分に本白根山鏡池北火口からの噴火が発生し、新火口列を生じると共に人的な被害が発生した。湯釜火口周辺5カ所に設置された傾斜計では、噴火の2分ほど前から湯釜南方が隆起する傾斜変動が観測され、噴火時刻の10:02:10に収縮に転じた。新火口列から1.1 kmのレストハウス付近に設置した地震計には隆起と共に発生した地震が捉えられた。また、空振計では噴火とともに発生した空振による顕著な高周波振動が10:02:13頃から記録された。観測された傾斜を説明する力源の最適解は、新火口列直下の海拔1000 m（地表面下1000 m）に位置する鉛直クラックが約2分間で42.5万 $\text{m}^3$ 膨張し、その後約8分間で30万 $\text{m}^3$ 収縮したことを示した。右下の図には、観測された傾斜と計算された傾斜の方向を示す矢印に加え、地面の上下変動を示す等値線（計算値）、湯釜から本白根にかけて発生する地震の震源分布を示す。また、平面図の赤線と震源分布の南北断面図中の赤四角は鉛直クラックの投影を示す。

## 2-2. 霧島山（新燃岳・硫黄山）の火山活動

霧島山は、宮崎・鹿児島県境に位置し、新燃岳、韓国岳、硫黄山、御鉢、高千穂峰など20を超える火山体から成る。その中で2008年から小規模な噴火が続く新燃岳では、2011年には約300年ぶりの本格的なマグマ噴火が発生し、大量に流出した溶岩は山頂火口を埋めた。この噴火を受けて、新燃岳を含む霧島山周辺の観測体制が強化され、その結果、マグマ供給系や噴火に伴う諸現象の理解が大きく進展した。溶岩の流出に伴い、新燃岳の北西約6 km、深さ約10 km付近で大規模な収縮が観測されたことから、そこが新燃岳へマグマを供給するマグマ溜まりだと考えられている。また、地震波干渉法\*により霧島山の3次元S波速度構造を推定した結果、霧島山の真下から北西方向に約10 kmにわたって、海拔下5-10 kmに低速度異常が存在すること明らかになっている<sup>[7003]</sup>。2017年度後半には、新燃岳で再びマグマ噴火が発生し、新燃岳北西約5 kmに位置する硫黄山

でも活動の活発化が進んだ。これまでの観測研究の成果を踏まえ、活動活発化の推移が詳細に捉えられ、新燃岳噴火発生後は迅速に活動の把握が行われた。その結果を速報として報告する。

硫黄山の活動活発化を受け、まず火山ガスの放出源を明らかにするために二酸化炭素を構成する炭素と酸素の同位体比測定を行った結果、火山ガスは地下水ではなく主にマグマから来ていることが確認された<sup>[1003]</sup>。また航空機SAR\*による観測では、硫黄山付近の膨張を示す地殻変動が明瞭に捉えられた<sup>[1008]</sup>（図2）。火山活動に関する多項目観測データを整理し、活動の推移についてとりまとめを行うとともに、2017年4月からの硫黄山浅部の地殻変動及び2017年9月の地殻変動を伴った地震活動についても解析し、地殻変動と地震活動の時空間関係を明らかにした。陸域観測技術衛星「だいち2号」（ALOS-2）のデータによるSAR解析では、硫黄山付近が2015年以降ほぼ一定速度で膨張していることが明らかになった<sup>[7003]</sup>。

新燃岳は2011年9月の噴火を最後に表面的な活動は停滞していたが、継続的な観測研究により活動の把握が行われていた。無人ヘリを用いた空中磁気測量により火口内容岩の冷却による帯磁\*の進行が観測される一方で、SAR干渉解析結果からは、2016年夏頃までは火口浅部への微量なマグマの供給を示唆する隆起が見られていた。その後、火口内は沈降に転じ、さらにその変化は徐々に減少傾向にあった。また、GNSS観測網のデータを用いた地殻変動解析によると、新燃岳北西のマグマ溜まりの膨張が間欠的に続いていた。

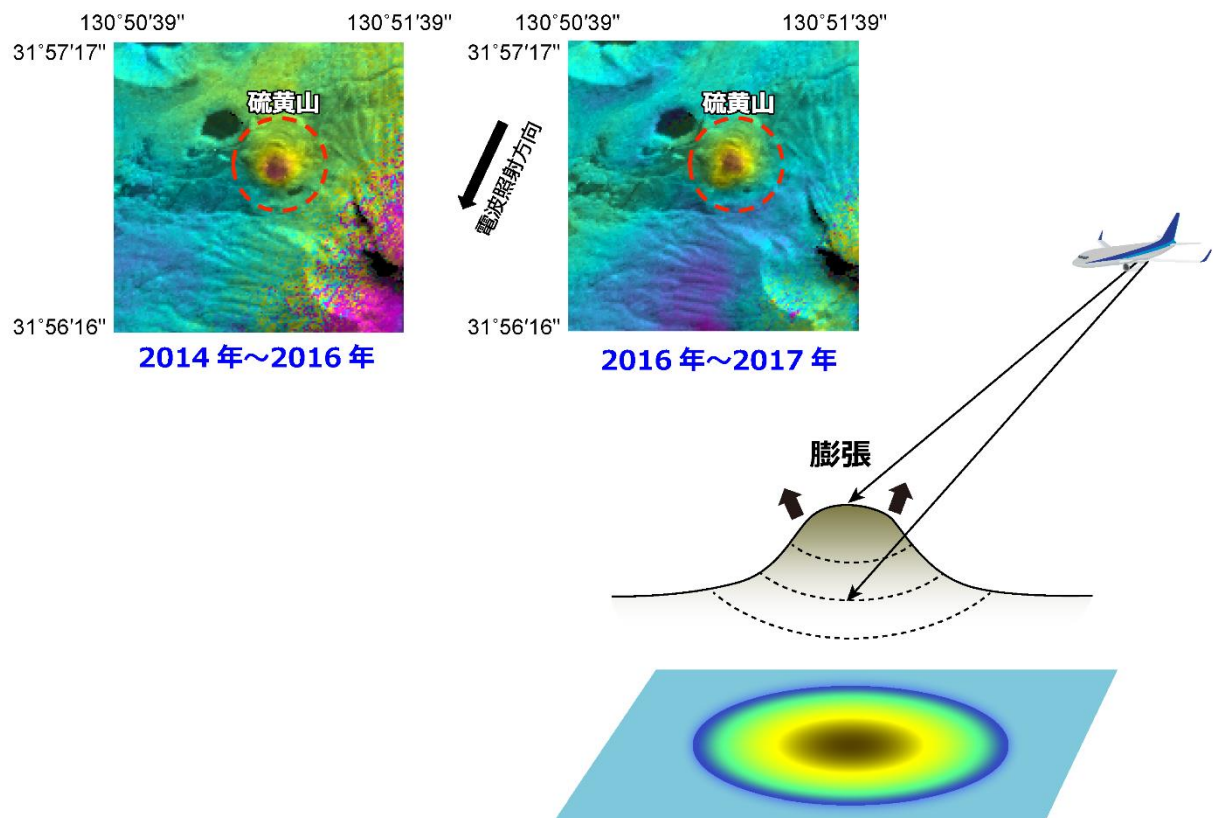


図2. 航空機SARによって捉えられた硫黄山付近の地殻変動

人工衛星を用いた干渉解析手法であるInSAR解析を航空機SARに応用するための手法開発を進めている。衛星と異なり、航空機の場合は風などの影響により飛行軌跡を均一に保つことは難しいため、独特の解析手法の開発が不可欠である。今年度までに手法の開発・改良が進み良好な解析結果が得られるようになったことから、火山活動が高まっている霧島の硫黄山で得たデータを用いて、2014年から2016年の変化と、2016年から2017年の変化を解析したところ、両期間ともに硫黄山付近の膨張を示す地殻変動が明瞭に検出された。航空機SARは人工衛星による観測と比較して多方向からの観測が容易であることを利用し、将来的には地殻変動を3次元的に捉えることを目指している。

2017年2月以降、新燃岳北西のマグマ溜まりの膨張が再び始まり、比較的速い速度で膨張が続く中で、10月9日に、火口直下浅部に流体が移動したことを示す微弱な傾斜変動が微動を伴いながら観測された<sup>[1508]</sup>。そして、2日後の2017年10月11日に噴火が発生した(図3)。その後、新燃岳では小規模噴火が10月17日まで断続的に発生した。マグマ溜まりは2017年10月の噴火直後にわずかに収縮したが、すぐに膨張を再開し、2018年3月1日からの爆発的な噴火活動が始まった。3月6日までに火口内への溶岩流出が始まり、2011年の活動で火口を満たしていた溶岩は新しい溶岩で覆われた。その後も溶岩流出は継続し、3月9日には溶岩が火口から溢れだして北西斜面を200mほど流下した。溶岩流出に伴い、3月6日から7日にかけてマグマ溜まりは一旦収縮したが、再び膨張に転じた。新燃岳火口近傍の広帯域地震観測網のデータを用いた火山性微動活動の解析も行われた。その結果、新燃岳直下を震源とする微動が、振幅と深度を変化させながら、2017年10

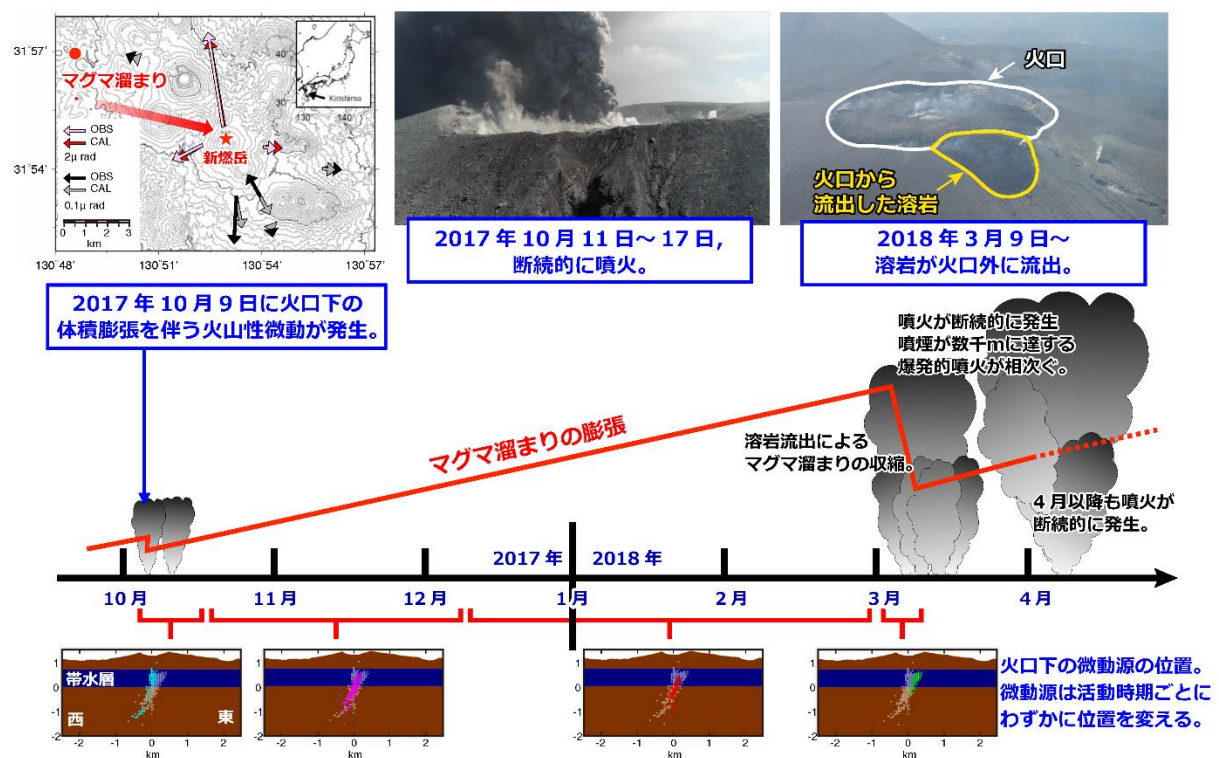


図3. 最近の新燃岳の活動

新燃岳では、2017年2月以降マグマ溜まりの膨張が再び始まり、2017年10月11日に噴火が発生した。噴火の2日前には、火口直下浅部への流体移動を示す傾斜変動が観測されている。マグマ溜まりは2017年10月の噴火直後にわずかに収縮したが、すぐに膨張を再開し、小規模噴火が10月17日まで断続的に発生した。3月1日からは爆発的な噴火活動が始まり、3月9日には火口内へ流出した溶岩が火口北西方向に溢れた。溶岩流出に伴い、3月6日から7日にかけてマグマ溜まりは一旦収縮したが、再び膨張に転じた。

図の一番下には、火口下の微動源の位置を期間毎に色分けして示している。火口直下海拔ゼロメートル付近で発生する微動は、2017年10月11日の噴火後振幅が次第に増加し、発生位置は火口北西の海拔-1.5kmから新燃岳直下浅部の間で何度か移動した。2018年3月1日噴火以降の微動震源は、溶岩が噴出した火口の北東縁直下に移動した。爆発的な噴火が増えた2018年3月10日以降、微動振幅は2017年10月の噴火前の水準に戻った。

2018年3月中は噴煙中の高さが3000mを超える噴火が頻発し、4月以降も月に1回程度の割合で噴火が発生している。

月 11 日の噴火 2 日前から 2018 年 3 月の噴火にかけて継続していたことがわかった。特に、2017 年の噴火後、2018 年の噴火に向けて振幅が次第に増加していた微弱な連続微動を検出できたことは、今後、噴火予測を行う上で有用な成果であると言える。

噴火後の火口内の状況把握を目的として、航空機搭載型 SAR (Pi-SAR2) による観測が行われた<sup>[010]</sup>。また、噴火直前の火口内の地殻変動を捉えるため干渉 SAR<sup>\*</sup>解析が行われた。時間分解能は限られるものの、日本と欧州の人工衛星データを用いた解析をつなぎ合わせると、2017 年 7 月から沈降が加速したこと、2017 年 10 月 11 日の噴火前の数日以内には 10 月 11 日の噴火位置付近である火口内東縁付近で膨張が発生したと考えられることがわかった<sup>[3005]</sup>。2017 年 10 月 11 日の噴火では、セソナ機による火山ガス組成と放出率の観測が行われ、SO<sub>2</sub>放出率が 1 万 t/日を超える大規模脱ガスが生じていることがわかった。また、噴出物を構成する粒子の解析から、10 月 11 日の噴火は地下の熱水系の活発化によるマグマ水蒸気噴火であったことが明らかになった<sup>[5006]</sup>。2018 年 3 月中は、噴煙柱の高さが 3000 m を超える噴火が頻発し、4 月以降も月に 1 回程度の割合で噴火が発生している。

### 2-3. 南海トラフ巨大地震

南海トラフでは、陸のプレートとフィリピン海プレートとの間（プレート間またはプレート境界と呼ばれるが、両者は同一の意味である）で巨大地震の発生が懸念されている。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋地震の発生を受けて、南海トラフにおいて発生しうる巨大地震に関する社会の注目度は一層高まっており、2017 年 9 月の中央防災会議幹事会の決定を受け、気象庁は確度の高い地震予測を前提としない「南海トラフ地震に関連する情報」の運用を 2017 年 11 月より開始するなど、日本における南海トラフ沿いの巨大地震に関する防災体制は大きく変化している。学術研究の分野においても、南海トラフ沿いで何が起きているのか、南海トラフ沿いの巨大地震についてどこまでわかっているのかといった視点で、関連する研究成果が社会の注目を集めている。

本計画では、南海トラフ沿いの巨大地震に関連する研究を総合的研究として優先して実施している。今年度は、陸上・海底観測による地震活動やゆっくり滑り<sup>\*</sup>に関する研究、数値シミュレーションに基づくシナリオ予測の研究等に関する成果が挙げられた。特に、2016 年 4 月 1 日に三重県南東沖のプレート間で発生した M6.5 (Mw5.8) の地震に関する研究が進められた。この地震自体は被害を及ぼすことはなかったが、前回の南海トラフの巨大地震である 1944 年東南海地震・1946 年南海地震の活動以来、約 70 年ぶりに発生した南海トラフでの規模の大きなプレート間地震であり、また発生場所も同東南海・南海地震の震源域に近かったため、より大きなプレート間地震を誘発する可能性が危惧されている。このような事情から、この地震に関しては、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進められてきた。これらについて、特筆すべき研究成果を述べる。

・地震活動

南海トラフ沿いの地震活動について、2006 年以降の気象庁一元化震源\*カタログから規模別頻度分布の指標である  $b$  値\*の詳細な空間分布を求めた (図 4)。1944 年東南海地震と 1946 年南海地震で滑り量の大きかった領域では  $b$  値が低く、それら二つの領域の間では  $b$  値が高い事がわかった。 $b$  値が低いところは潜在的に大地震を起こす力が大きいということが知られていることから、南海トラフ巨大地震の破壊過程の詳細解明に繋がる成果であると言える<sup>[2902]</sup>。

- ・ :低周波地震
- ★ : $M \geq 6.5$ 地震

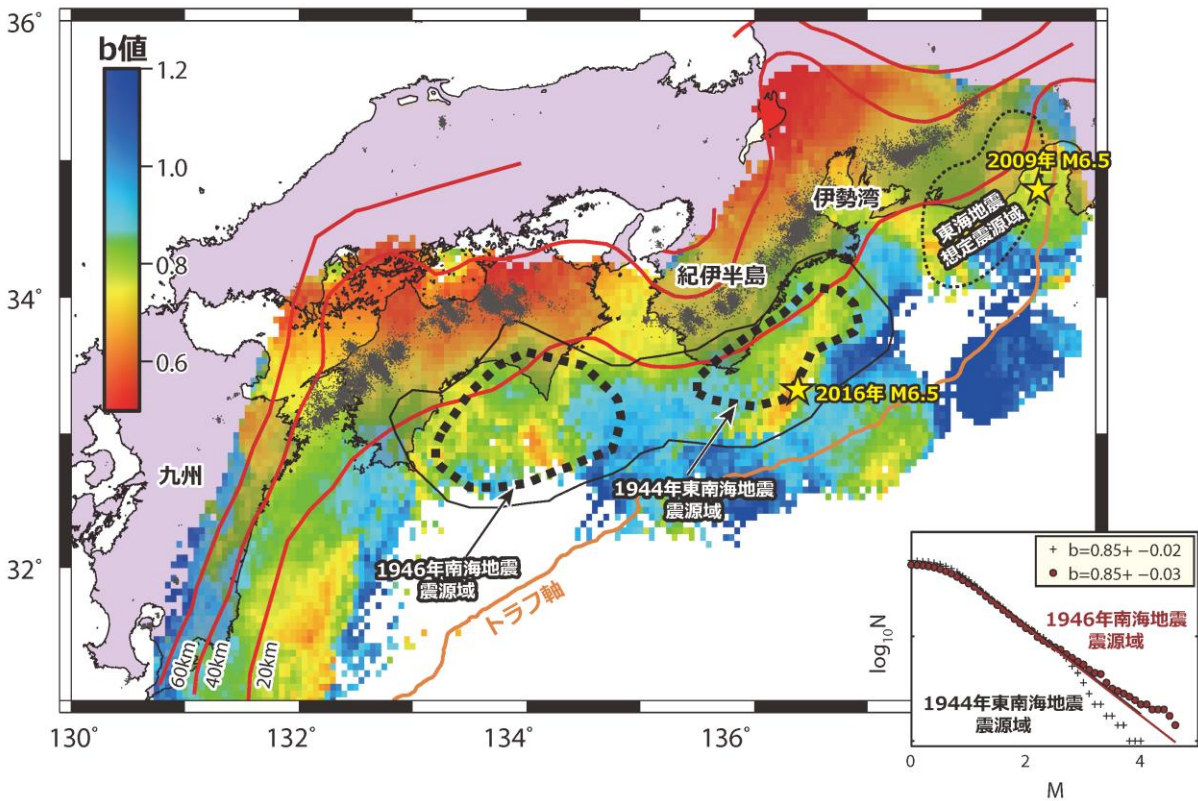


図 4. 南海トラフ沿いで発生する地震の  $b$  値の空間分布

1944 年東南海地震と 1946 年南海地震の震源域 (点線で囲んだ領域) で発生した地震の規模別頻度分布を右下に示す。

・ゆっくり滑りと地殻変動

南海トラフの掘削坑内での間隙水圧\*の観測から、熊野灘のプレート境界でゆっくり滑りが 8~15 か月間隔で繰り返し発生し、海溝軸近傍での低周波微動\*を伴うことが明らかになった (図 5)<sup>[4002]</sup>。陸上の異なる観測網で得られるひずみ・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ゆっくり滑りを解析するシステムの運用を継続した<sup>[5007]</sup>。また、GNSS-音響測距結合方式\*による南海トラフ周辺域での海底地殻変動観測も継続され、プレート間固着の影響による地殻変動が観測された<sup>[8001]</sup>。

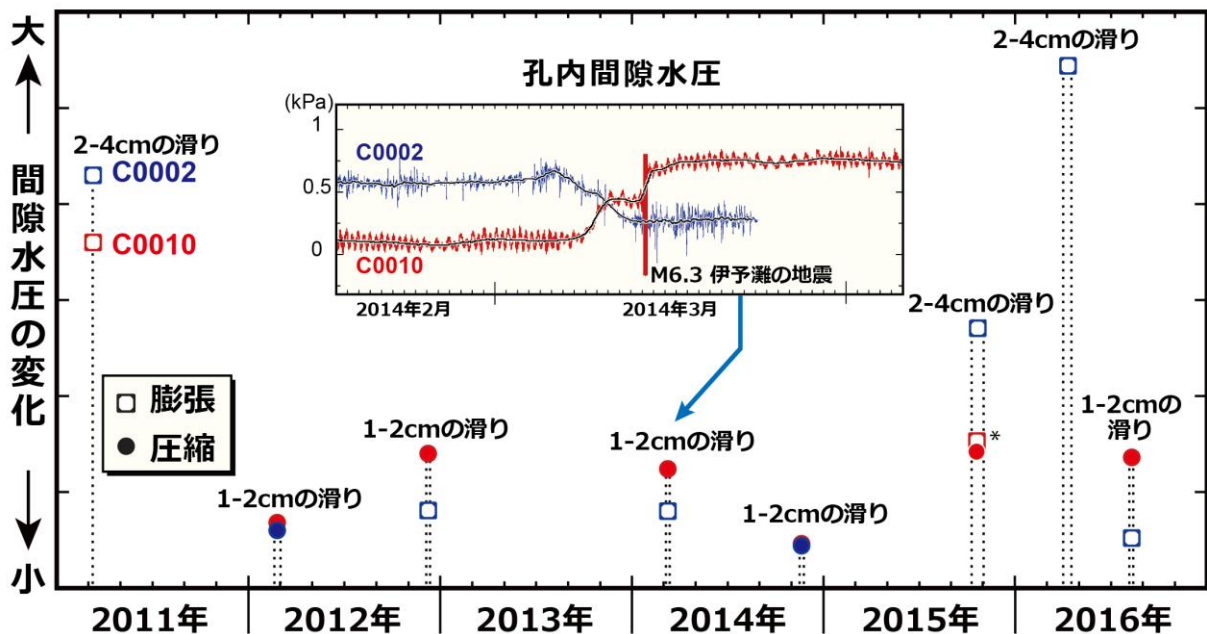
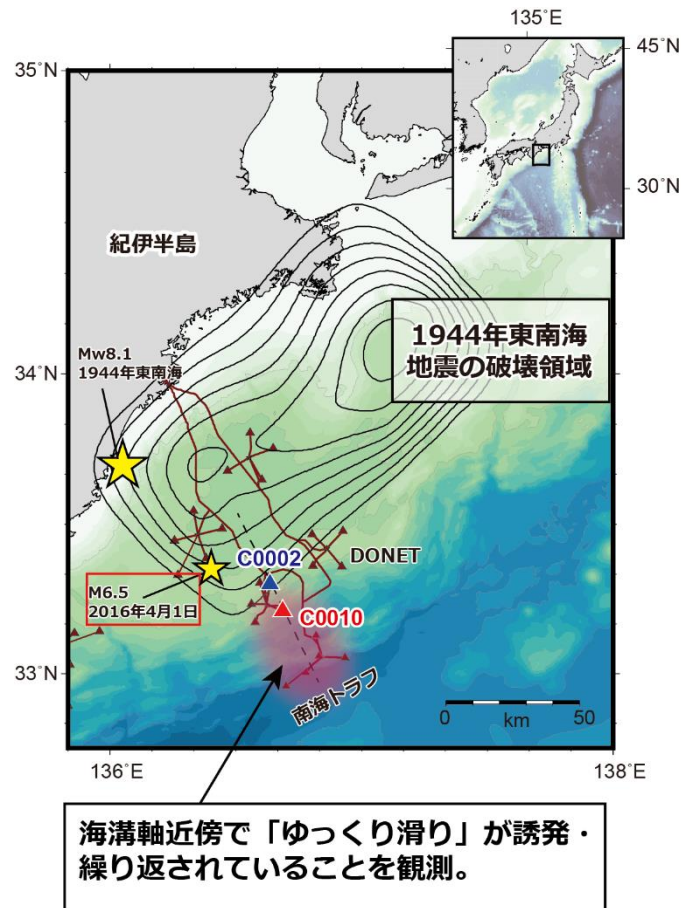


図5. 南海トラフ近傍（熊野灘）の坑内観測システム(C0002 およびC0010 観測点)で計測された、海溝軸近傍で繰り返り起こる「ゆっくり滑り」に伴う間隙水圧の変動イベント

下図には、ゆっくり滑りに伴う間隙水圧の変化の大きさと、その変化がプレート境界での滑りであると仮定した場合の各イベントの滑り量の推定を示した。2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震(M6.5)後に続発した、浅部超低周波地震の活動に連動した大きな滑りが観測されている。図中には、一例として2014年3月のゆっくり滑りに伴う両観測点の間隙水圧の変化を示した。

\*印: 2015年10月のイベントではC0010観測点ではその期間中に圧縮とそれに続く膨張が計測された。

・三重県南東沖の地震

2016年4月1日に、三重県南東沖の熊野灘の下の、フィリピン海プレートと陸のプレートの浅部境界でM6.5の地震が発生した。この地震はケーブル式の地震・津波観測監視システム(DONET)の直下で発生し、様々な記録が得られた。間隙水圧の変化から、この地震に伴うゆっくり滑りと海溝軸近傍での低周波微動の発生とが観測された<sup>[4002]</sup>。圧力波形から、海底地殻変動や断層モデルを精度良く推定する事ができ、震源直上での津波観測網が津波の即時予測に有効であることが明らかになった<sup>[1005]</sup>。また、強震動\*を生成した領域を推定し、その領域内におけるこの地震の応力降下\*の値を調べたところ、東北沖で発生する同規模のプレート間地震よりは値が小さく、従って短周期の波が比較的弱いことがわかった<sup>[1903]</sup>(図6)。今後、海底観測記録等も活用し調査を続けることで、南海トラフで発生する巨大地震による地震動の予測を高精度化するための重要な知見が得られるものと期待される。

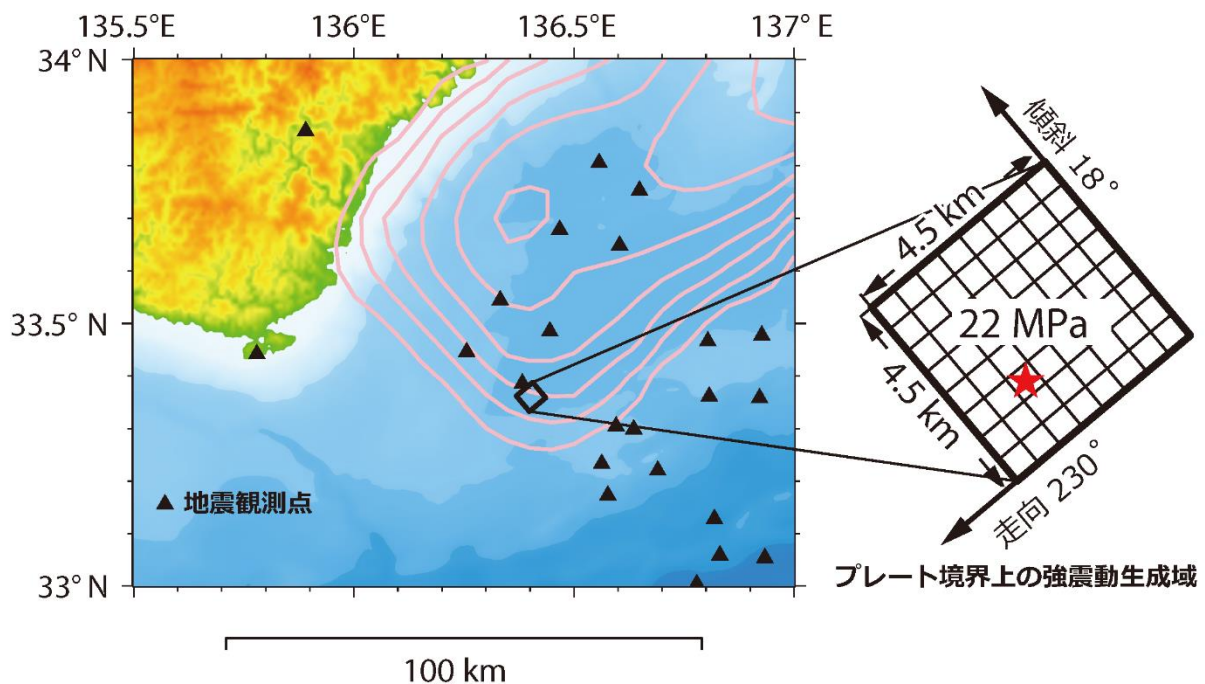


図6. 2016年4月1日三重県南東沖の地震(M6.5)の強震動生成域

海域及び陸域の地震観測点(左図)での強震波形記録を併用して求めた強震動生成域(右図)。4.5 km四方の強震動生成域に対して、浅い側(海溝軸側)から深い側(陸側)に向かう北向きに伝播する破壊様式が推定された。この域内での応力降下の値は22 MPaであった。左図中の桃色のコンターは、Kikuchi et al. (2003)による1944年東南海地震の滑り分布(0.5m間隔)。



数値実験によるシナリオを予測する研究も行われた。今回の地震と同程度の規模の地震と M8 クラスの巨大地震が、繰り返し起こる状況を計算機上で作り出して調べたところ、M6 程度の地震後、余効滑り\*がプレート境界の浅い側（海溝軸側）だけに伝播して収まる場合や、深い側（陸側）にも広がり数年後に M8 クラスの地震に発展する場合等が得られた<sup>[4002]</sup>（図 7）。2016 年 4 月 1 日三重県南東沖の地震の事象では、地震後の滑りが浅い側だけに伝播して収まっており、今のところは前者のシナリオで示された時間経過をたどっていると言える。必ずしも将来の現象予想を約束するものではないが、考えられるシナリオを認識しておくことは、防災上重要である。

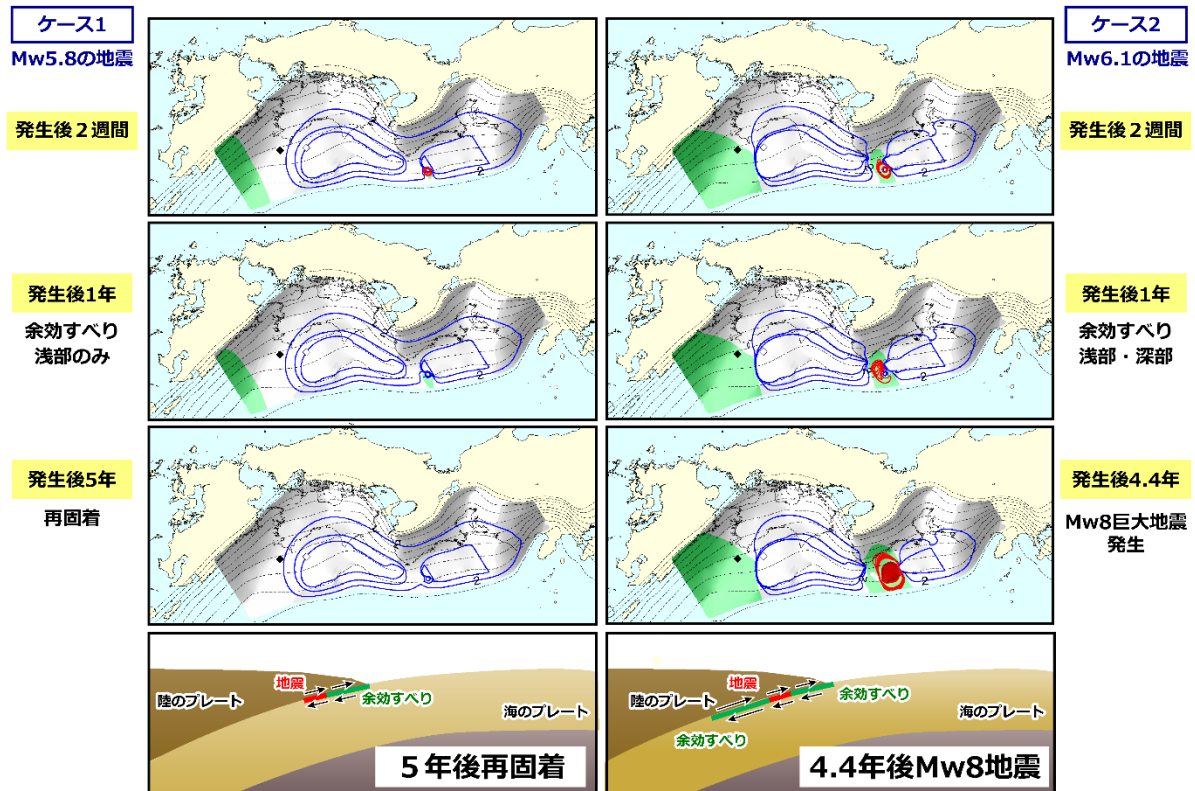


図 7. 地震発生シミュレーションにより検討した、2016 年三重県南東沖の地震による南海トラフ巨大地震への影響。白色、緑色、赤色となるにつれ、プレート境界での滑りが大きいことを示す。左図（ケース 1）：三重県南東沖の地震を模した地震によって余効滑りが浅部にのみ発生した後、再固着するケース。右図（ケース 2）：三重県南東沖の地震を模した地震によって余効滑りが浅部・深部ともに発生し、巨大地震につながるケース。

・その他

この他の研究として、過去の記録から指摘されているような、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、西南日本内陸における応力場の変化や内陸活断層に作用する応力を計算機上でモデル化することにより解明する試みが行われた<sup>[1907]</sup>。また、巨大地震のリスク評価の精度向上のための研究として、リスク評価の不確かさの要因を個別に検討し、これらの知見を統合したリスク評価およびその不確かさに関する検討が行われた<sup>[2975]</sup> (図8)。例えばリスク評価に対して影響の大きな、地盤増幅特性、地震動の距離減衰、時間経過に伴う人口や建物の変化の傾向分析が重点的に検討された。

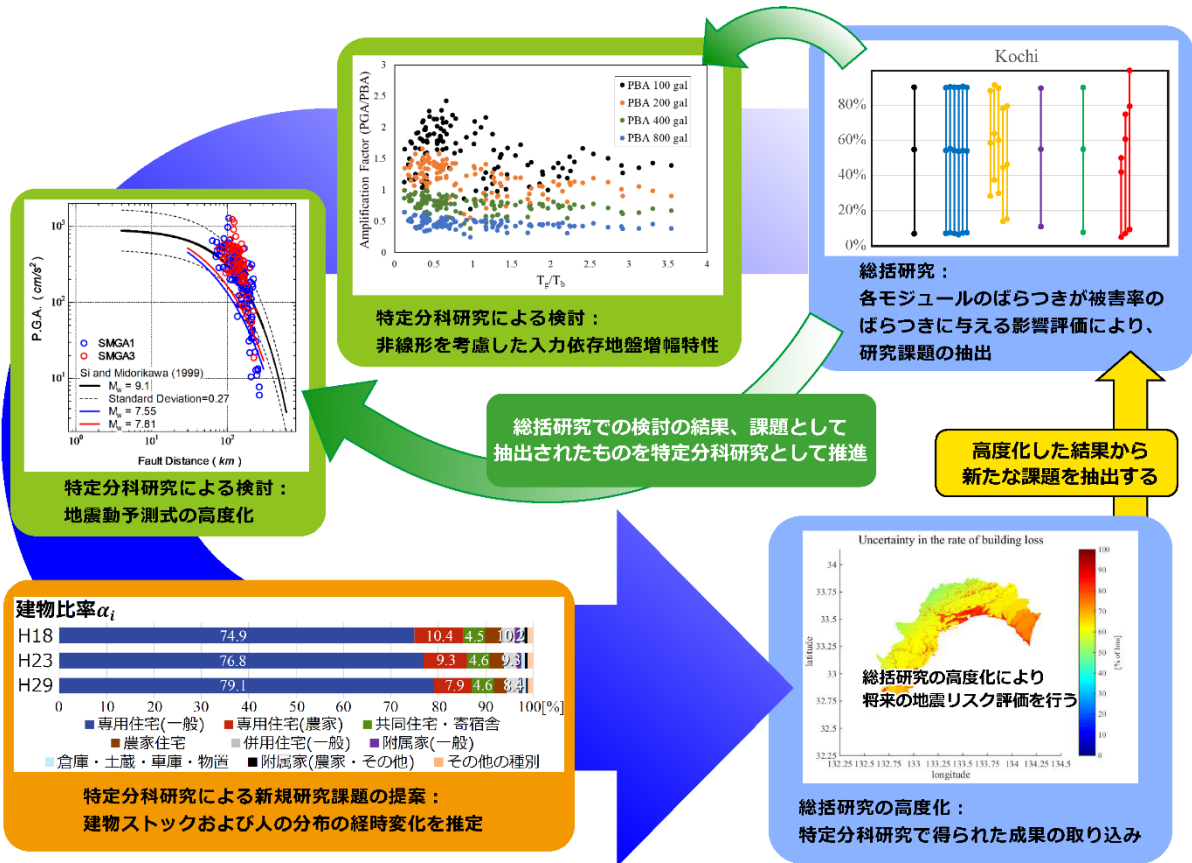


図8. 地震リスク評価およびその不確かさに関する検討の概要図

南海トラフ巨大地震による地震リスク評価の全体研究の結果から、各項目のばらつきが被害予測のばらつきに与える影響評価を行った。影響が大きい項目に関わる研究課題を深掘りして推進し、その結果に基づきリスク評価の高度化を行っていく。