

## 2 (1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

「日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象」計画推進部会長 松澤暢  
(東北大学大学院理学研究科)

地震・火山現象に関する予測システムを構築するためには、まず何よりも枠組みを明確にしなければならない。日本で地震や火山噴火が発生するのは、日本列島がプレート沈み込み帯に位置しているためであるが、プレート沈み込みによって地震・火山噴火が生じる機構は完全には解明されていない。その基本的な仕組みを解明し、長期的に見たときに日本列島はどのような場にあるのかを明らかにすることが、本研究計画の目標である。

具体的には、日本列島及びその周辺域で、長期的なプレート運動とそれに伴う応力場を明らかにし、上部マントルにおける水の供給・輸送過程とマグマの生成・上昇機構を明らかにして、これらの流体と地震発生との関係を解明することが重要である。このためには、マグマ等の地殻流体の分布を含む広域の地殻・上部マントル構造を明らかにし、また、地震活動と火山活動の相互作用に関する研究を推進する必要がある。さらに、地震現象の予測精度向上に不可欠な地震発生サイクルに関する理解を深めるために、アスペリティやセグメントの破壊様式についての過去の活動履歴を明らかにすると同時に、長期的な内陸の地殻歪の時空間分布を解明する必要がある。

このような観点から、本研究計画においては、下記の5項目について観測研究が実施されている。

- ア. 列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場
- イ. 上部マントルのマグマの発生場
- ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布
- エ. 地震活動と火山活動の相互作用
- オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

以下では、これらの項目順に従って、平成24年度(2012年度)の成果の概略について述べる。なお、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)の発生を受けた建策の見直しにより、超巨大地震に関わる新たな項目が立てられ、特に「オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ」からいくつかの課題が新たな項目に移動した。ここでは重複を避けるために、それらの移動した課題については触れないが、今後の展望については、超巨大地震に関する部分も述べることにする。

### ア. 列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場

日本列島およびその周辺域のプレート運動を理解するために、VLBI(超長基線電波干渉計)の国際・国内観測とアジア・太平洋地域でのGNSS連続観測(国土地理院[課題番号:6013])、およびSLR(衛星レーザー測距)国際共同観測(海上保安庁[課題番号:8005]、海上保安庁、2011)を実施した。VLBI観測により得られたデータを解析することで得られた日本列島及び周辺地域のプレート運動を図1に示す(国土地理院[課題番号:6013])。また、SLR観測により求められた下里の1997~2012年の期間の座標変化を図2に示す(海上保安庁[課題番号:8005])。

2011年東北地方太平洋沖地震はM9.0という巨大な地震であり、プレート運動を理解

するためにも、この地震がどのようにして生じたのかを理解することは重要である。

地震波形のインバージョン解析や地震前後のメカニズム解の変化等から、2011年東北地方太平洋沖地震では、プレート境界面上に蓄えられたほとんど全てのひずみが解放されたと考えられる（Hasegawa et al., 2011、深畑他, 2012）ため、応力降下量の見積もりなどから絶対応力レベルの推定が可能である。応力降下量の慎重な推定により、海溝から震源付近まで約 10MPa という値が得られた（図 3）。プレート境界面上ではほぼ全てのひずみを解放するには摩擦力を極端に下げる何らかのメカニズムが必要であり、摩擦発熱による間隙流体圧の上昇（thermal pressurization）の可能性も考えられる（Mitsui et al., 2012a, b）。またこの地震開始初期の 1 Hz GPS データから、最初の大きなモーメント解放が地震発生約 20 秒後から気象庁震源の約 35 km 西で始まったこと（Fukahata et al., 2012）、また、モーメント解放の立場で見ればそのピークは海溝寄りではなくむしろ震源付近であること（Chiba et al., 2012）をそれぞれ明らかにした（東京工業大学 [課題番号：1603]）。

この太平洋沖地震を理解するために、超巨大地震を伴う島弧のひずみ蓄積／解放過程について、東北日本弧と世界の他の沈み込み帯とを比較した（図 4）。東北日本弧においては、太平洋岸で急速な沈降が観測される一方で、第四紀後期の旧汀線高度は緩慢な隆起を示す。東北日本では幅広い固着領域の浅部のみが地震時に滑り、割れ残った深部固着域で余効滑りが起こると考えられる。このような深部固着は、他の超巨大地震発生帯には存在しない可能性が高い。日本海溝に沈み込んでいるプレートの年齢は極めて古く従って低温であるから、このように深い固着域が存在するのは熱的な原因によると考えられる（東京工業大学 [課題番号：1603]、池田ほか, 2012、Ikeda, 2012）。

次に、2011年東北地方太平洋沖地震の断層深部延長の余効的すべりと地殻・上部マントルの粘弾性的回復の両面から地震時の沈降及び地震発生以前の長期的な沈降を回復させるモデルについて検討した。地震後約 7 か月間の余効すべりを推定した結果をもとに断層面を 9 枚の短冊状の長方形で近似し、上述の仮説の通り、120km まで余効滑りが進んだ場合の上下地殻変動の分布とプレート運動方向の上下変動プロファイルを図 5 に示す。深さ 120km まで約 3.5m の余効滑りを与えることにより、海岸線が地震時の沈降量の約 1 m を回復することができると考えられる。また、球対称粘弾性地球モデルを用いて粘弾性余効と地震時及び余効滑りの量をすべて考慮した場合、断層モデルの与え方によっては、約 1000 年とされる地震サイクルで上下変動量が微弱な隆起を示すという地形学的な証拠と整合性のある条件が存在することが示された（東京大学地震研究所 [課題番号：1410]）。

一方、西日本の広域の応力場の特徴を明らかにするため、香川西部-燧灘-高縄半島に発生する地震を詳細に調べ、正断層型の地震が高縄半島や燧灘西部に発生していることがこれまでに明らかになっていたが、本年度は燧灘東部の地震のメカニズム解を詳細に調べた。その結果、横ずれ型が最も多く、正断層型が最も少ないことがわかった。したがって、予察的結果ではあるものの、燧灘東部では正断層型の応力場が卓越している可能性が低いことが明らかになった（高知大学 [課題番号：2102]）。

## イ. 上部マントルとマグマの発生場

火山の噴火の源となるマグマはマントルウェッジ内で作られると考えられるが、メル

トを生じるためには  $H_2O$  が供給される必要があり、その大元は沈み込んだスラブに由来すると考えられる。

東北地方のスラブ内地震に見られる太平洋プレート上部境界での PS 変換波の走時を用いて地震波速度トモグラフィを行い、海洋性地殻の面的な P 波速度分布を調べた結果、図 6 に示すように、深さ 60-90km の範囲において、得られた P 波速度は、岩石学的モデルや室内実験から期待される速度よりも 10%程度遅いことが明らかになった。この結果は、前弧域では海洋性地殻が多量の水（自由水）を保持していることを強く示唆しており、また、速度構造から期待される水の分布域と地殻内地震分布とは非常に良い対応を示している（東北大学 [課題番号：1203]）。

近地および遠地地震の走時データを用いて、日本列島下における深さ 700km までの三次元 P 波速度構造を詳細に決定した結果、図 7 に示すように、九州下ではフィリピンプレートが深さ 430km まで沈み込んでいること、九州地方下のマントルウェッジには斜めの低速度域が明瞭に分布し、それは東シナ海下から火山フロント下まで連続的に存在することなどが明らかになった（東北大学 [課題番号：1203]）。

沈み込み帯における噴出するマグマ及び地殻物質は、マントルで製造されたマグマの分化した最終生成物である。その成因を解明するために、海洋性島弧（伊豆小笠原マリアナ弧）において、無人探査機を用いて調査を行った結果、海底火山、及び火山島の海底斜面に、初生マグマを見出し、さらに記載岩石学的及び地球化学的分析・解析により、一つの火山に二種の初生マグマが存在することを明らかにした（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]）。

一方、火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに基づき、テクトニックセッティングとスラブ流体の起源の関係性を明らかにした。特に中部地方に産出する火山岩について、流体量の制約と、数値シミュレーションを合わせて、太平洋プレートとフィリピン海プレートの二重のスラブ沈み込み帯でのマグマ生成過程の定量的モデル化に成功した（Nakamura and Iwamori, 2013）。その結果、中部地方の下では、ソースマントルが二重のスラブからもたらされた液相濃集元素に富むこと、かつ主にガーネット橄欖岩がソリダス近傍の低温で融解するために、アダカイトとよばれる高 Sr/Y 比を有する岩石を産出することが分かった（図 8）。従来、アダカイトはスラブ溶融を伴う高温沈み込み帯で産出するという定説があったが、中部日本のような極めて低温の場において、むしろそのようなマグマが生成されることが分かった。一方、中国地方の白亜紀花崗岩のジルコン年代及び同位体分析結果に基づき、スラブ溶融を伴う火成活動の機構に制約を与えつつある。これらの研究結果は、沈み込み帯の物質循環の多様性を、沈み込むスラブ、ウェッジ対流、テクトニックセッティングに関わる基本パラメータの組合せで再現できることを意味しており、一般化に成功しつつあると言える（東京工業大学 [課題番号：1603]）。

## ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

上記のようにマントルにスラブから供給された  $H_2O$  はやがて近くに達し、そこで地震発生の原因となっていると考えられるため、このような地殻流体の状態と分布を調べることは極めて重要である。このような流体の検知には比抵抗測定が有効であると考えられる。

濃尾地震断層周辺域について、2012年5月までのデータを用いて3次元インバージョンを行って推定された構造を図9に示す。図9bに示ように濃尾地震断層域直下の中部地殻は、 $1\text{k}\Omega\text{-m}$ を超える高比抵抗域と推定された。跡津川断層周辺域での構造研究の考察から、地震発生域は高地震波速度、高比抵抗であり、流体の存在を示すと考えられる低地震波速度、低比抵抗層がバリアとなって地震のサイズを決定するのではないかとの議論がなされたことを考慮すると、濃尾地震断層が走った南南東方向にバリアとなる流体存在域がなかったことが、濃尾地震がM8クラスの大地震になった一つの要因としてあげられるのかも知れない。ただし、流体の存否に関して、高比抵抗域は流体が孤立して存在する領域であるとも解釈できるため、上記の議論のためには地震波速度構造との対比による検討が必要である（東京大学地震研究所〔課題番号：1411〕）。

一方、図9cに示すように、福井-岐阜県境付近の上部マントル内に東西に連なる低比抵抗域が決定された。低比抵抗域は、図10の南北断面図に示されるように、100km以深の深部から立ち上るかのような形状を示していて、沈み込むスラブからの脱水によるものである可能性が高く、その流体の存在が、本研究エリアでは福井-岐阜県境を走る新潟-神戸ひずみ集中帯のひずみ集中に関わっている可能性がある。本ターゲットエリアではフィリピン海スラブはその撓曲のために40-60kmにその上面が決定されていて、明らかに低比抵抗域の最深部はその下部に位置している。このため、本地域での深部低比抵抗帯は、フィリピン海スラブの下に横たわる太平洋スラブからの脱水を示唆する。これは図8に示した火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに基づいて推定された中部地方下流体移動モデルと良く整合している（東京大学地震研究所〔課題番号：1411〕）。

これまで秋田県内で得られたMT法による観測データについて、TMモードとTEモードを併用してインバージョン解析を行い、新たな構造モデルを算出した。それぞれの測線についての解析結果を図11に示す。震源の位置と比抵抗の関係をみると、比抵抗の急変部で普段の地震活動が生じている傾向が明瞭になった（秋田大学〔課題番号：1301〕）。

蔵王火山および福島盆地西縁断層を含む地域で、これまで28観測点において広帯域MT観測を実施してきたが、今年度はこれらに加えて、このエリアの北東に隣接する長町利府断層の61観測点の既存データをコンパイルした。さらに6観測点の追加観測を行った。これらから、データの品質の良い全95観測点のデータを選び、インピーダンスの全成分を使った3次元解析を行った。この結果、長町利府断層の深部延長に低比抵抗ブロックが解析され、その北西縁の高比抵抗部で東北地方太平洋沖地震以降の誘発地震が多発している。地殻内流体の移動が誘発地震をトリガーしたと推定される（東京工業大学〔課題番号：1601〕）。

西南日本弧を横断する測線（鳥取西部・島根東部-広島-愛媛-高知西部）に関する地殻・マントル上部の比抵抗構造調査として、未測定エリアである広島東部から愛媛今治大三島に至る山陽から瀬戸内海地域で観測を行った。また、このエリアの電磁気ノイズ環境の調査状況を考慮して、山陰地方の島弧縦断方向の不均質構造の解明を充実させる調査研究も加えて実施した。その結果、鳥取県中西部の地震（2002年、Mj5.3）発生域でも山陰地方地震活動帯で確認された深部低比抵抗領域が連続して存在する可能性を示すデータが得られた（鳥取大学〔課題番号：2001〕）。

以上のように比抵抗測定から地殻流体の存在が推定されているが、それ以外に、地震

波の速度、減衰、散乱からも地殻流体の存在が推定されている。

北海道下において地震波減衰構造を求めた結果、複数の地質帯・地質境界との明確な対応が見られ、大きな低 Q 領域が日高主衝上断層の西側の深さ 0-70km で見いだされた。また、1970 年 M7.1 日高山脈南部地震の震源はこの低 Q 領域の東端に位置し、1982 年 M6.7 浦河沖地震の震源も低 Q 領域中で最も低い値を持つ領域に位置しているという特徴がある。さらに、地震波低速度異常域内部での特異な微小地震活動 (Kita et al., 2012) も、この最も低い値を持つ低 Q 領域に集中している。これらの結果は、内陸大地震や微小地震活動の発生が、流体や含水鉱物の空間分布と関係する可能性を示唆している (東北大学 [課題番号: 1204])。

「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」による稠密機動地震観測の記録を用いて P 波減衰構造を推定した。解析の結果、深さ 10km では越後平野、新潟県中越沖地震の余震域北西部、及び新潟県中越地震の余震域南部において、地震波速度の低速度域と調和的な高減衰(低 Q)領域が存在することが分かった。一方、新潟・長野県境から長野県北部にかけての信濃川に沿った活断層帯の北西側では、地震波速度については低速度であるものの、減衰構造でみると低減衰(高 Q)であることが分かった。より深部においては、全体的には低減衰(高 Q)領域の中に、局所的に火山に対応する高減衰(低 Q)領域の存在を確認することができた (防災科学技術研究所 [課題番号: 3009])。

遠地 P 波のトランスバース成分解析を Hi-net データに適用した結果、火山あるいは火山と断層域近傍の領域は、断層域のみのある地域よりも、統計的に短波長不均質強度がやや大きいことがわかった (Nishimura, 2012)。一方、北部伊豆小笠原弧において、多重前方散乱による見かけの振幅減衰を考慮し、S 波減衰の三次元構造を推定した結果、北部伊豆小笠原弧は前弧側で減衰が非常に弱く、火山下は周囲に比べ強い減衰を示すことがわかった。ランダム速度不均質と減衰因子を比較すると、北部伊豆小笠原弧の火山下の媒質は東北日本前弧側と類似し、東北日本の火山下は、不均質性と減衰が特に強い媒質といえることがわかった (東北大学 [課題番号: 1204])。

長野県西部地域において、10kHz サンプリングの地震観測データの特長を生かして、詳細な P 波速度 ( $V_p$ )、S 波速度 ( $V_s$ )、 $V_p/V_s$  構造を推定した結果を図 12 に示す。断層に直交する 2 つの断面における推定値が示されている。特徴的な領域について見てみると、Region A では地震活動が活発で、 $V_p$  が小、 $V_s$  は大、 $V_p/V_s$  は非常に小さくなっており、一方、Region C では地震活動がほとんど無く、 $V_p$  がやや大、 $V_s$  は普通、 $V_p/V_s$  はやや大となっている。地震活動は、地震波速度が遅いところでは少なく速いところが多い傾向があるが、 $V_p/V_s$  の方がより相関が良く、 $V_p/V_s$  の小さなところに震源が集中しているように見える (京都大学防災研究所 [課題番号: 1806])。

このことを定量的に検討するために、図 13 に、各グリッドの  $V_p/V_s$  値と地震数の関係を示した。図 13b に  $V_p/V_s$  値とその値をとるグリッドの数との関係を示したが、 $V_p/V_s$  が 1.75 以上の値をとるグリッド数は全体の半分近くある。一方、図 13a の  $V_p/V_s$  値毎の地震数の関係を見ると、 $V_p/V_s$  が 1.75 以上の値をとるグリッドでは地震はほとんど発生していないことがよく分かる。さらに個々の  $V_p/V_s$  の値のグリッドに発生する平均的地震個数をプロットした図 13c ではその傾向はさらに顕著で、 $V_p/V_s$  が 1.65 以下のグリッドは数少ないものの、そこに地震が集中して発生する傾向があることがわかる。このように、長野県西部地域においては、地震活動と  $V_p/V_s$  比の関係が非常に良いこと

が分かった（京都大学防災研究所〔課題番号：1806〕）。

長野県西部地域では、竹田・他(1999)によりクラックのない岩石本体の速度が求められており、ここで推定された速度はいずれも岩石本体の速度より小さいため、クラックとその中の流体の有無で解釈可能である。 $V_p/V_s$  の大きな領域では、薄いクラックを満たした水の効果により、非地震・非弾性変形が進行して、地震が起こりにくいものと推定される。このような非弾性変形が発生していれば、その周囲で応力集中を起こし、応力場が回転することが期待される。このことを、標準的な応力逆解析手法により検討した結果、やはり  $V_p/V_s$  の大きなグリッドの周囲で応力場が回転しているように見えるものの、残念ながら今のところ、その違いは 95%の信頼区間を越えて有意ではないことがわかった。今後、さらにデータを蓄積して、この関係が有意となるかどうかの検証を行うことが重要である（京都大学防災研究所〔課題番号：1806〕）。

2010年11月下旬から今年度の6月下旬にかけて展開した和歌山地域を横断する長さ約90kmの南北測線上の稠密地震計アレイデータの解析を行った。和歌山地域の地震活動は深さ10km以浅に位置し、地震発生層の下限が活動域の中心部では縁辺部に比べて浅くなる、上に凸状の形状を示すことが明らかになった。地震発生域の深部延長部には、顕著な低速度体が存在し、下部地殻全体が低速度を示す。この低速度体の分布と活発な非火山性地震の分布との間には、明瞭な空間的な対応関係が見られる。2009年度に地震発生域の南部で取得された比抵抗構造(Uyeshima et al., 2010)を参考にすると、この低速度体は地殻内の流体である可能性が高い（東京大学地震研究所〔課題番号：1412〕）。

2011年7月から2012年3月にかけて展開された、和歌山地域南部を東西方向に横断する稠密地震計アレイのデータを用いて地震波トモグラフィ解析をおこなった結果、やはり南北測線同様に、地震発生域直下に低速度体がイメージングされ、地殻流体の存在を示唆する。東部において地震発生層の下限が浅くなるが、それに応じて低速度層の上端も浅くなっており、地震発生域の深部延長部に存在する地殻流体が、非火山性地震の発生と密接な関連があると考えられる（東京大学地震研究所〔課題番号：1412〕）。

紀伊半島下のフィリピン海プレート内で発生したスラブ内地震の地震波動を、Hi-netで得られた地震記録波形の解析と数値シミュレーションによって調査した。3次元媒質中での波動場計算による理論記象と観測記録の結果、観測記録中のチャンネル波の振幅を説明するためには、海洋性地殻が低速度層であるだけでなく、地震波動場を効率的にトラップし、振幅を保持する何らかのメカニズムが必要であることが分かった（防災科学技術研究所〔課題番号：3009〕）。

地震波干渉法を用いて、東北日本弧のウェッジマントル内部の反射・散乱構造のイメージングを行った結果、図14に示すように、反射的なウェッジマントルおよび透明な沈み込むスラブのイメージングに成功した。ウェッジマントル内部でも前弧側よりも火山フロント直下・背弧側で顕著な反射・散乱体の存在を示唆する結果が得られた。ウェッジマントル内部の反射・散乱体は地震波トモグラフィで得られたP波低速度体の周辺に分布する（東北大学〔課題番号：1204〕、Ito et al., 2012）。

ひずみ集中帯周辺域の地下構造を調査するため、佐渡島から猪苗代湖周辺に展開した直線アレイの観測データを用いたレシーバ関数解析を行った。その結果、佐渡島の深さ25km付近、越後山脈の下35km付近にモホ面と思われる変換面の存在を確認した。また、

越後山脈周辺の下部地殻は地震波速度が南北方向により速く伝わる異方性構造を示すことが分かった（防災科学技術研究所〔課題番号：3009〕）。

西南日本のP波方位異方性構造を推定した結果、図15に示すように、九州地方下の背弧マントルウェッジの異方性は海溝軸に直交するのに対し、前弧マントルウェッジの異方性は海溝軸に平行であるという、東北日本弧の同様の性質を示すことが明らかになった（東北大学〔課題番号：1204〕）。

## エ。地震活動と火山活動の相互作用

九州中南部地域下におけるマグマの生成に関するモデルを構築するためには、フィリピン海プレートからの脱水やマントルウェッジ内の流体の挙動を解明する必要がある。

霧島山周辺で新燃岳モニタリング用に行われている臨時観測点とHi-netの定常観測点を含めて、宮崎市から阿久根市まで九州南部を横断する稠密リニアアレイを構築し、暫定的なレシーバ関数イメージを得た（図16）。西北西に傾き下がるフィリピン海スラブ内の海洋モホ面を深さ120 kmまで確認することができる。ただし、深さ70 kmくらいからレシーバ関数イメージから読み取れる海洋モホ面と黒丸で示される深発地震面との間に開きが生じるが、これは水平成層構造を用いたイメージングによるバイアスであり、今後補正する必要がある。大陸モホ面は、測線の中～西部では深さ30～35 kmにみられるが、東部のウェッジ域では不明瞭である。これは、ウェッジ部がスラブ起源流体の影響で低速度化し、モホ面が高速度層上面ではなくなっているためと考えられる。宮崎市付近の深さ40 kmのプレート境界面は安定すべり域である可能性が高い（京都大学防災研究所〔課題番号：1805〕）。

九州地域でのNetwork-MT法観測によるデータをもとにした広域比抵抗構造の2次元解析結果を図17に示す。3次元比抵抗構造解析により、得られたモデルの妥当性に関して検討を加えた結果、火山フロントの主要火山の地下には、背弧側深部から沈み込むプレートの上面に沿うように浅部までに至る低比抵抗異常域が不連続に存在していることが明らかになった。一方、沈み込むプレートを含め火山フロントより前弧域は、概ね高比抵抗であるが、逆に、非火山地域では、前弧域のプレート上面から浅部にわたり、火山地域と比較して低比抵抗値を示しているがわかった（京都大学防災研究所〔課題番号：1805〕）。

別府-島原地溝帯を中心として、九州地域のひずみ速度分布、応力分布、地震発生層の厚さ分布を従来よりも高い精度で明らかにし、平均的間隙水圧分布を推定した。別府地域に大きなひずみが集中しており、そこでは微小地震活動が高いことが明らかになった。この地域は地震発生層の厚さが他の地域と比べて薄く、このためにひずみ速度が大きくなることが示された。この結果は応力比の空間変化からも支持され、ひずみ集中メカニズムに関して重要な知見が得られた。さらに、間隙水圧は別府-島原地溝帯西部で比較的lowく、断層地域では高い結果が得られるなど、地震発生特性との関連が示唆された（九州大学〔課題番号：2201〕）。

一方、地殻構造に関しては、平成23年度に実施された制御震源地震探査のP波初動データを用いて、トモグラフィ解析により高精度の地震波速度構造断面が得られた（図18）。速度構造には顕著な水平方向の速度不均質が見られ、臼杵-八代構造線を境にして、南側の付加帯が存在する領域よりも北側の火山岩類や火砕流堆積物が見られる領域

で、低速度領域が厚くなる特徴を示す。特に、別府-万年山断層帯の下部は深部まで低速度領域が延びている（九州大学〔課題番号：2201〕）。

また、レシーバ関数解析の結果では、図 19 に示すように、布田川・日奈久断層に平行な帯状の領域でモホ面が周囲よりも浅部に存在することがわかった。この帯状の領域は、一方の境界が布田川・日奈久断層であり、別府-島原地溝がこの領域内に存在する。この領域の内側では外側に比べてモホ面の深度が 5-10km 浅い。多田(1993)は、島原半島を南北に横切る測線上で観測された重力値をもとに、島原半島を中心とする幅 50km の領域でモホ面が最大で 10km 上昇していると推定しており、今回の解析結果はそのフォワードモデリングと調和的である。この帯状の領域の直下では、マントルの上昇流が存在する可能性がある。ただし、レシーバ関数解析によるモホ面深度の特徴は、別府-島原地溝帯の東部（別府地域）における地震発生層の厚さや応力・ひずみ分布とは調和的であるが、地溝帯西部とは必ずしも整合的ではないように見えるため、今後更なる検討と総合モデルの構築が必要である（九州大学〔課題番号：2201〕）。

上記のような広域の構造に加えて、火山周辺の詳細な構造探査と、火山活動の推移と地震等の地殻活動の関係を調べる研究も実施された。

富士山直下の比抵抗構造を調べるために設置された広帯域 MT 探査と AMT 探査の観測点の分布を図 20 に示す。今年度は、太平洋沖地震の直後の 2011 年 3 月 15 日に富士山直下で発生した M6.4 の地震の震源域を通る北西 - 南東方向の測線（図 20 の白点線）に沿った断面での比抵抗構造を二次元解析（図 21 左）と三次元解析（図 21 右）から推定した。得られた構造では、両者とも 2011 年 3 月 15 日の地震とその余震の震源域が低比抵抗となる結果が得られているが、この結果の有意性については、今後、更に検討する必要がある（東京大学地震研究所〔課題番号：1413〕）。

東海地震と連動した富士山の噴火可能性評価のため、富士山地下周辺の静的な応力変化に加え、粘弾性を考慮した準静的応力変化の検討を行なった。粘弾性による影響は、震源域では 100 年で約 77% 程度に緩和されるのに対し、富士山下マグマだまりの境界付近では 7% 程度の増加があることがわかった。また、火道内における気液二相マグマの上昇過程の数値的・解析的研究を実施した。特に非爆発的噴火から爆発的噴火への遷移過程を再現する時間発展モデルを開発し、地球物理学的観測データとの比較が可能な、火道内圧力変動プロセスなどの数値シミュレーションを引き続き実施した（防災科学技術研究所〔課題番号：3010〕）。

伊豆大島において、ハイブリッド重力測定（絶対重力観測点を基準として相対重力測定から絶対重力値を推定）を 2012 年 10 月に実施した。2009 年 6 月に実施した同様の測定の結果と比較して得られた重力変化を図 22 に示す。特徴として、(a) 中央火口近傍の重力増加（+10~+30  $\mu$  gal）、及び (b) カルデラ内北東部の重力減少（-10~-40  $\mu$  gal）を確認した。特徴 (a) については、火口近傍の 1km 程度の狭い範囲では、5~6cm の沈降が生じていることが、国土地理院の水準測量（2008 年 10 月~2012 年 10 月）で明らかになっている。そのため重力にもフリーエア効果だけで 20  $\mu$  gal 程度の増加が期待され、観測された 10~30  $\mu$  gal 程度の増加と概ね整合している。特徴 (b) については、島全体の北東上がり（南西下がり）の傾動が引き続き生じていることが、水準測量で明らかになっており、これにより、北東部の重力減少の一部（10  $\mu$  gal 程度）は説明可能であるが、それでもなお説明しきれない重力減少（20  $\mu$  gal 程度）が残る。地下水起源の擾乱が、こ

の重力減少に含まれている可能性もある。図 22 の重力変化と、国土地理院の水準測量結果および GNSS の F3 解をデータとして、変動のソースモデルを計算した。変動源としては、島の中央付近のやや深部（5km 程度）の膨張源と、極浅部（1km 程度）の収縮源とを想定し、それぞれを Mogi Source として扱った。その結果、2008/2009 年から 2012 年までの 3～4 年間に、浅部では 90 万 m<sup>3</sup> の収縮、深部では 800 万 m<sup>3</sup> の膨張が生じていることがわかった。深部へのマグマ蓄積量は、重力変動が小さいため、確定することができなかった（東京大学地震研究所〔課題番号：1413〕）。

2007 年～2011 年の期間における ALOS/PALSAR データ及び解析ソフトウェア StaMPS を用いた PS-InSAR 時系列解析を桜島火山に適用した結果を図 23 に示す。これまでノイズが少ないと思われる InSAR 解析結果にスタッキングを行うことで桜島北部における地盤の隆起が面的に検出されていたが、これとほぼ同様な結果がより客観的な解析方法で検出された（京都大学防災研究所〔課題番号：1805〕）。

霧島(新燃岳)山の北西約 18km の伊佐観測点においては、2011 年 1 月 26 日からの噴火活動の推移に対し歪変動が捉えられたが、その後の解析で各噴火前に、噴火時の約 1/100 程度 ( $1.0 \times 10^{-9}$ ) で、数時間先行する山体膨張を示す先駆的変動が確認されている。

また、図 24 に示すように、2008 年 8 月の小規模な噴火の際にも、噴火時のステップ状の変化と、噴火の 6 約日前から山体膨張を示すひずみ変化が記録されていることが確認された（京都大学防災研究所〔課題番号：1805〕）。

## オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

超巨大地震に関わる課題は別項目に移動したため、ここでは主として内陸の活断層に関わる研究を行った。

越後平野東縁の笹神丘陵を横断する約 8km 区間で高分解能反射法地震探査を行い、共通反射点重合処理法により解析を行った。その結果、測線東部では基盤の花崗岩類を覆う堆積層が約 30 度の西傾斜で分布しており、月岡断層はこの反射面群と平行に位置し、層面すべりによって形成されていることがわかった。測線西部の 1.5km 以浅ではやや緩傾斜になるが、堆積層は同様に西傾斜を示す。一方、測線中央部から西部の深さ約 2.5 km 付近の領域では、やや凸型を示す反射面が卓越する。阿賀野川沿いの深部反射のイメージと合わせて検討すると、月岡断層は、越後山地西縁の東傾斜の逆断層である主要断層とともにウェッジスラストを形成していると推定される。従って、東傾斜の逆断層が震源断層として重要であり、二次的な断層である月岡断層よりも変位量が大きいものと推定される（東京大学地震研究所〔課題番号：1414〕）。

強震動予測の精度を高める要請の高い都市域周辺において活断層地形を新たに発見したことから、活断層の地質学的認定及び、累積変位量を明らかにするため、群馬県太田市龍舞において 5 本の群列ボーリング調査を行った（図 25）。群馬県東部農業事務所が収集したボーリングコアも含めた地形地質断面図を図 25 下に示す。である。断層下盤側にあたる既設 no.5 において YP（浅間板鼻黄色軽石）とみられるテフラが確認でき、この YP は過去のトレンチ調査で断層上盤側で認められ、今回のボーリング調査の No.1 と No.5 でも認められている。既設 no.5 と断層上盤側の YP の層位は、ともに砂～シルト層中の水中堆積であり、ほぼ同じ環境下に堆積している。一方、断層を挟む高低差は 2～

3 m あり、これは両地点間に YP 以降に断層変位があったことを強く示唆する。また、下部で認められた礫層は、下盤側では深さ 5 m（下盤側の水田の高さを 0 とする）ぐらいで一定しているのに対して、断層上盤側では、深さ 0 m であり、5 m 以上の変位が認められる。このことから、礫層は YP よりも多く断層変位を受けている可能性が高い。今後、さらにテフラ分析やコアの詳細な記載などを実施し、詳細な検討をすすめる予定である（名古屋大学〔課題番号：1704〕）。

糸魚川－静岡構造線活断層系中部の塩尻峠周辺には、北西－南東走向の左横ずれ断層が複数並走する（図 26 左）。最近の活動性が不確かな断層について、牛伏寺断層や岡谷断層などで報告されている活動時期との関係を検討するために、塩尻峠の南側に位置する岡谷市西山地点においてトレンチ調査を実施した（図 26）。2 条の断層の東側の活断層トレースに沿っては、下流側（東側）隆起のバルジ状の高まりが形成されており、その西側斜面の傾斜変換点付近を断層が通過するものと推定し、掘削をおこなった。トレンチに露出した地層には、壁面にはほぼ垂直に近い高角な活断層が数条認められた（図 26 右）。断層は腐植質土壌をくさび状に落ち込ませるように変形させ、それより上位の表土に覆われる。現在、年代測定を実施中であり、その結果にもとづき活動時期と回数を推定し、本断層と並走または延長上に位置する他の活断層で報告されている活動時期との関係について検討する予定である（名古屋大学〔課題番号：1704〕）。

### これまでの課題と今後の展望

2011 年東北地方太平洋沖地震は、100 年という地球物理学的知見では把握しきれない巨大な地震が発生しうることを如実に示した。本来、「長期・広域」の研究は、このような地震の解明も大きな目標であったはずであり、十分な解明がなされないうちに巨大な災害が生じてしまったことは極めて残念であるが、津波堆積物の解析により、過去の巨大な地震の概要が、2010 年にはかなり明らかになっていたことを忘れてはならない。これまで「長期・広域」の研究対象の時間的スケールとして、地震の数サイクルを考え、数百年程度のイメージしていたが、超巨大地震の再来間隔が数百年～千年程度と考えられるため、今後は数千年以上の活動履歴を調べる必要がある。これは地質学・地形学的調査に頼らざるを得ない。一方、研究対象の空間スケールとしては、プレートの相対運動を理解するために千 km～数千 km 程度を考えていたが、今後は地球規模を対象とし、他の沈み込み帯での超巨大地震の観測データと比較することが極めて重要となる。そのような「長期・広域」から「超長期・グローバル」への転換が今後必要である。

今回、M9 の地震を「想定外」としてしまったのは、（1）東北のような古いプレートが沈み込むところで M9 の地震が起こるはずがない、（2）海溝近くで巨大な歪エネルギーを蓄えられるはずがない、という二つの思い込みが主たる原因であった。またアスペリティ・モデルを単純化しすぎたことも問題であった。今後は、単純なモデルでかなりの部分が説明できても、必ず説明できない部分が残るのが地球物理学の世界であることを忘れないようにし、また、「大きな地震が起こりにくい」、ということが理論的に確かめられても「大きな地震が起こりえない」ということを証明したことにはならないことを忘れないように注意することが必要である。

上記のような誤った思い込みが生じた理由の一つが、海域のデータの不足にあったことは否めない。日本のような島弧に発生する地震の全体像を正しく把握するためには、

今後、海域の観測を充実させる必要がある。

一方、陸域についても、地震発生のサイクルは活断層の研究から推定されているにすぎず、同じ場所で繰り返し大地震が発生する理由については、いくつかの仮説はあるものの、その検証は不十分である。今後は、観測のみならず実験やシミュレーションの研究とも連携して、内陸の歪エネルギー蓄積・応力集中過程と強度低下過程を解明し、かつ定性的説明にとどまらず、定量的モデルを構築していくことが必要である。特に地殻流体との関係の解明が地震発生メカニズムの理解にも火山噴火のメカニズムの理解にも極めて重要である。

以下、各項目の課題と展望について述べる。

「ア．列島及び周辺域のプレート運動、広域応力場」については、海外との共同観測研究により、日本周辺のプレート運動は次第に明らかになってきている。また、東北地方太平洋沖地震の前に海岸が沈降し、また地震時にも沈降した理由について、説明はつけられている。しかし、この沈降がいつ、どのようにして解消されるのかは、まだ不明のままである。今後、プレート運動による島弧の変形について、三次元不均質や非弾性効果を入れたシミュレーションによって理解する必要がある、そのためには、海域も含めた広域の構造探査と、今回の地震の地殻応答の観測が極めて重要となっている。

「イ．上部マントルのマグマの発生場」については、スラブ内の岩石の脱水の状況や、マントルウェッジ内の流体の分布が、明らかになってきているのは大きな進歩である。特に、マントルウェッジは、火山の下とそれ以外で異なっていることが、地震波速度分布のみならず比抵抗分布からも見えつつある。今後、シミュレーションについても、二次元解析にとどまらず、三次元解析を進め、火山の下でのみマグマが上昇してくる理由について解明する必要がある。

「ウ．広域の地殻構造と地殻流体の分布」については、地殻流体や三次元不均質と地震発生との関係が次第に明らかになってきている。大地震は基本的に高速度・高比抵抗の場所で起こり、普段の地震活動は、高速度・高比抵抗領域の中ではあるが、低速度・低比抵抗領域の境界付近で発生しているように見える。これは、低速度・低比抵抗領域で非弾性変形が進み、そこに隣接している高速度・高比抵抗領域に応力が集中していると考えれば理解できる。さらに、今回、長野県西部の低  $V_p/V_s$  域に普段の地震活動が集中していることが明らかになった。この低  $V_p/V_s$  域は石英の濃集域である可能性が高いと考えられるが、その場合、このような領域が地殻深部にあれば、周囲よりも低速度となっていることに注意が必要である。また、流体の地震発生に及ぼす役割として、これまで間隙圧の上昇の効果が強調されてきたが、流体が非弾性変形を促進し、周囲に応力集中をもたらす効果についても、十分な検討が必要である。今後、上記のような観点から地殻内の地震発生について、より定量的なモデルを構築していく必要がある。

「エ．地震活動と火山活動の相互作用」については、フィリピン海プレート北端と九州を中心として、様々な観測研究が行われてきた。2011年東北地方太平洋沖地震のあと、各地の火山で地震活動が活発化した。地震直後の一時的な活発化は、地震波によって地下のシールが破れ、深部高圧流体が浅部に移動したためと考えれば理解できるが、このような超巨大地震が地下のマグマそのものに及ぼす影響は、時間をおいて現れる可能性があり、たとえばスマトラの例を見ても、貞観地震の例を見ても、今後、数十年は要注意である。逆に、これらの観測から、地震発生や火山噴火のメカニズムの理解が進む可

能性があり、地震活動と火山活動の相互作用に関する研究は今後も重要である。

「オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ」については、超巨大地震に関わる部分は別項目となったが、一回り小さな地震で周期的な活動が見られるものや、活断層で繰り返し発生する地震について、まだ十分に理解が深まったとは言えず、今後、そのような地震の理解が超巨大地震の理解にも繋がると期待される。その際に重要なことは、完全な固有地震モデルに執着しすぎないことである。実際の地震活動は、GR式に代表されるような、特徴的規模を持たない地震と、小繰り返し地震に代表されるような、決まった規模を示す地震の両極端の間にあると考えられる。すべての地震が完全にランダムに発生しているというのは間違っているが、一方、すべての地震が完全に規則的に起こっていると考えるのも間違いである。どこまで決定論的に予測が立てられるのか、今後、実験や物質科学、シミュレーション等の専門家と一緒に研究を進めていく必要がある。

## 成果リスト

- Chiba, K., Iio, Y. and Fukahata, Y., 2012. Detailed stress fields in the focal region of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake -Implication for the distribution of moment release-, *Earth Planets Space*, 64, 1157-1165.
- Duputel, Z., Rivera, L., Fukahata, Y. and Kanamori, H., 2012. Error estimations for seismic source inversions, *Geophys. J. Int.*, 190, 1243-1256.
- Fujita, E., T. Kozono, H. Ueda, Y. Kohno, S. Yoshioka, N. Toda, A. Kikuchi, Y. Ida, 2013, Stress field change around the Mount Fuji volcano magma system caused by the Tohoku megathrust earthquake, Japan, *Bull. Volcanol*, 75, 1-14.
- 深畑幸俊, 2012. 世紀の難問「地震予知」に挑む, 地震学の今を問う, 日本地震学会モノグラフ, No. 1, 76-80.
- 深畑幸俊, 2012. 世紀の難問「経度問題」とのアナロジーから地震予知の将来について考える, 京大防災研年報, 55B, 149-153.
- 深畑幸俊・八木勇治・三井雄太, 2012. 2011年東北地方太平洋沖地震による絶対歪みの解放: 遠地実体波インバージョン解析と動的摩擦弱化, 地質学雑誌, 118, (7), 396-409.
- Fukahata, Y., Yagi, Y. and Miyazaki, S., 2012. Constraints on early stage rupture process of the 2011 Tohoku-oki earthquake from 1 Hz GPS data, *Earth Planets Space*, 64, 1093-1099.
- Goldfinger, C., Y. Ikeda, R.S. Yeats, and J. Ren, 2013, Superquakes and supercycles, *Seism. Res. Lett.* 84, 24-32, doi: 10.1785/0220110135.
- 後藤秀昭, 2012, 数値標高モデルから作成した日本列島の地形アナグリフー解説と地図ー, 広島大学大学院文学研究科論集特輯号, 72.
- 後藤秀昭・杉戸信彦, 2012, 数値標高モデルのステレオ画像を用いた活断層地形判読, *E-journal GEO*, 7, 197-213.
- Hata, M., N. Oshiman, R. Yoshimura, Y. Tanaka, and M. Uyeshima, 2012, Fluid upwelling beneath arc volcanoes above the subducting Philippine Sea Plate: Evidence from regional electrical resistivity structure, *J. Geophys. Res.*, 117, B07203, doi:10.1029/2011JB009109.
- 畑真紀, 2013, Modeling of Large-Scale Electrical Resistivity Structure for Clarifying Arc Magmatism beneath Kyushu, Japan, 京都大学大学院理学研究科博士論文.
- Huang, Z., D. Zhao, 2013, Relocating the 2011 Tohoku-oki earthquakes (M 6.0-9.0). *Tectonophysics* 586, 1-11.
- Ikeda, Y., 2012, Long-term strain buildup in the northeast Japan arc-trench system and its implications for the gigantic subduction earthquake of March 11, 2011, In: *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan*, 238-253. <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/Text/201204246>.
- 池田安隆, 2012, 東北地方太平洋沖地震を地質学的時間スケールでみると何が見えるか? *milsil*, 5 (No. 5), 14-19, 国立科学博物館.
- 池田安隆, 2012, 下北半島沖の大陸棚外縁断層: 地下に横たわる巨大な断層を原発安全審査はど

- うあつかったのか, 科学, 82, 644-650.
- 池田安隆・岡田真介・田力正好, 2012, 東北日本島弧-海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大歪解放イベント, 地質学雑誌, 118, 294-312.
- Ito, Y., K. Shiomi, J. Nakajima, and R. Hino, 2012, Autocorrelation analysis of ambient noise in northeastern Japan subduction zone, *Tectonophysics*, 572-573, 38-46.
- 岩森光, 2012, 固体地球の構造: 地殻-マントル-コア, 宇宙と地球の科学事典, 朝倉書店, 230-231.
- 岩森光, 2012, 地殻熱流量と地球の熱源, 宇宙と地球の科学事典, 朝倉書店, 246, 2012.
- Iwamori, H., and T. Nakakuki, 2013, Fluid processes in subduction zones and water transport to the deep mantle, In: *Physics and Chemistry of the Deep Earth* (ed. S. Karato), in press.
- Iwamori, H., and H. Nakamura, 2012, East-west mantle geochemical hemispheres constrained from Independent Component Analysis of basalt isotopic compositions, *Geochem. J.* 46, e39-e46, 2012.
- 岩森光・中村仁美, 2012, 沈み込み帯での地殻流体の発生と移動のダイナミクス, 地学雑誌, 121, 118-127.
- 海上保安庁, 2012, 人工衛星レーザー測距観測(2010年), 海洋情報部観測報告衛星測地編, 25.
- 加藤愛太郎, 2013, 稠密地震波観測に基づく地震発生と地殻流体, 地球化学, 46, 191-203.
- 加藤照之, 2012, 沈降か隆起か—過去100年と過去10万年の矛盾する挙動—, *milsil*, Vol. 5, No. 5, 10-13.
- Kawabata, R., S. Kurihara, K. Kokado, Y. Fukuzaki, J. Kuroda, M. Ishihara, Y. Mukai and T. Nishikawa, 2012, Tsukuba 32-m VLBI Station, *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*, NASA/TP-2012-217505, 111-114.
- Kaya, T., T. Kasaya, S.B. Tank, Y. Ogawa, M.K. Tuncer, N. Oshiman, Y. Honkura, M. Matsushima, 2013, Electrical Characterization of the North Anatolian Fault Zone in the Marmara Sea, Turkey by Ocean Bottom Electromagnetic Method, *Geophy. J. Int.*, in press.
- Kita, S., A. Hasegawa, J. Nakajima, T. Okada, T. Matsuzawa and K. Katsumata, 2012, High-resolution seismic velocity structure beneath the Hokkaido corner, northern Japan: Arc-arc collision and origins of the 1970 M 6.7 Hidaka and 1982 M 7.1 Urakawa-oki earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 117, B12301, doi:10.1029/2012JB009356.
- Kokado, K., S. Kurihara, R. Kawabata, K. Nozawa, 2012, Tsukuba VLBI Correlator, *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*, NASA/TP-2012-217505, 165-168.
- Kokado, K., S. Kurihara, R. Kawabata, K. Nozawa, 2012, Tsukuba VLBI Analysis Center, *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report*, NASA/TP-2012-217505, 264-267.
- Kurihara, S., and D. MacMillan, 2012, The Tohoku Earthquake: One Year After, *IVS Newsletter*, Issue 32, 6.
- Liu, X., D. Zhao, S. Li, 2013, Seismic imaging of the Southwest Japan arc from the Nankai trough to the Japan Sea. *Phys. Earth Planet. Inter.* 216, 59-73.
- Mitsui, Y., Y. Iio, and Y. Fukahata, 2012. A scenario for the generation process of the

- 2011 Tohoku earthquake based on dynamic rupture simulation: role of stress concentration and thermal fluid, *Earth Planets Space*, 64, 1177-1187, 2012.
- Mitsui, Y., N. Kato, Y. Fukahata, and K. Hirahara, 2012. Megaquake cycle at the Tohoku subduction zone with thermal fluid pressurization near the surface, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 325-326, 21-26.
- 中村仁美・岩森光, 2012, 沈み込み帯の物質循環とスラブ流体, *宇宙と地球の科学事典*, 朝倉書店, 228-229.
- Nakamura, H., and H. Iwamori, 2013, Generation of adakites in a cold subduction zone due to double subducting plates, *Contrib. Mineral. Petrol.*, 165, 1107-1134, doi:10.1007/s00410-013-0850-0.
- Nakamura, Y., J. Muto, H. Nagahama, I. Shimizu, T. Miura, and I. Arakawa, 2012, Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L21303, doi:10.1029/2012GL053228.
- Nichols, A. R. L., R. J. Wysoczanski, K. Tani, Y. Tamura, J. A. Baker, Y. Tatsumi, 2012, Melt inclusions reveal geochemical cross-arc variations and diversity within magma chambers feeding the Higashi-Izu Monogenetic Volcano Field, Izu Peninsula, Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13, doi:10.1029/2012GC004222.
- Nishimura, T., 2012, Heterogeneity of the Japanese islands as inferred from transverse component analyses of teleseismic P-waves observed at a seismic station network, *Hi-net Earth Planets Space*, 64, e25-e28.
- Noda, A., C. Hashimoto, Y. Fukahata, and M. Matsu'ura, 2013. Interseismic GPS strain data inversion to estimate slip-deficit rates at plate interfaces: Application to the Kanto region, central Japan, *Geophys. J. Int.*, doi:10.1093/gji/ggs129.
- Noguchi, N., A. Abduriyim, I. Shimizu, N. Kamegata, S. Odake, and H. Kagi, 2013, Imaging of internal stress around a mineral inclusion in a sapphire crystal: Application of micro-Raman and photoluminescence spectroscopy, *Journal of Raman Spectroscopy*, 44, 147-154, doi:10.1002/jrs.4161. Published online at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jrs.4161/full>.
- 大見士朗・和田博夫・濱田勇樹, 2012, 飛騨山脈焼岳火山周辺における東北地方太平洋沖地震後の群発地震活動, *地震*, 65, 85-94.
- Okada, S., and Y. Ikeda, 2012, Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of Northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, B01404, doi: 10.1029/2011JB008355.
- Ozawa, T., and E. Fujita, 2013, Local deformations around volcanoes associated with the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 390-405, doi:10.1029/2011JB009129.
- Patro, P. K., M. Uyeshima and W. Siripunvaraporn, 2013, Three-dimensional inversion of magnetotelluric phase tensor data, *Geophys. J. Int.*, 192, 58-66.
- Saiga, A., Kato, A, E. Kurashimo, T. Iidaka, M. Okubo, N. Tsumura, T. Iwasaki, S. Sakai and N. Hirata, 2013, Anisotropic structures of oceanic slab and mantle wedge in a deep low-frequency tremor zone beneath the Kii peninsula, SW Japan, *J. Geophys. Res.*, in press.

- 澤田源一郎, 2013, 秋田県地域の最適2次元MT比抵抗モデルの確立および比抵抗構造と地震活動の関係, 秋田大学大学院工学資源学研究所地球資源学専攻博士前期課程修了論文.
- Shimizu, I., 2012, Steady-state grain size in dynamic recrystallization of minerals, In: "Recrystallization", edited by Krzysztof Sztwiertnia, InTech, ISBN 978-953-51-0122-2, pp. 371-386. Published online at <http://www.intechopen.com/articles/show/title/steady-state-grain-size-in-dynamic-recrystallization-of-minerals>.
- 塩崎一郎, 2012, 電気の流れやすさから山陰地方の地震発生場を探る (Webコンテンツ), サイエンスアカデミー, 鳥取大学.
- 鈴木啓・宮原伐折羅, 2012, アジア太平洋地域におけるGPS解析戦略の構築, 国土地理院時報, 123, 1-8.
- 高岡宏之・津村紀子・高橋福助・野崎謙二・加藤愛太郎・飯高隆・岩崎貴哉・酒井慎一・平田直・生田領野・國友孝洋・吉田康弘・勝俣・山岡耕春・渡辺俊樹・山崎文人・大久保慎人・鈴木貞臣, 2012, 東海地域下の三次元地震波減衰構造—微小地震スペクトルを用いた推定—, 地震, in press.
- 谷口薫・杉戸信彦・廣内大助・澤祥・渡辺満久・鈴木康弘, 2012, 糸魚川—静岡構造線活断層系中部, 茅野断層 (茅野市坂室) の変動地形の再検討, 活断層研究, 37, 17-28.
- 宇宙測地課, 2012, VLBI2010～国際VLBIの動向～, 全測連, 44, 19-21.
- Ueki, K., and H. Iwamori, Thermodynamic model for partial melting of peridotite by system energy minimization, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, doi:10.1029/2012GC004143, 2013.
- Wang, J., D. Zhao, 2012, P wave anisotropic tomography of the Nankai subduction zone in Southwest Japan. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 13, Q05017, doi:10.1029/2012GC004081.
- Wang, Z., W. Huang, D. Zhao, S. Pei, 2012, Mapping the Tohoku forearc: Implications for the mechanism of the 2011 East Japan earthquake (Mw 9.0). *Tectonophysics* 524, 147-154.
- Wei, W., J. Xu, D. Zhao, Y. Shi, 2012, East Asia mantle tomography: New insight into plate subduction and intraplate volcanism. *J. Asian Earth Sci.* 60, 88-103.
- Zhao, D., 2012, Tomography and dynamics of Western-Pacific subduction zones. *Monogr. Environ. Earth Planets* 1, 1-70.
- Zhao, D., Y. Yamamoto, T. Yanada, 2013, Global mantle heterogeneity and its influence on teleseismic regional tomography. *Gondwana Res.* 23, 595-616.