

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ひずみ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23年度(2011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)によって、特に「オ.地震発生サイクルと長期地殻ひずみ」におけるアスペリティやセグメントといった概念について見直しが迫られているが、上記では建議の概要に掲げられた本研究項目の目的をそのまま示した。これらの概念の問題点については本報告の最後で述べる。

ア. 列島及び周辺域のプレート運動，広域応力場

日本列島及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GPS連続観測(国土地理院[課題番号:6013])、及び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、伊豆小笠原諸島を含むGEONETデータの解析により、図2に示すように、伊豆弧がフィリピン海プレート本体とは独立の剛体的運動をしていることが明らかになった(Nishimura, 2011)。地質学的・地震学的研究から伊豆弧で背弧拡大が進行中であることが示されてきたが、本研究は測地学的に背弧拡大を実証したものであり、三宅島西方での背弧拡大速度は9 mm/年と推定される(国土地理院[課題番号:6013])。

また、モンゴル(東京大学地震研究所[課題番号:1410])やロシア(北海道大学[課題番号:1002])でGPS観測を実施した。ウラジオストック等のロシアのGPS観測点で2011年3月11日に発生した東

北地方太平洋沖地震の地震時の変動のみならず余効変動も観測された (Shestakov et al., 2011, 2012)。このことは、このような大陸でのプレート運動を考えるうえでも、太平洋プレートの挙動の影響は無視できないこと、また、余効変動の理解においては余効滑りのみならず粘弾性応答も重要な役割を果たしていることを示している。今回の地震及びその余効変動は長期広域の日本列島周辺のプレート運動を理解する上でも極めて重要であるため、今後も余効変動の観測とそのモデル化が極めて重要である (北海道大学 [課題番号: 1002])。

中央構造線付近の、地震のメカニズム解を元にした応力解析結果と活断層の関係を検討した。横ずれ断層として滑りやすいと判定されるものは、周防灘、岩国断層、長者ヶ原、逆断層的な断層上下変位が説明できる可能性が出てくるものとして、江畑断層、鮎喰川があり、正断層的な滑りで断層の上下変位が説明できるものは、岩国断層となる。解析範囲の西部の岩国に正断層型、東部の江畑、鮎喰川で逆断層型であることから、前弧域ブロックの回転による Transpression/Transtension モデル (Ikeda et al., 2009) などに整合的と言え、微小地震の示す応力場と活断層の示す滑りは統合的に理解できる可能性を示唆している (高知大学 [課題番号: 2102])。

イ. 上部マントルとマグマの発生場

東北地方の太平洋から日本海にかけての領域で、異方性トモグラフィーを行った結果、背弧側の深さ 150-200 km から火山フロントのモホ面直下まで連続的に分布する低速度域が明瞭にイメージングされ、そこでの異方性はほぼ東西であることが明らかになった (Huang, et al., 2011b)。東西の異方性は、マントル上昇流によるものであると解釈できる。更に中国大陸においても S 波異方性解析を行った結果、異方性の方向が現在のテクトニクスから期待される対流の方向と対応することが明らかになった (Huang et al., 2011a)。また、東北地方の S 波スプリッティングの周波数依存から、上部地殻、下部地殻、マントル、太平洋スラブには異なる方向の異方性が層構造をなしていることが明らかになった (Huang et al., 2011c)。日本列島、中国大陸東縁を含む北西太平洋地域の速度トモグラフィを行い、下部マントルまでの地震波速度構造を推定した結果、太平洋プレートが遷移層に停留している様子が明瞭にイメージングされ、更に直上のマントルウェッジには大規模なマントル上昇流が存在することが明らかになった (図 3, Zhao et al., 2011a, 2011c)。このようなマントル上昇流は大陸リソスフェアの薄化や大陸の火山の形成に大きな役割を果たしていると考えられる (東北大学 [課題番号: 1203])。

このマントルウェッジを主要ターゲットとして、東北地方の三次元 P 波減衰構造の推定を行った結果、背弧側のマントルウェッジに存在する斜めの地震波低速度域は高減衰を示すこと、その高減衰域は南北方向に不均質であり、活火山の直下では特に高減衰を示すことなどの、新たな知見が得られた。また、東北地方の太平洋プレート上面で発生した地震の波形から、プレート境界面での PS 変換波を同定し、到着時刻の読み取りを行った。読み取った PS 変換波の走時を用いて、海洋性地殻の P 波速度を見積もったところ、火山フロント付近を境に速度が大きく変化し、前弧側では 6.5km/s 程度、背弧側では 7.5km/s 程度の速度が得られた。この速度変化は、海洋性地殻内での脱水を伴う相転移と関係していると考えられる (東北大学 [課題番号: 1203])。

流体は化学反応を通して岩石の実効粘性を低下させ、流れ場・温度場、更には流体自身の分布を変える。沈み込むスラブから放出された流体はその直上 (マントルウェッジの底部) に厚さ数キロメートルの蛇紋岩層を形成し、スラブとウェッジの力学的カップリングを弱める。この効果を数値モデルを構築して再現した (図 4)。モデル計算の結果、沈み込む流体が蛇紋岩を形成⇒蛇紋岩が沈み込むスラブとマントルウェッジの力学的カップリングを弱める⇒スラブ沿いの温度が低下して更に流体の沈

み込みと蛇紋岩の形成が進むという正のフィードバックが起こり、「水和侵食」が起こることが分かった。一方、蛇紋岩層も脱水分解し、最終的にはマントルウェッジ全体に流体が上昇する。この時の流体の上昇様式は、上昇速度、流体と周囲の岩石との化学反応効率、ひいては火山の分布・噴出量・組成に影響を及ぼす。流体の上昇様式を流体力学的なスケーリング、地震波速度構造とフォワードモデルの再現、及び化学的スケーリング（クロマトグラフィー効果の評価）によって見積もったところ、マントルウェッジ内では水溶液とメルトが共存し、かつ浸透流とチャンネル流れも共存している可能性があることが分かった（岩森・中村，2012，東京工業大学 [課題番号：1603]）。

蛇紋岩は沈み込みプレート境界のカップリングを弱めると考えられているので、その摩擦挙動も重要である。100MPaの封圧と30MPaの間隙水圧、450度以上の高温での蛇紋石ガウジの摩擦実験では剪断面で脱水反応が促進され、変形モードが流動から固着-滑りに変わるとともに強度が上がるという挙動が確認された（東京工業大学 [課題番号：1603]，Takahashi et al.，2011）。またガス圧式変形試験機をもちいて蛇紋岩の脱水反応に伴う力学物性の変化を調べた結果、高封圧（800 MPa）で見られた脱水軟化現象とは異なり、封圧200 MPaでは脆性破壊がおこり、圧力によって反応の効果に変化が起きることが明らかになった（東京工業大学 [課題番号：1603]）。

S波の散乱波の解析により北部伊豆弧の火山フロント下の地殻及び上部マントルの不均質性があきらかになった（Takahashi et al.，2011）。この不均質は、主としてこの付近のマグマやその残余物に起因していると考えられ、岩石学的研究と整合的な結果である。フィリピン海プレートの年代学的研究（全岩のアルゴン-アルゴン法やジルコンを用いたウラン-鉛法）が進展し、伊豆小笠原マリアナ弧形成の最初期（～50Ma）に、島弧にそってほぼ同時期に特異な玄武岩（FAB: Fore Arc Basalt）が噴出したことが判明した（ani et al.，2011a, 2011b）。さらに、マリアナ弧の海底火山であるNW Rota-1の研究により一つの火山に2種の初生マグマが存在することが明らかになった（Tamura et al.，2011）。またそれぞれの初生マグマを形成するためにはマントルに水に富んだ堆積物のメルトを付加する必要があることがわかった。火山フロントの40 km背弧側に位置するNW Rota-1にこのようなメルトを供給する可能性の一つとして沈み込むスラブの蛇紋岩化したかんらん岩の脱水による堆積物の融解（フラッシュメルティング）が考えられる。この仮説は沈み込むスラブのかんらん岩層までがアウトターライズにおいて断層にそって海水が浸透し、蛇紋岩化されているという最近の地震学的研究と整合的である（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]）。

ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布

地殻流体に敏感と考えられる短波長の不均質を解明するためには、地震波の散乱の挙動を正しく把握する必要があるという観点から様々な研究を行った。短周期地震波の直達波近傍のエンベロープは、主にランダムな不均質速度構造による多重前方散乱によって、その時間幅を拡大し、最大振幅の着信は遅れる。今回、角度スペクトルの概念を導入することにより、はじめて速度構造が段階的に変化する場合取り扱うことに成功した（Emoto et al.，2012）。また、放物近似に基づいたモンテカルロシミュレーションによってダブルカップル型震源から輻射されたベクトル波動のエンベロープを導出する方法を新たに構築した（Sawazaki et al.，2011）。さらに、強い不均質場における波動伝播の数値モデリングを行い、自由表面におけるモード変換・実体波-表面波の変換散乱の定量化を行った。また、強い不均質性をもつ活火山と一般的な地殻の比較研究を行うために非火山地域においても小規模アレイ観測を実施し波動場のモード分離・エネルギー分配の定量化を行った。その結果、一般的な地殻構造では変換散乱係数は火山地域に比べ約1/50程度であることが明らかになった（東北大学 [課題番号：1204]）。

多数の観測点で観測された近地地震のエンベロープ解析からエネルギー密度の時空間分布を評価し、これを直接説明するような散乱係数、内部減衰、及び震源輻射エネルギーをS波多重等方散乱モデルに基づいて推定した。散乱係数が空間的に一様であることを仮定すれば、ある震源経過時間におけるエネルギー密度の空間分布は散乱係数のみに依存するため、観測記録から散乱係数を独立に推定することが可能である。近年発生した77個の浅発地震をこの手法で解析し、散乱係数は $0.002-0.02\text{km}^{-1}$ 、平均的には東北日本で大きく($0.007-0.01\text{km}^{-1}$)、西南日本で小さい($0.003-0.005\text{km}^{-1}$)ことが確認された(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、日本列島の地殻及びマントル浅部の短波長不均質強度の空間分布を明らかにした。その結果、第4紀火山及びその周辺、平野域などで短波長不均質性が強いこと、活断層域では必ずしも短波長不均質性が強くないことなどが明らかとなった。また、東北日本弧において、内部減衰の三次元構造を推定した結果、第四紀火山下は周囲に比べて高減衰を示すこと、東北弧とKuril弧の衝突帯付近に高減衰域が分布することを明らかにした(東北大学 [課題番号: 1204])。

この衝突帯付近に位置する日高地域下の詳細な地震波速度構造を求めると、マントル物質(橄欖岩に相当)が通常の内陸地殻領域(深さ35km以浅)まで深部から西に向かって貫入して、高速度層と低速度層が傾斜した互層構造を形成していることが明らかになった。これらの層の傾きはおよそ $40-60^\circ$ 程度であり、走行はほぼ南北となっている。これらの互層の境界は陸上の地質構造線もしくは活断層の空間分布とよく対応しているように見え、さらに、日高変成帯下の境界は1970年のM6.7日高山脈南部地震の断層面に、浦河沖下は1982年のM7.1浦河沖地震の本震断層面に対応しているように見える。2つの地震は、通常より深部で発生した内陸大地震であるが、本研究により既存の弱面(物質境界)を利用して発生していた可能性が高いことが示された(図5, 東北大学 [課題番号: 1204])。

1995年兵庫県南部地震、2007年能登半島沖地震、2008年岩手・宮城内陸震源域周辺の詳細な速度構造を推定したところ、いずれの地震についても震源域下の下部地殻に地震波低速度域が存在することが明らかになった(東北大学 [課題番号: 1204], Tong et al., 2011, Padhy et al., 2011)。また、常磐地域の詳細な三次元地震波速度構造を推定した結果、東北地方太平洋沖地震以降に活動が非常に活発化している茨城県北部からいわき市にかけての領域直下の下部地殻及び最上部マントルに低速度域が分布することが明らかになった。この低速度域は太平洋プレート内の含水鉱物の脱水により浅部に供給された水の分布と対応すると考えられ、常磐地域の地震活動は深部起源の流体の存在と密接に関係していることを強く示唆している(東北大学 [課題番号: 1204], Tong et al., 2012)。

防災科研F-netによるモーメントテンソル解を使った地震波速度構造インバージョンを行った結果、震源域直上に観測点が殆どない海域の構造のイメージングが可能となり、太平洋スラブ内の地震波速度の地域性が明らかとなった。特に、東北地方太平洋沖地震の震源は速度勾配が大きいところに位置しており、また、この地震の主破壊域はスラブ内の高速度域に、その西縁は低速度領域に一致していることも明らかとなった(防災科学技術研究所 [課題番号: 3009], Matsubara and Obara, 2011)。

平成23年3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生した後、平成23年4月1日に秋田県北部でM5.0の地震が深さ12kmで発生した。この秋田県北部での誘発地震の震源域付近でMT観測を行って得られた比抵抗東西断面を図6に示す。震源位置(★印)と比抵抗構造との対応を見ると、高比抵抗ブロックとそのすぐ下に低比抵抗部が見られ、これよりも深い部分に震源が位置する。このように比抵抗が急変する場所と震源域が近接していることが特徴として見られた(秋田大学 [課題番号: 1301])。

蔵王山を含む宮城県南部について、地殻上部から地殻下部にいたる比抵抗構造を3次元的に解明した。解析されたモデルでは、深度5kmの深度スライスでは地殻内が不均質であり、低比抵抗異常の周

辺部に地震の震源が分布することが分かった。また深度 15km の深度スライスでは南南西—北北東の 2 次元走向を持つ低比抵抗異常が長町利府断層の直下に沿って存在することが示された。この低比抵抗異常は高塩濃度流体であると思われる、この流体の存在によって、地殻内が変形しやすくなるとともに、流体だまりから上部地殻に流体が移動することによって地震を発生していると解釈される。このように火山帯に沿う下部地殻の低比抵抗と、前弧側の低比抵抗の存在が明らかになった（図 7，東京工業大学〔課題番号：1601〕）。

房総半島においては、中感度地震観測網（MeSO-net）による記録波形を用いて、直達 S 波と SP 変換波との走時差から変換面の形状を推定した。ここでは、表層部に「地震ハザードステーション」（Japan Seismic Hazard Information Station, J-SHIS）による深部地盤構造モデルを導入し、走時に大きな影響を与える堆積層の影響を適切に除去した。解析の結果、変換面は房総半島南東岸では北方向にゆるやかに傾斜するのに対して、半島中央では北西方向に急傾斜することが分かった（防災科学技術研究所〔課題番号：3009〕）。

臨時観測網による長野県西部地域における 1996-2007 年の震源分布を、4 つの期間で色分けして図 8 に示した。深さ 1-2km には緑（2000-2001 年）や赤（2002-2007 年）の震源はほとんど無く、2000 年以降に震源が深くなっていることが分かる。気象庁一元化カタログによる長期間の地震活動によれば、1993 年 4 月 23 日 M5.1 の頃から地震活動は活発化し、1995~2000 年頃に最も活発化した後、徐々に減衰しているように見える。一方、温泉水の同位対比の測定により、1995 年頃から 2000 年にかけて、群発地震の発生域内にある温泉からのサンプルにおいてマントル起源の流体の割合が増加していることが報告されている（Takahata et al., 2003）。これらのことは、1990 年代に入って、マントルからの流体の上昇が活発化しその後半には地表まで達したこと、それに伴って地震活動も活発化した可能性を示唆している。そこで、1995 年~2005 年の期間において、関口・他（2004）の手法を用いて、各グリッドにおいて速度が線形に変化すると仮定して 4 次元インバージョンを行った。予察的な結果ではあるが深さ 2km において速度増加が推定されており、このことは、水が徐々に上方へ抜けていることを示唆しているのかも知れない（京都大学防災研究所〔課題番号：1806〕）。

日本において過去最大級の内陸地震となった 1891 年濃尾地震断層帯を取り囲む領域で、2011 年 3 月末よりネットワーク MT 観測を開始し、現在も観測を継続している。観測点配置を図 9 に示す。磁場変動に対する各エリア各チャンネルの地電位差の周波数応答関数（ネットワーク MT 応答関数）の推定を試みたが、福井県内から岐阜県の中北部にかけては概ね良好な応答関数が推定できたものの、岐阜県南西部では、直流電化路線からの漏れ電流や集落からのノイズの影響を受け、十分な品質の応答関数がまだ得られていないため、更なるデータの蓄積が必要となっている（東京大学地震研究所〔課題番号：1411〕）。

非火山性群発地震活動が最も活発な和歌山地域を横断する長さ約 90km の南北測線上に、計 86 点からなる稠密地震計アレイを 2010 年 11 月下旬から今年度の 6 月下旬まで展開した。これらの波形記録を用いて、自然地震を用いたトモグラフィー解析とレーザー関数解析の予備的解析をおこなった。得られた速度構造を図 10 に示す。和歌山地域の地震活動は深さ 10 km 以浅に位置し、上に凸状の形状を示す。群発地震発生域の深部には、顕著な低速度体が存在（図 10 の Low-V1）しており、昨年度取得された比抵抗構造を参考にすると、この低速度体は地殻内の流体である可能性が高い。紀伊半島南部の前弧域の中部~下部地殻でも、沈み込むスラブから解放された流体と考えられる低速度体がイメージされた（図 10 の Low-V2）。さらに、フィリピン海プレートの海洋性地殻が低速度層として明瞭にイメージされ、和歌山地域の深部（深さ 45-55 km）で、高速度層へ変化する。これは海洋性地殻内の玄武岩が脱水変成作用によりエクログナイト化していることを意味する。また、低周波地震・

微動域の海洋性地殻内は低速度・高ポアソン比で特徴づけられ（図 10 の Low-V3）、東海・四国西部で見られている特徴と一致する（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にみられる後続波を調査した。

Hi-net 観測網で得られた地震波形と数値シミュレーションから、海洋性マンツルの地震でもチャンネル波が観測されること、既往の研究ではほとんど報告事例のなかった、深さ 60km 以深の地震でもチャンネル波が観測されることが明らかになった。これらのチャンネル波から、奈良・三重県境付近では、低速度層としての海洋性地殻が存在していることが推定できたほか、深さ 60km 以深の地震の発生層が海洋性地殻と海洋性マンツルの両層であることなどが明らかになった（防災科学技術研究所 [課題番号：3009]、Miyoshi et al., 2012）。

レシーバ関数解析における地震波速度不連続面における P 波から S 波への変換効率の空間分布を調べるために、地震波の到来方向や入射角の影響を低減させる方法を検討した。この方法を紀伊半島内の観測点に適用した結果、フィリピン海スラブ内のモホ面の変換効率は深くなるにつれて単調減少し、深さ 43km 付近以深でほぼ一定となることを見出した。この変換効率の変化は、海洋地殻の脱水を伴う相転移を反映していると考えられる（防災科学技術研究所 [課題番号：3009]）。

中国地方東部と四国地方東部で行われた広帯域 MT 観測による 2 次元比抵抗構造断面に佐藤ほか（2005）や Ito et al. (2009) の求めた詳細な地震反射波断面を重ねて図 11 に示す。いずれの地域でも比抵抗構造と反射法探査により示された反射断面と地質構造解釈との間に明瞭な対応関係がみられる。すなわち、比抵抗構造にみられる中央構造線の北傾斜は反射断面の北傾斜と調和的であり、深さ 20km 以浅のパッチ状の比抵抗構造は付加体内部の構造と関連がみられ、深さ 20km からスラブ内地震発生領域までの 100 Ω m 前後の値を持つ領域は海洋地殻（デュープレックスから Layer3）に、またスラブ内地震発生領域以下の高比抵抗領域は海洋マンツルに関連づけられること等が分かった（鳥取大学 [課題番号：2001]）

南九州下に沈み込むフィリピン海スラブのように傾斜角と深さが大きい不連続面を正しくイメージングする手法（Abe et al., 2011a）を定常観測点のデータに適用して、南九州の複数の断面におけるレシーバ関数イメージを求めた。その結果、深さ 90km 以深では、稍深発地震沿う部分において海洋モホ面に対応するイメージが見られなくなることがわかった。これは、海洋地殻がもはや低速度でないことを意味し、海洋地殻に含まれていた「水」はこの深さまでにはほぼ脱水してしまうことを示唆する結果である（京都大学防災研究所 [課題番号：1805]）。

九州地域で 1993～1998 年の期間に実施された Network-MT 法観測によるデータをもとに 3 次元比抵抗モデルを推定した。過去に実施していた 2 次元比抵抗構造解析で得られた同様に、火山帯の下部に背弧側深部から連なる低比抵抗領域が存在し、沈み込むフィリピン海プレートは高抵抗であるという結果が得られた。前者の低比抵抗領域は、沈み込んだプレートから放出された流体、及びそれによって引き起こされた部分溶融（メルト）に起因すると考えられる。つまり、本研究の結果は、背弧側から火山フロントへの水循環 - マグマ供給モデルを支持するものとなっている（京都大学防災研究所 [課題番号：1805]）。

微小地震の発震機構解をもちいて応力テンソルインバージョンを行い、九州内陸部における主応力の方向と応力比の分布を明らかにした。断層の破壊はクーロン・ナビエの破壊基準によると仮定し、地殻の強度を低下させる間隙水圧の空間分布について検討した。本研究では Terakawa et al. (2010) の方法を用い、ある応力場の中での発震機構解の違いが間隙水圧の変化であると見なして、間隙水圧を推定した。その結果、平均間隙水圧は、別府-島原地溝帯で小さく、福岡西方沖地震や日奈久断層周辺では大きくなっていることが示された（図 12）。このことは、活断層地域では高間隙水圧であるこ

とを示唆している。一方、別府-島原地溝帯では、応力比が大きく（すなわち最大主応力が小さく）、断層面に作用する法線応力が小さいため、相対的に強度が低下し、低い間隙水圧で破壊している可能性がある（九州大学 [課題番号：2201]）。

エ. 地震活動と火山活動の相互作用

2009年に実施した伊豆大島及び周辺海域の構造探査実験の解析により、伊豆大島近傍の深さ約12 kmまでの地震波速度構造を推定した（図13）。その結果、図中のP波速度6.8 km/s層の上端の深さとその速度の絶対値が初めて明らかになった。この上部地殻と下部地殻の境界面と思われるP波速度6.8 km/sの層の上端が、火口下で盛り上がっていることは、火山の根が下部地殻までであることを示す重大な成果である。さらに、これまで観測された山体膨張、収縮の圧力源（図13の☆印）は、P波速度5.5~6.0 km/sの層内に限られていることが明らかになった。これは、マグマが深部から浮力により上昇し、浮力中立となるこの層に留まることを示している。1986年噴火の割れ目噴火の際に、震源が北西、南東方向に直線状に広がったが、その震源の深さは、4~10 kmであり、この層内にダイクが貫入して北西-南東方向に広がったと考えられる。基本的には、地震はマグマ貫入の起こるP波速度5.5~6.0 km/sの層内に発生するが、マグマ貫入域近傍では高温であるため脆性破壊が起こらない。マグマ貫入域から少し離れた伊豆大島沿岸西方・北方沖のこの層内で地震は発生している（図13の青丸）。一般に浅部では媒質の性質から地震活動度が低く、地震は発生しないが、マグマ貫入場所直上のカルデラ内はマグマ貫入によるひずみが極めて大きいので、例外的にカルデラ内で発生する（図13の赤丸）。沿岸部の地震はバースト的に発生するのに対して、カルデラ内の地震は比較的定常的に発生し、マグマ貫入によるひずみ量に比例して活動度がゆっくり変化する。沿岸部の地震とカルデラ内地震の活動パターンの違いもこれにより説明でき、更に上記以外の過去のフィリピン海北縁の火山活動も、マグマの動きが浮力中立というメカニズムで、構造に強く影響を受けているという点で共通であると考えられる（東京大学地震研究所 [課題番号：1413]）。

これまでの研究で、伊豆大島では約3年間隔でカルデラ北部の地下約5 kmの場所に間欠的にマグマが蓄積され、この時にカルデラ内と伊豆大島西部沿岸の数か所で地震活動が活発になることを明らかになっている。この活動のほかにも、伊豆大島の海岸線から沖合にかけての数か所で、マグマ蓄積期に群発的な地震活動が見られる。この活動はバースト的であり、ひとつの活動は1日から1週間程度続く。震源はほぼ鉛直の面上に分布し、発震機構解の節面は地震の分布面にほぼ一致することから、全体として1つの横ずれ断層面で地震が発生し、その地震によって隣で地震が発生するという様式の活動を行っていると考えられる。一つ一つの断層面に注目して、マグマ貫入の際に断層面に加わるクーロン応力の変化を計算した結果、それぞれの断層面で、前回の活動からほぼ同程度のクーロン応力の増加があると新たな群発地震活動が開始する傾向があることが明らかになった。この時の応力増加値は、10-50 kPaの範囲にあり、応力の絶対値としては極めて小さい。さらに、平成23年東北地方太平洋沖地震の発生時から数時間後に、これらの断層の2つで群発地震活動が発生した。本震時の静的応力変化によるこれらの断層に加わるクーロン応力の変化量も上記の範囲にあり、極めて小さな応力変化で群発地震活動が開始することが、全く異なった応力源による応力変化によって示されたことになる（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に行ってきた、富士山地下周辺の静的応力変化を定量的に評価する有限要素法コード開発を進展させ、従来開発してきた東海・東南海・南海地震領域に加えて、東北地方も含む広域による影響評価を実施するための機能拡張を行なった。さらに、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を評価するための検討を行なった。ひとつの

事例として、2011年3月15日に発生した静岡県東部の地震 (Mjma6.4) による富士山マグマシステムへの影響評価を行い、この地震により約 10^{-6} strain のひずみ変化が発生したことを明らかにした。また、2000～2001年の富士山深部低周波地震活発化の再検討を行い、三宅島・新島・神津島付近の断層運動によるひずみ変化は 10^{-9} strain 程度であることを示した。さらに、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に成功した (防災科学技術研究所 [課題番号: 3010])。

2007年2月から2011年2月までの日向灘沿岸に沿った地域の南行軌道から撮像されたALOS/PALSAR画像21シーンを解析し、干渉画像を得た。軌道間距離の短い26ペアの干渉画像をスタッキングして、平均的な視線距離変化速度分布を得た (図14)。日向灘に平行に南北方向約100kmで5cm/yr程度の勾配が認められる。これはGPS連続観測結果と調和的である。また、くじゅう連山と阿蘇山を含む領域において、火山性変動や広域のテクトニックな変動の検出可能性を検討するために、InSAR時系列解析をおこなった結果、くじゅうの星生山と、2kmほど西北西に離れている黒岩山付近で、2cm/yearまたはそれ以上のレンジ伸長が得られた。さらに、桜島火山を含む南九州地域のALOS/PALSAR画像の収集を継続しInSAR解析を行った結果、準上下方向の地盤変動からは、桜島北部で地盤隆起、桜島東部から南部では地盤沈降が検出され、同期間に行われた水準測量結果ともよい一致が見られた (京都大学防災研究所 [課題番号: 1805])。

2011年11月28日に、九州を縦断する南北総測線長約152kmの測線上に、535点の観測点と6カ所の発破点 (S1～S6) を展開し、更に各務財団の支援により、S7を測線上に追加して、合同人工地震探査を行った。本格的な解析は平成24年度であるが、暫定的な解析から、阿蘇カルデラから北部域の領域と阿蘇カルデラの南部領域では地殻構造が異なることが示唆される。特に、南部域では明瞭な反射波が、北部域では複雑な反射波が観測されており、今後これらの解析を進め、当該地域の地殻構造の特徴を明らかにしていく (九州大学 [課題番号: 2201])。

九州におけるレシーバ関数 (RF) 解析を行い、まず、南東方向から到来する地震のみのトランスバースRFをAbe et al. (2011b) の方法によりスタッキングし、フィリピン海プレートの海洋性モホ面の形状をもとめた。そして、大陸モホ面、コンラッド面と得られた海洋性モホ面を仮定し、すべての方位の地震のベクトリアルレシーバ関数をスタッキングし、不連続面の形状推定をするとともに、不連続面での速度コントラストを求めた。その結果、別府-島原地溝帯より南東の九州東岸地域のモホ面では、マントルウェッジのS波速度が地殻より遅いという逆転が生じている可能性のあることが明らかになった。人工地震測線における断面では、阿蘇火山近傍の地殻不均質のほか、九州山地にも地殻の不均質が存在すると推定され、人工地震探査の結果と合わせてこれらの実体解明を進める必要がある (九州大学 [課題番号: 2201])。

オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

横手盆地南部横手市浅舞付近では、最終氷期後期後半以降に形成されたと推定される扇状地面上に諸河川の流路跡が多数認められる。上藤根～下鍋倉の約4kmの区間において、東上がり比高1m程度以下の南北走向の低崖が認められ、流路跡がこの低崖を挟んで東西に連続しているので、ここに活断層が存在することは確実であり、反射法地震探査結果 (産総研, 2010) には、この低崖と関係すると思われる地下地質の東上がりの撓曲変形が現れている。そこで、この低崖を挟み流路跡の中で試錐を実施したが、すべての試錐の地層中において、肉眼観察で分かる様な明瞭な不整合関係はなく、礫層から地表まで連続した堆積環境であったと推測される。断面測量の結果等も考慮すると、本来撓曲崖

であった本地形を土地利用の際に東側へ向かって平坦化したために現況の様な低断層崖様の地形が生じたと推測され、横手盆地南部浅舞付近においては地表の段差よりも西側に断層線が位置するものと解釈される（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

反射法地震探査から得られる地下の地質構造から、東北日本弧の背弧域（羽越褶曲帯～北部フォッサマグナ）における地殻水平短縮量を求めた結果、この地域の鮮新世以降における地殻短縮量は10～15 kmであることがわかった（Okada and Ikeda, 2012）。これは東北日本弧全体で水平短縮速度が3～5 mm/yr となることを意味しており、（1）東北日本弧における非弾性ひずみの蓄積速度が、測地的に観測されるひずみ速度に比べておよそ一桁小さく、（2）したがって過去100年間以上にわたって東北日本弧に蓄積された大きなひずみの大部分が弾性ひずみであること、及び（3）その弾性ひずみはプレート境界状で起こる巨大な decoupling event にともなって解消されるという従来の予想を裏付けた（東京工業大学 [課題番号：1603]、池田, 2011、池田・岡田, 2011）。

平成24年度に東北地方南部・月岡断層帯を探査する予定であるが、その具体的計画を立案するための地質・地形調査・資料収集を本年度に行った。その結果、東北日本背弧域のうち前弧側に位置する高速変形帯である月岡断層帯においては、断層の上下滑り速度は年間約0.5 mmと比較的よく求まっているのに対し、その断層構造がこれまでの調査ではよく分かっていないこと、また断層上盤側で内部変形が生じている可能性がある事が明らかになった（東京大学地震研究所 [課題番号：1414]）。

長野盆地西縁断層帯においては、最新活動（1847年善光寺地震）を含めて、最近4回の活動時期が推定されており、善光寺地震の2回前の活動は2000～2150 cal BPに限定されているものの、1回前の活動時期には約500年の推定年代幅があった。そこで1回前の活動に対応する可能性が高い傾斜不整合の年代を詳細に検討した結果、この傾斜不整合は西暦500年前後（暫定値）に形成された可能性があることがわかった。仮に1回前の活動時期が西暦500年前後（1400～1500 cal BPとする）であった場合、その前の活動間隔は500～750年と短かったものの、善光寺地震までの間隔は1300～1400年であったものと推定される。2回前の活動と3回前の活動の間隔は320～920年と推定されている。したがって、善光寺地震に先立つ3回の活動間隔は、平均的には800～1000年程度であるが、およそ0.5～1.5倍の範囲でゆらいている、と解釈することができる（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

熊野市鬼ヶ城地区の海岸には、大小無数の海食洞や階段上の平坦面が標高数m付近に複数発達している。風食の影響も考えられるものの、これらの地形の大枠は、完新世における地震性隆起に起因する可能性が考えられる。そこで、その標高や連続性や対比を検討するため、航空レーザ測量を実施した。取得したデータから、樹木やオーバーハングした部分を取り除き、50 cm間隔の地形データを作成した。得られたデータに基づくと、海成段丘面・海食洞が数段発達しており、離水後に風食の影響で小規模な平坦面が様々な高さに形成されたように見える。今後、標高や連続性、対比を検討し、離水イベント（古地震）との関係を明らかにする予定である（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

昨年度までに試作してきた「活断層判読支援システム」に、数値標高モデル（DEM）を基に作成したステレオ画像を追加した。DEMによるステレオ画像を用いることで、大地形から微地形まで1枚の画像で判読可能であり、変形に要した時間スケールの異なる変動地形を多面的に検討することができる（後藤・中田, 2011）。今年度は、「新編日本の活断層」や「活断層詳細デジタルマップ」とDEMによる画像を、GISを用いて重ね合わせ、全国の網羅的な活断層の再判読を開始した。その結果、十勝平野や嬬恋などで新たな活断層を見いだした。今後、複数の研究者により、系統的な作業を行う予定である（名古屋大学 [課題番号：1704]）。

1958年択捉沖地震、1963年ウルフ島巨大地震の最大余震（Mw7.2, Mt7.9）、及び1969年8月12日色丹島沖で発生したMw8.2のプレート境界型地震について津波波形インバージョンを実施し、滑り

量分布を推定した。1958年択捉沖地震の解析結果を図15に示す。最大滑りは1.6mであるが、大きく滑った場所は一か所でM8クラス以上のプレート境界型地震によく見られる震源過程の複雑さは見られない。この結果もこの地震がスラブ内地震であったことをサポートする。剛性率を $6.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ と仮定すると、地震モーメントは $1.7 \times 10^{21} \text{ Nm}$ (M_w 8.1)となる。1963年ウルップ島巨大地震の最大余震については、新しく花咲の原記録を収集し、時刻が正確であることを確かめた上で、そのデータを加えて津波波形インバージョンを実施した。結果を図16に示す。最も大きく滑った小断層は海溝近傍に位置し、3.2mの滑りが推定された。さらに、1.5-1.6mの大きな滑りが南側でも推定された。この滑りは花咲の検潮記録を説明するためにはどうしても必要となる。以上より1963年択捉島地震の最大余震の震源域は海溝よりのプレート境界を300kmにも渡った長い領域を破壊したと考えられる。これは、津波地震の大きな特徴と言える。剛性率を $4.0 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ と仮定すると、地震モーメントは $1.1 \times 10^{21} \text{ Nm}$ (M_w 8.0)と推定された。1969年の色丹島沖の地震については、推定された滑り量が1m以上の破壊域は200km \times 100kmとなり、震源付近では滑り量が約3mと大きいことがわかった。地震モーメントは $1.1 \times 10^{21} \text{ Nm}$ (M_w 8.0)と推定された(北海道大学[課題番号:1002])。

北海道では400-500年程度の間隔で極めて巨大な津波に襲われたことが明らかになっている。根室市別当賀の津波堆積物について詳細な解析(粒度組成分析、鉱物組成分析、珪藻分析)を実施し、Ko-c2(300年前の駒ヶ岳噴火のテフラ)とTa-c(2700年前の樽前噴火のテフラ)の間の層準にある7層の津波堆積物(TS1からTS7)の分布限界を推定した(図17)。最近のTS1とTS2をもたらした津波は最も規模が大きく、TS3とTS5は上記の津波に比べると明らかに規模が小さかったことが判明した。さらに、音別・キナシベツの2測線でも新たに津波堆積物調査を実施した結果、やはり規模のばらつきが認められた。つまり400-500年周期で発生する巨大地震にもその規模に大きなばらつきがあることが判明した(北海道大学[課題番号:1002])。

この千島海溝沿いの一連の巨大地震のうち、17世紀の地震と1611年慶長三陸津波とは同一であるとの仮説が提示されている(たとえば平川・他, 2000)。これについて断層モデルによる津波シミュレーションから検討を行った結果、仮に両者が同一であれば、地震の規模は従来考えられていたよりもかなり大きくなる可能性があることがわかった(産業技術総合研究所[課題番号:5006], 岡村・行谷, 2011)。

2011年東北地方太平洋沖地震の発生を受け、緊急調査として青森県から千葉県にかけて(岩手県を除く)、太平洋沿岸における津波高さ・浸水域の確認と津波堆積物調査を行った。その結果、仙台平野や石巻平野では、昨年度までの研究で解明されていた869年貞観地震の津波浸水域とほぼ同規模であることが判明した。また津波堆積物の到達限界と実際の津波浸水域の範囲との関係や浸水深と層厚、層相との関係など、今後の津波堆積物に基づいた津波規模の評価において基礎となる重要なデータを多く取得した(産業技術総合研究所[課題番号:5006])。

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、まさしく、「日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象」の研究が極めて重要であることを我々に示した。我々が良く知っているのは、時空間的に極めて狭い範囲の現象に過ぎないため、「木を見る前に森を見よ」ということを合言葉にして検討を進めてきたつもりであったが、残念ながらやはり近視眼的であったと言わざるを得ない。今後は時間スケールも空間スケールもはるかに大きな対象を相手にすることを自覚して取り組む必要がある。以下、ア～オの項目ごとに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、海外との協力でGPS観測が進め

られ、また、広域の地下構造の解明と相まって、巨大スケールのテクトニクスが議論できるようになってきている。昨年度までの解析結果として、アムールプレートの動きがそれほど顕著でないということがわかってきたことも、このような海外との共同研究での大きな成果である。

しかし、陸上の観測点だけで検討していることはやはり無理があり、海底地殻変動観測や海底地震観測の充実が極めて重要となる。これによりプレート境界の固着状況をモニタリングして、かつメカニズム解の情報から応力場をもモニタリングすることが重要となっている。また、広域の応力・ひずみ場をモデル化しようとするれば、構造の発達史の知見と地下構造の情報は欠かせない。今後、更に測地・地殻変動の研究者と地殻応力の研究者、地震の研究者、そして変動地形学の研究者間の共同研究を進める必要がある。

「イ. 上部マントルのマグマの発生場」については、スラブの脱水に起因すると考えられるような地震波速度構造の詳細な分布が得られつつある。また、マントルウェッジ内のマグマと考えられる領域が、地震波低速度・高減衰域としてのみならず低比抵抗域として捉えられるようになってきた。さらには、数値シミュレーションにより、沈み込んだスラブ内やマントルウェッジ内の岩石組成や流体の移動が推定できるようになってきた。今後、これらを組み合わせることにより、スラブへの水の供給からマグマの生成・上昇にいたるまでの流体移動の全過程の解明を行う必要がある。

この際に、狭いマントルウェッジ内だけに注目しては全体像はわからず、大陸の下までの広い範囲に注目しつつ、島弧火山のことを考える必要がある。この点は、プレート境界地震と同様であり、常に「森を見る」ことに心掛ける必要がある。日本周辺はもちろん、日本以外の沈み込み帯や海嶺付近の挙動を理解して初めて日本の沈み込み帯が理解できることになる。このためには、国際協力による共同研究が欠かせない。

「ウ. 広域の地殻構造と地殻流体の分布」については、もっとも多くの研究者が参入しており、その結果、地震は、低地震波速度・低電気比抵抗域を避けて、その近傍の高速・高比抵抗域中で発生している、という事例が増えてきている。また、大地震の震源の直下には局所的に低速度・低比抵抗域が存在すること事例も増えている。また、地震波速度構造と温度構造と地震発生域の下限の深さに良い相関があり、地震の発生は温度に強く依存していることがより明瞭となってきている。これらをあわせて考えれば、水や高温の影響で塑性変形している場所の周囲の脆性的領域で応力集中を起こして地震発生に至る、というモデルが最も考えやすい。

ただし、現状ではたとえば V_p/V_s が大きい場合も小さい場合も流体に結び付けられており、この状況を打破するために、今後は、散乱や異方性といった別の情報も利用して流体の分布と形態について明確にしていく必要がある。またモデル化において、流体の役割を整理して考える必要がある。間隙圧が上昇すれば断層は滑りやすくなるが、間隙圧が常に高ければ不安定滑りは起きにくくなるため、間隙圧が地震発生に関与しているのなら、それが時間変化するとしたほうが地震は起こしやすくなる。しかし、間隙水圧の時間変化を認めてしまえば、地震発生の再来間隔や規模の再現性は失われていくことに注意が必要である。つまり、この問題は地震発生サイクルの問題と深くかかわっていることを認識しておく必要がある。また、流体の役割として、局所的に塑性変形を促進し、その周りで応力集中を作り出す、ということも考えられるため、間隙圧の上昇による強度低下以外の流体の役割についても、十分な検討が必要である。

「エ. 地震活動と火山活動の相互作用」については、伊豆大島で見られたように、マグマ貫入によって火山周辺に起震応力場が作られ、しかもその地震の起こりやすさや活動の特徴は構造の規定されていることが明らかになってきた。今後、このような現象が他の火山でも見られるかどうかの検証が重要となっている。

また、火山浅部のマグマの近くは高温・低圧の領域となっているはずで、地震は本来起こりにくい。一方、フィリピン海プレートの深部低周波微動が発生するあたりも、高温でかつ間隙圧が高い（つまり有効法線応力が小さい）可能性がある。したがって、火山付近で起こる低周波地震とフィリピン海プレート深部の低周波微動は発生原因が極めて似通っている可能性があり、一方の理解が他方の理解に通じる可能性がある。今後、流体の問題とあわせて、このような観点からも両方の研究者の交流を進めることは有意義と考えられる。また、火山の山体変形のモニタリングにおいて、合成開口レーダーは極めて強力な手段となる。さらには、広域のテクトニックな地殻変動のモニタリングにも使える可能性が出てきたことは、今後の地震活動と火山活動のモニタリングと相互作用の解明の研究にとって極めて重要である。

「オ. 地震発生サイクルと長期地殻ひずみ」については、最初に述べた通り、まさしく「長期広域」の視点から把握しなおす必要がある。めったに起こらない巨大な地震については、日本列島の活動のみならず、海外の巨大地震との比較研究が極めて重要となる。その際には、地震学者のみならず、測地学者や変動地形学者等も含めて、国際的な研究を推進していく必要がある。

その際には、「サイクル」という名称にとらわれないようにすることが重要である。地震が特定のサイクルで繰り返すためには、(1)破壊域が有限で、(2)壊れる時は常に全体が壊れ、(3)ローディングレートがほぼ一定で、(4)強度がほぼ一定という、かなり厳しい条件が成立してなければならない。速度強化域に囲まれた孤立した速度弱化域（アスペリティ）であれば、この条件は満足されるので、小繰り返し地震のように同じような地震が周期的に発生することはありえたが、M9 といった超巨大地震は、まず孤立しているということは考えにくいし、壊れる範囲が毎回同じである保証もない。また、超巨大地震の発生そのものが地球のシステム全体に大きな影響を与えてしまうので、ローディングレートがほぼ一定という仮定が成立するかどうかとも疑ってかかる必要がある。さらに、次の地震発生までの時間が長いので、沈み込み帯のプレート境界のように水の供給が多いと考えられる場所では間隙圧の時間変化が無視できず、強度についても毎回一定とは考えにくい。また、東北地方太平洋沖地震のような広域の破壊が生じた理由としては、極めて強度の大きな領域が存在していたこと(Kato and Yoshida, 2011) や、広域に条件付き安定領域が存在していたこと(Hori and Miyazaki, 2011) 等が考えられているが、決してカスケードモデルに代表されるようなセグメントの単純な連動破壊ではない。このため、超巨大地震については、特に、固有地震的なモデルに思考が縛られることの無いよう、常に心して取り組む必要がある。

成果リスト

- Abe, Y., T. Ohkura, K. Hirahara, and T. Shibutani, 2011a, Common-conversion-point stacking of receiver functions for estimating the geometry of dipping interface, *Geophys. J. Int.*, 185, 1305-1311.
- Abe, Y., T. Ohkura, K. Hirahara, and T. Shibutani, 2011b, Water transportation through the Philippine Sea slab subducting beneath the central Kyushu region, Japan, as derived from receiver function analyses, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L23305, doi:10.1029/2011GL049688.
- Cheng, B., D. Zhao, and G. Zhang, 2011, Seismic tomography and anisotropy in the source area of the 2008 Iwate-Miyagi earthquake (M 7.2), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 184, 172-185.
- Emoto, K., H. Sato, and T. Nishimura, 2012, Synthesis and Applicable Condition of Vector Wave Envelopes in Layered Random Elastic Media with 2Anisotropic Autocorrelation Function Based on the Markov Approximation, *Geophys. J. Int.* 188, 325-335.
- 藤原 治・澤井祐紀・宍倉正展・行谷佑一・木村治夫・楳原京子, 2011, 2011 年東北地方太平洋沖地震津

- 波で千葉県蓮沼海岸（九十九里海岸中部）に形成された堆積物，活断層・地震研究報告，11，97-106.
- Ghimire, S., and Y. Tanioka, 2011, Spatial distribution of stress and frictional strength along the interplate boundary in northern Japan and its correlation to the locations of large earthquakes, *Tectonophys.*, 511, 1-13.
- Ghimire, S., and Y. Tanioka, 2011, Spatio-Temporal changes in stress field and occurrence of the 2003 Tokachi oki earthquake in Hokkaido, northern Japan, In Sharkov, E. V. (eds.), *New Frontiers in Tectonic Research- General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs*, 309-322.
- 後藤秀昭・中田高，2011，デジタル化ステレオペア画像を用いたディスプレイでの地形判読，活断層研究，34，31-36.
- Gusman, A. R., Y. Tanioka, and T. Takahashi, 2012, Numerical experiment and a case study of sediment transport simulation of the 2004 Indian Ocean tsunami in Lhok Nga, Banda Aceh, Indonesia, *Earth Planet Space*, in press.
- Huang, Z., L. Wang, D. Zhao, N. Mi, M. Xu, 2011a, Seismic anisotropy and mantle dynamics beneath China. *Earth Planet. Sci. Lett.* 306, 105-117, doi:10.1016/j.epsl.2011.03.038.
- Huang, Z., D. Zhao, L. Wang, 2011b, Seismic heterogeneity and anisotropy of the Honshu arc from the Japan Trench to the Japan Sea. *Geophys. J. Int.* 184, 1428-1444, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.04934.x.
- Huang, Z., D. Zhao, L. Wang, 2011c, Frequency-dependent shear-wave splitting and multilayer anisotropy in Northeast Japan. *Geophys. Res. Lett.* 38, L08302, doi:10.1029/2011GL046804.
- Ichihara, H., M. Uyeshima, S. Sakanaka, T. Ogawa, M. Mishina, Y. Ogawa, T. Nishitani, Y. Yamaya, A. Watanabe, Y. Morita, R. Yoshimura, and Y. Usui, 2011, A fault-zone conductor beneath a compressional inversion zone, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L09301, doi:10.1029/2011GL047382.
- 池田安隆，2011，東北日本島弧 海溝系における歪みの蓄積 解放過程と超巨大歪解放イベントの可能性，地震予知連各会会報 86，687-697.
- 池田安隆・岡田真介，2011，島弧—海溝系における長期的歪み蓄積過程と超巨大地震. *科学*, 81, 1071-1076.
- Ishizuka, O., K. Tani, M.K. Reagan, K. Kanayama, S. Umino, Y. Harigane, I. Sakamoto, Y. Miyajima, M. Yuasa, and D.J. Dunkley, 2011a. The timescales of subduction initiation and subsequent evolution of an oceanic island arc, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 306, 229-240, doi: 10.1016/j.epsl.2011.04.006.
- Ishizuka, O., R.N. Taylor, M. Yuasa, and Y. Ohara, 2011b, Making and breaking an Island arc: a new perspective from the Oligocene Kyushu-Palau arc, Philippine Sea., *Geochem. Geophys. Geosys.*, 12, Q05005, doi:10.1029/2010GC003440.
- 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，in press.
- 海上保安庁，2011，人工衛星レーザー測距観測（2009年），海洋情報部観測報告衛星測地編，24.
- Kuriki, M., M. Matsushima, Y. Ogawa, and Y. Honkura, 2011, Spectral peaks in electric field at resonance frequencies for seismically excited motion of ions in the Earth's magnetic field, *Earth Planets Space*, 63, 503-507.
- Matsubara, M., and K. Obara, 2011, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake related to a strong velocity gradient with the Pacific plate, *Earth Planets Space*, 63, 663-667.
- Mishra, O.P., D. Zhao, C. Ghosh et al., 2010, Role of crustal heterogeneity beneath Andaman-Nicobar Islands and its implications for coastal hazard. *Natural Hazards* 57, 51-64.
- Miyoshi, T., T. Saito, and K. Shiomi, 2012, Waveguide effects within the Philippine Sea slab beneath southwest Japan inferred from guided SP converted waves, *Geophys. J. Int.*, 189, 1075-1084, doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05409.x.
- 行谷佑一・佐竹健治・宍倉正展，2011，南関東沿岸の地殻上下変動から推定した 1703 年元禄関東地震と

- 1923年大正関東地震の断層モデル, 活断層・地震研究報告, 11, 107-120.
- Nishimura, T., 2011, Back-arc spreading of the northern Izu-Ogasawara (Bonin) Islands arc clarified by GPS data, *Tectonophysics*, 512, 60-67.
- Okada S., and Ikeda Y., 2012, Quantifying crustal extension and shortening in the back-arc region of Northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, B01404, doi:10.1029/2011JB008355.
- 岡村行信・行谷佑一, 2011, 17世紀に発生した千島海溝の連動型地震の再検討, 活断層・地震研究報告, 11, 15-20.
- Omuralieva, M.A., A. Hasegawa, T. Matsuzawa, J. Nakajima, and T. Okada, 2012, Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis, *Tectonophysics*, 518-521, 93-105, doi:10.1016/j.tecto.2011.11.013.
- Padhy, S., O.P. Mishra, D. Zhao, and W. Wei, 2011, Crustal heterogeneity in the 2007 Noto-Hanto earthquake area and its geodynamical implications. *Tectonophysics* 509, 55-68.
- Sawazaki, K., H. Sato, and T. Nishimura, 2011, Envelope synthesis of short-period seismograms in 3-D random media for a point shear-dislocation source based on the forward scattering approximation: Application to small strike-slip earthquakes in southwestern Japan, *J. Geophys. Res.*, 116, B08305, doi:10.1029/2010JB008182.
- Shestakov, N., M. Gerasimenko and M. Ohzono, 2011, Crustal displacements and deformations of the Russian Far East induced by the Tohoku earthquake of March 11, 2011, Mw = 9.0 and their influence on the results of GNSS observations, *J. Geodesy Cartography*, 8, 35-43.
- Shestakov, N., H. Takahashi, M. Ohzono, A. Prytkov, V. Bykov, M. Gerasimenko, M. Luneva, G. Gerasi-mov, A. Kolomiets, V. Bormotov, N. Vasilenko, J Naek, P. H. Park, M, Serov, 2012, Analysis of the far-field crustal deformations caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations, *Tectonophys.*, 524-525, 76-86, doi:10.1016/j.tecto.2011.12.019.
- Shikakura, Y., Y. Fukahata and M. Matsu'ura, 2012. Spatial relationship between topography and rock uplift patterns in asymmetric mountain ranges based on a stream erosion model, *Geomorphology*, 138, 162-170.
- Takahashi, M., S. Uehara, K. Mizoguchi, I. Shimizu, K. Okazaki, and K. Masuda, 2011, On the transient response of serpentine (antigorite) gouge to stepwise changes in slip velocity under high-temperature conditions, *J. Geophys. Res.*, 116, B10405, doi:10.1029/2010JB008062.
- Takahashi, T., K. Obana, S. Kodaira, D. Suetsugu, N. Takahashi, S. Kamiya, and Y. Tamura, 2011, Random inhomogeneities in the northern Izu-Bonin arc estimated by tomographic inversion of peak delay times of S-wave seismograms, *J. Geophys. Res.*, 116, doi:10.1029/2010JB007691.
- Tamura, Y., O. Ishizuka, R.J. Stern, H. Shukuno, H. Kawabata, R.W. Embley, Y. Hirahara, Q. Chang, J.-I., Kimura, Y. Tatsumi, A. Nunokawa, and S.H. Bloomer, 2011, Two primary basalt magma types from Northwest Rota-1 volcano, Mariana arc and its mantle diapir or mantle wedge plume, *J. Petrology*, 52, 1143-1183, doi:10.1093/petrology/egr022.
- Tani, K., D.J. Dunkley, and Y. Ohara, 2011a, Termination of back-arc spreading: zircon dating of a giant oceanic core complex, *Geology*, 39, 47-50, doi:10.1130/G31322.1.
- Tani, K., R.S. Fiske, D.J. Dunkley, O. Ishizuka, T. Oikawa, I. Isobe, & Y. Tatsumi, 2011b, The Izu Peninsula, Japan: zircon geochronology reveals a record of intra-oceanic rear-arc magmatism in an accreted block of Izu-Bonin upper crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 303, 225-239, doi:10.1016/j.epsl.2010.12.052.
- Tong, P., D. Zhao, and D. Yang, 2011, Tomography of the 1995 Kobe earthquake area: Comparison of finite-frequency and ray approaches, *Geophys. J. Int.*, 187, 278-302.

- Tong, P., D. Zhao, and D. Yang, 2012, Tomography of the 2011 Iwaki earthquake (M 7.0) and Fukushima nuclear power plant area, *Solid Earth*, 3, 43-51.
- Zhao, D., Z. Huang, N. Umino, A. Hasegawa, and T. Yoshida, 2011a, Seismic imaging of the Amur-Okhotsk plate boundary zone in the Japan Sea. *Phys. Earth Planet. Inter.* 188, 82-95, doi:10.1016/j.pepi.2011.06.013.
- Zhao, D., W. Wei, Y. Nishizono, and H. Inakura, 2011b, Low-frequency earthquakes and tomography in western Japan: Insight into fluid and magmatic activity. *J. Asian Earth Sci.* 42, 1381-1393, doi:10.1016/j.jseaes.2011.08.003.
- Zhao, D., S. Yu, and E. Ohtani, 2011c, East Asia: Seismotectonics, magmatism and mantle dynamics, *J. Asian Earth Sci.*, 40, 689-709, doi:10.1016/j.jseaes.2010.11.013.

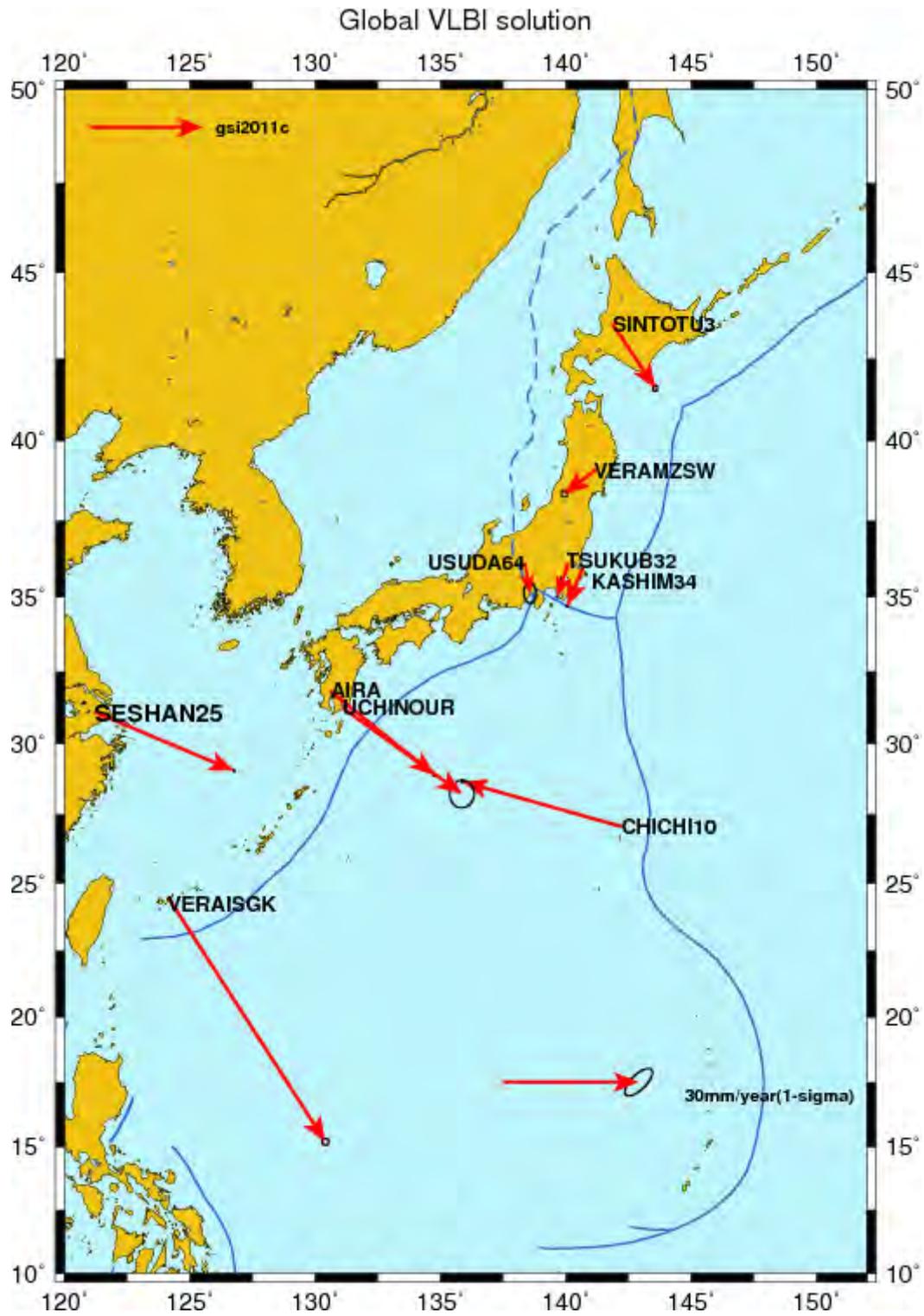


図 1. VLBI 観測によって得られた日本列島及び周辺域のプレート運動 (国土地理院 [課題番号 : 6013])。

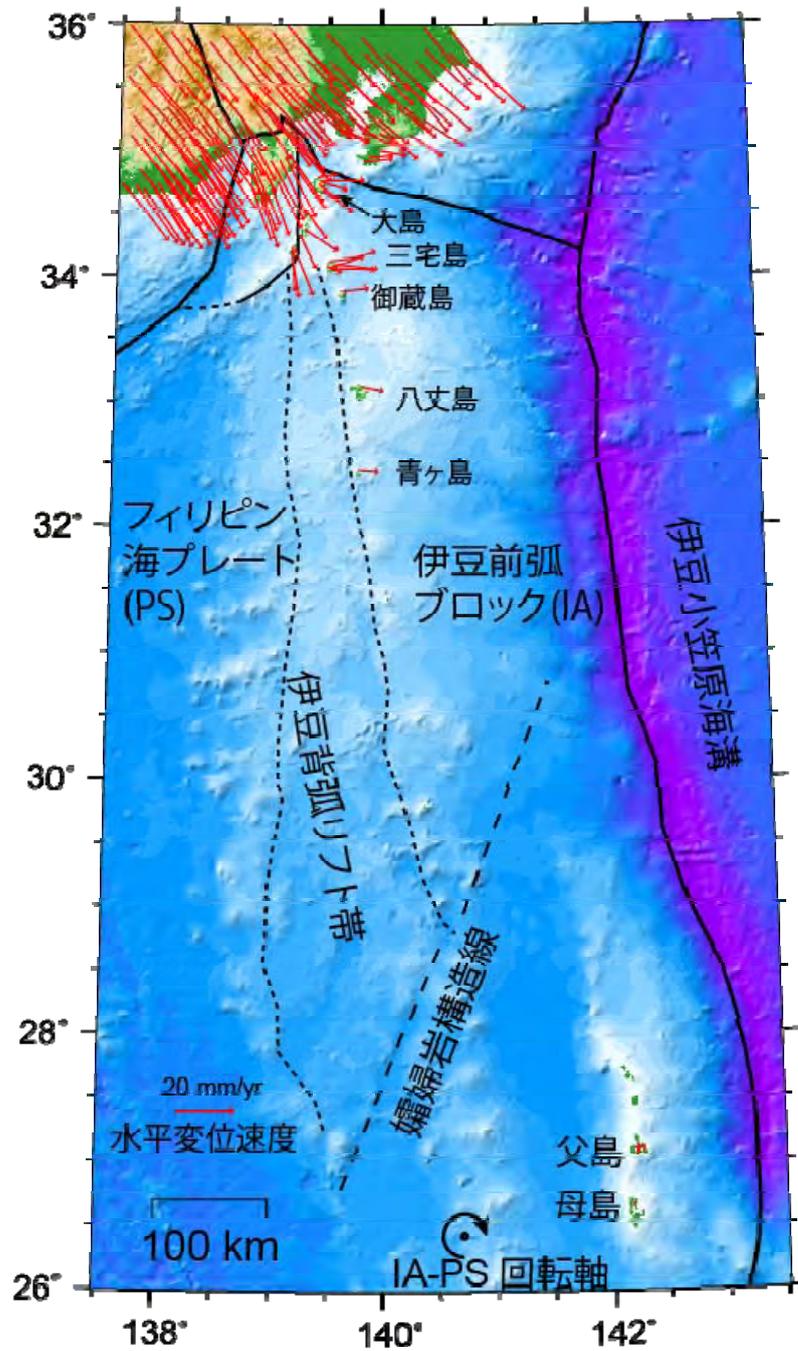


図2. GEONETによる伊豆小笠原諸島の水平速度ベクトル（国土地理院 [課題番号：6013]）。フィリピン海プレートの剛体部分を基準とした2007年1月から2009年7月までの水平速度ベクトルを示す。伊豆諸島の速度ベクトルが系統的に東向きを示し、背弧拡大に伴う運動を表している。

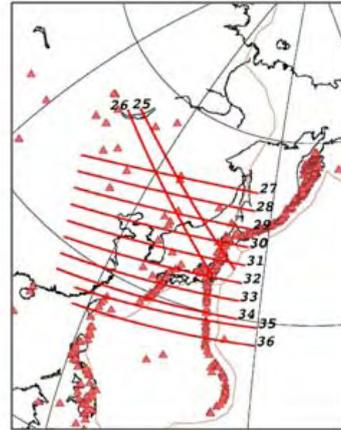
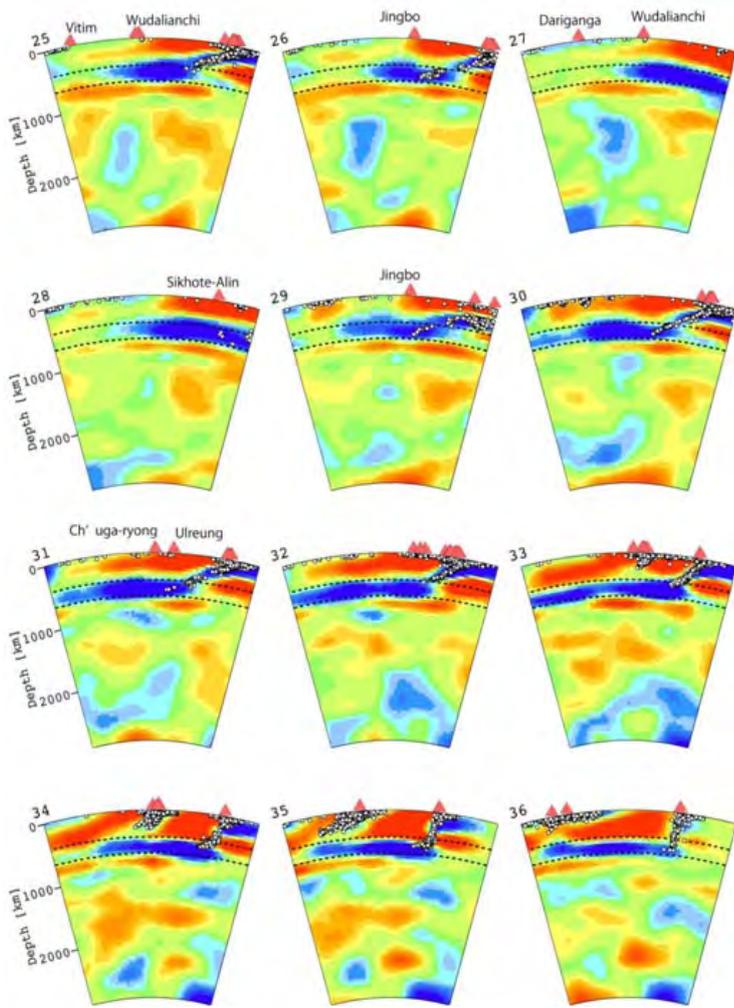


図 3. 日本列島及びその周辺の P 波速度構造の鉛直断面図 (東北大学 [課題番号: 1203])。

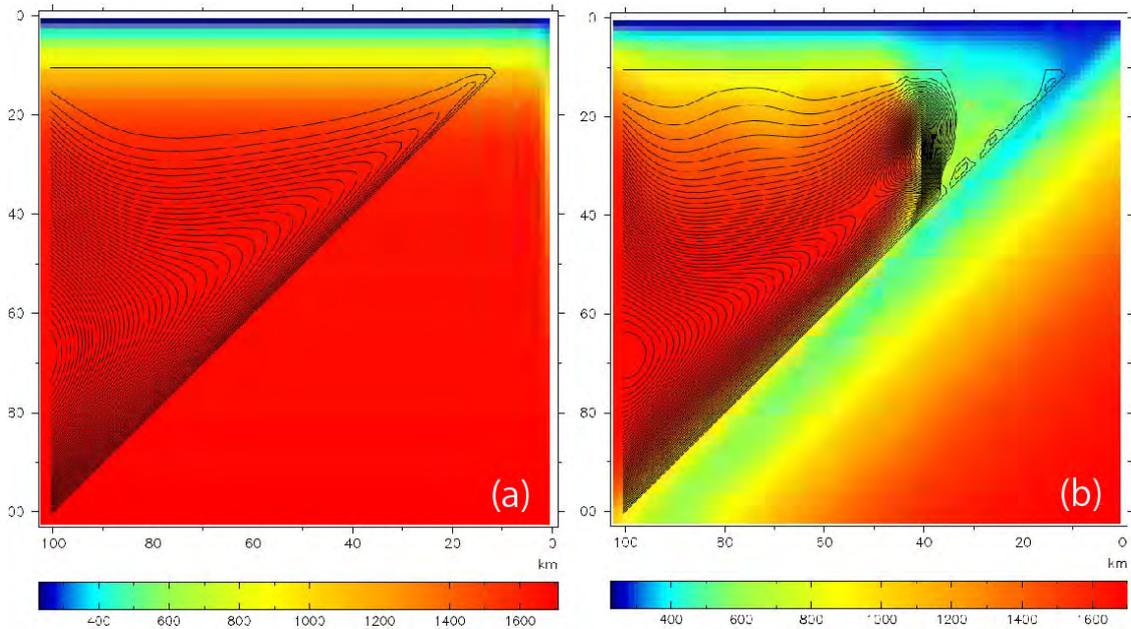


図 4. モデル計算に基づく沈み込み帯の温度・流線構造（東京工業大学 [課題番号：1603]）。絶対温度を色で，流線構造を実線で示す。(a) 温度と流線の初期状態。(b) ほぼ定常的な状態に達したときの温度と流線の分布。座標に付した空間スケールは 3 倍すると km に対応する。図 b では，前弧の深さ 120km（目盛では「40」）付近まで，蛇紋岩による力学的デカップリングが及び，低温度のコーナーウエッジ領域が形成されていることが分かる。

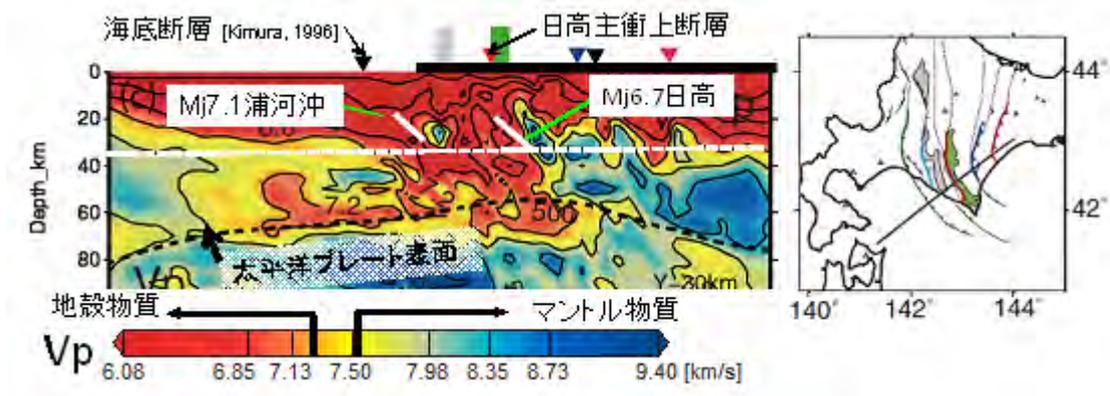


図5. 定常観測点と合同観測データの併合処理により推定された北海道島弧会合部のP波速度構造（東北大学[課題番号:1204]）。白線は1970年日高山脈南部地震のメカニズム解から推定される断層面の位置と、森谷他（1983）による1982年浦河沖地震の断層面の位置を示す。▽印は地質境界もしくは衝上断層の位置を示す。日高変成帯及び神威古潭帯の位置を緑及び灰色領域で示す。白点線及び黒点線はモホ面の概略と太平洋プレート表面の位置を表す。

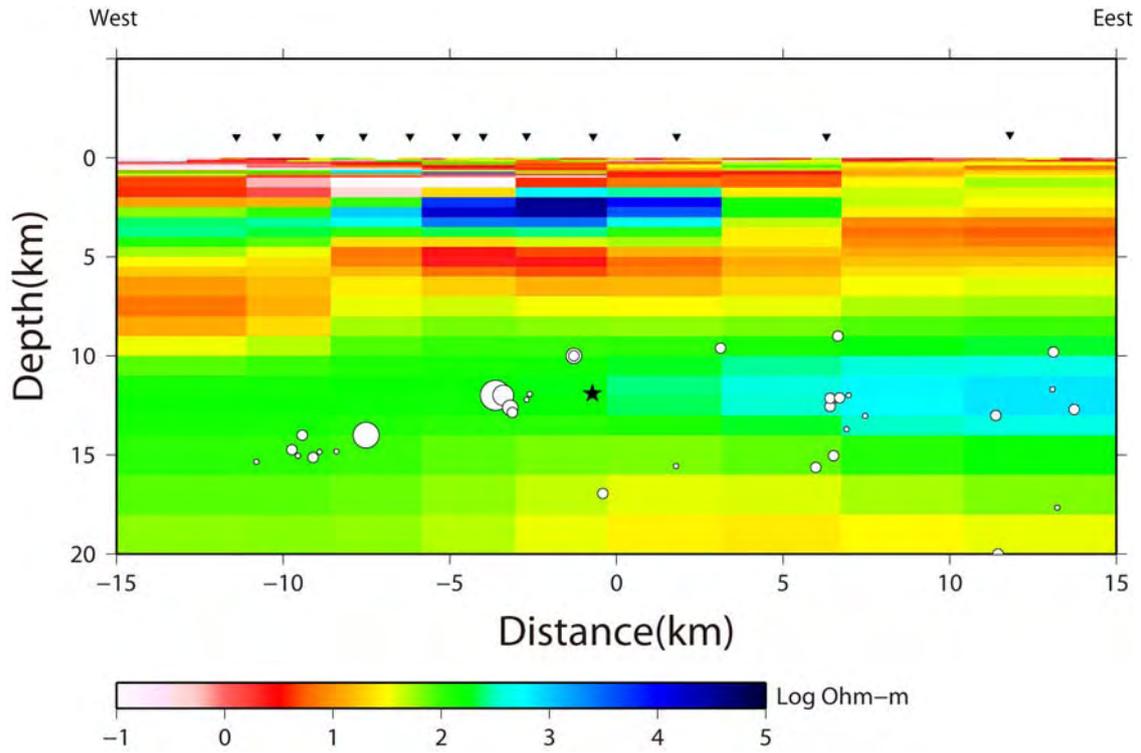


図 6. 秋田県北部の比抵抗東西断面。2011年（平成23年）4月1日の東北地方太平洋沖地震に誘発されたと考えられるM5.0の地震の震源を★印で、2010年以前の震源（すべてM4.0以下）を○印で、観測点の位置を▼印で示す（秋田大学 [課題番号：1301]）。

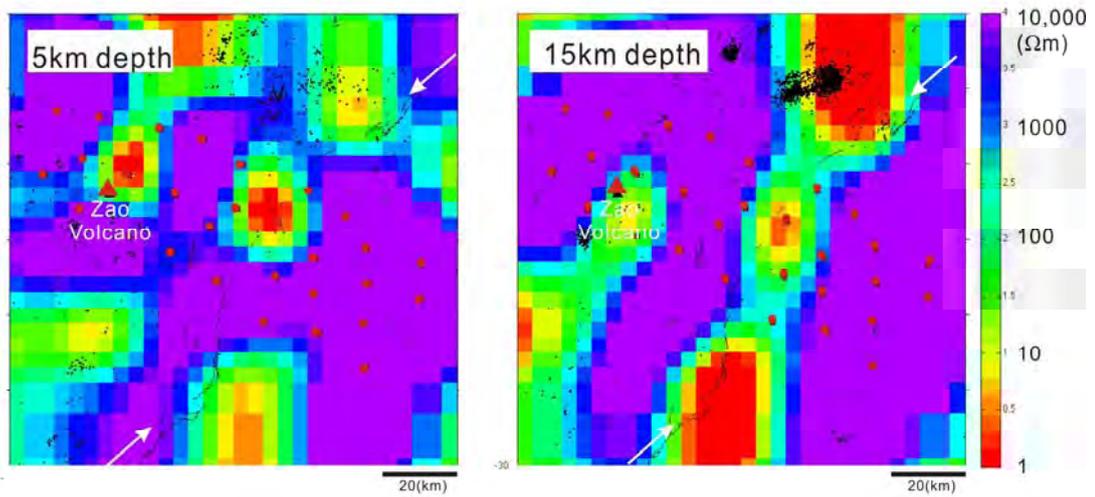


図 7. 3次元インバージョンによる蔵王火山・長町利府断層を含む比抵抗構造（東京工業大学 [課題番号：1601]）。（左）深度 5 km における比抵抗分布図。暖色系が低比抵抗を表す。黒点は地震の震源を，赤三角は蔵王火山を，白矢印で指し示した実線は長町利府断層の地表トレースを表す。（右）深度 15 km における比抵抗分布。

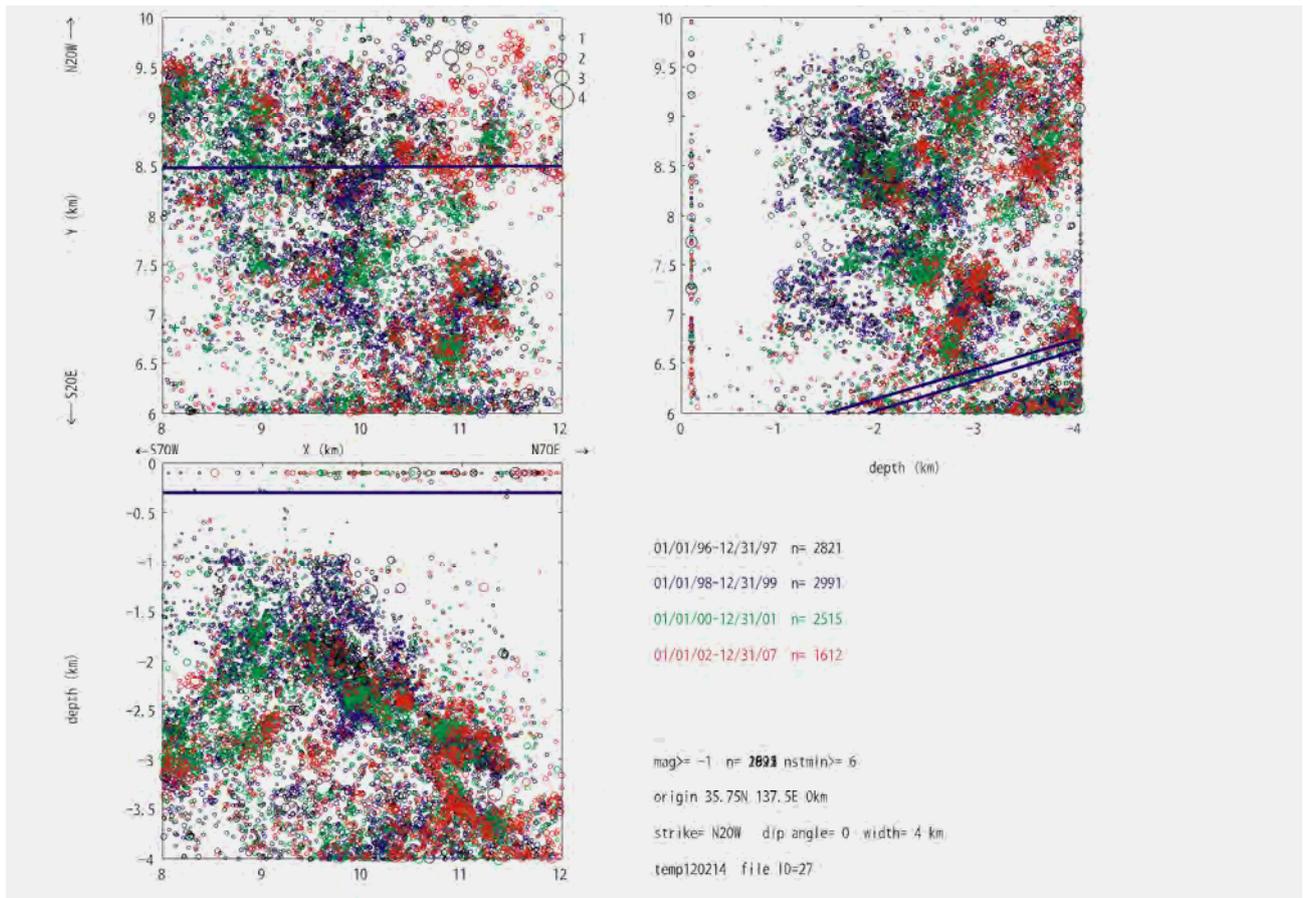


図 8. 長野県西部地域における震源分布の時空間変化（京都大学防災研究所 [課題番号：1806]）。1996-1997 年，1998-1999 年，2000-2001 年，2002-2007 年に発生した地震の震源分布をそれぞれ，黒，青，緑，赤色の丸印で示す。



図9. 濃尾地震断層周辺域でのネットワークMT観測点分布図（東京大学地震研究所 [課題番号：1411]）。白四角内に地名の入った、20交換所エリアでの観測を実施しており、異常位相が観測されている領域を薄赤色で示す。防災科学技術研究所による広帯域MT法観測点（3測線）を赤三角で示し、前キャンペーンである跡津川断層周辺域での観測においてデータを取得した地点を白抜き地名で示す。ネットワークMT法応答関数を求めるための磁場参照点を観測域内の2点（中竜（NKT）、根尾（NEO））におき、ローカル磁場ノイズを除去するための遠隔磁場参照点を前観測計画から引きついで、京大防災研上宝地殻変動観測所・蔵柱坑内（KTJ）、輪島市（WJM）においている。灰太線は、濃尾地震推定地震断層を示す。また、直流、交流電化路線をそれぞれ赤、オレンジ線で示している。