

2 (2) (2-1) 地震準備過程

「地震準備過程」計画推進部会長 飯尾能久

(京都大学防災研究所)

地震発生の準備過程を解明するために、地殻とマントルで応力が特定の領域に集中し地震発生に至る過程を明らかにするための観測研究を実施してきた。プレート境界地震に関しては、「超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進」部会が立ち上がり、一部の課題がそちらへ移動したが、プレート境界の滑りと固着の状態の把握やプレート境界におけるゆっくり滑りの時空間的推移の解明、プレート境界近傍の地震発生場における応力状態の解明などが進んだ。

内陸地震に関しては、広域の応力によって非弾性的な変形が進行して、特定の震源断層に応力が集中する過程を定量的にモデル化することが必要不可欠である。新潟―神戸ひずみ集中帯及び近年発生した内陸大地震発生域などにおける、上部地殻、下部地殻及び上部マントルまでの地震波速度・減衰・電気比抵抗構造、散乱体・流体分布、媒質の異方性、微小地震の詳細な震源分布、発震機構解等の解明、およびひずみ速度が小さい地域におけるこれら解析との比較、内陸の地震発生モデルの一般化、断層の両端部の非弾性変形と断層への応力集中過程の関係の解明、および震源断層の強度回復過程の解明等において、重要な成果が得られた。

スラブ内地震の発生機構を解明するため、スラブ内の震源分布や地震波速度構造を詳細に明らかにすることにより、スラブ内に取り込まれた流体の分布と挙動の解明を図ることが重要である。海溝付近から島弧下までの海洋プレート内の不均質構造や震源分布・発震機構解を詳細に調べることにより、スラブ内の強度分布並びに流体の供給・輸送過程を明らかにし、スラブ内地震の発生に至る過程を解明する研究が進展した。

ア. アスペリティの実体

アスペリティの実態に関して、東北地方太平洋沖および日向灘から南西諸島沖において、以下に述べるように重要な知見が得られた。

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域のアスペリティの特性について、小繰り返し地震の積算滑りから、本震前の非地震性滑りの空間変化の特徴の抽出が行われた（東北大学 [課題番号：1205]）。その結果、海溝近傍に大滑り域が存在し陸に近い場所でも地震時滑りが大きかった領域 B では、プレート境界の深い場所（50-60km 付近）まで滑りレートが小さいのに対し、その南北に隣接する領域（領域 A, C）では、深さ 35km 付近から深さとともに滑りレートが大きくなる傾向が報告された（図 1）。沈み込むプレートが陸のプレートのマントルに接する場所においては、基本的には、深さとともに滑りレートが大きくなるが、滑りの大きかった領域 B では深くまで小さい滑りレートが推定されており、これは、この領域のプレート境界の特性の違いを反映している可能性があることも報告された。

日向灘から南西諸島沖においても、小繰り返し地震活動からプレート間固着についての知見が得られた（九州大学 [課題番号：2202]）。日向灘においては南部から北部に向かうにつれて非地震性滑りレートが減少し、過去に発生した M7 級のプレート境界地震の地

震滑り領域との対応関係が認められること、東北地方とは反対に、日向灘北部では深くなるほど滑りレートは小さくなるが、日向灘南部の大隅半島沖では小繰り返し地震発生領域の浅部・深部で滑りレートが大きい傾向が報告された（図2）。

大隅半島以南のトカラ列島東方沖～奄美大島沖では、1993年4月～2012年9月のデータについて、個々の相似地震群の活動期間を考慮に入れて非地震性滑りレートの分布が推定された（図3）（鹿児島大学[課題番号:2301]）。奄美大島の北方海域で発生した2009年10月30日M6.8の地震の震源域近傍での準静的滑り速度が2007年ころから早くなる傾向にあること、地震資料を見直すことで再決定された1911年に喜界島近海で発生した巨大地震の震源付近は地震活動が非常に低調であり、その周辺で非地震性滑りレートが小さいことが報告された。また、津波の現地調査および津波シミュレーションの結果から、この巨大地震に伴う津波は、波源域が喜界島の北～北北東にあり、低角逆断層運動により発生したものと推定された（図3）。

イ. 非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

（スロースリップの時空間変化）

2011年東北地方太平洋沖地震の発生前の2011年1月下旬から、直上に設置された海底水圧計および陸上沿岸部の体積歪計で非地震性の地殻変動が観測され、以下のような解析結果が報告された（図4）（東北大学[課題番号:1206]）。地殻変動が観測された期間の前半の1月下旬から2月上旬には、周辺の地震活動度に顕著な変化は見られなかったが、2月中旬頃よりマグニチュード5程度の地震が海底圧力観測網内で発生した。これらの地殻変動が沿岸部のGPS観測点では観測されなかったことを考慮し、観測された地殻変動記録からスロースリップイベントの断層を推定した結果、100km×35kmの矩形断層上の40cmの逆断層滑り（地震モーメント： 3.6×10^{19} Nm:M7.0）で観測記録が説明された。地震モーメントは2008年に観測されたスロースリップイベントの2倍であった。2011年のスロースリップイベントは少なくとも3月9日の最大前震直前まで継続していた可能性があり、観測記録のトレンドの変化から、スロースリップイベントの断層の上端部は、2月下旬から3月9日の発生直前にかけて、海溝軸の方向に拡大していた可能性が指摘された。

四国と房総沖においてもスロースリップイベントに関して、重要な知見が得られた（防災科学技術研究所[課題番号:3301]）。2011年12月～2012年1月の豊後水道～四国中部における短期的スロースリップイベント（SSE）と深部低周波微動・超低周波地震活動の発生域は、フィリピン海プレート走向方向の長さが150～200km程度に及び、従来のエピソードと比べて大規模なものであった。短期的SSEの詳細な滑り過程を微動及び超低周波地震の活動と比較し、愛媛県西部及び中部では滑りの増加に伴って微動や超低周波地震の活発化が見られた一方で、2つの領域の間では微動活動が活発化するが、短期的SSEの滑りがほとんど発生せず、超低周波地震も発生していなかった。このギャップ領域では、微動活動が潮汐とよく対応することや通常地震波によってトリガーされやすいことが知られている。これらのことから、短期的SSEを含めたスロー地震の発生様式を支配する滑り特性が、プレートの走向方向に不均質性を有していることが示唆された。房総半島沖ではスロースリップイベントが2011年10月～11月にかけて4年2か月ぶりに再来した。過去約30年間に房総半島沖で発生してきたスロースリップイベント（以下、

房総 SSE) の再来間隔は平均 68 か月であり、2011 年の房総 SSE は 50 か月と最短だったが、1990 年房総 SSE は 91 か月と最長だった。この間には 2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) 及び 1987 年千葉県東方沖地震 (M6.7) がそれぞれ発生しており、これらの地震による応力変化 (Δ CFS) を評価したところ、前者は約 0.1 MPa の増加、後者は約 0.2 MPa の減少と推定された。これは房総 SSE の応力降下量と比較して大きな部分を占めるものであり、外的な応力変化によって SSE の発生間隔が影響を受けた可能性が指摘された。

GNSS 連続観測によっても、短期的なスロースリップイベントが多数検出され、下記のような特徴が報告された (国土地理院 [課題番号: 6014])。四国、紀伊半島、東海地方に加えて、日向灘から種子島にかけての領域と相模トラフ沿いにおいても短期的スロースリップの発生を示唆する地殻変動を検出するとともに、断層モデルが推定された (図 5)。四国中西部では、Mw6.0 前後のイベントが数か月ごとに繰り返し発生し、四国東部、紀伊半島、東海地方においては、Mw6.0 以下の小規模なイベントが数か月～半年ごとに繰り返し発生していることが分かった (図 6)。相模トラフでは、主に房総半島南東沖で繰り返し間隔が長く Mw6.5 程度のやや大規模なイベントと Mw6.0 以下の小規模なイベントが繰り返し発生していること、日向灘から種子島にかけては、Mw6.0 前後のイベントが半年～1 年ごとに発生していること、短期的スロースリップの発生する深さは、四国から東海地方にかけては深部低周波微動の発生する 30～40km 程度であり、それより浅い場所では検出されなかったが、相模トラフ及び日向灘から種子島にかけての領域では浅部の深さ 10～20km でも発生するという地域的な特徴があることが報告された。

(浅部超低周波地震の解明)

東北地方太平洋沖において超低周波地震が発生していることが、防災科研 F-net の広帯域地震計記録を用いた解析により見出され、以下のような特徴が報告された (防災科学技術研究所 [課題番号: 3301])。超低周波地震のクラスターは、岩手沖、宮城沖、福島・茨城沖の 3 つの領域で見られ、それぞれクラスター的な活動分布をしていることが分かった。2011 年東北地方太平洋沖地震後に岩手沖及び福島・茨城沖の活動が活発化したのに対し、宮城沖については地震後に活動が検出されていないが、これは、大地震の滑りによる応力集中や解放、あるいは余効滑りの影響を反映していると考えられる。

2003 年十勝沖地震発生以前の期間における千島海溝—日本海溝会合部付近の超低周波地震活動に関して、1994 年三陸はるか沖地震の直前直後に目立った超低周波地震活動は無かったこと、その後、2003 年十勝沖地震発生までの 1996～2002 年の期間には約 10.5 か月間隔で超低周波地震が発生していたことが明らかとなった。この期間における超低周波地震活動の多くは北東方向のマイグレーションを示し、逆方向のマイグレーションが卓越した 2003 年十勝沖地震後の活動とは対照的である。このようなマイグレーション方向の違いは、超低周波地震発生域に対するその周辺域からの応力集中状態の違いに起因している可能性が指摘された。

(東北地方太平洋沖地震の震源域における応力の時空間変化の推定)

東北地方太平洋沖地震を受けて、各種緊急調査により甚大な地震・津波災害を引き起こした断層活動の場所が絞り込まれたが、それを受け、統合国際深海掘削計画 (IODP) により、今回の地震断層を特定してそこでの摩擦熱を計測することにより、どのような

メカニズムで地震が発生したかに迫るために、H24年4-5月及び7月に地球深部探査船「ちきゅう」による調査掘削が実施された（海洋研究開発機構 [課題番号：4003]）。この調査掘削では、掘削同時検層や試料採取により、断層深度を絞り込み、その断層周辺に密に温度計を設置することに成功し、長期温度計測が実施され、検層データから、地震発生時に海溝付近で大きな応力開放が起こったことが明らかにされた（Lin et al., 2013）。

応力集中に対応した応力場の空間変化を検出するために、2011年東北地方太平洋沖地震発生前の応力場と本震の断層滑りとの関係が注意深く調査され、以下の結果が得られた（産業技術総合研究所 [課題番号：5007]）。プレート境界面で発生している逆断層型の地震は解析から除外して推定された東北地方太平洋沖地震発生前の応力場は、震源域北部域と南部域で異なる結果が得られた。北部域の応力場は横ずれ場で特徴付けられ、最大主圧縮軸はほぼ水平で大滑り域の方向に向くが、南部域の応力場は正断層場で特徴づけられ、最大主圧縮軸がプレート境界面にほぼ直交していた。北部の応力場は海溝軸付近に大きな滑り欠損があった場合に予想される応力場と調和的である。一方、南部域は北部域に比べてプレート境界に掛かっているせん断応力が小さいと推定され、本震による断層滑りが小さかったこととも矛盾しない。東北地方太平洋沖地震の発生後、震源域南部の上盤側では正断層型の地震が多発しているが、もともと正断層場だった南部域の上盤側で本震の断層滑りによる伸張の応力変化が生じたため、正断層型の地震が起きやすいと解釈された。

（ゆっくり地震の発生と流体との関連）

サブダクション・ゾーン陸側の長期的な重力変動をとらえるために、沖縄～北海道太平洋岸の8地域（北海道道東部、えりも、北海道南部、三陸、東海、日向、琉球）で、絶対重力測定が行われている（東京大学地震研究所 [課題番号：1406]）。琉球弧の西表島で約半年ごとに発生するスロースリップに関して、2回のスロースリップイベントにともなって約4マイクロガルの減少が観測され、スロースリップ時に高圧間隙水の拡散がおきている可能性が示唆された（図7）。

深部低周波微動発生域を含む紀伊半島南部下の地震波速度構造やプレート境界面の形状を把握するために、稠密自然地震観測及び制御震源地殻構造探査が実施され、測線下におけるフィリピン海プレートの形状やプレート境界域の地震波速度構造に関する知見が得られた（東京大学地震研究所 [課題番号：1415]）。地震波トモグラフィ解析では、深部低周波微動は高速度領域を避けるように分布し、微動発生域では V_p/V_s 値が大きくなることが推定され、深部低周波微動発生過程における流体の関与が示唆された。

ウ. ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

（ひずみ集中帯の成因）

屈斜路カルデラ周辺のGPS連続観測により、カルデラを中心とする収縮場が得られたが、広域的なデータ解析から得られた結果と調和的であり、地域スケール・カルデラスケール双方で収縮が卓越する場となっていることが確認された（図8）（北海道大学 [課題番号：1103]）。機動観測点を含めたより詳細な速度場から、カルデラ内部のより詳細な状況が明らかにされ、屈斜路湖南東岸以外の地域では伸長ひずみ場となっていること

が報告された。これまで明らかにされてきた広域なひずみ場では、伸長ひずみは検出されておらず、カルデラ内部にひずみ場の不均質が存在していることが示唆された。

岩手・宮城内陸地震震源域における合同余震観測グループによる稠密臨時地震観測点のデータを利用し、2008年岩手宮城内陸地震の前震・本震・余震分布と周辺の詳細な速度構造が推定され、以下の結果が報告された (Okada et al., 2012) (東北大学 [課題番号: 1207])。1) 本震震源周辺では余震は西に傾斜した分布と東に傾斜した分布が交差したような分布となるが、主な断層面は西に傾斜したものである。2) 直前の前震は本震の震源付近に位置し、1999年頃からの先駆的活動域は西に傾斜した余震の並びの浅部に対応する。3) 本震震源周辺では、西に傾斜した余震の並びに対し、上盤側は低速度、下盤側は高速度となり、2003年宮城県北部地震などのインバージョンテクニクスによると考える地震の特徴と一致する。地震時に大きくすべった領域は高速度域に対応する。4) 震源域の深部には地震波速度低速度域が分布する。この低速度域の震源域の走向方向の広がりには震源域の広がりに対応することから、地殻下部での弱い領域の広がりが、地殻上部での震源域の広がりを規定していた可能性が指摘された (図9)。

日本海東縁ひずみ集中帯では、顕著な短縮変形と同時に長期的かつ長波長の沈降が生じており、堆積盆形成に寄与しているが、この地殻変形の運動学的なモデルについて検討が行われた (名古屋大学 [課題番号: 1705])。厚さ 8km の弾性的な上部地殻の上に厚さ 10km の堆積層 (軟らかい弾性層) が、下に粘弾性的な下部地殻 (粘性率 $1021\text{Pa}\cdot\text{s}$) とマントル (粘性率 $3\times 10^{19}\text{Pa}\cdot\text{s}$) を仮定して、上部地殻全体と堆積層の下半分を切る傾斜 30 度の逆断層を仮定し、断層変位後の完全緩和を求めた結果が図 10 に示された。この完全緩和は、断層が一定速度でずれている場合の定常解とみなすことが可能であるが、断層付近で短縮変位の 3 割程度に相当する沈降域が生じること、および水平短縮のブロック運動が再現された。これは短縮変形による余剰質量をアイソスタティックに支えるために生じる沈降であり、ひずみ集中帯の変形過程を支配するメカニズムの一つと考えられた。

越後平野周辺における東北地方太平洋沖地震時のひずみ分布の不均質が有限要素法により再現された (国土地理院 [課題番号: 6015])。東北地方太平洋沖地震を含む 1 年間の GNSS 観測から越後平野周辺では地震時の東西伸張ひずみが周辺より大きいことが観測されたが、このひずみ分布の不均質を説明するため、有限要素法による J-SHIS 地盤構造モデル (防災科学技術研究所) に準拠した地殻不均質構造と東北地方太平洋沖地震の震源断層モデルを用いた地殻変動の数値シミュレーションが行なわれた。その結果、地震時の東西伸張ひずみ分布において越後平野が周辺部より 2 倍程度大きくなり、観測データの特徴が再現された。

濃尾地震震源域の総合集中観測により、下記に述べるように、震源域周辺の不均質構造に関する様々な知見が得られた (東京大学地震研究所 [課題番号: 1417])。地震波トモグラフィ解析により、濃尾地震震源域およびその北西側の下部地殻は P 波、S 波とも周囲に比べ低速度であること、その中でも特に、濃尾地震の際に滑り量が大きかった温見断層直下の下部地殻の速度が遅いことが確認された。また、濃尾地震の震源よりも南東側の下部地殻の速度は平均程度であり、震源域付近を境に下部地殻の速度が大きく変化することが示された。稠密アレー観測の地震波トモグラフィ解析から、活断層密集域の地震発生層下部には、低速度層が存在することが明らかとなった。さらに、2009年10

月に研究地域で行われた発破のアレイ地震観測点での記録から反射波群の空間的広がり
の特定が試みられ、対応する反射群の上面と下面の深さは、28-32 km及び37-41kmと根尾
谷断層を境に北東側の方が深い深度を示すことが示された（図11）。これらのことから根
尾谷断層が下部地殻まで及んでいる可能性が示唆された。地殻内で発生する地震のS波ス
プリッティング解析において、波線長で正規化した時間差をGPS解析から得られた差ひず
み速度と比較すると、Hiramatsu et al. (2010) で報告されているひずみ集中帯におけ
る差ひずみ速度との比例関係と整合的な結果が得られ、差ひずみ速度に対応する速度で
上部地殻に応力が蓄積しているという解釈がなされた。3次元的解析による比抵抗構造の
推定結果によると、深さ4km程度までの地下浅部に、濃尾地震断層南部に沿って低比抵抗
帯のあること、中部地殻は全体的に高比抵抗であること、福井-岐阜県境域上部マント
ルに東西に横たわる低比抵抗域が存在することが分かった。この低比抵抗域は、深さ
100km以深にまで達しており、その生成には太平洋プレートからの脱水が関与している可
能性が示唆された。

前計画で実施した跡津川断層域における総合集中観測については、地震波形3成分デー
タを用いて、コードQ (Q_c) の解析を継続して行い、低周波数帯である1.5 Hz帯や2.0 Hz
帯では、北東-南西方向に跡津川断層帯と重なるように低コードQ域（高コード Q^{-1} 域）が
広がり、跡津川断層帯から離れるにつれ、高コードQ（低コード Q^{-1} ）になることが示され
た（東京大学地震研究所 [課題番号：1417]）。Nakajima et al. (2010)による地震波ト
モグラフィのS波速度構造と比較すると、上部地殻下部から下部地殻でのS波速度と正の
相関が見られ、低周波数帯におけるコードQ値は地殻の脆性-延性遷移領域を反映したパ
ラメータであるというこれまでと調和的な結果が得られた。

2007年能登半島地震の余震のメカニズム解から推定された応力の深さ変化（Kato et
al., 2011, Yoshimura et al., 2008）について、断層の深部延長の滑りによる解釈が行
われ、深部で逆断層的、浅部で横ずれ型の応力場が再現された（東京大学地震研究所 [課
題番号：1417]）。また、能登半島地震の震源域では、下部地殻内の低速度・低比抵抗異
常域から推定されるWeak Zoneは震源域を超えて続いていないと推定されるのに対して、
跡津川断層においては、下部地殻内の低速度・低比抵抗異常域は大規模なものであり
（Nakajima et al., 2007; Yoshimura et al., 2009）、深部延長だけでなくその両端部を
含めてWeak Zone（変形集中帯）となっていることから、新潟-神戸歪集中帯の走向方向の
Weak Zoneのつながりが、ひずみ集中帯（Sagiya et al., 2000）の形成に関係している可
能性が指摘された。

（内陸地震発生の準備過程）

福岡県西方沖地震の余震のメカニズム解から、新たに開発された手法（Matsumoto et
al., 2012）により推定された断層端及び破壊開始点での非弾性変形を他地域と比較する
ために、同じ横ずれ型地震で近年発生した最大規模の内陸地震である1995年兵庫県南部
地震の震源域を対象とした解析が行われた（九州大学 [課題番号：2203]）。Hardebeck and
Michael (2006)の応力テンソルインバージョンを適用した結果、1) σ_1 軸はほぼ東西
で安定、2) 応力比が小さく（0.1-0.3）、 σ_2 、 σ_3 が近接、3) 北東方向は横ずれ場、
南西方向は逆断層場という結果が得られた（図12）。Matsumoto et al. (2012)による手
法を用いて広域応力場と非弾性変形源を推定した結果、広域応力は横ずれ応力場である

が、応力比が小さく(0.1-0.3)、 σ_2 、 σ_3 が近接していることが推定された。これらは断層南西部では地震の滑りによって鉛直応力<水平最小圧縮力となった可能性が指摘された。また、淡路島側の断層端や明石海峡周辺で大きな非弾性変形がみられ、断層端の応力集中や震源付近の応力場の乱れに対応すると解釈された。このように、断層端および破壊開始点では大きな非弾性変形が見られ、福岡県西方沖地震震源域で得られた特徴と同様な結果であることから、これらが地震発生及び停止に関連している可能性が示唆された。

山陰地方の地震帯中部、島根県東部から鳥取県西部地域における満点システムを用いた稠密地震観測から、断層への応力蓄積過程に関する知見が得られた(京都大学防災研究所[課題番号:1808])。2009年11月から2011年10月までのデータを用いて決定したメカニズム解のP軸の方位分布において、Kawanishi et al. (2009)に報告されているように、南部ではほぼ東西であるのに対して、北へ行くほど北西-南東方向へ回転している空間変化が見られた(図13)。定常的な地震活動の見られる島根県東部において応力逆解析が行われ、地震帯中央部のR2, R3付近で最大主圧縮応力軸が回転しており、深部延長の滑りで説明可能であることが報告された。トモグラフィーによる山陰地方の地震帯中部での速度構造の推定も行われ、微小地震活動は顕著な低速度及び高速度域を避けるように分布していること、黒線で示された2000年鳥取県西部地震の余震域、及び2000年10月に誘発された地震活動及び1978年の三瓶山の地震の余震分布の両端に低速度異常域があるように見えることが示された(図14)。低速度異常域では周囲より弾性定数が小さいと考えられるため、その周辺に局所的な応力集中を起こした可能性が示唆された。

(断層の強度回復過程)

野島断層近傍の地表岩盤に設置されたアクロス震源の連続運転を2012年10月~2013年1月に実施した。過去7回の連続運転(2000年1月~2001年4月, 2003年3月~6月, 2005年8月~9月, 2007年11月~2008年5月, 2009年9月~2010年1月, 2010年11月~2011年1月, 2011年11月~2012年2月)データと合わせた解析により、アクロス震源と800 m孔底地震計の間の伝達関数からP波およびS波の走時と振幅の経年変化を推定するとともに、1999年6月及び9月に試験的に実施した実験データについても再解析を行い、共通の周波数帯の応答を取り出して比較することにより、1999年~2012年にわたる経年変化が推定された(京都大学防災研究所[課題番号:1807])。その結果、走時は各期間で±1ms程度のばらつきを持つものの、1999年~2012年にかけて約2 ms (0.4%)程度速くなる傾向が確認された(図15)。同じ伝達関数を用いて、後続波部分における走時変化についても推定することにより、鉛直成分については変化がなく、水平成分については変化がないかもしくは0.1%程度速くなっていることが推定された。後続波(散乱波)部分は直達波経路よりも広い領域の速度変化を反映すると考えられるので、野島断層の破碎帯近傍ではその周辺領域よりも速度の速まり(強度回復)が大きい可能性が示唆された。

エ. スラブ内地震の発生機構

スラブ内地震の発生機構に関していくつかの重要な知見が得られた。

東北地方のスラブ内地震にみられる太平洋プレート上部境界でのPS変換波(Matsuzawa et al., 1986)の走時を用いて、海洋性地殻の面的なP波速度構造が推定された(東北大

学〔課題番号：1208〕）。その結果、P波速度は前弧側で6.5-7.5 km/s、背弧側で7.5-8.5 km/sであり、火山フロント下を境に速度が大きく変化することが明らかにされた。深さ70-90kmの範囲では、観測された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%程度遅く、含水鉱物に加えて多量の水が存在していることが強く示唆された。また、海洋性地殻内で地震活動が活発な上面地震帯（Kita et al., 2006）はこの低速度域とよい対応を示すことから（図16）、地殻内地震は含水鉱物の脱水によって生じた高間隙圧水によって生じているというモデルが支持された。

北海道下において稠密地震観測網のデータも用いて地震波減衰構造が推定された（東北大学〔課題番号：1208〕）。太平洋スラブ内は全体的には、これまでの研究と同様に低減衰（高Q）となっているが、地震波低速度領域としてイメージングされている海洋性地殻領域は高減衰（低Q）を示すことが明らかになった（図17）。これらの知見も海洋性地殻での地震発生には流体が関わることを支持する結果である。

新潟県新発田市の下の深さ約155kmで発生している稍深発地震のクラスターについて、波形解析からその特徴を調べ、下記の知見が得られた（東北大学〔課題番号：1208〕）。地震クラスターは、太平洋スラブの地殻内に位置していること、正断層、逆断層地震が発生していること（図18）、波形の相似性から9つの地震クラスターに分類できることが明らかになった。また、相互相関データを用いた震源決定の結果、正断層地震は逆断層地震よりも1km程度浅部で発生していることがわかった（図18b）。この結果は、同じクラスターの中で応力場が急変していることを示しており、海洋性地殻がエクロジャイト化する際の体積減少に伴って、浅部の引張場、深部の圧縮場が形成されているとすると、観測事実を説明することができると考えられた（図18c）。

これまでの課題と今後の展望

アスペリティの実体に関して、東北地方太平洋沖の大滑り域において浅部から深部まで非地震性滑りレートが小さいことが確認された。南西諸島沖では、1911年の喜界島近海の巨大地震の震源や断層モデルが推定されるとともに、奄美大島の北方海域で発生した2009年10月30日M6.8の地震は、1911年の巨大地震の断層深部で発生したことが示された。海溝軸近くに決定された1911年の巨大地震の震源付近では非地震性滑りレートが小さく、地震発生域の深部ではM6.8のプレート境界地震が発生したことから、南西諸島沖においても東北地方太平洋沖と同様に、巨大地震の発生域では、プレート境界の固着域が広い可能性が示唆された。一方、日向灘においては、北部の大地震の発生する地域においては、震源域付近で非地震性滑りレートが小さいことが報告されたが、海溝近くの浅い領域では非地震性滑りレートが大きく、東北地方太平洋沖や喜界島近海とは異なっているように見える。日向灘北部では、過去に南海トラフの巨大地震の震源域が及んだ可能性が指摘されているが、小繰り返し地震が発生しない領域では滑りレートの推定が出来ないため、他の手法を用いた推定が非常に重要である。

非地震性滑りの時空間変化に関して、2011年東北地方太平洋沖地震の発生前の2011年1月下旬から、直上に設置された海底水圧計および陸上沿岸部の体積歪計でスロースリップイベントが観測され、それは少なくとも3月9日の最大前震直前まで継続していた可能性があること、観測記録のトレンドの変化から、その滑り域が、2月下旬から3月9日の発生直前にかけて、海溝軸の方向に拡大していた可能性が指摘された。これら

の知見は、超巨大地震の発生と直接関係している可能性のある極めて重要な知見であり、他の観測結果による検証が重要である。

東北地方太平洋沖においては浅部超低周波地震が発生していることが防災科研 F-net の広帯域地震計記録を用いた解析により見出され、2011年東北地方太平洋沖地震後に岩手沖及び福島・茨城沖の活動が活発化したのに対し、宮城沖については地震後に活動が検出されていないことが報告された。2003年十勝沖地震に関連して超低周波地震活動のマイグレーション方向の違いも推定されたが、これらの知見をさらに蓄積して、地震発生との関係を解明することが重要である。

九州から房総沖においても、深部低周波微動や超低周波地震活動とともに、スロースリップイベントに関して興味深い知見が多数得られた。GNSS連続観測によっても、短期的なスロースリップイベントが多数検出され、四国、紀伊半島、東海地方に加えて、日向灘から種子島にかけての領域と相模トラフ沿いにおいても短期的スロースリップの断層モデルが推定され、それぞれの活動の時空間的な特徴や時間変化が明らかになりつつある。これらの知見をさらに蓄積するとともに、断層モデルの推定精度を向上し、地震発生との関係を解明することが重要である。琉球弧の西表島ではスロースリップに伴って重力変化が観測され、スロースリップ時に高圧間隙水の拡散がおきている可能性が示唆された。スロースリップの発生過程を推定するだけでなく、地震発生を考える上でも重要な知見であり、今後の発展を期待したい。

ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程に関しても、物理モデルの構築へ向けて突破口となると期待される重要な知見がいくつか得られた。断層直下の下部地殻の不均質構造に関しては、岩手・宮城内陸地震や濃尾地震の震源域で、低速度異常や下部地殻の不連続構造が推定された。能登半島地震の震源域や山陰地方の地震帯に属する島根県東部において、メカニズム解の逆解析から推定された応力場が深部滑りにより解釈可能であることが示された。山陰地方の地震帯では、地震発生域の断層の両端に低速度異常が推定され、断層両端の変形による応力集中の可能性が示唆された。さらに、新潟-神戸歪集中帯に属する跡津川断層周辺で推定された不均質構造と、能登半島地震の震源域で推定されたものとの比較から、不均質構造の水平方向におけるつながりがひずみ集中帯の形成に関係している可能性が示唆された。

スラブ内地震の発生機構に関して、今年度においても、東北地方および日高地方において、脱水脆性仮説を支持する重要な知見が多数得られた。スラブ内の詳細な応力場の推定にも成功しつつあり、スラブ内地震の発生に至る過程の解明へ向けて、今後の進展が大いに期待される。

成果リスト

秋田藤夫・岡崎紀俊・高橋浩晃, 2012, 屈斜路カルデラの地下温度構造, 日本温泉科学会 2012 年秋季大会講演予稿集.

後藤和彦, 2013, 1911年に喜界島近海で発生した巨大地震の震源位置の再評価, 地震 2, 65, 231-242.

Hiramatsu, Y., K. Iwatsuki, S. Ueyama, T. Iidaka, and the Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, 2010, Spatial variation in shear wave splitting of the upper crust in the zone of inland high strain rate, central Japan, Earth Planets Space, 62, 675-684.

- Hiramatsu, Y., A. Sawada, Y. Yamauchi, S. Ueyama, K. Nishigami, E. Kurashimo, and the Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, Spatial variation in coda Q and stressing rate around the Atotsugawa fault zone in a high strain rate zone, central Japan, *Earth Planets Space*, in press.
- Hirose, H., Hisanori Kimura, Bogdan Enescu, and Shin Aoi (2012) Recurrent slow slip event likely hastened by the 2011 Tohoku earthquake, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 109(38) 15157-15161, doi:10.1073/pnas.1202709109.
- 生田領野・山岡耕春・渡辺俊樹・國友孝洋・西上欽也, ACROSS による淡路島野島断層近傍における 11 年間の地震波速度モニタリング, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 20 日 (ポスター) .
- 生田領野・山岡耕春・渡辺俊樹・國友孝洋・西上欽也, ACROSS による淡路島野島断層近傍の長期地震波モニタリング, 日本地震学会 2012 年度秋季大会, 2012 年 10 月 17 日 (口頭) .
- 今西和俊・桑原保人, 2012, 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域における正しい応力場の推定—応力インバージョンにおけるデータセットの抽出基準の重要性—, 地球惑星科学連合 2012 年大会, SCG68-2.
- 今西和俊・桑原保人, 2012, 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源域における正しい応力場の推定—応力インバージョンにおけるデータセットの抽出基準の重要性—, 地球惑星科学連合 2012 年大会, SCG68-2.
- Ito, Y. R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, S. Miura, M. Mishina, K. Suzuki, T. Tsuji, J. Ashi, 2013, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Tectonophysics*, in press.
- 伊藤喜宏・日野亮太・木戸元之・藤本博己・長田幸仁・稲津大祐・三浦哲・太田雄策・内田直希・辻健・芦寿一郎・三品 正明, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震発生前のスロースリップイベント, 日本地球惑星科学連合2012年大会, SCG63-01.
- 伊藤喜宏・芝崎文一郎・柄谷和輝・日野亮太・中島淳一, 2012, 有限要素法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震による地殻内変形, 日本地球惑星科学連合2012年大会, SSS39-06.
- Ito, Y., R. Hino, M. Kido, H. Fujimoto, Y. Osada, D. Inazu, Y. Ohta, T. Iinuma, M. Ohzono, M. Mishina, S. Miura, K. Suzuki, T. Tsuji, J. Ashi, 2012, Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *AGU 2012 Fall meeting*, T21F-01.
- Kato, A. et al., 2011, Anomalous depth dependency of the stress field in the 2007 Noto Hanto, Japan, earthquake: Potential involvement of a deep fluid reservoir, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L06306, doi:10.1029/2010GL046413.
- Kawanishi, R., Y. Iio, Y. Yukutake, T. Shibutani, and H. Katao, 2009, Local stress concentration in the seismic belt along the Japan Sea coast inferred from precise focal mechanisms: Implications for the stress accumulation process on intraplate earthquake faults, *J. Geophys. Res.*, 114, B01309, doi:10.1029/2008JB005765.
- Kita, S., T. Okada, J. Nakajima, T. Matsuzawa, and A. Hasegawa, 2006, Existence of a seismic belt in the upper plane of the double seismic zone extending in the along-arc direction at depths of 70-100 km beneath NE Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24310,

doi:10.1029/2006GL028239.

- Kita, S., A. Hasegawa, J. Nakajima, T. Okada, 2012, T. Matsuzawa and K. Katsumata, 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*, doi:10.1029/2012JB009356, Vol. 117, B12301.
- 国土地理院, 2012, 東北地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 87, 127-141.
- 国土地理院, 2012, 関東甲信地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 87, 200-205.
- 国土地理院, 2012, 中国・四国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 87, 438-447.
- 国土地理院, 2012, 東北地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 88, 131-139.
- 国土地理院・東京大学地震研究所, 2012, 御前崎における絶対重力変化, 196回地震予知連絡会.
- 国土地理院・東京大学地震研究所, 2012, 御前崎における絶対重力変化, 197回地震予知連絡会.
- 国土地理院・東京大学地震研究所, 2013, 御前崎における絶対重力変化, 198回地震予知連絡会.
- Lin Weiren, et al., 2013, Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Science*, 339, 687-690, (DOI: 10.1126/science.1229379).
- Matsumoto, S., 2012, Modeling heterogeneous deviatoric stress field around the hypocentral area of the 2005 Fukuoka earthquake (M7.0) by spatially distributed moment tensors, *Journal of Geophysical Research*, VOL. 117, B03303, doi:10.1029/2011JB008687, 2012. 03.
- Matsuzawa, T., N. Umino, A. Hasegawa and A. Takagi, 1986, Upper mantle velocity structure estimated from PS-converted wave beneath the northeastern Japan arc, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 86, 767-787.
- Nakajima, J., and A. Hasegawa, 2007, Deep crustal structure along the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Japan: its origin and segmentation, *Earth Planets and Space*, 59, e5-e8.
- Nakajima, J., A. Kato, T. Iwasaki, S. Ohmi, T. Okada, T. Takeda, and The Japanese University Group of the Joint Seismic Observations at NKTZ, 2010, Deep crustal structure around the Atotsugawa fault system, central Japan: A weak zone below the seismogenic zone and its role in earthquake generation, *Earth Planets and Space*, 62, 555-566.
- Nakajima, J., N. Uchida, T. Shiina, A. Hasegawa, B.R. Hacker, and S.H. Kirby, 2013, Intermediate-depth earthquakes facilitated by eclogitization-related stresses, *Geology*, in press.
- 西村卓也, 2012, 測地観測データに基づく東北日本の最近120年間の地殻変動, *地質学雑誌*, 118, 279-293, doi:10.5575/geosco.2012.0027.
- 岡田知己・米川真紀・吉田圭佑・高木涼太・松澤暢・2011年東北地方太平洋沖地震合同余震観測グループ, 2012, 東北地方西部地域の地殻構造と地震活動, 日本地震学会2012年大会, B12-04.
- Okada T., Umino, T., Hasegawa A., and Group for the aftershock observations of the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008, 2012, Hypocenter distribution and heterogeneous seismic velocity structure in and around the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake, NE Japan—Possible seismological evidence for a fluid driven compressional inversion earthquake, *Earth Planets Space*, 64,

doi:10.5047/eps.2012.03.005.

大久保修平・張新林・田中愛幸・今西祐一・植木貞人・大島弘光・前川徳光, 2012, 2011年東北地方太平洋沖地震で生じた地上重力の余効変動, 日本測地学会第118回講演会要旨集, 43-44.

大久保修平, 2012, ナノで見た日本列島の重力変化ー東北地方太平洋沖地震の影響, 地震ジャーナル, 54, 24-25.

大園真子・高橋浩晃・一柳昌義・山口照寛・眞城亮成・篠原大地・湊宏司, 2012, 屈斜路カルデラ周辺における稠密GPS観測, 日本測地学会2012年秋季大会.

Ozawa, S., T. Nishimura, H. Munekane, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire, 2012, Preceding, coseismic, and postseismic slips of the 2011 Tohoku earthquake, Japan, *J. Geophys. Res.*, 117, B07404, doi:10.1029/2011JB009120.

Ozawa, S., H. Yarai, T. Imakiire, and M. Tobita, Spatial and temporal evolution of the long-term slow slip in the Bungo Channel, Japan, *Earth Planets Space*, in press.

Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada, 2000, Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan, *PAGEOPH*, 157, 2303-2322.

鷺谷威・歪み集中帯GPS観測グループ, 2012, GPS稠密観測から推測される日本海東縁歪み集中帯の変形様式, 日本地震学会2012年秋季大会.

水藤 尚・西村卓也・小林知勝・小沢慎三郎・飛田幹男・今給黎哲郎, 2012, 2011年(平成23年)東北地方太平洋沖地震に伴う地震時および地震後の地殻変動と断層モデル, *地震*2, 65, 95-121, doi:10.4294/zisin.65.95.

鈴木秀市・伊藤喜宏・木戸元之・太田雄策・長田幸仁・日野亮太・藤本博己, 2012, 音響トランスポンダを用いた音響測距による海底ベンチマークの位置決定精度について, 日本地学会第118回講演会, P-1.

Suzuki, S., Y. Ito, M. Kido, Y. Ohta, Y. Osada, R. Hino, H. Fujimoto, 2012, Accuracy of acoustic positioning of seafloor benchmarks by a generic acoustic transducer pair, *AGU 2012 Fall meeting*, T13F-2696.

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・勝俣啓・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ー微小地震スペクトルを用いた推定ー, *地震* 第2輯, 第65巻2号, 175-187.

田中愛幸・岡村盛司・宮崎隆幸・名和一成・今西祐一・大久保修平・中村衛, 長期的スロースリップの発生時に観測された絶対重力変化, 日本測地学会第118回講演会要旨集, 31-32.

田中愛幸・今西祐一・大久保修平・名和一成・田村良明・宮地竹史・池田博・岡村盛司・宮崎隆幸・中村衛, 2012年5月の琉球弧の長期的スロースリップとその前後に観測された重力変化, 日本地震学会2012年秋季講演会予稿集, 200.

内田直希・松澤 暢, 2011東北地方太平洋沖地震震源域の地震活動特性ー釜石沖地震との比較を基にして, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 千葉, 幕張メッセ, 2012年5月.

Uchida, N., T. Matsuzawa, W. L. Ellsworth, K. Imanishi, K. Shimamura, and A. Hasegawa, 2012, Source parameters of microearthquakes on an interplate asperity off Kamaishi, NE Japan over two earthquake cycles, *Geophys. J. Int.*, 189, 999-1014.

van Keken, P. E., S. Kita, and J. Nakajima, 2012, Thermal structure and intermediate-depth

seismicity in the Tohoku-Hokkaido subduction zones, *Solid Earth*, 3, 355-364, doi:10.5194/se-3-355-2012.

Yamashita Y, H. Shimizu, and K. Goto, 2012, Small repeating earthquake activity, interplate quasi-static slip, and interplate coupling in the Hyuga-nada, southwestern Japan subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L08304, doi:10.1029/2012GL051476.

山下裕亮, 2013, Heterogeneity of interplate coupling in the Hyuga-nada region revealed by the analysis of interplate earthquakes, 九州大学博士論文.

山下裕亮・清水 洋, 2012, 小繰り返し地震を用いた日向灘におけるプレート間固着状態の推定, 西部 地区自然災害資料センターニュース, 47, 14-19.

Yoshimura, R., et al., 2008, Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (Mj6.9), central Japan, *Earth Planets Space*, 60, 117- 122.

Yoshimura, R., et al., 2009, Magnetotelluric Transect Across the Niigata-Kobe Tectonic Zone, Central Japan: A Clear Correlation Between Strain Accumulation and Resistivity Structure *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20311, doi:10.1029/2009GL040016.