

「地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）」

平成20年度年次報告

項目別

平成21年10月

科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会

観測研究計画推進委員会

目 次

平成 20 年度の成果の概要	1
1. (1) 「日本列島及び周辺域の長期広域地殻活動」研究計画	1 5
1. (2) 「地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動」研究計画	2 3
1. (3) 「地震破壊過程と強震動」研究計画	4 5
1. (4) 「地震発生の素過程」研究計画	5 5
2. (1) 「地殻活動予測シミュレーションモデルの構築」研究計画	6 3
2. (2) 「地殻活動モニタリングシステムの高度化」研究計画	7 3
2. (3) 「地殻活動情報総合データベースの構築」研究計画	8 5
3. 「新たな観測・実験技術の開発」研究計画	8 7

平成 20 年度の成果の概要

平成20年度の成果の概要

1. はじめに

平成15年7月に科学技術・学術審議会において建議された「地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）の推進について」（以下、「第2次新計画」という。）のもと、平成16年度から平成20年度にかけて地震予知に関する研究計画が実施された。第2次新計画では、計画を推進するために、科学技術・学術審議会測地学分科会地震部会の下に、計画実施機関からの委員で構成する観測研究計画推進委員会を平成16年4月に設置し、年度ごとに観測研究実施計画及び観測研究成果報告の取りまとめを行ってきた。

本報告は、第2次新計画の成果について、平成20年度の研究成果を中心に取りまとめたものである。

なお、計画の実施機関は以下の通りである。

- ・国立大学法人： 北海道大学、弘前大学、東北大学、秋田大学、東京大学、東京工業大学、名古屋大学、京都大学、鳥取大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学
- ・独立行政法人： 情報通信研究機構、防災科学技術研究所、海洋研究開発機構、産業技術総合研究所
- ・政府機関： 国土地理院、気象庁、海上保安庁

地震の発生を定量的に予測するためには、広域の地殻応力が特定の断層域に集中していく地震発生の準備過程を理解し、地震断層域で応力が再配分されるしくみを理解する必要がある。さらに、観測を通じてこれらの過程を迅速に把握するとともに、地殻活動の推移予測を目的とした物理モデルに基づいた数値シミュレーションモデルによる予測を行うことが必要である。この考えに基づき平成16年度から実施された第2次新計画では、次のような項目に沿って研究を実施した。

- (1) 地震発生に至る地殻活動解明のための観測研究の推進
- (2) 地殻活動の予測シミュレーションとモニタリングのための観測研究の推進
- (3) 新たな観測・実験技術の開発
- (4) 計画推進のための体制の整備

上記項目のうち「(1) 地震発生に至る地殻活動解明のための観測研究の推進」は、地震発生に至る地殻活動の全過程と、その過程に伴って現れる種々の地殻現象の発生機構を解明するための総合的観測研究であり、次のような小項目に分けられている。

- 1) 日本列島及び周辺域の長期広域地殻活動
- 2) 地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動
- 3) 地震破壊過程と強震動
- 4) 地震発生の素過程

また、「(2) 地殻活動の予測シミュレーションとモニタリングのための観測研究の推進」は、地殻活動の推移予測を行うための地殻活動予測シミュレーションモデルの開発研究及び地殻の状態を実時間で把握する地殻活動モニタリングシステムの高度化のための研究であり、次のような小項目に分けられている。

- 1) 地殻活動予測シミュレーションモデルの構築
- 2) 地殻活動モニタリングシステムの高度化
- 3) 地殻活動情報総合データベースの開発

「(3) 新たな観測・実験技術の開発」は、地震発生に至る一連の過程に伴う地殻現象を高精度で検出するための、新たな観測・実験技術の開発研究である。

「(4) 計画推進のための体制の整備」については、計画全体を効果的に推進できる体制の整備、観測研究プロジェクトを立案・推進するための広く開かれた仕組みの整備を図るものであり、平成16年度から科学技術・学術審議会測地学分科会地震部会に設置された観測研究計画推進委員会が重要な役割を担っている。観測研究計画推進委員会は、国立大学法人、独立行政法人、政府機関等の組織がそれぞれの機能に応じた役割分担と密接な協力連携の下に計画を推進するための委員会であり、本報告書も同委員会により編集されている。

2. 平成20年度の重要な成果

2-1. 研究計画の特筆すべき成果

1) 東海・東南海地震の震源域におけるプレート間固着の解明

中部日本のGPS（汎地球測位システム）データを用いたブロック断層モデルの解析により、ゆっくり滑り発生時期のうち2001年1月～2004年8月について、およびそれ以外の2つの時期（1996年4月～2000年4月、2006年1月～2008年8月）について、プレート間の固着の分布の推定を行った。駿河湾から熊野灘にかけてのプレート境界は、深さ10～20kmの部分においてほぼ全面的に固着しており、これはゆっくり滑り発生時においても変化していない。東海地域における過去の研究成果や1944年（昭和19年）東南海地震（M7.9）の震源断層モデルと整合的な結果が得られており、熊野灘と比較して東海地域では滑り欠損が半分程度と小さくなること、深部低周波微動はプレート間の固着がほぼ無くなる場所で発生していること、東海地域で観測されたゆっくり滑りは固着域から安定滑り領域への遷移領域で発生したことも分かる（図1）。

2) 内陸地震発生域の歪・応力集中機構

跡津川断層周辺において、これまでの約2倍の検知能力で地震活動が求められた他、応力逆解析、地震波トモグラフィ法解析、制御震源構造探査、比抵抗構造探査が実施された。上部地殻に1858年飛越地震のアスペリティに相当する高速度域が存在し、その下方の下部地殻に存在する低速度域が、上記の高速度域の間にまで及ぶことを示した。アスペリティに相当する上部地殻内の非地震発生域は高比抵抗、その周囲の地震頻発域および下部地殻の低速度域は低比抵抗で、流体の存在を強く示唆する。跡津川断層域両端では火山地域があり、低速度域が下部地殻から上部地殻にまで達しており、その非弾性効果が破壊の進展を妨げ、結果的に断層のサイズを規定していると考えられる。GPS観測によれば、高速度域を含む跡津川断層のほぼ全体（深さ15kmまで）が固着している可能性が高く、観測された変位は下部地殻における内部変形でまかなわれていると考えられる。これらの結果から、地殻内に蓄積された応力が高速度域の境界付近に集中し、最終的には破壊に至るという内陸地震発生モデルが考えられる。地殻内の流体の存在が、構造の不均質な部分に応力を集中させ、さらにこの過程が進展すると考えられる（図2）。

3) プレート内地震の発生機構

沈み込む海洋プレート（スラブ）内では、大地震がしばしば発生し、またプレート境界地震とプ

プレート内地震との相互作用を明らかにするためにも、プレート内地震の発生機構の理解は重要である。DD（二重時間差）トモグラフィ法を用い、北海道東部の太平洋スラブ内の詳細な地震波速度構造を推定した。その結果、二重地震面下面に沿って低速度域が分布すること、地震活動があまり活発でない上面と下面の間（面間）は高速度であることが明らかになった。ただし、1993年（平成5年）釧路沖地震（M7.8）の余震域は下面から面間に向かってほぼ水平に伸びているが、そこでは面間であっても例外的に低速度を示すという特徴がある（図3）。下面や釧路沖地震の余震域の速度は、無水カンラン岩の速度よりも小さいため、そこには水が分布することが期待される。これらの成果は、二重地震面下面の地震、及びスラブ内地震の発生には水が深く関与していることを示唆している。

2-2. 大地震の緊急的研究とその成果

大地震の直後には集中的観測を行い、震源断層の形状、余震や余効変動、周辺の地殻構造と地震発生域の関係、地表変状などの知見を得ることにより、地震発生のプロセスの解明に関する多くの成果をあげている。

1) 2008年（平成20年）岩手・宮城内陸地震（M7.2）

2008年6月14日に発生した岩手・宮城内陸地震について、緊急の地震およびGPS観測を実施した。余震は西側に傾斜した分布を示しているが、一部では東傾斜の分布も見られ、複雑な震源断層を示している。地震波トモグラフィ解析から、余震は高速度域内で発生していることが分かった。震源域直下の下部地殻から最上部マントルには顕著な低速度域が存在しており、地殻流体の分布が内陸地震の発生機構に密接に関連していることを示している（図4）。GPS観測から、地震時滑り発生域の浅部延長で顕著な余効滑りが発生したことが確認された。震源域北部では、地震時滑りと余効滑りが別々の断層面で発生した可能性がある（図5）。

3. 成果の概要

（1）地震発生に至る地殻活動解明のための観測研究の推進、（2）地殻活動の予測シミュレーションとモニタリングのための観測研究の推進、（3）新たな観測・実験技術の開発の3項目について、平成20年度に達成された成果を中心に第2次新計画の成果の概要を示す。

3-1. 地震発生に至る地殻活動解明のための観測研究の推進

1) 日本列島及び周辺域の長期広域地殻活動

日本列島の地殻活動を理解し予測するためには日本列島から東アジア規模の観測研究が必要である。これは、日本列島周辺でのプレート運動によりもたらされる力が日本列島における活発な地殻活動の原因であり、さらにその力が日本列島内で再配分され地震発生域に作用しているからである。そのため、日本列島周辺のプレート運動の詳細および日本列島規模の構造と変形を知る必要がある。

ア. 日本列島及び周辺域のプレート運動

アムールプレート東縁部における多点でのGPS観測や、周辺のGPS観測データから推定した、ア

ムールプレートのユーラシアプレートに対するオイラー極は、用いるデータセットにより大きく位置が異なり、「アムールプレート」と称されている地域は実は一枚の剛体で近似することが不適切であるという重要な知見が得られた。

イ. 列島規模のプレート内の構造と変形

三次元速度構造を用いた変換波の波形解析により、東海から九州北部までの領域において新たなフィリピン海プレート形状モデルの構築を行った。従来の研究で明らかにされている中国地方に加え、淡路島周辺や琵琶湖北東部下に非地震性海洋プレートの存在を確認した。また、海洋プレート内の地震の分布やメカニズムはプレート形状に強く影響を受けていることが明らかになった。

2) 地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動

応力の集中と地震の発生の関係を解明するには、地震発生に至る準備過程から直前過程までの地殻活動を相互に関連する一連の過程として研究する必要がある。近年、急速に理解の進んだプレート境界における歪・応力集中機構、内陸地震の準備過程、地震発生直前の物理・化学過程及び地震発生サイクルについて、それぞれの成果を概観する。

ア. プレート境界における歪・応力集中機構

アスペリティの位置を高精度で推定することは、地震発生予測のみならず強震動の予測にとっても極めて重要である。日本周辺のプレート沈み込み帯において、アスペリティの分布やその振る舞い、構造的な特徴などを明らかにするための観測研究が行われた。また、これまでアスペリティが知られていない領域でもその位置を推定可能にする目的で、既に位置が知られているアスペリティやゆっくり滑り域と、地下の構造の相関を調べる研究も進められてきた。

茨城県沖の M7 級地震が繰り返し発生している場所では、海山が存在する一方で、海山とアスペリティの位置が一致しないことが分かり、海山ではプレート間の摩擦がむしろ小さいことが分かった。海底地殻変動観測により、東海沖、相模湾、福島沖、宮城沖の海底基準点で定常的なプレート運動を検出した。これにより、現状の海底観測技術が、数年間の観測によりプレート運動を検出可能なことを実証した。また、プレート間の固着が福島沖では周囲と比べて強くないことを明らかにした。

ゆっくり滑りや深部低周波微動は、プレート境界の振る舞いの多様性を示すものであり、その物理過程を解明するために様々な観測研究を行ってきた。南海トラフ沿いで発生する深部低周波微動および超低周波地震の活動をモニターする手法を確立し、その時空間的な分布の特徴を明らかにした。深部低周波微動や短期的ゆっくり滑りに同期して発生する深部超低周波地震の震源過程解析を行った結果、特徴的時間が長いほど伝播速度が遅いという関係が示唆された。また、低周波微動とゆっくり滑りでは後者が本質的な現象であり、特定の条件が満たされた時にのみ微動が発生していることが示された。

イ. 内陸地震発生域の不均質構造と歪・応力集中機構

跡津川断層周辺において不均質構造と歪・応力集中機構を詳しく調べた他、2005年（平成17年）福岡県西方沖の地震（M7.0）、2004年（平成16年）新潟県中越地震（M6.8）、2007年（平成19年）新潟県中越沖地震（M6.8）、2007年能登半島地震（M6.9）、2008年岩手・宮城内陸地震の震源域周辺において、余震観測、構造探査などを実施した。その結果、内陸地震震源域の不均質構造の解明

が大きく進展し、地質構造との対応、破壊過程や余震発生様式との対応が明らかとなった。

ウ．地震発生直前の物理・化学過程

南アフリカ金鉱山の地下2～3kmにおいて、採掘に伴って発生するM3以下の地震活動とそれに伴う岩盤挙動の至近距離・高感度観測を行った。2つの観測点でゆっくりとした歪変化が発見され、そのうちの一部には明瞭な前駆的歪変化が見られた。また、歪変化の規模と特徴的な継続時間との関係は、プレート境界などのゆっくり滑りについて提唱された両者の関係とは傾向が異なることが分かった。

エ．地震発生サイクル

日本海溝や相模トラフ、南海トラフ等で発生する海溝型の大地震について、通常考えている地震発生サイクルよりももっと長いサイクル（超サイクル）が存在することが明らかとなった。また、千島海溝西部や宮城県沖日本海溝の津波堆積物の調査によって、海溝型地震は常に同じような規模で発生するのではなく、まれに複数の震源域が連動破壊して巨大津波を発生させることを明らかにし、チリ海溝やインド洋東岸でも巨大津波の履歴の解明に成功した。

3) 地震破壊過程と強震動

三次元地下構造の考慮や近地強震記録、遠地実体波波形、GPS 測地データを用いた同時逆解析などにより震源過程解析の高度化を一層進め、これらの手法により国内外の多数の地震を解析した。その結果得られるアスペリティの微細構造を微小地震分布や構造探査結果等と比較して、アスペリティの特性の解明を進めた。強震動予測の高度化のために、高精度の地下構造モデルの構築や、強震動予測シミュレーションの実証的研究を行った。

ア．断層面上の不均質性

三次元地下構造でのグリーン関数（地震波伝達関数）を用いた震源過程の解析手法を開発し、これまでに1995年（平成7年）兵庫県南部地震（M7.3）、2003年（平成15年）宮城県北部の地震（M6.4）の震源モデルを推定した。また、強震波形と地殻変動データとの広帯域記録統合解析により、詳細な震源過程とアスペリティ位置の高分解能化が実現し、地震性滑りから余効滑りに至る震源過程の全体像が明確になった。

2008年1月11日に発生した岩手県釜石沖の地震（M4.7）の滑り分布を、近地広帯域地震波形逆解析により推定し、一連の釜石沖の繰り返し地震がほぼ同じアスペリティの繰り返し滑りであることを確認した。一方で高周波地震動解析からは、滑り分布にわずかな相違が存在することが示された。このように、アスペリティの破壊は詳しく見ると必ずしも毎回同じではなく、大地震の破壊過程の予測には、個々のアスペリティの滑り履歴の詳細な検討が課題となる。

イ．強震動シミュレーション・強震動予測

関東平野の長周期地震動の生成伝播特性を強震観測データ解析と、強震動シミュレーションの比較から詳しく調査し、震源の位置と規模を特定すれば、平野で強く生成する長周期地震動の発生予測が可能であることを示した。また、近い将来に発生が懸念される主要な海溝型地震を想定し、長周期地震動の予測地図の作成に必要な中部・関東・近畿地域・南東北の地下構造モデルの構築を進めた。

「地震－津波連成シミュレーションコード」を新たに開発し、海溝型の大地震による強震動と大津波の発生過程を検証した。まず三次元不均質場での地震波伝播と地殻変動について地震動シミュレーションを行い、そこで求められた海底面の上昇と沈降の時空間変化を入力として三次元ナビエ・ストークス式の計算により津波を評価した。

4) 地震発生の素過程

観測可能な V_p 、 V_s 、比抵抗、 Q 等から、どのような物質がどのような状態にあり、どのような破壊・摩擦特性を持っているのか推定できるようになることを目指した実験的・理論的研究を推進した。摩擦破壊現象の物理・化学的素過程を実験的に明らかにしていくことによって、アスペリティの実体、摩擦破壊現象の規模依存性などについて理解を深めることを目標とした。

ア. 摩擦・破壊現象の物理・化学的素過程

深さ 100－200 km 程度の^{やや}稍深発地震の発生メカニズムとして蛇紋岩の脱水脆性化が有力視されてきたが、脱水反応時の体積変化の物理化学的考察からは過剰間隙水圧は生じないことになる。このような考えにもとづき、非常に高圧で脱水反応した蛇紋岩の変形実験を行い、不安定な破壊は起こらないことを示した。

イ. 地殻・上部マントルの物質・物性と摩擦・破壊構成則パラメータ

蛇紋岩は、非地震性の滑りを起こしやすい力学的性質を持っており、地震発生の力学に対して大きな影響を持つ。弾性波速度の分布から、沈み込み帯等において蛇紋岩の存在が示唆されていたが、従来解釈に用いられたのは、低温型蛇紋岩の弾性波速度データであるため適切でない。そこで、本計画においては、高温型蛇紋岩の弾性波速度を、地震発生場の高温・高圧を再現して計測した。トモグラフィで示唆されるほど低い弾性波速度を再現するためには、高温型蛇紋岩自体の弾性波速度だけでは説明できず、間隙水が存在していることが必要であるとの結論を得た。

弾性波を透過させることで、断層面の固着状態を非破壊的にモニターすることが定量的に可能なことが示され、固着滑り実験においては、载荷せん断応力がピーク値に達するより前に、物理的な固着のはがれは大方完了することがわかった。

3-2. 地殻活動の予測シミュレーションとモニタリングのための観測研究の推進

1) 地殻活動予測シミュレーションモデルの構築

「地殻活動予測シミュレーションモデルの構築」研究計画の目標は、北米、太平洋、フィリピン海、ユーラシアの四つのプレートが複雑に相互作用する日本列島域を一つのシステムとしてモデル化し、観測網からの膨大な地殻活動データをリアルタイムで解析・同化することで、プレート相対運動によって駆動される広域応力の増加から準静的な震源核の形成を経て動的破壊の開始・伝播・停止に至る大地震発生過程の定量的な予測を行うことである。

ア. 日本列島域

地殻マントルの弾性－粘弾性構造、プレート境界の三次元形状、断層構成則の環境依存性等を考慮した、日本列島域の地殻活動シミュレーションモデルのプロトタイプ(CAMPモデル)を構築した。また、2003年十勝沖地震(M8.0)について、準静的応力増加－動的破壊伝播－地震波動伝播の連成

シミュレーションを行い、理論的に予測された地震波形と実際に観測された地震波形が概ね一致することを示した。

イ. 特定の地域

摩擦特性の不均一性を考慮したシミュレーションにより、1994年（平成6年）三陸はるか沖地震（M7.6）の余効滑りと最大余震（M7.2）を含めて、三陸沖のプレート境界地震の繰り返しを説明するアスペリティモデルを構築した。これにより、摩擦特性の大まかな分布について知見が得られた。

ウ. 予測シミュレーションモデルの高度化

予測シミュレーションの高度化のため、余効変動のGPSデータ時間依存逆解析による摩擦パラメータ推定が行われた。また、現在の地殻活動予測シミュレーションでは考慮されていない物理過程を組み込むため、熱多孔質媒質中での破壊伝播シミュレーション、離散要素法による粉体シミュレーション、内陸地震のモデル化に向けた粘弾塑性有限要素法（FEM）コードの開発、有限要素法およびその拡張によるプレート境界域周辺の地殻変動シミュレーション、不均質媒質における破壊伝播シミュレーションモデルの高度化などが進められた。

2) 地殻活動モニタリングシステムの高度化

日本列島全域の地殻活動モニタリングは、政府の地震調査研究推進本部が策定した基盤的調査観測計画の下で整備が進められた地震及びGPS連続観測網により行われ、今日では、その観測データ及び解析結果は広く公開されている。モニタリングシステムによって得られるデータは、地殻活動予測シミュレーションモデルの構築やシミュレーション結果の検証において不可欠なものである。また、過去のデータとともに日本列島地殻活動情報データベースとして整備されることにより、大地震発生時の即時対応等にも活用できる。列島規模の広域のモニタリングシステムだけでなく、想定東海地震震源域や想定東南海・南海地震震源域等、大地震の発生が予想される特定の地域における地殻活動モニタリングの高度化も重要である。

ア. 日本列島域

リアルタイムで取得可能になったGEONET（国土地理院の全国GPS連続観測網）の1秒毎のデータを利用し、震源断層の即時解析手法の開発を進めた。事前に設定した60点の電子基準点のリアルタイム解析を可能とし、2008年岩手・宮城内陸地震等に適用したところ、気象擾乱時等を除きM7程度の地震の震源断層モデル推定に耐えうる精度の地殻変動を地震後10分以内に得るための基礎技術を確立した。

イ. 東海地域

大地震の発生が予測されている東海地域においては、列島規模のモニタリングに加えて、より高度化された地殻活動モニタリングのための研究開発が実施されている。前兆滑りや短期的ゆっくり滑りの早期発見及び把握のために、気象庁以外のデータを用いた同時異常の監視を可能にし、その有効性を確認した。また、東南海沖に新たなケーブル式海底地震計システムを敷設し、運用を開始した。

ウ. 東南海・南海地域

東南海・南海地震域における地殻変動特性を研究するために5カ年で16点のGPS観測点を増設し、ゆっくり滑りのモニタリングを行なった結果、浜名湖周辺の東海ゆっくり滑りが沈静化後、その周囲で滑りが発生していることが分かった。また、東南海・南海地震予測のため12点の地下水等総合観測施設を新規に整備した。この施設は地殻変動や地震計も併設し、四国一紀伊半島周辺直下のプレート境界で生じるM6-6.5の短期的ゆっくり滑りを検出可能である。

エ. その他特定の地域

近い将来の地震発生が懸念されている宮城県沖における固着および滑りについて、GEONET観測点および沿岸域に増強したGPS観測点のデータを用いた準リアルタイム処理技術、及び相似地震（小繰り返し地震）を用いた準リアルタイム処理技術を開発し、非定常的な滑りを見出すことができるようになった。

3) 地殻活動情報総合データベースの開発

「地殻活動情報総合データベースの構築」の研究は、地殻活動予測シミュレーションモデルの開発の基礎となる観測データを整備し、地殻活動モニタリングシステムから有効に情報を取り出すために必要不可欠である。

ア. 日本列島地殻活動情報データベースの構築

日本付近の過去の大地震について、古い地震記象や津波記録、測地記録などをスキャナーを用いてデータベース化を行い、研究者が必要なときに迅速に利用できるようなシステムの構築を行った。日本列島全域における地震観測データベースを逐次的に追加・更新した。過去さまざまな機関で実施された活断層調査の情報を網羅的に収集した活断層データベースを構築し、インターネット上での公開を行った。10,000平方キロメートルを達成目標として、活断層の詳細な位置、関連する地形の分布等の情報を、1:25,000都市圏活断層図として整備・公表してきた。一元化処理による全国地震カタログの作成作業を継続して行い、地震・火山月報（カタログ編）、地震年報を刊行した。

イ. 地殻活動データ解析システム

地殻活動総合解析システムの開発、運用を行っているが、この5カ年の期間中、新たに行われた観測データの追加、GEONETの新解析戦略による解析結果への更新など、データベース内容の確認と更新を実施した。

3-3. 新たな観測・実験技術の開発

「新たな観測・実験技術の開発」研究では、これまでとらえることが困難、または不可能であった現象を見るための「道具」の開発し、地震予知のための観測研究の推進に貢献した。

1) 海底諸観測技術の開発と高度化

プレート沈み込みに伴う大地震発生機構の解明等の研究では、陸域の観測網だけでは海域で発生する地震を観測するには不十分で、十分な空間分解能と観測精度を得るには海底諸観測技術開発と高度化が必要である。そのため、GPS-音響測距結合方式による海底測位計測システムの高度化、海底における圧力・傾斜変動観測の高度化、海底ケーブル利用システムの開発、海底ボアホール利用を目標とした歪・傾斜変動観測の高精度化、海底における長期地震観測の高度化などに関する研究が実施された。

GPS—音響測距結合方式による海底測位計測システムの高度化に関しては、複数の研究機関が互いに連携しながら研究を進めた。重要な成果としては、2004年紀伊半島南東沖の地震（M7.1）に伴う地殻変動を世界で初めて海底測地観測により捉えたことや、宮城県沖において太平洋プレートの沈み込みに伴う陸側の地殻歪を初めて捉えるとともに、2005年宮城県沖地震に伴う地殻変動を検出し、2009年春にはその余効変動が収束し震源域の固着が復活したことを捉えたことなどがある。

2) ボアホールによる地下深部計測技術の開発と高度化

ボアホール利用による地下深部計測技術は、雑音の大きい地表から離れることによって高感度のデータを得るだけでなく、震源核に近づいて地殻応力状態や断層物質を直接測定するための重要な技術の一つである。この研究項目では、地殻応力測定の高高度化、ボアホール間隙水圧測定、光干渉計測技術等先端技術の導入などが行われた。

3) 地下構造と状態変化をモニターするための技術の開発と高度化

地殻内の微小な応力変化、散乱体や地殻内流体の分布の変動、プレート境界での反射強度の時間変動、地殻深部の物質移動地殻比抵抗の時空間変化、地殻内の水の状態変化などをモニターするため、精密制御震源技術の高高度化、平坦な周波数特性を持ちかつ高感度な地震計の開発、マントル起源のヘリウム放出量計測技術開発が行われた。

4) 宇宙技術等の利用の高高度化

GPS や SAR（合成開口レーダー）に代表される宇宙技術の利用は地殻変動観測に革命をもたらした。ここではGPS 測位技術の高高度化研究、SAR による地殻変動観測手法の高高度化研究、次世代テレメータ衛星通信システムの開発が実施された。

4. 課題と展望

現計画では、長期にわたる地殻活動によってもたらされる広域応力が特定の断層に集中していく地震発生の準備過程と、それに続く直前過程における応力の再配分機構を理解し、観測によるそれらの過程の迅速な把握と、物理モデルに基づいた地殻活動予測シミュレーションモデルを開発することが重要とされていた。

プレート境界のアスペリティの位置を正しく把握し、また、そこでの滑り欠損をモニタリングしていくことは、地震発生の中・長期予測にとって極めて重要である。地震記録の解析手法の高高度化により発生した地震のアスペリティ分布がより高精度で推定できるようになり、GPS データや相似地震から滑り欠損をモニタリングする研究が進展した。また、地震学的な不均質構造とアスペリティの分布に良い対応関係があることが明らかとなった。しかし、こうした構造的特徴とアスペリティが対応する原因まで明らかになったとは言えず、構造的特徴の物理的実体を解明することが待たれる。これまで、地殻・マントルの弾性-粘弾性構造、プレート境界の三次元形状、断層構成則の環境依存性を考慮した地殻活動シミュレーションモデルにより、プレート境界での準静的応力増加—動的破壊伝播—地震波動伝播をシミュレーションすることに成功した。今後は、各種データとシミュレーションを統合した研究をより充実させる必要がある。

プレート境界における多様な物理過程として注目されたゆっくり滑りに伴う深部低周波微動は、沈み込み帯にある程度普遍的な現象であることが示された。南海トラフ沿いで発生する深部低周波微動および超低周波地震の活動をモニターする手法が確立され、その時空間的な分布の特徴が明ら

かになった。今後はゆっくり滑りに関してもシミュレーションにより再現する研究を進め、ゆっくり滑りによるアスペリティへの応力集中を定量的に評価・予測することを目指すべきであろう。

内陸地震発生域に関しては、内陸地震のアスペリティに相当する高速度域の存在や、断層深部延長の下部地殻に局在する低速度域や反射体の存在が確認されるとともに、これらの不均質構造に対する流体の関与が示唆され、内陸地震の応力集中や発生が不均質構造によって強く規定されていることが明らかとなった。特に、地震、地殻変動、電磁気などから多角的に得られた構造、活動特性が内陸地震の応力集中機構を知る上で極めて重要であることが示された。今後は、地震サイクル中のステージが異なる複数の断層帯に関する比較も行い観測の事例をさらに増やすとともに、不均質構造を考慮した内陸地震の準備過程や発生サイクルのモデル化を進めていく必要がある。

第2次新計画は、物理モデルに基づく地殻活動予測シミュレーションの実現を目指した基礎的な研究ではあるが、計画の中で明らかになった現象や構築されたモデルのいくつかは地震災害軽減のための調査研究に役立てられている。例えば、プレート境界の地震におけるアスペリティモデルやゆっくり滑り現象の理解は、プレート境界で発生した地震の評価に貢献しているとともに、南海トラフ等の巨大地震の連動性予測にとっての基本的概念となっている。これまでに解明されてきた内陸地震のアスペリティに関する理解も、内陸活断層の地震による強震動発生予測の高精度化につながる。今後も、地震の全過程の理解に基づく予測を目指した予知研究の進歩が、その各段階において現実の災害軽減に貢献することが期待される。

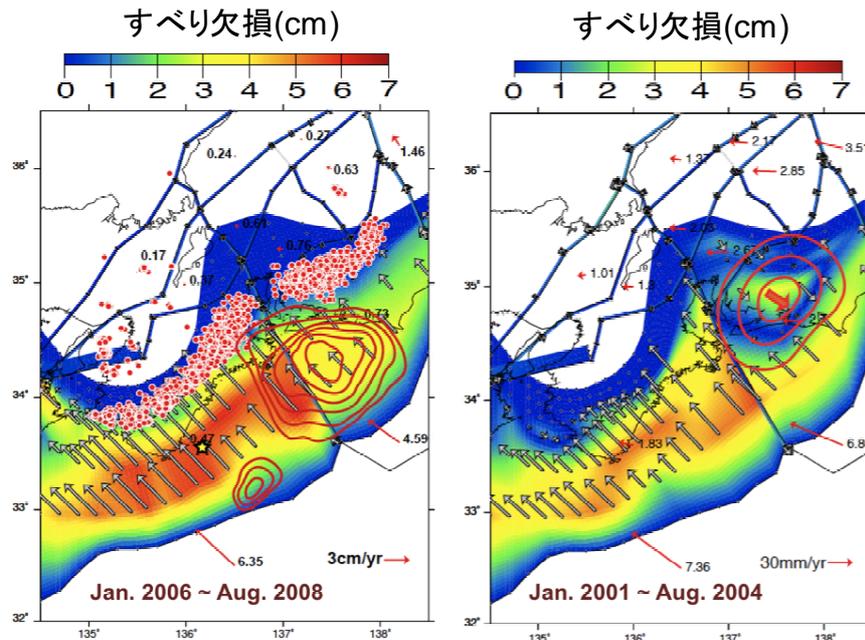


図1：ブロック断層モデル解析により得られたブロック間の相互作用の分布。定常時（左）とゆっくり滑り発生時（右）の比較から、ゆっくり滑り領域が特定され、それ以外の部分で固着状況が変化していないことなどが見出された（名古屋大学 [課題番号：1702]）。

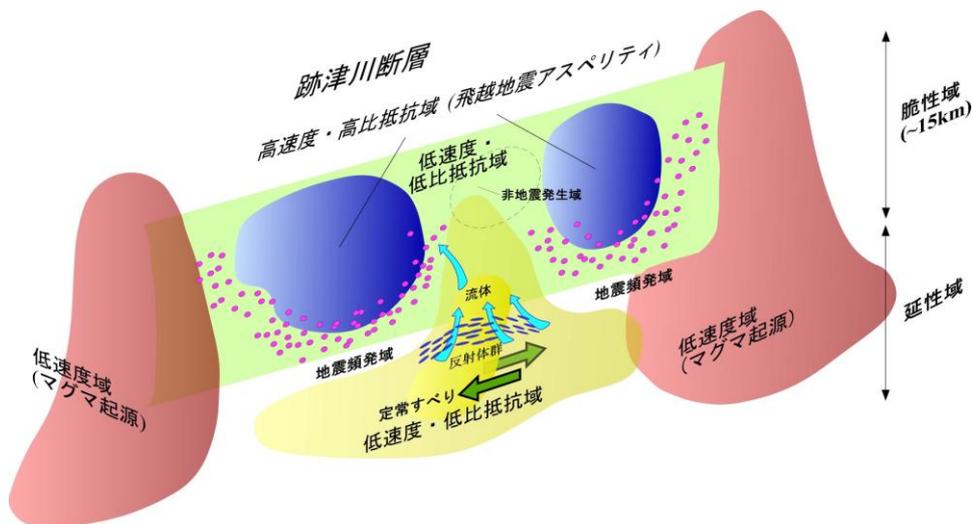


図2：跡津川断層総合集中観測から得られた内陸地震における応力集中の概念モデル（東京大学地震研究所 [課題番号：1404]）。

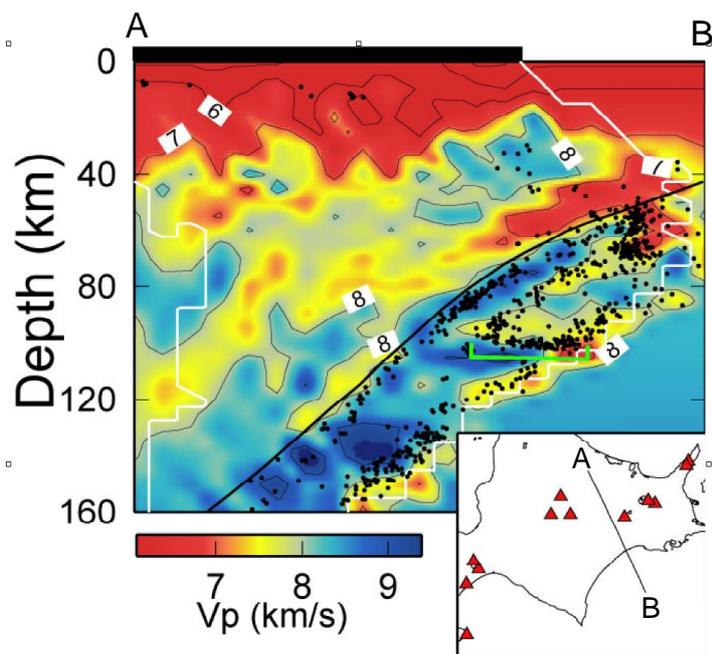


図3：挿入図の測線（A-B）に沿うP波速度構造の鉛直断面。黒細線は太平洋スラブの上部境界、黒丸は微小地震、地表の黒太線は陸域を示す。緑線で表した1993年釧路沖地震（M7.8）の余震域では、低速度になっている（東北大学[課題番号:1209]）。

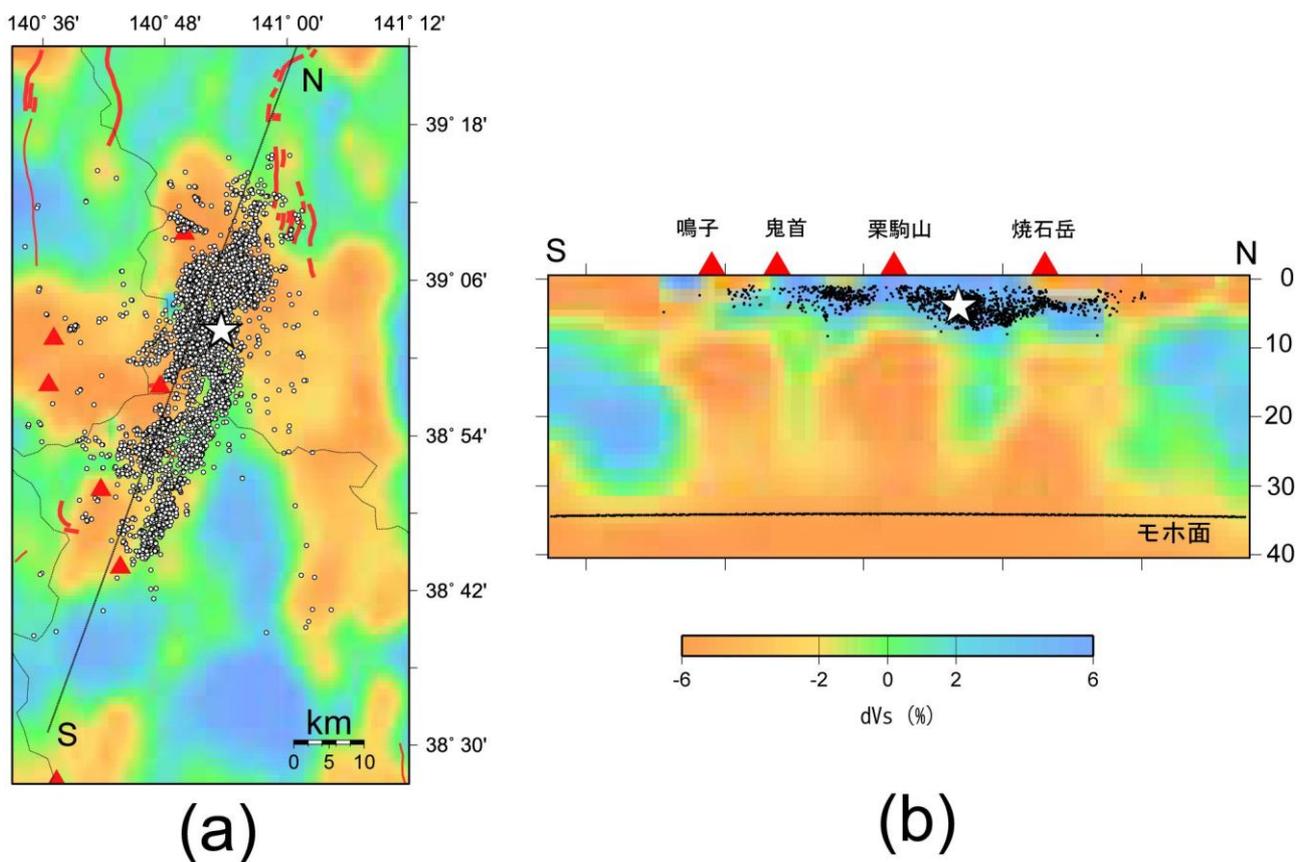


図4：2008年岩手・宮城内陸地震の余震分布と震源域の速度構造。(a) 深さ24kmにおけるS波速度偏差(標準的な速度からのずれ)の分布。白星は本震、白丸は余震、赤三角は活火山、赤線は活断層を示す。(b) S波速度偏差の深さ分布。余震(黒点)は高速度域内で発生している。震源域直下の下部地殻から最上部マントルには顕著な低速度域が存在する(東北大学[課題番号:1202])。

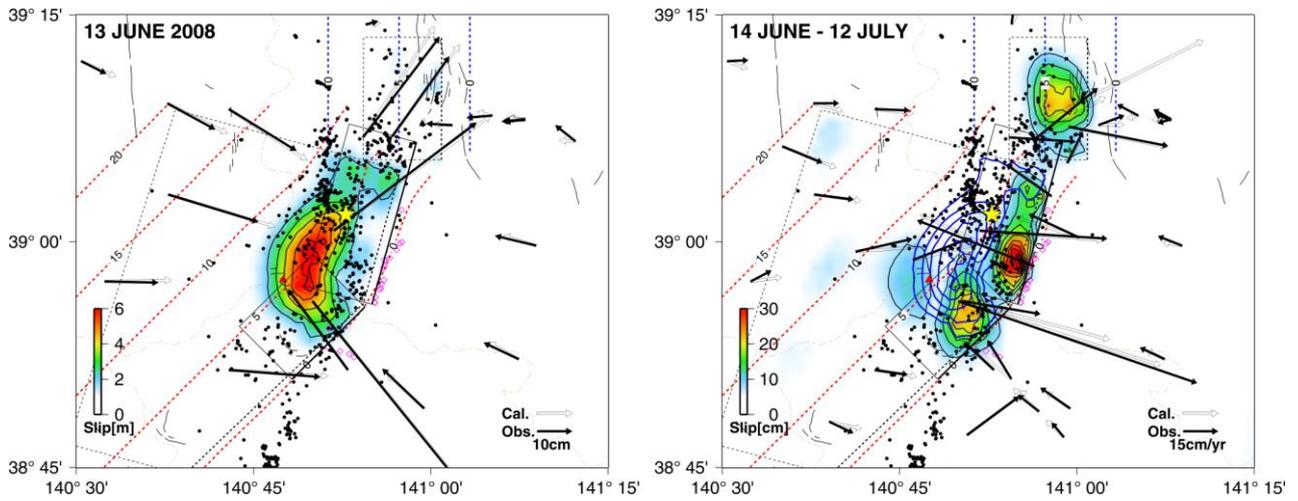


図5：2008年岩手・宮城内陸地震の（左）地震時滑り分布と、（右）余効滑りの積算値の分布、および観測された水平変位・変位速度と推定値から計算されたものとの比較。右図には左図の地震時滑り分布の等値線を青実線で示している。青と赤の破線はそれぞれ北側及び南側の断層面の等深線。黒点は余震、黒の実線は活断層の地表トレース（東北大学 [課題番号：1202]）。

1. (1) 「日本列島及び周辺域の長期広域地殻活動」
研究計画

1. (1) 「日本列島及び周辺域の長期広域地殻活動」研究計画

地震の発生を定量的に予測するためには、まず、長期にわたる地殻活動によってもたらされる広域応力が、特定の断層域に集中していく地震発生の準備過程を理解し、それに引き続く直前過程における地震断層域での応力の再配分機構を解明しなければならない（「地震予知のための新たな観測研究計画（第2次）の推進について（建議）平成15年7月」より）。したがって、日本列島を含むプレートの運動やそれによってもたらされる広域の応力場に関する知見を集積することが、地震発生予測の研究にとっては基本的に重要である。このために、本研究計画では二つの研究項目を実施している。第一の研究項目「ア．日本列島及び周辺域のプレート運動」は、日本列島を含む周辺域のプレートの形状と運動を精密に決定することである。プレート運動の精密な決定によって日本列島にかかる応力の境界条件が把握できると考えられる。特に、ユーラシアプレートとは独立な動きをしていると考えられているアムールプレート等の、大陸側のプレートの境界の形状と変位速度場を精密に推定することが本研究の主たる目的である。第二の研究項目「イ．列島規模のプレート内の構造と変形」は、日本列島の構造やその不均質を明らかにし、プレート境界での境界条件が日本列島に働く応力やその変化にどのように反映されていくのかを知ることであり、このような観点から多面的な研究を実施した。以下では、ア、イに分けて記述するが、両方の項目にまたがる成果もあることを注記しておく。

ア．日本列島及び周辺域のプレート運動

本研究項目では、宇宙技術（GPS（汎地球測位システム）、SLR（人工衛星レーザー測距）及びVLBI（超長基線電波干渉法））を用いたプレート運動の実測を行った。プレート運動の実測とその解釈には数年以上に及ぶ長期の研究が必要である。本計画においては、アムールプレートに関して、これまで知られていなかった重要な知見が得られた。

アムールプレート東縁部に位置する、沿海州・ハバロフスク州・サハリン州のGPS観測点の、ユーラシアプレートに対する相対（水平）速度を図6に示す。全体として、アムールプレートの運動を示す同一の変動を見てとることは難しいことが分かった。これらの変動の意味することは現時点では不明であり、今後の調査にゆだねられたが、各領域の特徴を以下に要約する。日本海沿岸の三観測点 SMHK、PLST、TERN は、大きさも方向もそろっており確かな変動である。シホテ・アリン断層の西側の点での変動については、東側の GOBL でも同様の変動が見られるため、シホテ・アリン断層に関係するブロック運動という見方も出来る。また、明らかにサハリンの観測点は、西向きの変動を示しており、サハリン島全体の変動の特徴である（北海道大学[課題番号:1001]）。

モンゴル国内でのGPS連続観測を実施するとともに、これまで取得してきたGPS観測データを統合し、アジア大陸の統合変位速度場を算出した。これらのデータを用いて、アムールプレートのユーラシアプレートに対するオイラー極を推定した結果を図7に示す。ここにはアムールプレート内を代表する5点で推定した場合と、バイカル湖の西岸の点を除いた14点で推定した場合の二通りの結果を示した。既存の結果も合わせて示しているが、アムールプレートの極の位置は研究によってかなり異なっており、安定して推定することができない。用いるデータによって大きく異なる位置が求められるということは、“アムールプレート”と称されている地域は実は一枚の剛体で近似することは不適切であるという可能性が考えられる（東京大学地震研究所[課題番号:1401]）。

また、平成20年5月には中国四川省においてM8.0の大地震が発生し、大きな災害を引き起こした。地震を発生させた断層は、四川－雲南地震活動帯の中でもチベットブロックと南中国ブロック

とを境とする鮮水河—安寧河—小江断層帯から北東に派生する龍門山断層帯に位置する。この断層帯で境されるブロックは GPS 観測からみると年数 mm で相対運動を行っており、今回の地震はこのブロック運動による歪の蓄積が原因となって発生したものと考えられる。今回の地震の滑り量などから考えると、同等の地震は 1000~3000 年に一度くらいの繰り返し周期で発生する可能性があることが分かった（東京大学地震研究所[課題番号:1401]）。

イ. 列島規模のプレート内の構造と変形

プレート運動によってもたらされる外部応力が日本列島の内部にどのように伝達し、断層周辺の応力集中をもたらすのかを解明することは、地震予知研究の上でも第一級の重要性を持っている。このためには日本列島の全体的な構造の不均質性や深部構造を詳細に知ると同時に、広域の応力の集中過程や歪の蓄積過程をモニターし、構造と変動の情報から応力の集中過程に関するモデルを構築することが重要である。

日本列島に展開している防災科学技術研究所の高感度地震観測網（Hi-net）や広帯域地震観測網（F-net）等のデータを用いて、高い空間分解能での三次元地震波速度構造、減衰構造を解明すると共に、三次元不均質構造を用いた高精度震源決定、震源分布と地下構造との関係解明を目的とした研究が行われた。

三次元速度構造を用いた変換波の波形解析により、東海から九州北部までの領域において新たなフィリピン海プレート形状モデルの構築を行った。従来の研究で明らかにされている中国地方に加え、淡路島周辺や琵琶湖北東部下に非地震性海洋プレートの存在を確認した。また、海洋プレート内の地震の分布やメカニズムはプレート形状の影響を強く受けていることが明らかになった（図 8）（防災科学技術研究所 [課題番号:3001]、Shiomi et al., 2008）。

西南日本の浅部地殻では火山フロント沿いと四国東部から兵庫県南東部にかけて、地震波の強散乱領域が広がっていることが明らかになった。（防災科学技術研究所[課題番号:3001]）。

日本全国における三次元地震波速度構造から、深さ 5km の低速度領域と活断層の地表トレースの分布を比較すると、両者の間に相補的な関係が見られた。また、西南日本においては断層の浅部では高速度域に偏り、深部では低速度域に偏ることが分かった。このことは、断層の深部は周囲よりも変形しやすい領域であることを示唆している。（防災科学技術研究所[課題番号:3001]）。

広域応力場と、余震観測データなどに基づく解析から得られる断層周辺の応力場との関係についての研究を実施したほか、比抵抗構造調査などを通じて下部地殻の物性と変形機構の解明を進めた。2000 年（平成 12 年）鳥取県西部地震（マグニチュード M7.3）の余震域とその周辺における応力の空間的な変化を地震の応力逆解析から求めた。山陰地域に見られる帯状の地震分布に沿う領域では、最大主応力の方向は、その周りの広域の応力場である東西から時計回りに約 30 度回転しており、S 波の偏向異方性解析の結果とも調和的であった。また、この領域では周囲の領域に比べて応力比 R が大きいことが分かった（Kawanishi et al., 2009）。この応力場の回転の原因を探るため、有限要素法によるシミュレーションを行った。内陸地震の断層付近の不均質構造として下部地殻に不均質をおくモデルでは、応力比 R の空間変化を定量的によく説明し、鳥取県西部地震の余震域における応力場の回転をよく再現することが分かった。これらの結果は、内陸地震の断層への応力蓄積過程において、下部地殻の不均質構造が重要な役割を果たしていることを示している（京都大学防災研究所[課題番号:1801]）。

1891 年（明治 24 年）濃尾地震（M8.0）震源域周辺の水準データを解析することにより、地震後の 1901 年から 1928 年までの上下変動パターンが、粘性緩和による変動パターンと類似しており、

水準測量により余効変動が検知されていることが明らかとなった。弾性-粘弾性の二層構造モデルを仮定し、弾性層の厚さ及び粘弾性係数を推定した。得られた弾性層の厚さ 33km は、ほぼ中部地方の地殻の厚さに相当するので、地殻はほぼ弾性であり、モホ面より下の上部マントルが粘弾性体として振る舞っていると考えられる（名古屋大学[課題番号:1701]）。

沈み込む海洋プレート（スラブ）内では、1993年（平成5年）釧路沖地震（M7.8）、1994年（平成6年）北海道東方沖地震（M8.2）、2001年（平成13年）芸予地震（M6.7）等の大地震がしばしば発生し、またプレート境界地震とプレート内地震との相互作用が指摘されていることから、プレート内地震の発生機構の理解は重要である。プレート内の含水鉱物の脱水反応により生じた水は、プレート内地震の発生原因（脱水不安定）と考えられ、また、マントルウェッジ内の二次対流として陸域下に達し、内陸地震の発生機構と関係する可能性もある。以上のような観点から、詳細な沈み込む海洋プレート内地震の震源分布・プレート内の不均質構造をもとめ、プレート内地震の発生機構の理解を深める研究を行った（Hasegawa et al., 2009）。

地震波速度トモグラフィにより、太平洋スラブ最上部に含水化した海洋性地殻に対応する低速度領域を明瞭にイメージすることに成功した。海洋性地殻は東北では深さ約 80km、関東では深さ 120-150km 程度まで低速度異常を示す。この結果は、速度変化を伴う地殻物質の相転移がそれぞれの深さで起きており、東北と関東で高密度相へ相転移する深さが異なることを示している。関東で低速度域のおよぶ深さが深くなるのは、直上にフィリピン海スラブが沈み込んでいることにより、太平洋スラブの地殻の温度が東北に比べ低温であるためと考えられる。さらに、東北、関東とも海洋性地殻が低速度から高速度になる領域でスラブ地殻内の地震活動が極めて活発であるという特徴があり、これは脱水反応により放出された水が地殻内地震の発生に関与していると考えたと説明がつく（東北大学[課題番号:1209]、Tsuji et al., 2008、Nakajima et al., 2009a）。

DD（二重時間差）トモグラフィ法を用い、北海道東部の太平洋スラブ内の詳細な地震波速度構造を推定した。その結果、二重深発地震面下面に沿って低速度域が分布すること、地震活動があまり活発でない上面と下面の間（面間）は高速度であることが明らかになった。ただし、1993年釧路沖地震（M7.8）の余震域は下面から面間に向かってほぼ水平に伸びているが、そこでは面間であっても例外的に低速度を示すという特徴がある（図3）。下面や釧路沖地震の余震域の速度は、無水カンラン岩の速度よりも小さいため、そこには水が分布することが期待される。一方で、面間の速度は無水カンラン岩でほぼ説明できることから、水があったとしても局所的であると考えられる。これらの成果は、二重深発地震面下面の地震の発生には水が深く関与していることを示唆しており、スラブ内地震の発生メカニズムとしての脱水脆性化説を支持している（東北大学[課題番号:1209]、Nakajima et al., 2009b）。

地震波速度トモグラフィによって推定された地震波速度構造とプレート境界地震の分布から、関東下におけるフィリピン海スラブ下面と太平洋スラブ上面が接触している領域（接触域）の広がりや推定し、接触によって生じている特異な地震活動の特徴を明らかにした。両スラブの接触域は関東地方の広範囲に広がっており、接触域下の太平洋スラブではプレート境界地震が深さ約 80km まで発生している。これは、太平洋スラブのみが沈み込む東北地方より約 30km も深い。この結果は、低速度な海洋性地殻が関東下では深さ 120-150km まで存在するという結果と調和的であり、接触域下ではフィリピン海スラブが直上に存在するため、太平洋プレートの境界が低温のまま深いところまで沈み込んでいると考え、これらの特徴を説明することができる（東北大学[課題番号:1209]、Nakajima et al., 2009c）。

霞ヶ浦から千葉県東部にかけてのフィリピン海スラブのマントル部分に顕著な低速度域（蛇紋岩

化領域) が存在することを明らかにした。この蛇紋岩化領域に関係する特徴的な地震活動として、1987年の千葉県東方沖地震(M6.7)の余震はこの蛇紋岩化域の西縁に沿って発生していること、1921年の竜ヶ崎地震(M7.0)の本震の一つの節面も蛇紋岩化域西縁の走向と一致すること、フィリピン海スラブ内の現在の地震活動も蛇紋岩化域の西縁に沿って面的に発生していることなどが挙げられる。これらの結果は、1921年や1987年の地震は、蛇紋岩化したマンツルの西縁に沿うフィリピン海スラブが変形することに伴い生じる歪の一部を解消するために発生していることを示唆している(東北大学[課題番号:1209])。

東北日本弧と千島弧の衝突域である日高衝突帯について、上面地震帯が深さ80–120kmへと局所的に深くなる領域であることを確認するとともに、その原因を明らかにするために、地震波速度トモグラフィを行った。その結果、スラブ直上のマンツルウェッジに、沈み込んだ千島前弧の地殻であると解釈される速度を持つ物質が分布していることを明らかにした(図9)。そのように地殻物質が太平洋プレートに覆いかぶさっているため、マンツルウェッジからの加熱が妨げられ、この地域で局所的に低温となることが期待される。従って脱水分解する深さも局所的に深くなり、上面地震帯がこの地域で局所的に深くなると考えられ、脱水脆性化モデルを強く支持する観測事実であるといえる(東北大学[課題番号:1209]、Kita et al., 2009)。

課題と展望

日本列島及び周辺域のプレート運動について、アムールプレートの運動を示す同一の変動を見てとることは難しく、アムールプレートと称されている地域は実は一枚の剛体で近似することが不適切であるという可能性が高いことが分かった。オホーツクプレートについては、運動速度が小さいため、高精度のデータをさらに長期間安定して取得することが必要である。

列島規模のプレート内の構造と変形については、列島全体を俯瞰した構造及び変動の不均質を明らかにすることが必要である。Hi-netの整備により、列島規模において、高密度・高精度のデータが利用できるようになり、西南日本や関東地方直下のフィリピン海プレートの形状など、プレート境界の構造やプレート内の不均質構造が精度良く決定された。また、山陰地方の地震帯においては、下部地殻における局所的な非弾性変形による応力集中モデルにより、様々な観測結果が統一的に説明された。日本列島全体における三次元地震波速度構造の研究も、下部地殻における局所的な非弾性変形による応力集中モデルと調和的な結果を得ている。今後は、局所的な非弾性変形による応力集中モデルをさらに定量化することが重要である。新潟–神戸歪集中帯は、中部プレート境界ではなく内陸の変形集中帯である可能性が高いことが分かった。今後は、日本列島及び周辺域のプレート運動の研究とあわせて、新潟–神戸歪集中帯から日本海東縁のテクトニクスを明らかにし、上部マンツルの粘弾性構造や応力場の不均質構造を推定することが重要な課題である。

平成19年度から開始した、沈み込むプレート内地震の発生機構に関する研究においては、スラブ地殻内地震が海洋性地殻の脱水反応により発生しているという説を支持する成果が得られた。今後の更なる研究の進展に期待したい。

参考文献

Hasegawa, A., J. Nakajima, N. Uchida, T. Okada, D. Zhao, T. Matsuzawa, and N. Umino, Plate subduction, and generation of earthquakes and magmas in Japan as inferred from seismic observations: An overview, *Gondwana Research*, 2009, in press.

- Kawanishi, R., Y. Iio, Y. Yukutake, T. Shibutani, and H. Katao, 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, 2009.
- Nakajima, J., Y. Tsuji, A. Hasegawa, S. Kita, T. Okada, and T. Matsuzawa, Tomographic imaging of hydrated crust and mantle in the subducting Pacific slab beneath Hokkaido, Japan: Evidence for dehydration embrittlement as a cause of intraslab earthquakes, *Gondwana Research*, in press, 2009a.
- Nakajima, J., Y. Tsuji, and Akira Hasegawa, Seismic evidence for thermally-controlled dehydration in subducting oceanic crust, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L03303, doi:10.1029/2008GL036865, 2009b.
- Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa, Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, in press, 2009c.
- Shiomi, K., M. Matsubara, Y. Ito, and K. Obara. Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan, *Geophys. J. Int.* 173, 1018-1029, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03786.x, 2008.
- Tsuji, Y., J. Nakajima, and A. Hasegawa, Tomographic evidence for hydrated oceanic crust of the Pacific slab beneath northeastern Japan: Implications for water transportation in subduction zones, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L14308, doi:10.1029/2008GL034461, 2008.

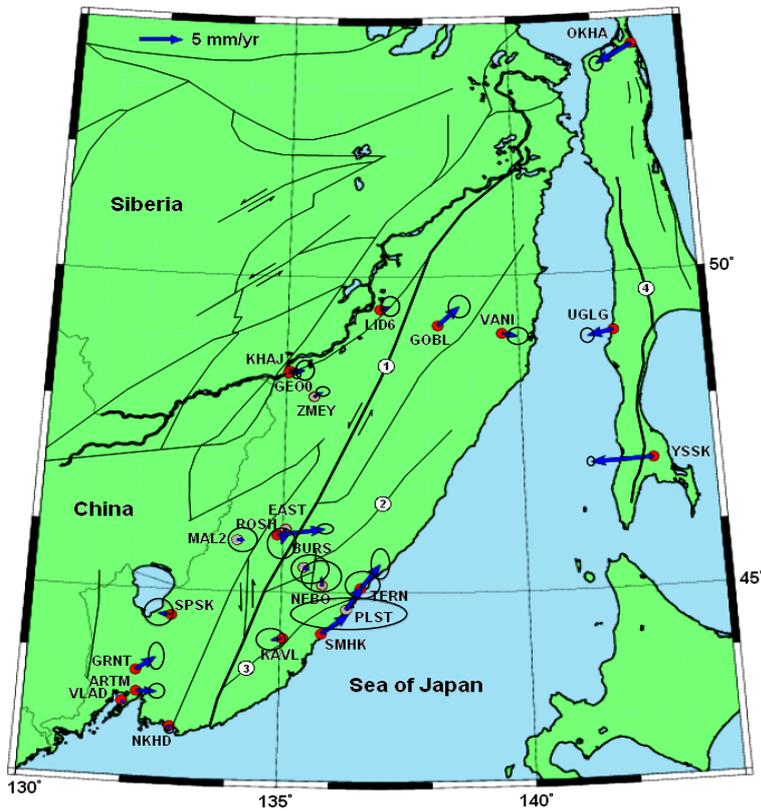


図6： 調査領域内のGPS観測点の、ユーラシアプレートに対する相対水平速度（年あたり）の分布。YSSK（IGS）を除く赤丸観測点が、本課題で日ロ共同観測の行われた観測点。灰色丸印の観測点は、Timofeev et al. (2008)による観測点とデータを使用。実線は主要な断層で矢印はその動きの方向。丸数字で示した断層は、①中央シホテ・アリン断層、②コラムビンスキー断層、③プリブレツニイ断層、④ティム・ポロナイスキー断層を示す（北海道大学[課題番号:1001]）。

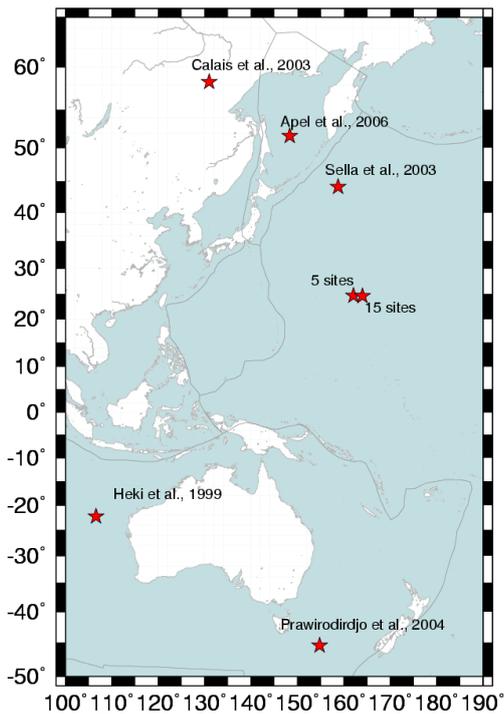


図7：アムールプレートのユーラシアプレートに対するオイラー極（東京大学地震研究所[課題番号:1401]）。

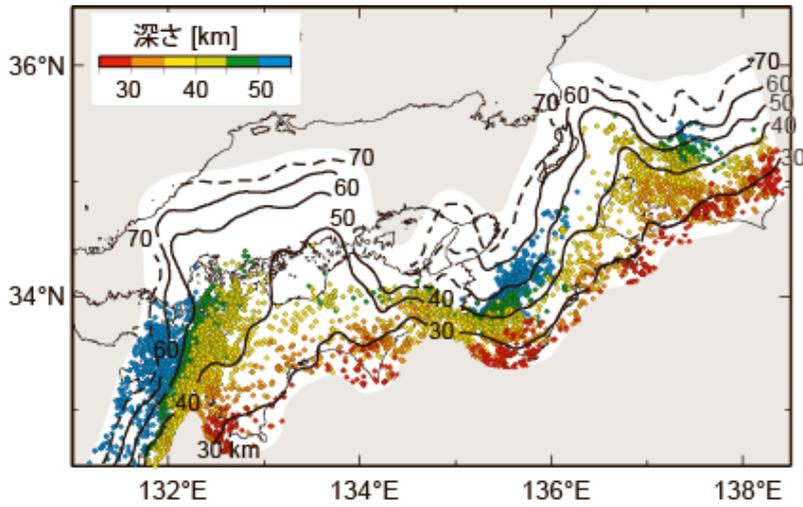


図 8 : 変換波を用いた波形解析によって推定されたフィリピン海プレート内海洋モホ面等深度線と海洋モホ面近傍で発生する地震の震源分布 (防災科学技術研究所 [課題番号 : 3001]) 。

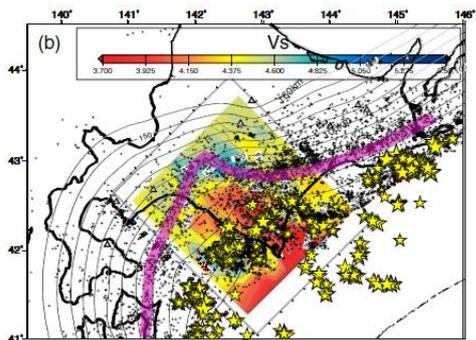


図 9 : マントルウェッジの地震波速度分布と上面地震帯との関係。太平洋スラブ上部境界面より 10km 上方の曲面に沿う S 波速度の分布を重ねた。黒十字、黄星はそれぞれ上面の地震および相似地震を示す。桃色の領域は上面地震帯を示す (東北大学 [課題番号 : 1209]) 。

1. (2) 「地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動」

研究計画

1. (2) 「地震発生に至る準備・直前過程における地殻活動」研究計画

「地震予知のための新たな観測研究計画の推進について」（以下、「第1次新計画」という。）においては、地震予知の3要素である「時期」、「場所」、「規模」の推定のために、地震がなぜ、どのように発生するのかを深く理解することが重要であるとの認識のもと、地震発生に至る過程を解明するための詳細な研究が実施された。その結果、特にプレート境界型地震の発生過程に関する理解が大きく進展した。地震発生に至る過程の更なる理解のためには、その準備過程から直前過程までの地殻活動を相互に関連する一連の過程として研究する必要がある。そのため、第2次新計画では以下の4項目を実施してきた。

- ア. プレート境界域における歪・応力集中機構
- イ. 内陸地震発生域の不均質構造と歪・応力集中機構
- ウ. 地震発生直前の物理・化学過程
- エ. 地震発生サイクル

ア. プレート境界域における歪・応力集中機構

第1次新計画では、地震波を放出する高速な滑りを生じる領域のみならず、ゆっくりとした滑りが定常的あるいは間欠的に生じている領域がプレート境界に存在しており、かつ現在強く固着している領域は過去の大地震の震源域に対応していることがGPS観測から明らかになってきた。つまり、地震性の滑りを生じる領域とゆっくりとした滑りを生じる領域は基本的には棲み分けていることが明らかになってきたのである。このような地震性滑りが卓越する領域をアスペリティと呼び、その周りのゆっくりとした滑りの進行によりアスペリティに応力が集中して地震に至るというモデルが提唱された。このような背景のもと、第2次新計画においてはこのモデルの妥当性を検証するための観測研究を重視し、また、数値シミュレーションの高度化に必要不可欠な、地下の構造やプレート境界面の特性に関する情報が得られる観測研究を実施してきた。

（アスペリティ域の特徴）

アスペリティの位置を高精度で推定することは、地震発生予測のみならず強震動の予測にとっても極めて重要である。日本周辺のプレート沈み込み帯において、アスペリティの分布やその振る舞い、構造的な特徴などを明らかにするための観測研究が行われた。また、これまでアスペリティが知られていない領域でもその位置を推定可能にする目的で、既に位置が知られているアスペリティやゆっくり滑り域と、地下の構造の相関を調べる研究も進められてきた。

日向灘から奄美大島にいたる海域での相似地震解析を行った結果、日向灘以南では相似地震活動が活発で、その活動度や活動様式には地域差が見られることが分かった。繰り返し型の相似地震活動が活発な地域ではM7級の地震が発生しておらず、これはプレート間固着の強度の違いを反映していると考えられる。相似地震活動から求めた平均滑り量は4cm/年程度と、プレートの相対運動速度にほぼ一致していた（図10）（鹿児島大学 [課題番号：2201]）。

日向灘で、海底地震観測を行い地震波トモグラフィ法によって推定した速度構造によれば、非地震性滑り領域と対応する高ポアソン比の領域が見られた。これは、日向灘のプレート間の固着状態が弱いこととの関連が考えられる。（九州大学 [課題番号：2101]、Tahara et al., 2008）。

熊野灘で構造探査データの解析を進めた結果、分岐断層周辺の詳細な速度構造イメージが得られ、分岐断層周辺は周囲に比べて地震波速度の低下が見られることが分かった。また、1944年（昭

和 19 年) 東南海地震 (M7.9) 時の滑りが大きいと推定される領域で構造調査を行ったところ、海洋地殻の凸構造を示唆するイメージが得られている (海洋研究開発機構 [課題番号: 4001]、Nakanishi et al., 2008)。

中部日本の GPS データを用いたブロック断層モデルの解析により、東海・東南海地域のプレート境界における滑り欠損分布を推定した。東海地域における過去の研究成果や 1944 年東南海地震の震源断層モデルと整合的な結果が得られており、熊野灘と比較して東海地域では滑り欠損が半分程度と小さくなること、深部低周波微動はプレート間の固着がほぼ無くなる場所で発生していることが分かった。さらに、東海地域で発生したゆっくり滑りのうち、2001 年 1 月～2004 年 8 月については固着域から安定滑り領域への遷移領域で発生したことも分かった (図 1) (名古屋大学 [課題番号: 1702])。

海底地殻変動観測により、東海沖、相模湾、福島沖、宮城沖の海底基準点で定常的なプレート運動を検出した。これにより、現状の海底観測技術が、数年間の観測によりプレート運動を検出可能なことを実証した (図 11)。また、プレート間の固着が福島沖では周囲と比べて強くないことを明らかにした (Matsumoto et al., 2008) (海上保安庁 [課題番号: 8003])。

宮城県沖の想定震源域や福島県・茨城県沖の海溝陸側斜面、房総半島沖において、アスペリティの実体解明を目的として、制御震源と海底地震計を用いた構造探査を実施した。その結果、島弧側マンツルの不均質と沈み込む海洋プレートの形状が大地震の破壊域を規定している要因の一つと考えられることが分かった。また、茨城県沖の M7 級地震が繰り返し発生している場所付近には海山があり、その海山とアスペリティの位置が一致しないことが分かり、海山ではプレート間の摩擦がむしろ小さいことが分かった (Mochizuki et al., 2008) (東京大学地震研究所 [課題番号: 1403])。

日本海溝・千島海溝沿いのプレート間で発生した相似地震の解析から、プレート間における準静的滑りの時空間変化を調査した結果、アスペリティとそれ以外での滑り速度の違いや、本震発生後の余効滑りによる加速が認められた。また、地殻変動データに基づく推定結果と比較したところ、相似地震解析では余効滑りを過小評価している可能性が示された。また、福島沖、十勝沖等の地震後の余効滑りや 2003 年 (平成 15 年) 十勝沖地震 (M8.0) 震源域の滑り欠損量を GPS 観測から推定し、アスペリティ・モデルが成り立っていることを確認した。また、地震学的な構造探査によって、青森県沖から福島県沖にかけて、アスペリティでは直上のマンツルウェッジが高速度になること、三陸沖では海洋性地殻と島弧下部地殻が接している部分がアスペリティに対応することなどの構造的特徴が明らかとなった。この特徴は、周囲の非アスペリティ領域において、マンツルウェッジのカンラン岩が海洋プレートからの脱水によって蛇紋岩化していると考えられ、マンツルの P 波速度からもこの解釈を支持する結果が得られた。(東北大学 [課題番号: 1201])。

釧路沖～十勝沖～えりも岬沖で実施してきた地殻構造探査の結果、2003 年十勝沖地震のアスペリティ直上の島弧地殻に P 波速度と S 波速度の比 (V_p/V_s) が大きい場所があり、また、その東隣ではプレート境界に沿って大きな V_p/V_s が分布し、反射波も同定できた。これらの結果から、プレート境界の固着強度に流体の有無が大きく関与していることが推察される (北海道大学 [課題番号: 1004]、Machida et al., 2009)。

(ゆっくり滑りと深部低周波微動)

ゆっくり滑りや深部低周波微動は、プレート境界の振る舞いの多様性を示すものであり、その物理過程を解明するために様々な観測研究を行ってきた。

南海トラフ沿いで発生する深部低周波微動および超低周波地震の活動をモニターする手法を確立し、その時空間的な分布の特徴を明らかにした（図 12）。深部低周波微動や短期的ゆっくり滑りに同期して発生する深部超低周波地震の震源過程解析を行った結果、特徴的時間が長いほど伝播速度が遅いという法則の存在が示唆された（図 13）。また、愛知県から紀伊半島および四国西部から豊後水道にかけての地域で低周波微動活動を単位とする区域を特定し、それぞれの活動の特徴を明らかにした。一方、房総半島沖では 6-7 年毎にゆっくり滑りが繰り返し発生しており、微動ではなく群発地震を伴った 2007 年 8 月のゆっくり滑りについて、傾斜計および GPS データを用いた解析から滑り分布を推定し、地震活動域が滑り領域の周囲に分布していることを明らかにした（防災科学技術研究所 [課題番号：3002]）。

新宮に設置されたボアホール歪計の 2004 年 1 月から 2008 年 9 月のデータを精査し、紀伊半島南部で発生する深部低周波微動に伴う歪変化を検出した。全部で 11 個の歪変化を特定し、それぞれについて断層モデルの推定を行った。これらのうち 5 個は深部低周波微動を伴うが、残り 6 個は微動活動が無い時期に発生していた。これは、ゆっくり滑りが本質的な現象であり、そのうち特定の条件が満たされた時にのみ低周波微動が発生していることを示唆している（図 14）（名古屋大学 [課題番号：1702]）。

（西南日本のテクトニクスの解明）

フィリピン海プレートの沈み込みは、沈み込んだプレートの形状や、西南日本における地震テクトニクスと密接に関連している。そうした西南日本のテクトニクスの解明を目指す研究も進められた。

自然地震を用いた解析により紀伊半島の下に沈み込むフィリピン海プレートおよびその周辺の構造を明らかにした。海洋地殻は低周波微動の発生域まで顕著な低速度を示し、そこから放出された流体が低周波微動の発生に関与していることが示唆される。また、マントルウェッジは広範囲で低速度であり、蛇紋岩化していることが示唆される。（図 15）（京都大学防災研究所 [課題番号：1802]）。

地球深部探査船「ちきゅう」を用いた熊野沖の掘削が開始され、付加体先端から前弧海盆までの 8 地点で最大 1400m の掘削に成功し、分岐断層を貫通して掘削コアや孔内検層データを取得できた（海洋研究開発機構 [課題番号：4002]、木下・他，2008）。

中部日本の GPS データに基づいてブロック断層モデルを用いた運動学的な解析を行い、GPS による速度ベクトルデータを、ブロックの剛体運動、ブロック内で一様な歪、プレート間やプレート内の断層における相互作用という三者に分解した。その結果、紀伊半島の前弧域ではプレート境界にほぼ並行なスリバー運動が見られること、歪集中帯、糸魚川-静岡構造線、養老断層系などを考慮したブロックがデータ最も良く再現することが分かった。得られたブロック間の相対運動速度は断層の平均変位速度とほぼ整合的であり、また、歪集中帯ブロックの歪速度から計算される地震モーメントの蓄積量は同ブロックで過去 85 年間に発生した地震の積算量とほぼ釣り合い、蓄積されたエネルギーがほぼ地震で解放されていることが示唆される（図 16）（名古屋大学 [課題番号：1702]）。

イ. 内陸地震発生域の不均質構造と歪・応力集中機構

プレート内地震の震源断層周辺へ応力が集中する機構を理解するためには、まず地殻の不均質構造と応力・歪分布を詳細に解明しなければならない。このような観点から第 1 次新計画におい

て GEONET (国土地理院の全国 GPS 連続観測網) 等による歪速度分布の推定と高分解能の地下構造推定が精力的に行われ、その結果、下部地殻の一部が弱化し、その直上ないし周辺の上部地殻に応力が集中するというモデルが提案されている。こうした背景から、第 2 次新計画においては、このようなモデルで内陸の地震発生帯を説明できるか否かの検証が重要視された。その検証には詳細な構造と応力・歪速度の推定及び弱帯形成の鍵となる流体の分布の把握が極めて重要である。

(歪集中帯と跡津川合同観測)

広域地震観測によって、跡津川断層周辺の地震活動がこれまでになく精密に求められた。地震の多くは西北西－東南東方向の圧力軸を持つ右横ずれ型の発震機構を示す。応力逆解析の結果からも西北西－東南東方向の最大主応力が推定された。地震波トモグラフィ法解析および制御震源構造探査によって、上部地殻に 1858 年飛越地震のアスペリティに相当する高速度域が存在し、その下方の下部地殻に存在する低速度域が、上記の高速度域の間にまで及ぶことを示した (図 2) (Nakajima and Hasegawa, 2008)。この下部地殻内の低速度域には厚さ数 km の反射波が多くみられる領域も存在する。比抵抗構造探査からは、アスペリティに相当する上部地殻内の非地震発生域は高比抵抗、その周囲の地震頻発域および下部地殻の低速度域は低比抵抗で、流体の存在を強く示唆する。跡津川断層域両端では火山地域があり、低速度域が下部地殻から上部地殻にまで達しており、その非弾性効果が破壊の進展を妨げ、結果的に断層のサイズを規定していると考えられる。GPS 観測によれば、高速度域を含む跡津川断層のほぼ全体 (深さ 15km まで) が固着している可能性が高く、観測された変位は下部地殻における内部変形でまかなわれていると考えられる。下部地殻低速度域で進行している内部変形によって、地殻内に蓄積された応力が高速度域の境界付近に集中し、最終的には破壊に至るという内陸地震発生モデルが考えられる (Iidaka et al., 2009)。地殻内の流体の存在が媒質の変形に不均質を生じさせ、それにより構造の不均質な部分に応力を集中させ、さらにこの過程が進展すると考えられる (東京大学地震研究所 [課題番号: 1404])。

跡津川断層北東端付近における地震活動を精査し、跡津川断層と茂住祐延断層^{もずみすけのぶ}の地震活動が地震発生層の下限まで独立した二つの断層面として存在すること、活動度は茂住祐延断層の方が高いこと、立山火山の活動とは震源の深さの違いから区別できることなどが明らかとなった (京都大学防災研究所 [課題番号: 1803])。

GPS 観測からは、新潟－神戸歪集中帯の中でも跡津川断層の周辺にせん断歪がさらに集中していることが明らかとなった。こうした階層構造は地震波トモグラフィ等で見られる地下構造とも共通しており、両者の間の関係が示唆される。牛伏寺断層の変形の様子と比較すると、地震サイクル中での段階が異なるにも関わらず見かけの固着域の深さは同程度であり、下部地殻内の断層深部延長において変形が集中している結果と思われる (名古屋大学 [課題番号: 1703]、鷲谷, 2008)。

(断層周辺の微細構造)

跡津川断層等で微小地震観測を行って、その発震機構解から応力場の空間的な変化の詳細を明らかにし、断層深部での定常滑りが応力蓄積過程として適当であることを示した (産業技術総合研究所 [課題番号: 5001])。

2005 年 (平成 17 年) 福岡県西方沖の地震 (M7.0) の応力場を推定した。本震震源域では本震の発震機構と整合的な応力場が支配的であるが、余震域の両端部では応力場が時計回りに回転し

ており、応力場の不均質が明らかとなった。また、地震波トモグラフィや減衰構造の推定から、地震時の滑りが大きかった領域は高速度で減衰が小さいことが分かった（図 17）（九州大学 [課題番号：2102]）。

また、布田川一日奈久断層帯では、断層下部に低速度域が、下部地殻内には反射体が見られ、応力集中が起こり易い状況にあることが分かった。この地域では西南西―東北東圧縮、北北西―南南東伸張の応力が見られるが、別府―島原地溝帯では正断層が卓越する傾向が見られる（図 18）（九州大学 [課題番号：2102]）。

野島断層の注水実験から、野島断層の回復過程が 2003 年以降頭打ちとなっていることが分かった。またデータのモデリングから、断層近傍岩盤の透水係数およびその経年変化を推定した。また、注水と極微小地震活動との間に高い関連性が認められる（京都大学防災研究所 [課題番号：1804]）。

（中越地域）

中越地域は 2004 年（平成 16 年）新潟県中越地震（M6.8）発生以後に様々な観測が実施され、内陸地震を起こす震源断層の構造的特徴の詳細が検討され、歪集中帯の一部として注目されてきた。2007 年（平成 19 年）7 月 16 日には新潟県中越沖地震（M6.8）が発生し、その余震観測等を通じてこの地域の特徴がより一層明らかになりつつある。

2004 年新潟県中越地震は、余震分布が新発田―小出構造線と同一走向で、約 60 度と傾斜が大きいことから、既存の弱面を用いて発生したと考えられるが、本震と共役な低角東傾斜の断層で大規模な余震も起きている。一方、2007 年新潟県中越沖地震は南東傾斜の面が主たる断層面であるが、一部に西傾斜の余震分布も見られた。また、余震データによるトモグラフィ及び制御震源探査、比抵抗構造探査によって、内陸地震震源域の不均質構造の解明が大きく進展し、地質構造との対応、破壊過程や余震発生様式との対応が明らかとなった。中越地域では、基盤岩とその上の堆積層との境界面に過去の地殻活動で生じた凸凹形状が見られ、2004 年新潟県中越地震はその境界面に位置する。この地域の下部には低速度域が局在化し、比抵抗構造探査の結果と合わせて考慮すると、この低速度域は流体が関与した構造であると考えられる（図 19）（東京大学地震研究所 [課題番号：1404]、Kato et al., 2008b、2009）。

新潟県中越地震の余震のデータを精査して発震機構解を精査したところ、単純な一枚のせん断滑りでは説明できない極性分布を持つ地震が見つかった。これらは、顕著な速度境界付近で発生したり、余震活動の特定の時期に集中したりする特徴があり、応力場の不均質が原因である可能性がある（弘前大学 [課題番号：1102]、小菅・他、2009）。

中越地域を対象として三次元地質構造モデルおよび三次元物性値構造モデルを構築した。さらに、この地下構造モデルと摩擦則を想定した断層運動シミュレーションを基礎とする地震発生予測モデルを作成し、2007 年新潟県中越沖地震発生への 2004 年新潟県中越地震の影響を検討した。その結果、下部地殻の粘性の効果によって、2004 年新潟県中越地震が 2007 年新潟県中越沖地震を誘発した可能性が示された（図 20）（産業技術総合研究所 [課題番号：5001]）。

（2007 年能登半島地震（M6.9））

海陸での余震観測や構造探査を実施し、詳細な余震分布や応力場を推定した。断層の走向は周辺の地質構造と調和的で、応力場は構造に規定されていると考えられる。また、応力場の解析から、浅部の横ずれ型の応力場が深部では逆断層型の応力場へ変化していることが明らかとなった

(東京大学地震研究所 [課題番号：1403、1404])。

能登半島地震の震源域周辺において広帯域 MT (地磁気・地電流) 観測を実施し、本震直下に低比抵抗領域が存在し、余震域と調和的な広がりを持つこと、断層北東端の余震の空白域が高比抵抗領域に対応することが明らかとなった (京都大学防災研究所 [課題番号：1803])。

(2008 年 (平成 20 年) 岩手・宮城内陸地震 (M7.2))

2008 年岩手・宮城内陸地震の発生に伴い、宮城県北部から震源域を覆う領域において余震観測を実施し、詳細な余震分布と三次元地震波速度構造を推定した。その結果、本震断層に対応すると考えられる西傾斜 (傾斜角約 40 度) の余震の並びと、震源域中央から南にかけて東傾斜の余震の並びが見られ、本震震源付近では西傾斜の余震の並びに対し上盤側が下盤側に比べて低速度である。この結果は今回の地震の原因となった断層がかつて日本海拡大時に生成された断層 (正断層) であり、それが反転運動したものである可能性を示している。また、今回の地震の震源は火山に伴う低速度域に近く、地震発生過程がそれらのマグマや流体の分布と密接に関わっていることが示唆される (図 21) (東北大学 [課題番号：1202]、岡田・他, 2008)。

GPS 観測による地震時の地殻変動から断層運動の推定を行った結果、地震後に出店断層等でゆっくり滑りが発生していたことが明らかになった。また、本震断層においては地震時滑り領域と余効滑り領域が相補的であることが分かった (図 5) (東北大学 [課題番号：1202]、Ohta et al., 2008)。

広帯域 MT 観測からは、本震震源域の東部の深さ 5km 付近に顕著な低比抵抗域が見出された。断層面および余震分布域は高比抵抗域にあり、地震波速度の高速度分布域に対応していることが明らかにされた (東北大学 [課題番号：1202]、秋田大学 [課題番号：1301])。

(流体の分布)

1938 年 (昭和 13 年) の屈斜路湖地震 (M6.1) の震源域付近で比抵抗構造探査を行い、三次元比抵抗構造モデルを作成した。カルデラ構造の境界部やその西側の高比抵抗体で地震が発生したことが分かった (図 22) (北海道大学 [課題番号：1005]、Ichihara et al., 2009)。

(地殻応力と全磁力)

応力変化に伴う電磁気学的な変化を捉える目的で、伊豆半島北東部において全磁力観測が続けられているが、平成 11 年以降は変化が認められていない (東京工業大学 [課題番号：1603])。

ウ. 地震発生直前の物理・化学過程

地震発生直前においては不可逆的な物理・化学過程が存在していると考えられているが、その実体はまだよく分かっていない。第 1 次新計画において摩擦構成則に基づくシミュレーションにより大地震前に生成する破壊核の挙動の理解は進んだが、その破壊核を近代的観測で直接捉えた例は無く、いくつか報告されている事例はあくまでも傍証にすぎない。また、流体の存在は地震発生に深く関わっていると考えられるが、間隙水圧の上昇が地震発生を促すという事例は人工的な誘発地震では知られているものの、通常地震の発生前の間隙水圧の変化や流体の挙動に関する直接的証拠は得られていない。さらに、地震発生直前に電磁気学的異常が生じるとの報告もあるが、それらの現象と地震発生との関連の検討はまだ十分ではなく、また、その現象を説明する説得力のあるモデルはまだ構築されていない。

このような背景のもと、地震学的直前過程、流体の挙動と地震発生の関係、及び電磁気学的時間変化と地震発生の関係に注目して、研究が実施された。

(電磁気的变化と地殻内流体)

VHF 帯の散乱波が地震発生前に変化する可能性を検討するための観測から、十勝沿岸で発生した M4.7 と M4.0 の二つの^{やや}稍深発地震について、どちらもほぼ震央方向から散乱波が到来していたことが判明した。ただし、すべての事例でうまくいく訳ではなく、事例の積み重ねとメカニズム解明が必要である（北海道大学 [課題番号：1006]）。

東海地域では、ゆっくり滑り領域の縁辺部に位置する春野観測点において全磁力の顕著な増加が間欠的に生じていることが明らかとなった。ゆっくり滑りによる地殻内流体の移動に関連した変化である可能性がある。伊豆地方では、与望島で全磁力変化が停滞ないし現象し、手石島で比較的顕著な増加が見られ、深さ 2km 程度の上部地殻浅部における熱消磁過程が示唆される（東京大学地震研究所 [課題番号：1405]）。

浅間山において絶対重力計による連続観測を実施し、台風通過時の大雨に伴う重力の急上昇と地下水浸透に伴う重力値の緩やかな減少を観測し、地下水の流動を考慮したシミュレーションと整合的であることを確認した。重力観測を高精度化する上でも重要な知見である（東京大学地震研究所 [課題番号：1405]）。

(震源核形成過程の半制御実験による解明)

南アフリカ金鉱山の地下 2~3km において、採掘に伴って発生する M3 以下の地震活動とそれに伴う岩盤挙動の至近距離・高感度観測を行った。普通の地震よりも桁違いにゆっくりとした歪変化が観測され、その大きさと継続時間との関係は、プレート境界などのゆっくり地震に対して提唱されるそれらの関係と、傾向が異なることが分かった（図 23）（京都大学防災研究所 [課題番号：1805]、小笠原・他，2009）。

エ. 地震発生サイクル

第 2 次新計画では、アスペリティ・モデルを更に進展させ、地震発生サイクルの実体の解明と、そのサイクルの揺らぎを生じる原因を解明するために、「地震発生サイクル」という本小項目が新たに設けられた。現在の地震発生サイクルの研究は、近代的地震観測データと数値シミュレーションに基づく物理学的モデルを用いる研究と、過去の地震発生の履歴に基づく統計学的モデルを用いる研究の二つに大別される。この二種類のモデルを統合し、より高度で定量的な大地震発生予測モデルを構築することが本小項目の目標である。

通常考えている地震発生サイクルよりももっと長いサイクル（超サイクル）で大規模な地震が発生している可能性が以前から指摘されていたが、2004 年にインドネシア・スマトラ島沖で発生した M9 の大地震は、そのような地震が実際に発生しうることを明確に示した。このような超サイクルの地震および地震発生サイクルの揺らぎの解明を中心として、以下の研究を実施した。

(超サイクルの地震)

日本海溝や相模トラフ、南海トラフ等で発生する海溝型の大地震について、通常地震サイクルを超える数百年に一度の超サイクルが存在することが明らかとなった。日本海溝では 869 年の貞観地震、南海トラフでは 684 年白鳳地震、1361 年康安（正平）地震、1707 年宝永地震、関東

では 1293 年正応（永仁）地震、1703 年元禄関東地震がこれに該当する。また、海溝型地震の発生間隔に 2 倍程度の揺らぎがある例が見出された。（東京大学地震研究所 [課題番号：1406]）。

津波堆積物の調査によって、海溝型地震は常に同じような規模で発生するのではなく、まれに複数の震源域が連動破壊して巨大津波を発生させることを、千島海溝西部や宮城県沖日本海溝で明らかにし、チリ海溝やインド洋東岸でも巨大津波の履歴の解明に成功した。また、津波堆積物が分布しない隆起域では、ヤッコカンザシやカキ等の化石の調査によって連動型地震の履歴を明らかにできることを、南海トラフやミャンマー西岸で明らかにした（産業技術総合研究所 [課題番号：5003]、Sawai et al., 2008）。

また東北日本弧の長期的な隆起速度を求め、測地学的に求め得られた地殻変動の速度と大きく異なることを示した（産業技術総合研究所 [課題番号：5002]、Matsu'ura et al., 2009）。

（地震発生サイクルの揺らぎ）

釜石沖における M5 弱の繰り返し地震の解析から、再来間隔が周囲における準静的な滑りのゆらぎによって変化するとともに、間隙圧の時間変化に起因すると考えられる強度の揺らぎによって規模や再来間隔、連鎖破壊のしやすさも変化している可能性や、近傍の一回り小さな地震の活動によって地震時の破壊過程に揺らぎが生じている可能性が示された。（図 24）（東北大学 [課題番号：1203]、島村，2008）。

余効滑りやゆっくり滑りの伝播速度が、基本的に有効法線応力で規定されることを数値シミュレーションによって示すとともに、プレート境界における極めて高い間隙水圧の影響で摩擦が非常に小さくなる可能性を示した。また、小繰り返し地震の積算滑りが、余効滑りの積算滑りと一致することをシミュレーションから示した（東北大学 [課題番号：1203]）。

津波波形データを用いて、千島海溝沿いで発生した 1894 年（明治 27 年）根室沖の地震、1918 年（大正 7 年）中千島の地震、1963 年（昭和 38 年）択捉島沖の地震、1973 年（昭和 48 年）根室半島沖地震（M7.4）、2003 年十勝沖地震、2006 年（平成 18 年）中千島の地震、2007 年中千島の地震の断層モデルや滑り分布推定を行った。その結果、1894 年の地震は 1973 年の地震よりも破壊域が広く大規模だったこと、1973 年と 2003 年の震源域の間に未破壊領域があること、2006 年の地震が 1918 年の地震の繰り返しだった可能性のあることなどが明らかとなった。南千島での調査の結果、北海道の火山噴火に伴う噴出物が確認され、今後年代決定で使えることがわかった（北海道大学 [課題番号：1007]、伊尾木・谷岡，2009）。

（活断層系のセグメンテーション）

活断層で発生する地震の規模予測のため、活断層を、固有の活動履歴をもつと考えられるセグメント単位に区分するとともに、断層長および変位量などの断層パラメータと地震規模の関係を確立するため、日本、中国、トルコ、パキスタン等において詳細なデータを収集した。また、これらのセグメント間の連動破壊についての動的破壊シミュレーションを実施した。その結果、セグメント連動破壊に関するいくつかの経験則を導くことができた（産業技術総合研究所 [課題番号：5002]）。

課題と展望

（プレート境界域における歪・応力集中機構）

プレート境界のアスペリティの位置を正しく把握し、また、そこでの滑り欠損を GPS や相似地

震からモニタリングしていくことは、地震発生の中・長期予測にとって極めて重要である。過去に大地震が発生した場所は、地震記録の解析等でアスペリティの分布が推定できるが、そうした記録が無い場所については、構造的な特徴や現在の地殻変動から推定するしかない。現計画ではそうした研究が進められ、地震学的な不均質構造とアスペリティの分布に良い対応関係があることが明らかとなった。しかし、こうした構造的な特徴とアスペリティが対応する原因まで明らかになったとは言えず、今後も観測事例を積み重ねるとともに、構造的な特徴の物理的実体を解明することが待たれる。また、アスペリティの多くは海域の地下深くに位置しており、その詳細な振る舞いを観測的に明らかにするため、相似地震や数値シミュレーションを用いたアスペリティの振る舞いに関する検討も進みつつあり、今後も研究を進める必要がある。

プレート境界における多様な物理過程の代表例として注目された深部低周波微動やゆっくり滑りは、世界各地の報告例から、沈み込み帯にある程度普遍的な現象であることが明らかとなった。南アフリカの金鉱山で得られた事象は、ゆっくり滑り現象の規模と継続時間の関係等がわかりつつあり、より多くの観測事例に基づいた検証が今後の課題である。

(内陸地震発生域の不均質構造と歪・応力集中機構)

跡津川断層周辺における集中観測や中越地域、能登半島地震、岩手・宮城内陸地震の震源域周辺等における観測により、大規模な内陸地震を引き起こす断層周辺の詳細な構造が明らかにされた。これらの観測から、内陸地震のアスペリティに相当する高速度域の存在や、断層深部延長の下部地殻に局在する低速度域や反射波が多く見える領域の存在が確認されるとともに、これらの不均質構造に対する流体の関与が示唆され、内陸地震の応力集中や発生が不均質構造によって強く規定されていることが明らかとなった。特に、地震、地殻変動、電磁気などから多角的に得られた構造、活動特性が内陸地震の応力の集中機構を知る上で極めて重要であることが示された。観測の事例をさらに増やすとともに、不均質構造を考慮した内陸地震の準備過程や発生サイクルのモデル化が課題である。

現時点における別の課題として、これまでの観測対象には最近大地震が起きた地域が多く、近い将来に大地震を起こす可能性の高い断層については情報が少ないことが挙げられる。日本列島の内陸地震の再来期間は短くても 1000 年以上であるが、地震サイクル中の段階が異なる複数の断層帯に関する比較も行っていく必要がある。

(地震発生直前の物理・化学過程)

地震発生直前に異常変化が発生するかどうかは、将来、短期的な地震発生予測が可能になるかどうかを左右する重大問題であるが、地震予知研究を 40 年以上続けてきた現時点においても答えが出ていない。摩擦構成則等の物理法則から前駆現象が期待されるかどうかも重要であるが、地震予知計画においては、その前駆現象が観測可能かつ解釈可能である必要がある。

前駆的な地殻変動については、現在の観測技術に照らして検証に耐えうるだけの観測例が過去に無く、南アフリカの金鉱山における観測でも、ゆっくりとした歪変化の直前に見られた場合を除けば、前駆的な変化は検出されていない。今後は、ゆっくり地震と通常地震の関係を明らかにすること、通常の大震災の直前過程の有無の検証を行っていくことが求められる。

(地震発生サイクル)

日本海溝や日向灘における小繰り返し地震は、単純化された地震サイクルの姿を示しているが、

それでも周囲で発生した大地震の影響による揺らぎが見られる。また、小繰り返し地震のアスペリティを精査すると、さらに詳細構造が見えてくる場合もある。

一方、津波堆積物などから南海トラフなどのプレート境界で発生する巨大地震を調べると、毎回到ような地震が起きるのではなく、数回に一度規模の大きい地震が起きていることが明らかとなった。2004年スマトラアンダマン地震を考へても、次に起きる海溝型地震が巨大地震になるかどうかを知ることは防災上特に重要である。地震サイクルの中で時々こうした超巨大地震が生じるしくみを理解することは今後の課題である。超巨大地震の存在は、通常の繰り返しではサイクルが完了せず1サイクル前とは異なる状態になっていることを示唆する。この状態の違いを識別する手法を開発することは重要な課題である。

参考文献

- Ichihara, H., T. Mogi, H. Hase, T. Watanabe and Y. Yamaya, Resistivity and density modelling in the 1938 Kutcharo earthquake source area along a large caldera boundary. *Earth Planets and Space*, in press, 2009.
- Iidaka, T., Kato, A., Kurashimo, E., Iwasaki, T., Hirata, N., Katao, H., Hirose, I. & Miyamachi, H., 2008. Fine structure of P-wave velocity distribution along the Atotsugawa fault, central Japan, *Tectonophysics* (in press), 2009.
- 伊尾木圭衣, 谷岡勇市郎, 中千島沖巨大地震による津波の北海道オホーツク海沿岸での挙動, 地震2, 第61巻, 印刷中, 2009
- Kato, A., Sakai, S., Kurashimo, E., Igarashi, T., Iidaka, T., Hirata, N., Iwasaki, T., Kanazawa, T. and Group for the aftershock observation of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake, Imaging heterogeneous velocity structures and complex aftershock distributions in the source region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake by a dense seismic observation, *Earth Planets Space*, **60**, 1111-1116, 2008b.
- Kato, A., E. Kurashimo, T. Igarashi, S. Sakai, T. Iidaka, M. Shinohara, T. Kanazawa, T. Yamada, N. Hirata, and T. Iwasaki, Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L05301, doi:10.1029/2008GL036450, 2009.
- 木下正高・Harold Tobin・芦寿一郎・Siegfried Lallemand・木村学・Elizabeth Screaton・Moe Kyaw Thu・眞砂英樹・Daniel Curewitz・IODP 第314/315/316航海乗船研究者, 南海トラフ巨大地震震源域への掘削調査を開始, 科学, 78, No.6, 2008.
- 小菅正裕・岩渕 智・村田和則, 稠密余震観測データを用いて推定した2004年新潟県中越地震震源域の応力場, 地震2, 61, 印刷中, 2009.
- Machida, Y., M. Shinohara, T. Takanami, Y. Murai, T. Yamada, N. Hirata, K. Suyehiro, T. Kanazawa, Y. Kaneda, H. Mikada, S. Sakai, T. Watanabe, K. Uehira, N. Takahashi, M. Nishino, K. Mochizuki, T. Sato, E. Araki, R. Hino, K. Uhira, H. Shiobara, and H. Shimizu, Heterogeneous structure around the rupture area of the 2003 Tokachi-oki earthquake (Mw=8.0), Japan, as revealed by aftershock observations using Ocean Bottom Seismometers, *Tectonophysics*, **465**, 164-176, 2009.
- Matsumoto, Y., T. Ishikawa, M. Fujita, M. Sato, H. Saito, M. Mochizuki, T. Yabuki, and A. Asada, Weak interpolate coupling beneath the subduction zone off Fukushima, NE Japan, inferred from GPS/acoustic seafloor geodetic observation, *Earth Planets Space*, **60**,

e9-e12, 2008.

- Mochizuki, K., T. Yamada, M. Shinohara, Y. Yamanaka, and T. Kanazawa, Weak Interplate Coupling by Seamounts and Repeating M^7 Earthquakes, *Science*, **321**, 5839, 1194-1197, 2008.
- Nakajima, J., and A. Hasegawa, Existence of low-velocity zones under the source areas of the 2004 Niigara-Chuetsu and 2007 Niigarta-Chuetsu-Oki earthquakes inferred from travel-time tomography, *EPS*, **60**, 1127-1130, 2008.
- Nakanishi A., S. Kodaira, S. Miura, A. Ito, T. Sato, J.-O. Park, Y. Kido, Y. Kaneda, Detailed structural image around splay-fault branching in the Nankai subduction seismogenic zone: Results from a high-density ocean bottom seismic survey, *J. Geophys. Res.*, **113**, B03105, doi:10.1029/2007JB004974, 2008.
- 小笠原宏・川方裕則・石井 紘・中谷正生・矢部康男・飯尾能久・南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験国際共同研究グループ, 南アフリカ金鉱山における半制御地震発生実験ー至近距離観測による地震発生過程の解明に向けてー, 地震2, 印刷中, 2009.
- Ohta et al., Coseismic fault model of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced by a dense GPS network, *EPS*, Vol. 60, No. 12, 1,197-1,201, 2008.
- 岡田知己・海野徳仁・長谷川昭・2008年岩手・宮城内陸地震緊急観測グループ, 2008年岩手・宮城内陸地震, *科学*, **78**, 978-984, 2008.
- 鷺谷威, GPS 観測に基づく日本列島の地震テクトニクス, 地震2, **61**, S479-S488, 2009.
- Sawai, Y., Kamataki, T., Shishikura, M. et al., Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis from the past 5,500 years in eastern Hokkaido, Japan. *Jour. Geophysical Research*, doi:10.1029/2007JB005503, 2008.
- Tahara, M, K. Uehira, H. Shimizu, M. Nakada, T. Yamada, K. Mochizuki, M. Shinohara, M. Nishino, R. Hino, H. Yakiwara, H. Miyamachi, K. Umakoshi, M. Goda, N. Matsuwo and T. Kanazawa, Seismic velocity structure around the Hyuganada region, Southwest Japan derived from seismic tomography using land and OBS data and its implications for interplate coupling and vertical crustal uplift, *PEPI*, **167**, 19-33, 2008.

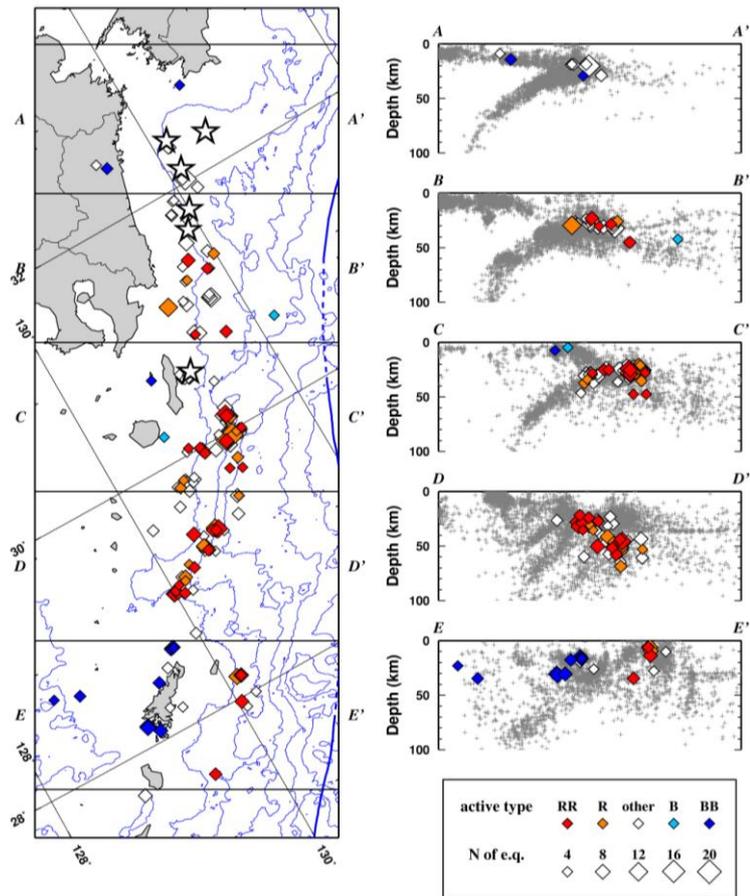


図 10：活動様式ごとの相似地震群の震央分布（左図）と震央分布図に示されている5つの領域についての震源断面分布（右図）。◇印は相似地震群の震源を表しており、赤色は繰り返し型、橙色は稍繰り返し型、青色はバースト型、水色は稍バースト型、白色はその他である。震央分布図の星印は1923年以降に発生したM7.0以上の地震の震央(気象庁データ)、断面分布の灰色は鹿児島大学で決定された微小地震の震源分布である（鹿児島大学 [課題番号：2201]）。

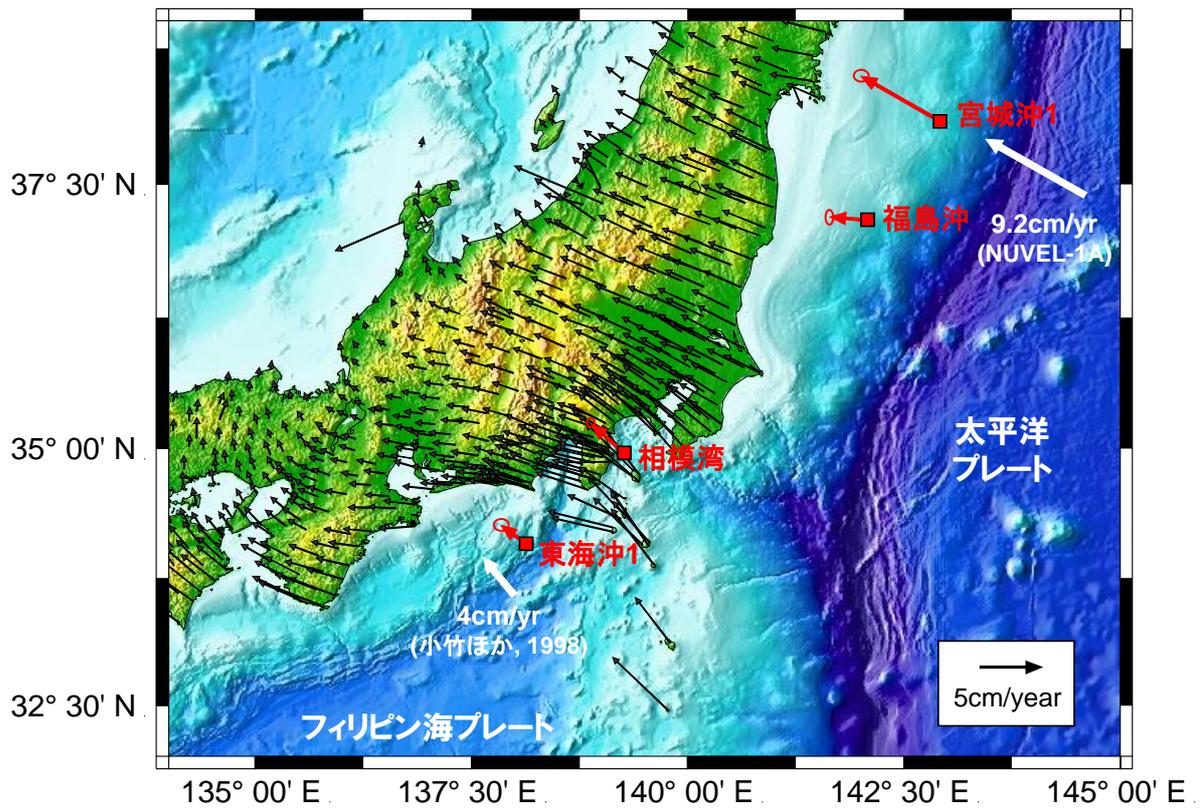


図11: 海底基準点のユーラシアプレート安定域に対する動き (海上保安庁 [課題番号: 8003])。黒い矢印は国土地理院の電子基準点の速度ベクトルを示す。

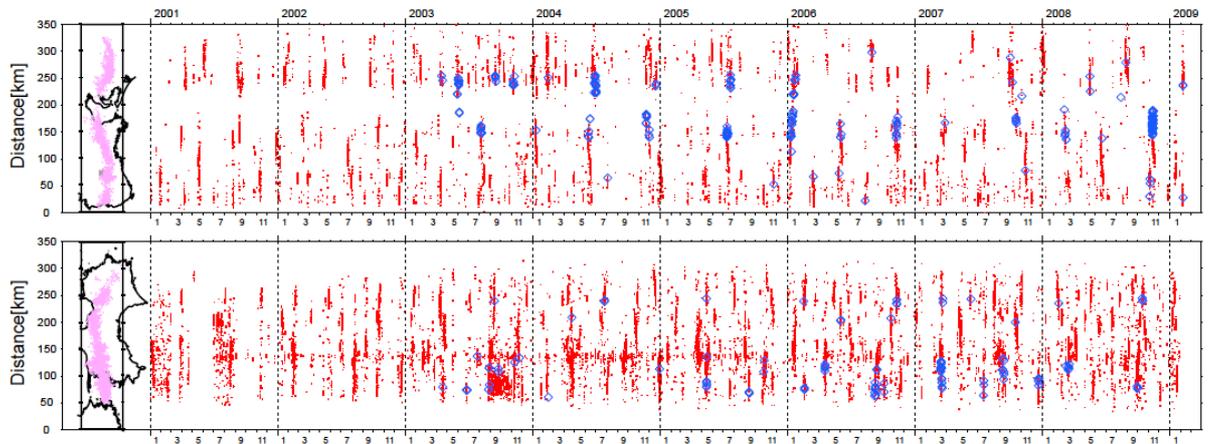


図 12 : 2001 年～2009 年 1 月の西南日本における深部低周波微動（赤）及び深部超低周波地震（青）発生状況（防災科学技術研究所 [課題番号：3002]）。

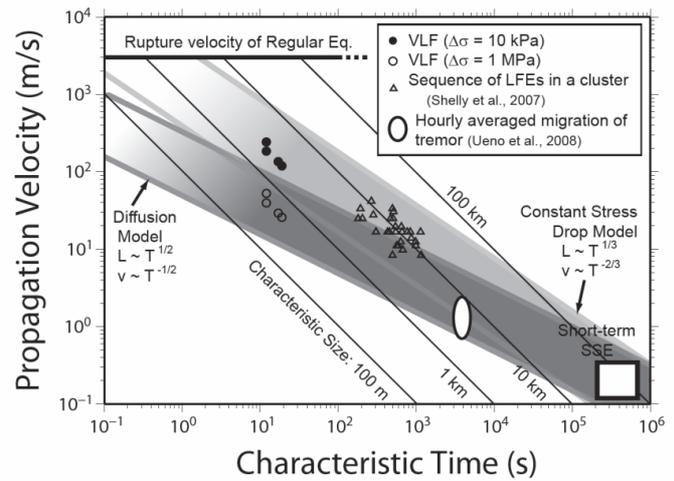
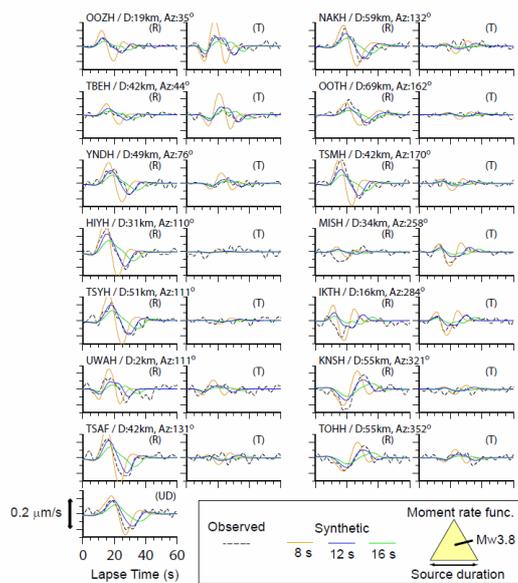


図 13 : (左) 深部超低周波地震の理論波形（実線）と観測波形（点線）との比較。理論波形は震源時間が 8 秒（橙）、12 秒（青）、16 秒（緑）の場合であり、このうち 12 秒が最適である。(右) 超低周波地震の応力降下量を 10kPa 及び 1MPa にしたときの特徴的時間と伝播速度との関係（防災科学技術研究所 [課題番号：3002]）。

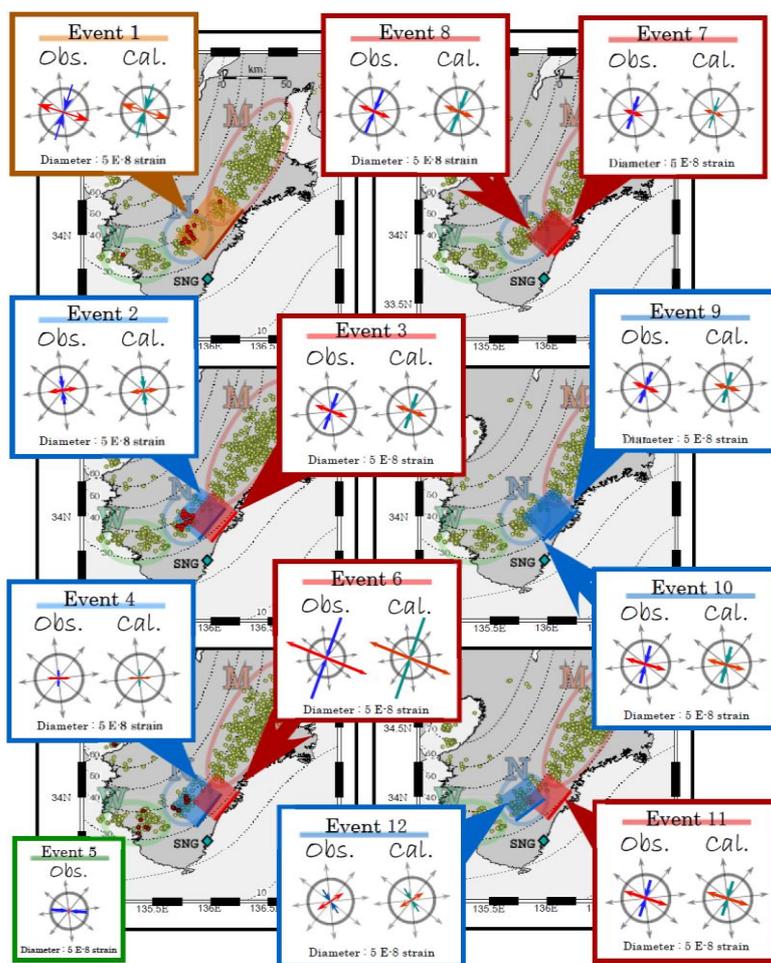


図 14: 新宮ボアホール観測点で検出された 12 個の歪変化イベントについて求めた歪変化の主軸および推定された断層モデルと、断層モデルによる歪主軸の計算値の比較。青で囲まれたイベントは奈良県南部の微動活動に伴うもので、赤で囲まれたイベントは微動活動を伴わずに発生した。それぞれについて推定された断層モデルは、微動活動の位置および微動活動の空白域にほぼ対応している (名古屋大学 [課題番号: 1702])。

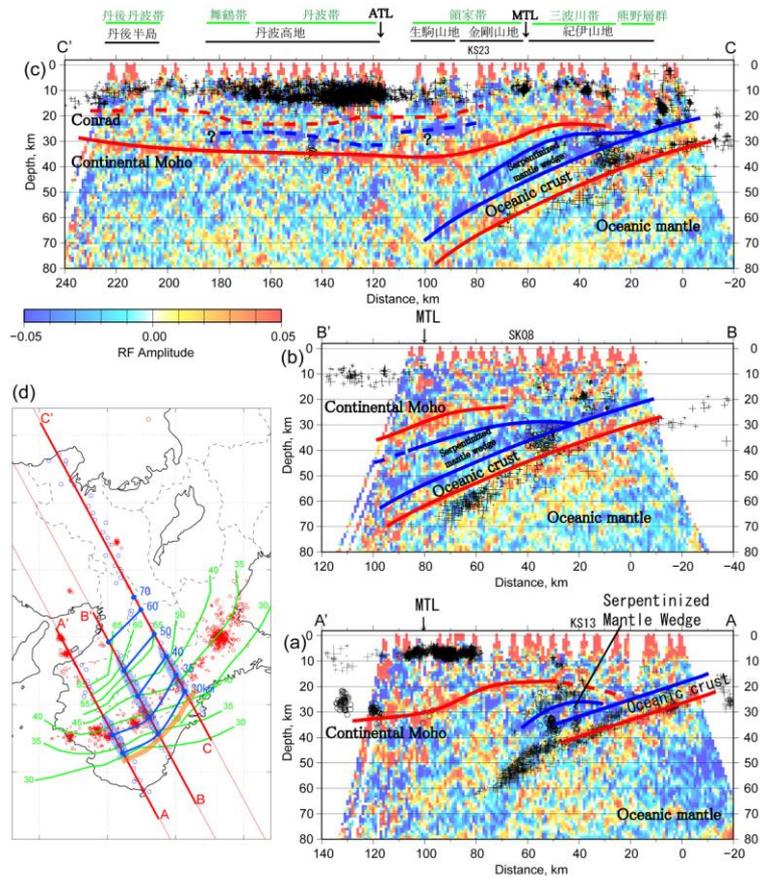


図 15：レシーバ関数イメージ。(a)潮岬—田尻測線 (AA')、(b)新宮—河内長野測線 (BB')、(c)尾鷲—京丹後測線(CC')。黒丸は深部低周波イベント。(d)本研究で求められたフィリピン海プレート上面のコンター (青線) と三好・石橋 (2004) によるコンター (緑線) (京都名大学防災研究所 [課題番号: 1802])。

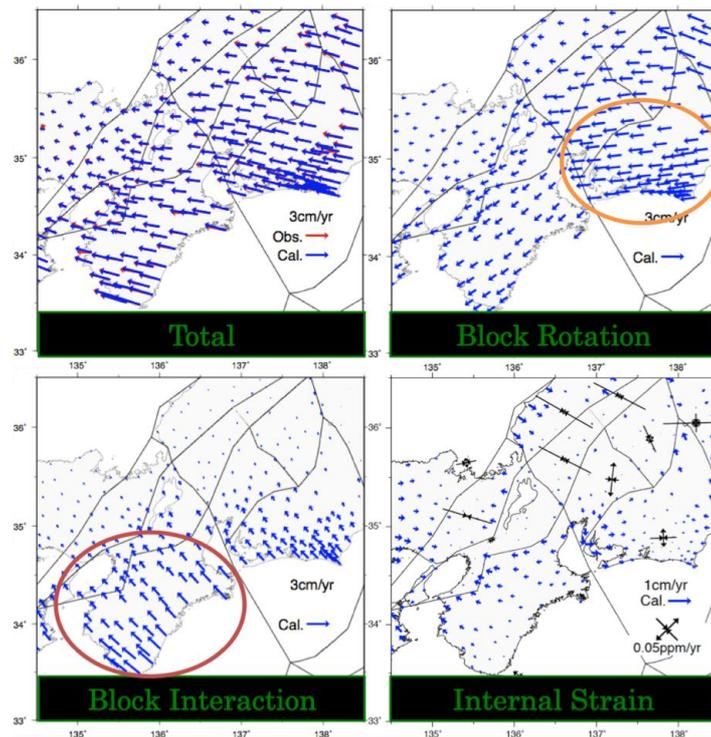


図 16 : GPS 速度ベクトル (左上、2006 年 1 月～2008 年 8 月) をブロック断層モデル解析によって、ブロックの剛体回転運動 (右上)、ブロック間相互作用 (左下)、ブロック内歪 (右下) の各成分からの寄与に分解した。プレート沈み込みによる影響やブロック運動からの寄与が東海と紀伊半島の前弧部分で異なること、紀伊半島の前弧部分がスリバー的な運動をしていることなどが分かる (名古屋大学 [課題番号 : 1702])。

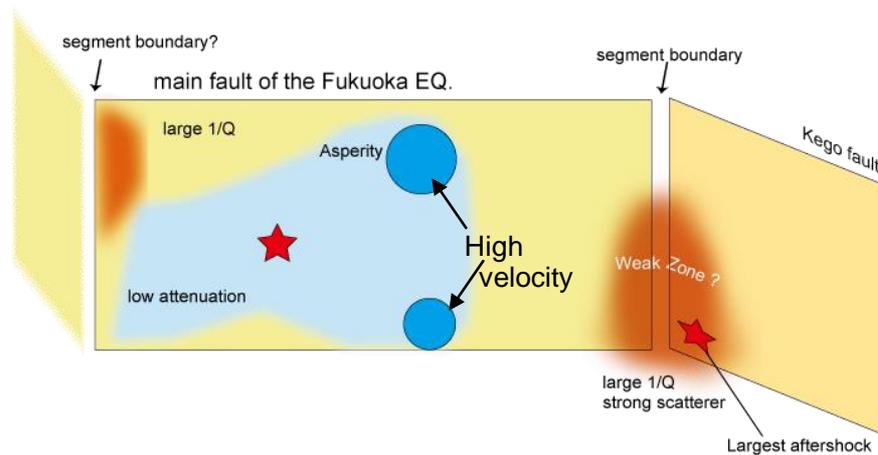


図 17 : 福岡県西方沖地震断層の構造模式図。北西部と南東部にセグメント境界があり、強い不均質が存在すると考えられる。断層面上では高速度異常を示すアスペリティが見出された (九州大学 [課題番号 : 2102])。

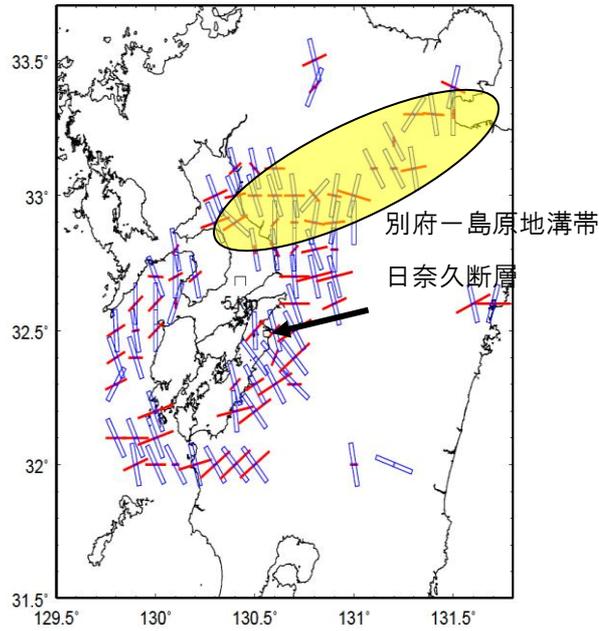


図 18：応力テンソル逆解析によって得られた九州内陸の応力分布。赤が最大圧縮軸、青は最小圧縮軸を示す。日奈久断層周辺ではほぼ横ずれ断層運動を示す応力が、別府島原地溝帯内部では正断層型の分布が見られる（九州大学 [課題番号：2102]）。

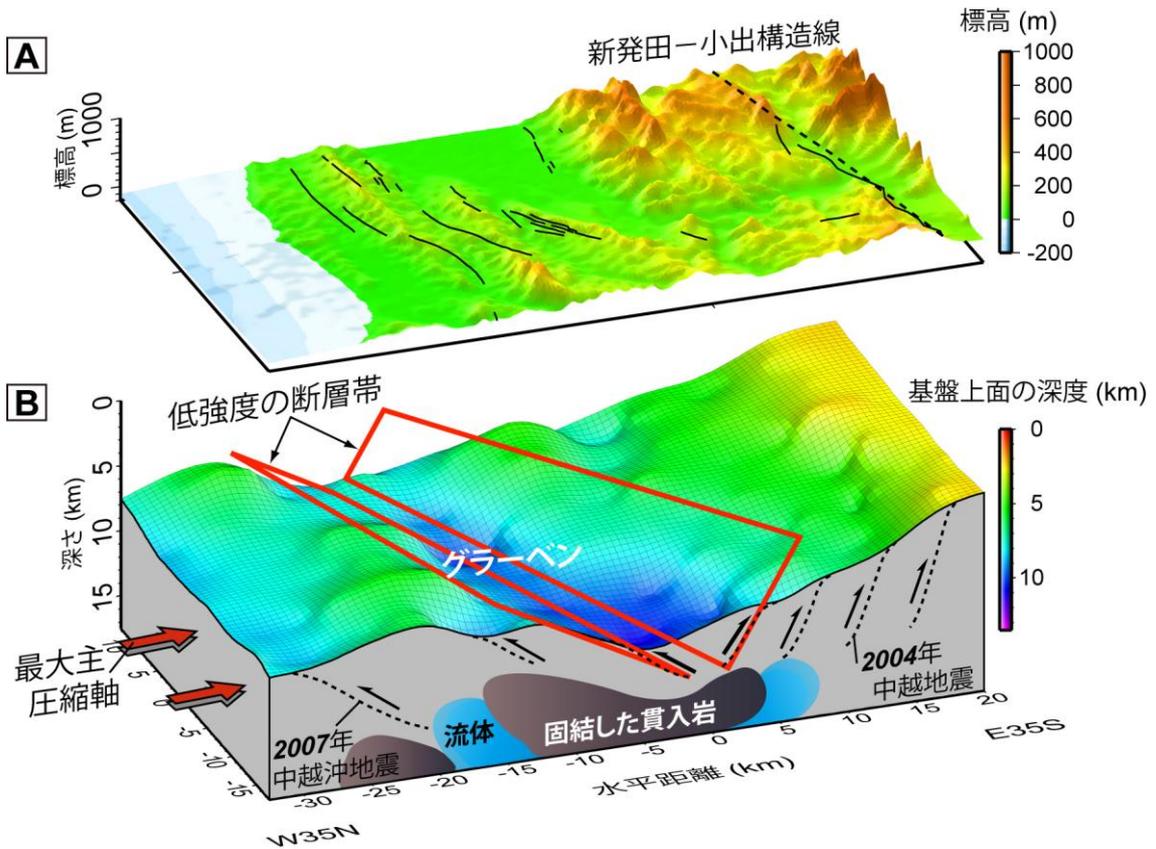


図 19：日本海東縁部の構造と内陸地震発生の概念モデル（東京大学地震研究所 [課題番号：1404]）。

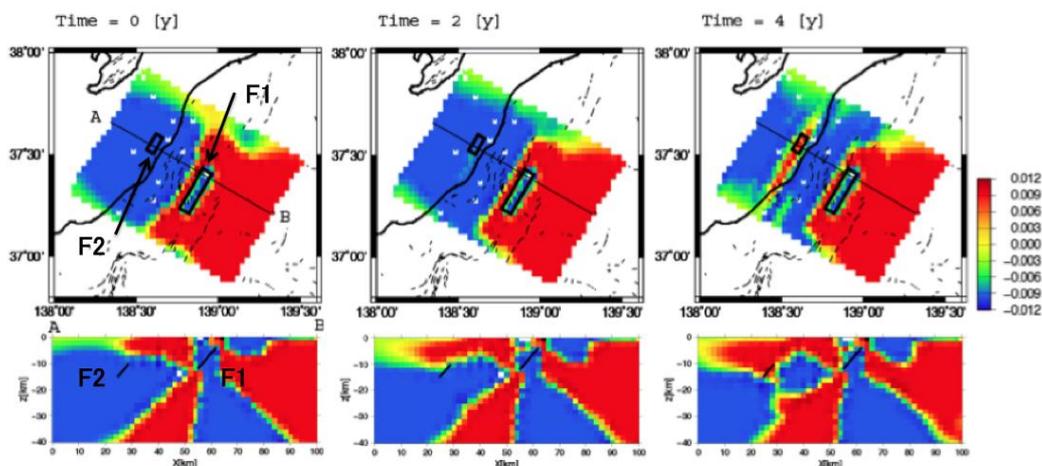


図 20：下部地殻の粘性の効果と三次元地殻構造を考慮した、2004 年中越地震によるクーロン破壊応力の時間変化。左からそれぞれ直後、2 年後、4 年後の平面図（上図）と断面図（下図）。F1 は 2004 年中越地震、F2 は 2007 年中越沖地震の断層面を表す。約 2 年後には 2007 年中越沖地震の震源付近で地震発生を促進させる応力場に変化したことが分かる（産業技術総合研究所 [課題番号：5001]）。

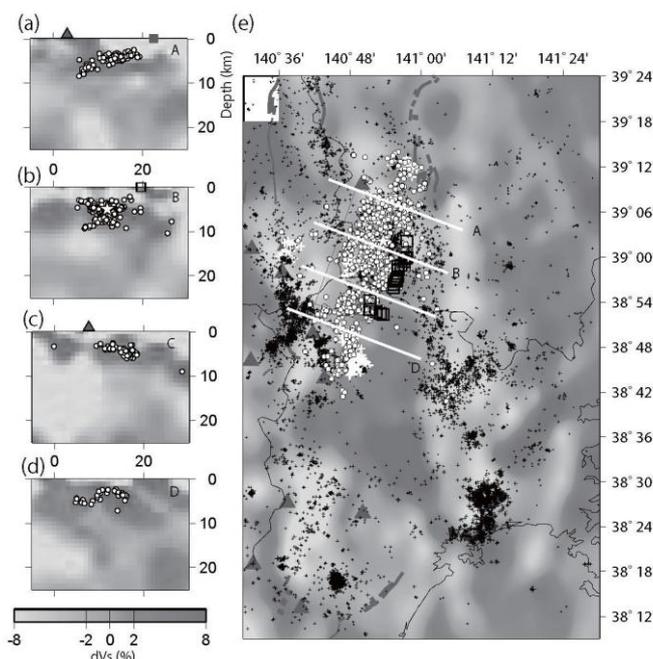


図 21：2008 年岩手・宮城内陸地震震源域における S 波速度構造と余震分布。白星、白丸は、本震および余震を、三角は火山を示す。(a-d) S 波速度偏差の鉛直断面図。地表の四角は活断層の地表トレースを示す。(e) 深さ 24 km における S 波速度偏差分布。黒+は深さ 20km より浅い地震、破線で囲った領域は余震活動が低調な領域、太線は活断層を示す（東北大学 [課題番号：1202]）。

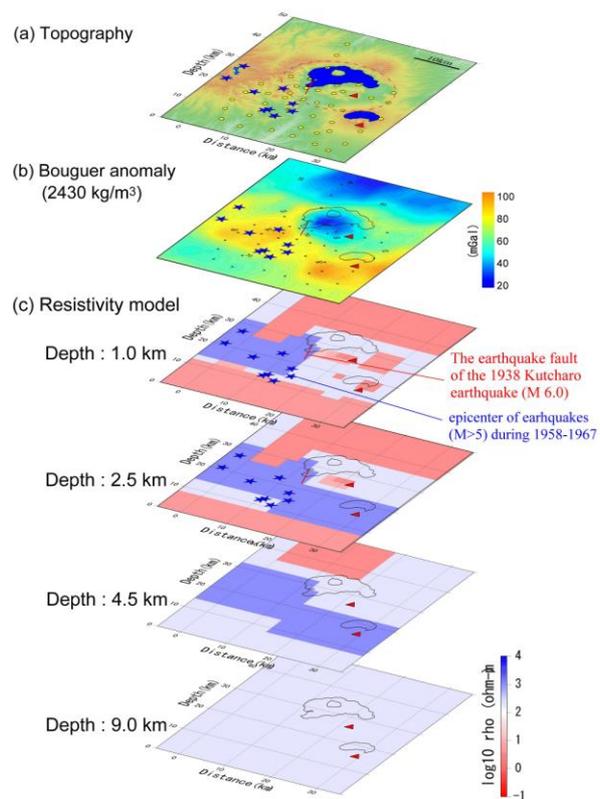


図 22 : 弟子屈一屈斜路地域の三次元比抵抗構造 (北海道大学 [課題番号 : 1005]、市原・他、2007)。

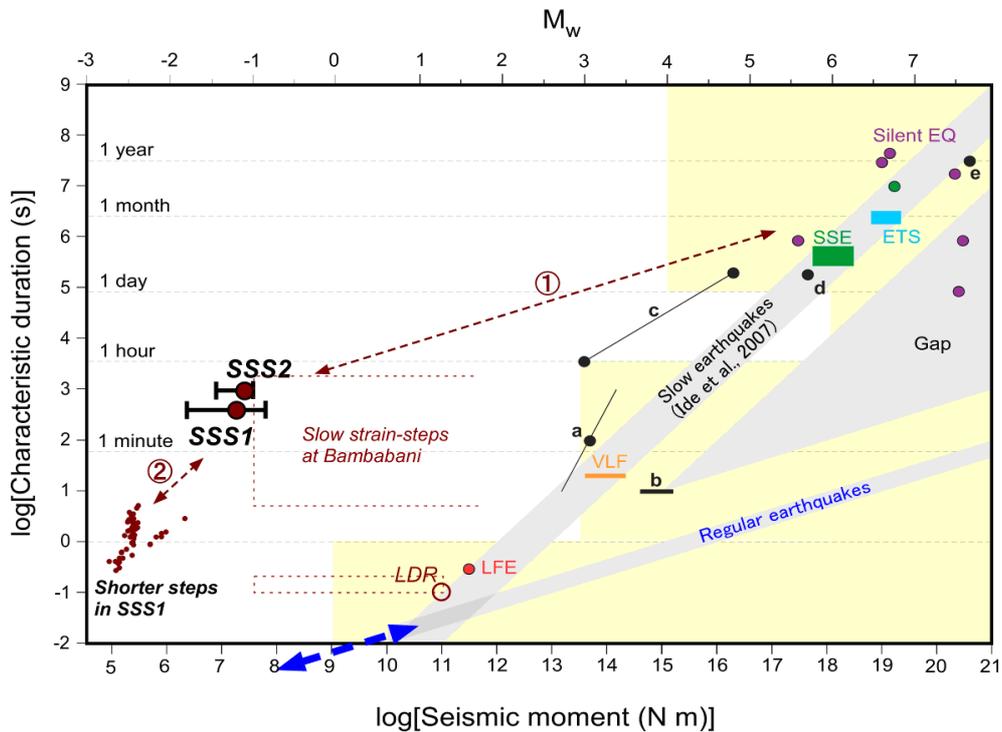


図 23 : Mponeng 金鉱山地下 2.9 キロメートルの断層帯で確認されたスロー歪ステップと他のデータの比較(安武 2009 立命修士論文より; Ide et al. 2006 の図に加筆修正)。安武(2009)はまた、Bambanani 鉱山で Naoi et al. (2006 ; GRL)が発見したスロー歪ステップのモーメント (M_0) の下限や、それらより速いが動的応答が少ないイベント (LDR イベント; Little Dynamic Response) の下限も推定し同図にプロットした (えんじ色の点線)。クリーム色は日本付近の地震・地殻変動観測網のノイズレベルから推定される観測が可能な M_0 と継続時間のおおまかな範囲である。SSS (えんじ色の丸) と自然のより大きなスローイベント (SSE や ETS、Silent EQ) を結ぶえんじ色の点線①は、通常の地震性のイベント (Regular earthquake) のスケーリング則と平行であるように見える。SSS と Shorter steps とを結ぶえんじ色の点線②は、Ide et al. (2007) が提唱するスケーリング則と平行であるように見える (京都大学防災研究所 [課題番号: 1805])。

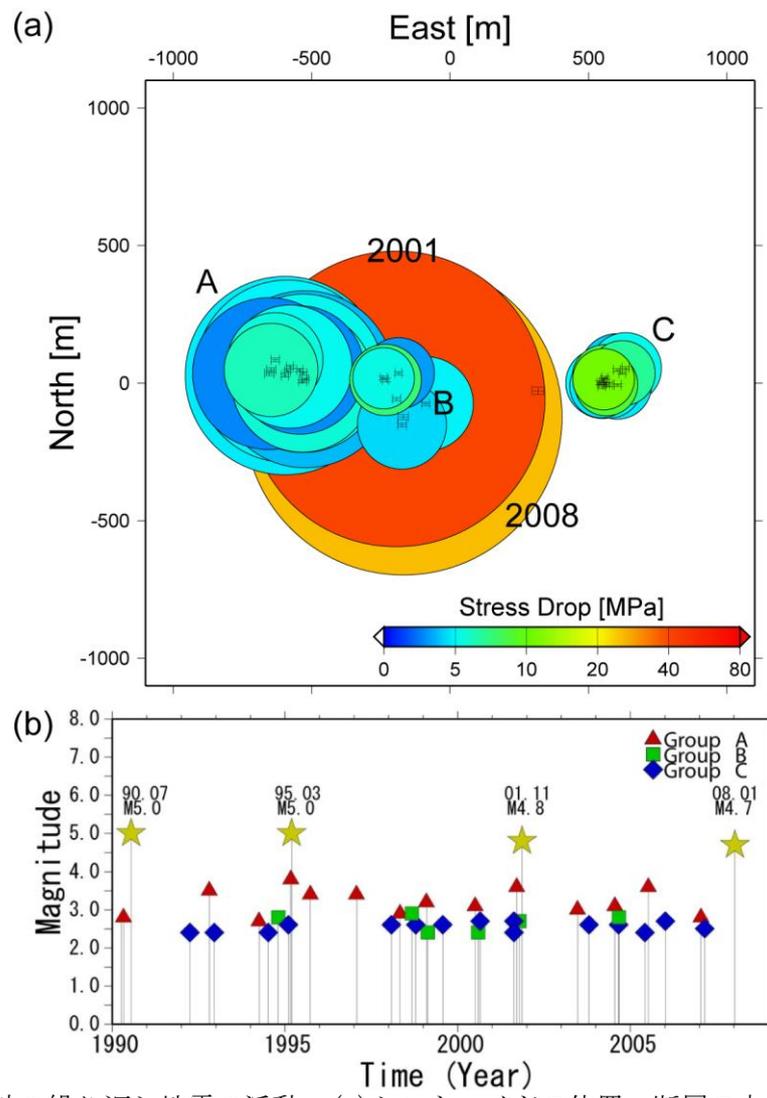


図 24 : (釜石沖の繰り返し地震の活動。(a)セントロイドの位置、断層の大きさ、応力降下量の比較。色は応力降下量を表す。(b) M-T 図。シンボルはグループの分類を表す (東北大学 [課題番号 : 1203])。)

1. (3) 「地震破壊過程と強震動」研究計画

1. (3) 「地震破壊過程と強震動」研究計画

大地震の破壊過程を詳しく調べることによって、断層面上のアスペリティやその周辺の不均質な応力降下の分布が得られる。このような情報を蓄積することにより、大地震発生に先立って震源域における破壊開始点やアスペリティ周辺の応力及び強度に関する特徴を知ることができる。また、アスペリティの分布やその活動の再来性の理解が進めば、単に地震規模の予測だけでなく、大地震時の強震動生成域の分布についても定量的評価が可能になる。そのためには、震源過程の複雑さとともに、波動伝播への地下構造の影響を評価することも重要である。

このような観点から、平成 16～20 年度の 5 カ年の研究期間において、三次元地下構造の考慮や、近地強震記録、遠地実体波波形、GPS 測地データを用いた同時逆解析などにより震源過程解析の高度化を一層進め、国内外の地震への適用を数多く行った。その結果得られるアスペリティの微細構造を微小地震分布や構造探査結果等と比較して、アスペリティの特性の解明を進めた。このアスペリティ分布とプレート境界や断層周辺の構造及び地震活動との関係を調べるとともに、震源域での地震波速度、重力、比抵抗、微小地震活動等の測定・観測及びデータ解析を実施した。こうしたアスペリティ研究や強震動予測の高度化のためには、高精度の地下構造モデルの構築や、強震観測の拡充・整備が欠かせず、これらの研究及びその成果に基づいた強震動予測とそのシミュレーションの実証的研究を行った。

ア. 断層面上の不均質性

(解析手法やデータの高度化による詳細なアスペリティ分布の把握)

三次元地下構造でのグリーン関数(地震波伝達関数)を用いた震源過程の解析手法を開発した。1995 年(平成 7 年)兵庫県南部地震(M7.3)について手法の適用可能性を検証した後、2003 年宮城県北部の地震(M6.4)の震源モデル推定に適用した。従来の一次元構造グリーン関数を用いた結果と比較してアスペリティの位置が北側のやや深部に再決定されるなどの結果を得た(東京大学地震研究所[課題番号:1407])。また、同地震に対しては、観測点毎に最適化した一次元構造を利用するという簡便的解析手法も新たに開発して、震源解析に適用した。このほか、GPS の 1 秒間隔のデータから地殻変動を含む変位波形を取り出して、2003 年十勝沖地震、2005 年福岡県西方沖の地震の震源過程解析に適用した。強震波形と地殻変動データとの広帯域記録統合解析により、詳細な震源過程とアスペリティ位置の高分解能化が実現し、地震性滑りから余効滑りに至る震源過程の全体像が明確になった(東京大学地震研究所[課題番号:1407])。

2003 年宮城県北部の地震、2004 年新潟県中越地震(Asano and Iwata, 2009)、2007 年能登半島地震(図 25)(靱山・他, 2009、岩田・他, 2008)、2007 年新潟県中越沖地震(Mori, 2008)、2008 年岩手・宮城内陸地震(図 26)(Suzuki et al., 2009)の震源解析を継続して進めたことにより、内陸地殻内地震の震源過程の理解と、強震動評価のための基礎的データを蓄積することができた。特に、2003 年宮城県北部の地震では、余震分布が曲がった震源断層面を示唆していることから、三次元構造を導入するだけでなく、曲面上での断層滑りの定式化も併せて行なって、一次元グリーン関数・平面断層を用いた従来の逆解析に比べて前震・本震・最大余震の棲み分けが明確になったほか、地殻変動の解析結果との矛盾点も解消されるなど大きな進展があった(東京大学地震研究所[課題番号:1407])。また、新潟県中越地震では本震とマグニチュード 6 以上の余震(4 回)について、全て異なる断層面で破壊が起こったことが分かり、震源過程の面から

もこの地震の震源断層系の複雑性が明らかになった（東京大学地震研究所 [課題番号：1407]、京都大学防災研究所 [課題番号：1806、1808]、防災科学技術研究所 [課題番号：3005]）。2007年新潟県中越沖地震は、厚い堆積層を伴った複雑な地下構造の地域で発生したため、共役な断層面二面（南東傾斜面と北西傾斜面）のうちどちらが真の震源断層面かが議論となったが、観測点毎に最適な一次元速度構造を用いたグリーン関数の再計算や、経験的グリーン関数法に基づく広帯域地震動シミュレーション、海底地震観測データの解析結果などを参考にした余震分布の再検討により、同地震の主要な震源断層面は南東傾斜面であると結論づけることができた（東京大学地震研究所 [課題番号：1407]）。

また、日本国内だけでなく2004年インドネシア・スマトラ島沖大地震（M9.0）、2008年中国四川の地震（M7.9）等、世界中の地震を対象に、震源過程の準リアルタイム解析を継続的に行ってきた。

（アスペリティの物性と実体解明）

二重時間差（DD）トモグラフィ法により、2003年宮城県北部の地震、2000年鳥取県西部地震、1995年兵庫県南部地震、2001年芸予地震の震源断層及びアスペリティ周辺の地震波速度構造を詳細に求めた。その結果、それらの地震について、アスペリティの領域は断層面上の高速度域に対応する可能性が高いことが分かった（東京大学地震研究所 [課題番号：1407]、東北大学理学研究科 [課題番号：1204]）。2004年新潟県中越地震について同様の解析を行い、アスペリティの領域が断層面上の高速度域に対応する可能性が追認された（東北大学理学研究科 [課題番号：1204]）。

また、山崎断層付近における1976年6月から2004年7月までの地震活動について、連携震源決定（JHD）法による震源再決定を行った。この結果、安富断層の中央付近から土万断層の中央付近まで地震活動の低い領域があり、この低活動域では大きめの地震（ $M \geq 2$ ）がほとんど発生しておらず、そのため地震の規模別頻度分布のb値の大きな領域を作り出していることが明らかになった。一つの可能性として、ここでは断層の固着が他より強く、次の大地震時に大きな滑りを生じる領域になることが考えられる（図27）（京都大学防災研究所 [課題番号：1806]、澁谷・他、2008）。

2002年（平成14年）鳥取県東部の地震（M5.3）と2007年三重県中部の地震（M5.4）について波形相関解析をもとに前震の精密震源決定を行ない、前震はアスペリティの周縁部に発生している可能性を示した。このことは、前震と本震はともに断層面上の強度の小さい部分で発生し、破壊伝播がその後、強度のより大きなアスペリティ領域へ伝搬したという破壊伝播過程を示している（京都大学防災研究所 [課題番号1806]）。このような断層面上の不均質性と破壊伝播の進行過程を詳しく調べるために、京都大学防災研究所の地殻活動総合観測線の上宝蔵柱、逢坂山に高精度記録収集システムと気圧・温度の高精度観測システムを導入し、ゆっくり滑りの同定の精度を格段に向上させた連続動観測を開始した（京都大学防災研究所 [課題番号：1807]）。

（内陸地震のアスペリティと地殻構造・地震活動度の対応）

二重時間差トモグラフィ法により、1995年兵庫県南部地震、1997年（平成9年）鹿児島県薩摩地方の地震（M6.6）、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震、2003年宮城県北部の地震、2004年新潟県中越地震等の、近年発生した大地震の震源断層周辺の詳細な地震波速度構造が求められ、地震波や地殻変動解析による地震時滑り量分布との対比が行われた。その結果、これまで知られ

ていた他の内陸地震やスラブ内の地震と同様に、地震滑り量の大きな領域は地震波速度の低速度域を避けて、比較的高速度な領域におよそ分布していることが分かった。一方、破壊開始点は低速度域内あるいはその境界におよそ位置していることが分かった（東北大学大学院理学研究科 [課題番号：1204]）。このことは、詳細な速度構造調査により、アスペリティの位置を特定できる可能性を示唆している。

断層面の不均質性を、反射法人工地震探査の手法を用いて検出する実験が、2003年宮城県北部の地震の震源域で試行された。予備的調査ではあるが、地殻深部の断層面と考えられる明瞭な反射波が検出されるなど、断層面上の不均質性の検出可能性が示されたことは大きい（産業技術研究所 [課題番号：5005] 大滝・他、2008）。

国土地理院のGPS記録を使用して過去10年前後の新潟・神戸歪集中帯における歪速度の変化点の分布を調べた結果、近畿北部でせん断歪速度の変化が起きた地域が認められた。この地域の発震機構を考えると、この現象が近畿北部での地震活動の静穏化に対応することが判明した。同様の歪速度の変化が、新潟県中越地震の発生の2~4年前に新潟平野に現れていることが分かり、かつ震源域に向かって移動していたことも確認できた（京都大学防災研究所 [課題番号：1807]）。

（プレート境界のアスペリティとその相互作用・破壊過程の多様性）

2003年に発生した福島県沖の地震(M6.8)の滑り分布を、遠地地震波形逆解析により推定した。滑り域と海底地形の比較から、沈み込んだ海山がこの地震を起こしたアスペリティの原因であるという可能性が挙げられる。2008年1月11日に発生した岩手県釜石沖の地震(M4.7)の滑り分布を、近地広帯域地震波形逆解析により推定し、前回(2001年)・前々回(1995年)の釜石沖の地震の滑り域とほぼ重なることを確認した。このことから一連の釜石沖の繰り返し地震がほぼ同じアスペリティの繰り返し滑りであることが確認された。一方で高周波地震動解析からは、滑り分布にわずかな相違が存在することが示された。このように、アスペリティの破壊は詳しく見ると必ずしも毎回同じではなく、大地震の破壊過程の予測には、個々のアスペリティの滑り履歴の詳細な検討が課題となる（東北大学 [課題番号：1204]、米原・他、2008、島村・他、2008）。

2005年宮城県沖の地震(M7.2)と1978年(昭和53年)宮城県沖地震(M7.4)について、地震波逆解析と余震分布から求めた滑り分布を比較した。2005年の地震で破壊したアスペリティが、1978年の地震で破壊したアスペリティの一部に対応することを明らかにした。また、宮城県沖で1930年代に連続して発生した三つのマグニチュード7クラスの地震は、地震毎に異なるアスペリティが個別に破壊したのに対して、1978年の地震ではこれら三つの地震の全アスペリティを含む領域が破壊していたことが、余震分布等の調査から明らかになった（東北大学大学院理学研究科 [課題番号：1204]）。断層面上に複数のアスペリティが隣接する場合には、アスペリティの破壊様式が毎回同一とはならず多様性を有することが明らかになった。

（準リアルタイム震源過程解析への展望）

KiK-net（防災科学技術研究所の基盤強震観測網）強震観測のリアルタイムデータ伝送化に伴い、データ取得までの時間が大幅に短縮された。今後は、大地震発生直後の震源逆解析の準リアルタイム処理とともに、強震動の面的分布との対応付けや、救援や復旧などの災害対応のための基礎データの提供がリアルタイムで可能になると期待される（防災科学技術研究所 [課題番号：3005、3006]）。また、リアルタイム強震観測データを用いた緊急地震速報の高度化のために、即時震源決定に用いられている「着未着法」に対して、複数の地震が同時発生した場合でも対処で

きるよう改良が図られたほか、地震動とノイズを正しく識別するための信号処理手順の改良が進められた（防災科学技術研究所 [課題番号：3006]）。

（強震観測データベースの構築と一般公開）

伊豆・駿河湾および足柄平野に展開された強震観測ネットワークを継続運用し、主として関東周辺で発生した中小地震の強震動データを記録した。長期の欠測なく強震動データを得たことにより、K-NET（防災科学技術研究所の強震観測網）や KiK-net 強震観測網データとあわせて、2004 年紀伊半島南東沖の地震（M7.1）や 2004 年新潟県中越地震、2007 年能登半島地震、および 2007 年新潟県中越沖地震等における、関東平野での長周期地震動の伝播特性に関する詳しい理解が進んだ。これらの定常観測点および臨時観測で取得された、1990 年以降の強震波形データを、2008 年に開発した「強震データ公開システム」により広く一般に公開した（東京大学地震研究所 [課題番号 1408]）。

イ. 強震動シミュレーション・強震動予測

（長周期地震動のシミュレーション）

2004 年新潟県中越地震、及び 2007 年新潟県中越沖地震による関東平野の長周期地震動を、強震観測データ解析と、強震動シミュレーションの比較から詳しく調査した。首都圏・甲信越地方の地下構造モデルを用いたシミュレーションを実施し、都心部、及び関東平野での長周期地震動の再現を確認した。これは、震源の位置と規模を特定すれば、平野で強く生成される長周期地震動の発生予測が可能であることを保証する。また、2007 年能登半島地震では、表面波が糸魚川―静岡構造線を通過することで減衰し、都心部での長周期地震動の振幅が比較的小さくなったことが分かった（東京大学地震研究所 [課題番号：1408]）。

南海トラフ地震による長周期地震動の生成を理解する上で、2004 年紀伊半島南東沖の地震の地震動が全国で記録された影響は大きい。たとえば、この地震により生まれた長周期地震動をシミュレーションすることで、南海トラフに厚く堆積する海洋堆積物（付加体）の影響により、大阪盆地や濃尾平野で長周期地震動の継続時間が延びる効果が明らかになり、観測データとシミュレーション結果の比較検証により、陸域～海域の地下構造モデルの物性値の修正が進んだ（京都大学防災研究所 [課題番号：1808]、東京大学地震研究所 [課題番号：1408]、Furumura et al., 2008）。こうして高度化が進められた地下構造モデルを用いて、1944 年東南海地震の長周期地震動シミュレーションが行われ、当時の煤書き記録の復元により求められた、関東平野（東京、千葉、横浜地点）の強震記録との比較から、東南海地震における関東平野周辺での長周期地震動の理解が大きく進んだ。こうして、将来の東南海地震における関西圏の広帯域地震動や、南海地震における大阪平野等の長周期地震動の予測が行われ、建築・土木工学における耐震工学研究との連携により、構造物への影響に関する研究が加速した（京都大学防災研究所 [課題番号 1808]、Iwaki and Iwata, 2008）。

（地震動予測地図等の作成に向けた地下構造モデルの高度化）

全国を対象とした強震動評価のために、地質情報を主に作成された深部地盤構造を初期モデルとして、シミュレーションと、K-NET と KiK-net で得られた強震記録との比較検証により、強震動評価に必要な深部地盤モデルの物性値モデルへと変換する手順が一般化した。近い将来に発生が懸念される主要な海溝型地震として、宮城県沖地震、想定東海地震、東南海地震、南海地震が

優先的に選ばれ、これらの長周期地震動の予測地図の作成に必要となる、中部・関東・近畿地域・南東北の地下構造モデルの構築が進められた（図 28）（東京大学地震研究所 [課題番号 1407]、Koketsu et al., 2009、瀧瀬・他, 2009）。

大阪平野では、浅層ボーリングデータに基づいて表層地盤構造（沖積層から洪積層上部）モデルの作成が行われ、大阪湾断層、上町断層系、六甲・淡路断層系や、海溝型地震の想定地震シナリオについて、強震動シミュレーションと地震動予測地図がまとめられた（産業技術総合研究所 [課題番号：5006]、Sekiguchi et al., 2008）。さらに、震源断層を特定した地震動予測地図を、山崎断層帯の地震、高山・大原断層帯の地震、中央構造線断層帯（金剛山東縁－和泉山脈南縁）の地震、日向灘の地震に対して作成した。これらの最新の研究成果は地震調査委員会の全国地震動予測地図作成に用いられ、強震動予測手法の高度化および地震動予測のばらつき評価に関する検討を通して、確率論的地震動予測地図の作成手法の改良に貢献した。強震動評価の結果を、インターネット等を通じて広く一般に発信することを目的に、地震ハザードステーション「新型 J-SHIS」を開発した（防災科学技術研究所 [課題番号 3006]）。

（短波長不均質構造の理解と広帯域強震動シミュレーション）

深発地震に見られる震度分布の異常（異常震域）と、大加速度の成因となる周期 1 秒以下の短周期地震動の伝播を、K-NET、KiK-net 強震観測網のデータ解析から詳しく評価した。異常震域の成因を、これまで考えられてきた低減衰・高速度プレートモデル（宇津モデル）に加えて、プレート内の横長の散乱体（不均質性）の中を短周期地震動が広角多重散乱を起こして遠地まで導かれる「散乱トラップ」の新しいモデルにより説明することに成功した（東京大学地震研究所 [課題番号：1408]）。地殻・マンツルの短波長不均質構造の分布を詳しく調べるために、2000 年鳥取県西部地震の余震記録を用いて、S 波の見かけ放射パターンの周波数・距離変化特性を調査し、短波長不均質構造を持つモデルを用いた地震波伝播シミュレーションとの比較から物性の揺らぎの分布を調べた。こうして、従来の長周期地震動のシミュレーションモデルを、周期 1 秒以下の短周期地震動にまで拡張することができ、長周期～短周期地震動の広帯域シミュレーションに向けて前進した（東京大学地震研究所 [課題番号 1408]、Takemura et al., 2009）。

（地震－津波連成シミュレーションの開発）

海溝型の大地震に伴う津波の発生予測と、検潮記録等を併用した震源逆解析の統合解析を目指して、地震と津波を連成して同時に計算できる「地震－津波連成シミュレーションコード」を新たに開発した。まず、三次元不均質場での地震波伝播と地殻変動を地震動シミュレーションにより行った。計算から求められた海底面上昇と沈降の時空間変化を入力として、津波が伝播する過程を三次元ナビエ・ストークス式の計算により評価した。これにより、これまでの線形長波長近似の津波シミュレーションに比べ精度が向上した。本シミュレーションモデルを用いて、2004 年紀伊半島南東沖の地震、2006 年千島列島の地震（M7.9）等による強震動と津波の同時シミュレーションを行ない、海溝型の大地震による強震動と大津波の発生過程を検証した。特に 2004 年紀伊半島南東沖の地震では、海洋研究開発機構により室戸沖に設置されている海底ケーブル津波計で記録した津波に見られる分散波形に着目し、地震波の解析からはこれまで判断が難しかった断層面の走行が北西－南東方向であることを明らかにした。今後近地地震波形と津波波形の統合処理による海溝型地震の震源モデル推定と、強震動・津波予測の高度化が進むことが期待される（図 29）（東京大学地震研究所 [課題番号 1408]、Saito and Furumura, 2009）。

(強震動予測シミュレーションコードの高度化)

近年の高速計算機を用いた、大規模な強震動シミュレーションの実用化を目指し、世界最高速レベルにある地球シミュレータやT2K オープンスパコン(東京大学)などの並列計算機に適した、強震動シミュレーションコードの開発を進めた。三次元不均質場での地震波伝播を記述する三次元運動方程式の差分法計算の並列化性能を 99.995%以上に高め、最大 10,000 個以上の CPU を用いた超並列計算の実現に成功した。これにより、地球シミュレータを用いて数十億格子モデルでの三次元地震波・津波計算が可能となり、さらに 2012 年に完成予定の世界最速の次世代スパコンを用いてこれより 650 倍以上の大規模シミュレーションの実現の目処が得られた(東京大学地震研究所 [課題番号 1408]、古村, 2008)。

課題と展望

「地震破壊過程と強震動」研究計画の第一の目標は、地震の破壊過程を詳しく調べることであった。この目標のため、地震波伝達関数の精度を高める様々な手法(現実的な三次元構造の導入、構造モデルの逆解析、経験的グリーン関数など)を開発し、最近の地震(2007 年能登半島地震、2007 年新潟県中越沖地震、2008 年岩手・宮城内陸地震など)に数多く適用して、アスペリティの詳細分布を得た。この分布を、二重時間差トモグラフィ法等で得られる高精度の地震波速度構造などと比較した結果、地震波の高速度領域がアスペリティに対応する可能性が見いだされた。このことは、アスペリティの位置の予測という面での長期的な地震予知や強震動予測を実現する可能性を意味している。

このほか、強震動予測の面では特に、長周期地震動の予測に必要な各地の堆積平野の地下構造モデルが各種の物理探査データを駆使して構築されつつあり、2003 年十勝沖地震や 2004 年紀伊半島南東沖の地震、2004 年新潟県中越地震、そして 2007 年新潟県中越沖地震などの近年の地震の K-NET、KiK-net 等の強震観測記録をもとに、不均質地下構造における波動伝播と長周期地震動の生成・伝播過程の理解が進み、またコンピュータシミュレーション結果との比較からシミュレーションモデルの検証と高度化が進むなど、観測とシミュレーションによる実証的な研究が行われた。異常震域の生成や、大加速度を作り出す周期 1 秒以下の短周期地震動の伝播を支配する、短波長不均質構造の分布特性が、高密度地震観測データの解析と波動伝播シミュレーションから明らかになり、地球シミュレータや、次世代スパコン等の高速計算機の性能向上も相まって、短周期地震動から長周期地震動を含めた広帯域の地震動予測が可能になってきた。シミュレーションと観測、そして地震波解析は表裏一体の関係にあり、これらの協調研究を今後も進展させなければならない。

参考文献

- Asano, K. and T. Iwata, Source rupture process of the 2004 Chuetsu, Mid-Niigata prefecture, Japan, earthquake inferred from waveform inversion with dense strong-motion data, Bull. Seism. Soc. Am., **99**, 123-140, 2009.
- Furumura, T., T. Hayakawa, M. Nakamura, K. Koketsu, and T. Baba, Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai (Mw8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula (Mw7)

- Earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 165, 3, 585-607, 2008.
- 岩田知孝・浅野公之・栗山雅之・岩城麻子, 2007年能登半島地震の震源モデルと強震動, 京都大学防災研究所年報, **51A**, 121-127, 2008.
- Iwaki, A. and T. Iwata, Long-period ground motion characteristics in Osaka basin, Japan, from strong motion records of large earthquakes, *Proc. 14 World Conf. Earthq. Eng.*, paper no. S10-053, 2008.
- Koketsu, K., H. Miyake, Afnimar and Y. Tanaka, A proposal for a standard procedure of modeling 3-D velocity structures and its application to the Tokyo metropolitan area, Japan, *Tectonophysics*, doi:10.1016/j.tecto.2008.05.037, 2009.
- 瀬藤一起・三宅弘恵・引間和人・木村武志・古村孝志・藤原広行・橋本徹夫・石井透・吾妻瞬一・室谷智子・早川崇・渡辺基史・鈴木晴彦, 「長周期地震動予測地図」2009年版 ー想定東海地震・東南海地震・宮城県沖地震ー, 2009年地球惑星科学連合大会, 2009
- 榎山将・引間和人・瀬藤一起, 観測点ごとの地下構造を考慮した 2007年能登半島地震の震源過程解析, 2009年地球惑星科学連合大会, 2009.
- Mori, J., Determination of Dip Direction for the 2007 Niigata-ken Chuetsu-Oki Earthquake from Relocation of Aftershocks Using Arrival Times Determined by Cross-Correlation, *Earth Planets Space*, 60, 1117-1120, 2008.
- 大滝壽樹・伊藤忍・加野直巳・横倉隆伸・山口和雄, 反射法測線を用いた 2003年宮城県北部地震の余震の精密震源決定, *地震第2輯*, 61, 49-59, 2008.
- Saito, T. and T. Furumura, Three dimensional simulations of tsunami generation and propagation: application to intraplate events, *J. Geophys. Res.*, 114, B02307, doi:10.1029/2007JB005523, 2009.
- Sekiguchi H., M. Yoshimi, H. Horikawa, K. Yoshida, S. Kunimatsu, K. Satake, Prediction of ground motion in the Osaka sedimentary basin associated with the hypothetical Nankai earthquake, *Journal of Seismology*, 12, 185-195, 2008.
- 澁谷拓郎・中尾節郎・西村和浩・Mori James・加納靖之, 山崎断層周辺の地震活動ー30年間のデータのまとめー, 日本地球惑星科学連合2008年大会, S143-P010, 2008.
- 島村浩平・岡田知己・内田直希・松澤暢・河野俊夫・長谷川昭, 2008年1月11日に釜石沖で発生した地震と過去の釜石沖の繰り返し地震の破壊域の比較, 日本地球惑星科学連合2008年大会講演予稿集, S142-P005, 2008.
- Suzuki, W., S. Aoi, and H. Sekiguchi, Rupture process of the 2008 Northern Iwate intraslab earthquake derived from strong-motion records, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99, 2825-2835, doi:10.1785/0120080331, 2009.
- Takemura, S., T. Furumura, and T. Saito, Distortion of the apparent radiation pattern in the High-frequency wavefield: Tottori-ken Seibu, Japan, Earthquake of 2000. *Geophys. J. Int.*, in press, 2009.
- 米原みずき・岡田知己・八木勇治・対馬弘晃・日野亮太・海野徳仁・長谷川昭, 2003年福島県沖に発生した地震 (M6.8) の地震時すべり分布ー海山・アスペリティ仮説の検討, 日本地球惑星科学連合2008年大会講演予稿集, T229-P001, 2008.

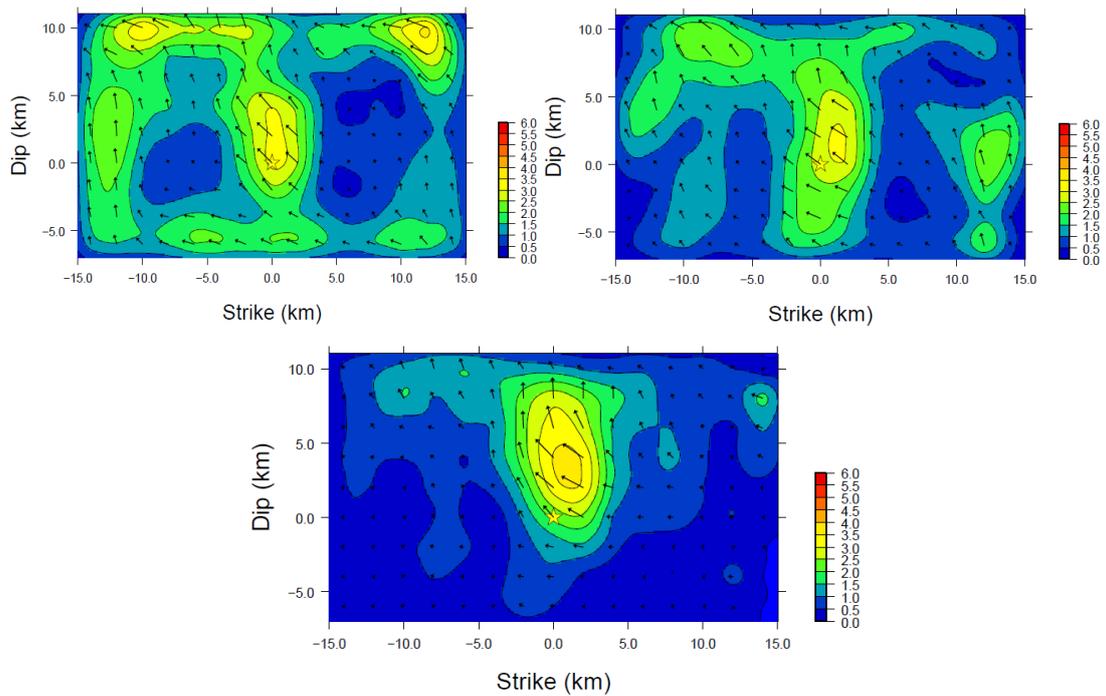


図 25 : 2007 年能登半島地震のいろいろな震源逆解析の結果。左上 : 改良前の速度構造モデルを用いた単独逆解析の結果 (滑り分布)。右上 : 改良後の速度構造モデルを用いた単独逆解析の結果。下 : 改良後の速度構造モデルを用いた同時逆解析の結果 (東京大学地震研究所 [課題番号 : 1407、靱山・他, 2009])。

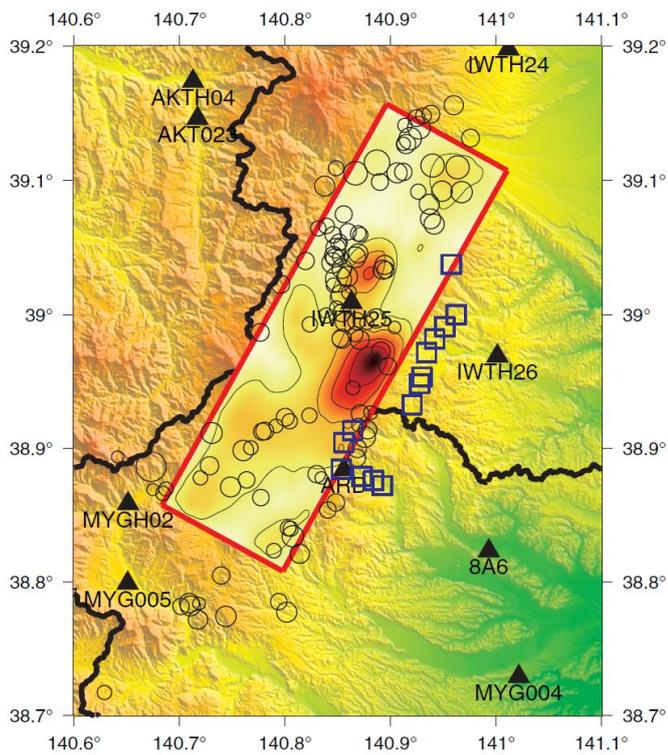


図 26 : 2008 年岩手宮城内陸地震の滑り分布地表投影。○は余震、□は地表変位が報告されている地点。▲は強震観測点 (京都大学防災研究所 [課題番号 : 1806、1808]、Suzuki et al., 2009)。

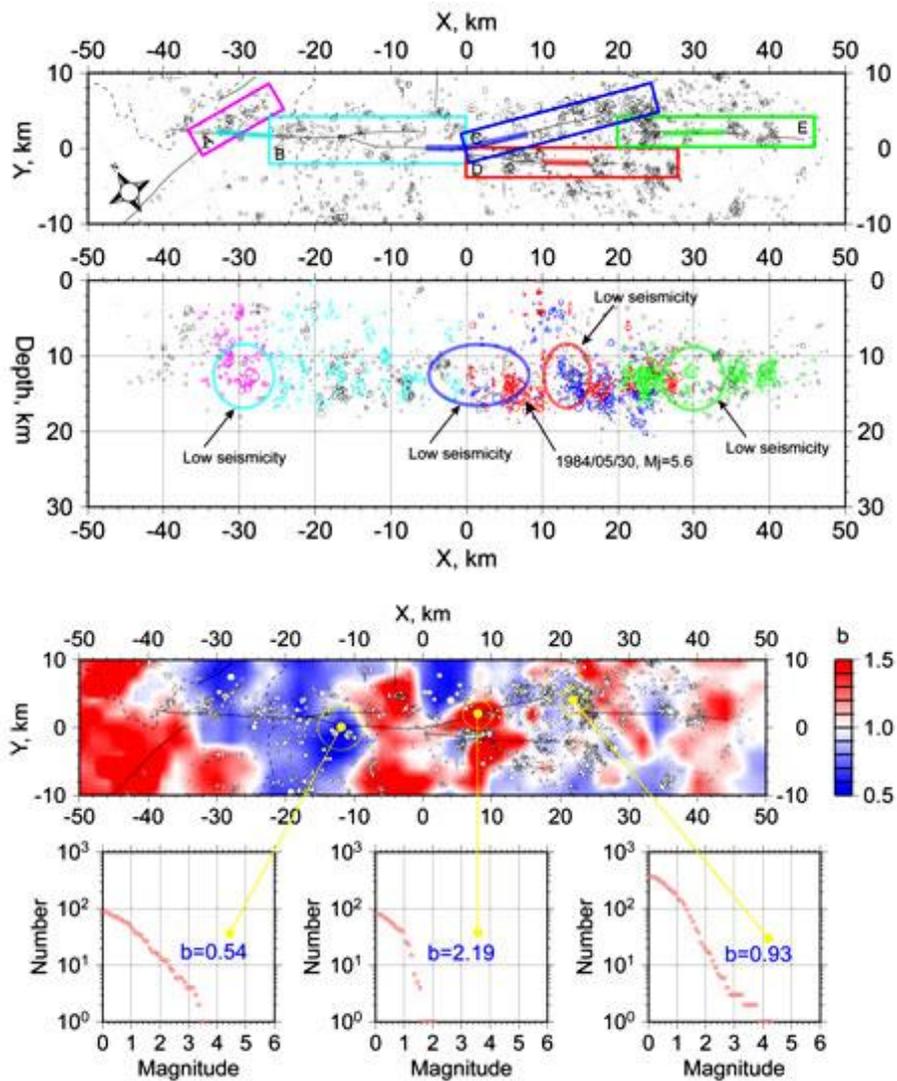


図 27：山崎断層付近の地震活動分布（1976～2004 年）の平面図及び断面図（上）と山崎断層付近の b 値の分布（下）。b 値の大きい場所は赤で示してある。また、代表的な三つの場所についてマグニチュードによる累積頻度分布を示した（京都大学防災研究所 [課題番号：1806]、澁谷・他、2008）。

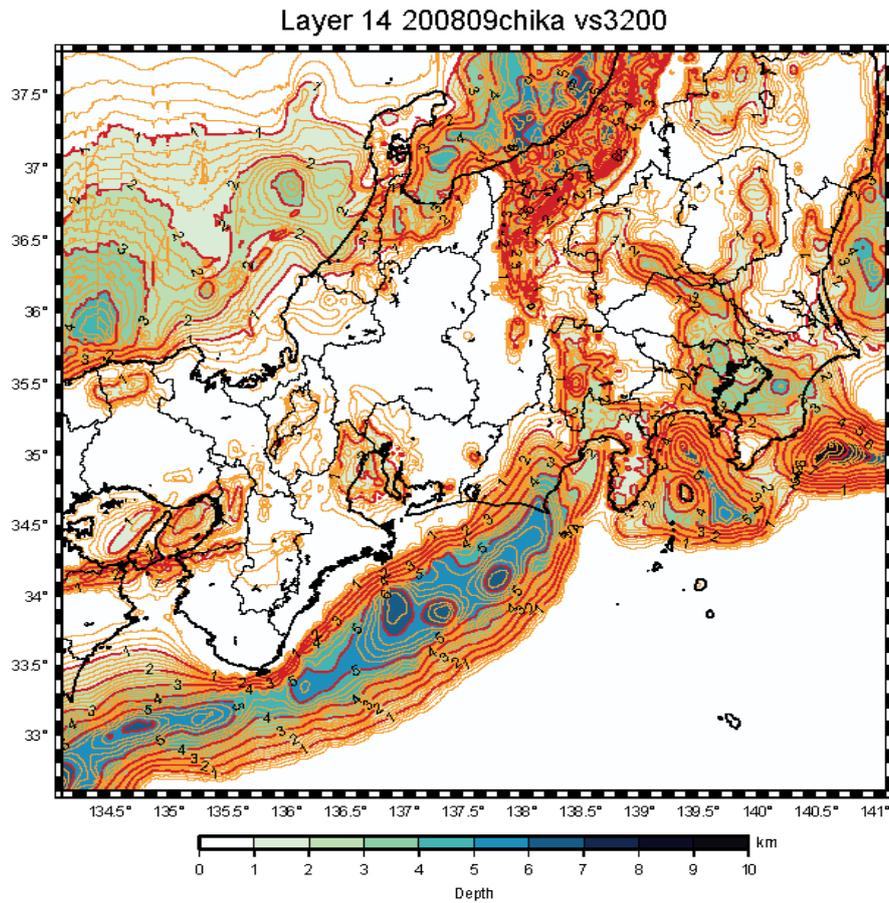


図 28：想定東海地震・東南海地震に対する中部・関東・近畿地域の一次地下構造モデル。地震基盤（S波速度 3.2 km/s）の上面の深さ分布が示されている（東京大学地震研究所 [課題番号 1407]、額野・他，2009）。

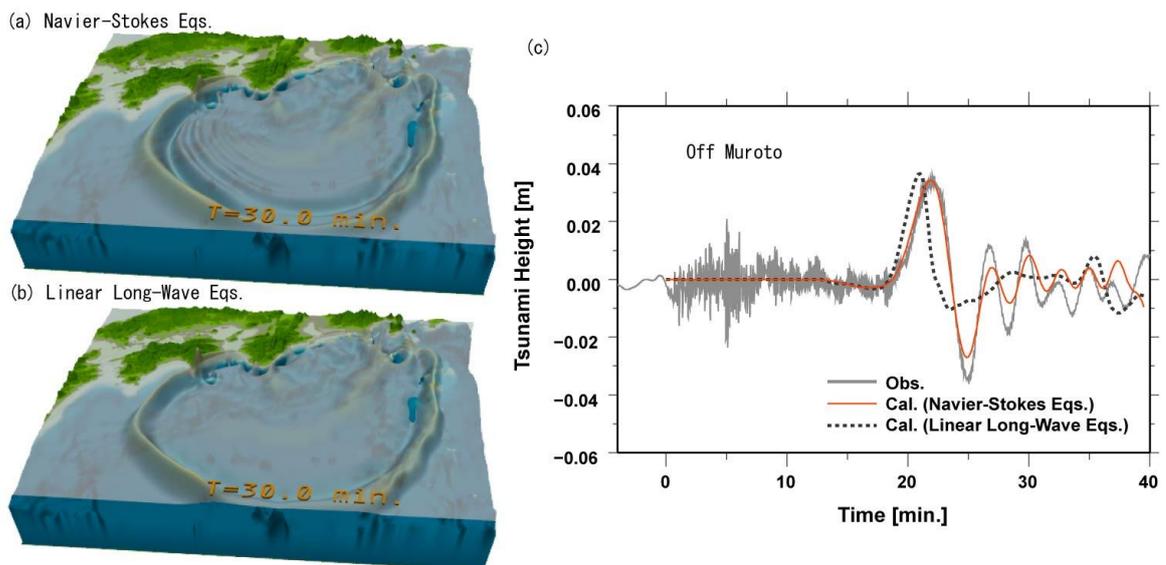


図 29：2004 年紀伊半島南東沖の地震による津波発生伝播シミュレーション。地震発生から 30 分後の津波伝播。(a) 三次元ナビエーストックス式による計算、(b) 線形長波方程式による計算。(c) 室戸沖における津波波形の比較（グレーは観測波形、赤はナビエーストックス式、黒は線形長波方程式による計算結果）（東京大学地震研究所 [課題番号:1408]）。

1. (4) 「地震発生^の素過程」研究計画

1. (4) 「地震発生の素過程」研究計画

地震サイクル等の数値シミュレーションで説得力のある結果を得るためには、確かな根拠に基づいて破壊・摩擦構成則のパラメータの分布を与える必要がある。最近、種々の構造探査により、P波速度(V_p)、S波速度(V_s)、比抵抗、減衰の程度を表すQ等が同一断面上で比較できるようになってきた。それら観測可能な V_p 、 V_s 、比抵抗、Q等から、どのような物質がどのような状態にあり、どのような破壊・摩擦特性を持っているのか推定できるようになることを目指した実験的・理論的研究を推進してきた。そのためには、室内実験により V_p 、 V_s 、比抵抗等と、破壊・摩擦特性を様々な条件下で同時測定した。また、 V_p 、 V_s 、比抵抗、Q等は地殻中の水の状態に強く依存するため、間隙水の実体に関する研究、浸透率構造に関する研究等も併せて推し進めた。

摩擦破壊現象の物理・化学的素過程を実験的に明らかにしていくことによって、アスペリティの実体、摩擦破壊現象の規模依存性などについて理解を深めることを目標とした。

なお、[課題番号：1409] 及び [課題番号：1410] は、東京大学地震研究所の課題であるが、[課題番号：1409] は横浜市立大学、海洋開発研究機構と、[課題番号：1410] は東北大学、千葉大学、東京大学理学系研究科、富山大学、静岡大学、京都大学、大阪大学との共同研究課題であるため、本文中では当該研究を主に実施した機関名を示してある。

ア. 摩擦・破壊現象の物理・化学的素過程

(深部岩石の変形特性)

岩石は深さ 50km 以深の高温高压条件下では、不安定な脆性破壊を起こさず、延性的な変形様式となるため、そのままでは地震を起こしがたく、実際ほとんどの地震はそれ以浅で起こっている。しかし、スラブ内に限っては、深さ 600km 超まで地震が起こっており、それを可能にする様々なメカニズムが提案されてきた。深さ 100–200 km 程度の稍深発地震とよばれるものに対しては、蛇紋岩が脱水分解するときに放出した間隙水が高い流体圧を発生し、岩石変形への有効封圧を下げるために、脆性破壊が可能になるとのメカニズムが有力とされてきたが、鉱物の脱水反応時の体積変化の物理化学的考察からは、封圧が数 GPa 以上では、分解・放出される水の体積が、固体鉱物部分の体積減少を下回り、したがって、過剰間隙水圧は生じないことになる。このような考えにもとづき、非常に高压で脱水反応した蛇紋岩の変形実験を行なうと、不安定な破壊は起こらなかった。一方で、塑性流動による安定な変形のメカニズムと、それが岩石組織に残す形跡について、石英多結晶体を流動させての組織観察と理論的考察をすすめた(東京大学理学系研究科、静岡大学理学部 [課題番号：1410]、井本他, 2008、Michibayashi, 2008、Tasaka et al., 2008、Harigane et al., 2008、Kono et al., 2008、Shimizu, 2008)。

(高速摩擦特性)

ロータリー式摩擦試験機による、実験速度、および法線応力条件の範囲を拡大し、これまで実験が十分でなかった中・高速での摩擦特性を中心にデータがえられた。沈み込み物質を含む様々な岩種に対して実験を行い、高速では部分熔融による摩擦の増加・低下、完全熔融による低下のほか、かならずしも熔融をへないでも、特に、石英含有率の高い岩石においては長い滑り距離のあいだに摩擦が大きく低下することなどが明らかにされた(京都大学[課題番号：1410])。さらに、温度の効果を分離して実験するため、1000°Cを越える背景温度で高速摩擦試験が行える装置を導入した(千葉大学[課題番

号：1410])。また、固着滑り実験において、瞬間溶融が起きていること、およびそのタイミングを実験後試料観察とメルト生成による瞬間的電気伝導度の変化から明らかにし、瞬間溶融を含む摩擦滑りの一般的モデルを提案した(東北大学[課題番号：1410])。一方で、粉体層の摩擦の場合に、粒子の破碎が起こらずに、粒子同士の衝突散逸のみを考えた場合は、摩擦が滑り速度に強い正の依存性を持つべきことが、数値モデリングによって示された(東京大学地震研究所 [課題番号：1410]、Hatano, 2008)。

(低速滑り摩擦の物理)

次節イで述べる(弾性波透過による摩擦固着状態のその場観察)の結果から、滑りの安定性に強く影響する摩擦構成則パラメータの従来の決定法に疑問がもたれたため、従来の手法を格段に精密化した実験を行った。その結果、パラメータ値は従来求められていた値より数倍大きいことが判明した。新たな値は、かねてから物性理論により提案されていた値とよく一致する。また、さまざまな熱活性化過程による摩擦強度の時間的変化については、実験と理論の整合性が確かめられた(東京大学地震研究所[課題番号：1409]、中谷他、印刷中)。

(透過弾性波と離散要素法で探る応力鎖の挙動)

せん断力を受けるガウジ層中において最大主応力方向に発達していると仮定される応力鎖に直交する方向に弾性波を通した場合、明らかに強い減衰が見られ、逆に、平行な方向では減衰が弱いか僅かに増幅も見られた。この事実は、応力鎖の存在のみならず、応力鎖による内部不均質構造が、透過波の減衰に影響していることを陽に物語っている。この影響は、せん断歪 0.01%程度の微小な変位レベルでも検知されることも分かった。一方、同実験を模擬した離散要素法による数値シミュレーションでは、透過波を周波数領域に分解して解析した結果、せん断開始後、比較的早期の段階で、低周波側から減衰が始まっていることが明らかになった。これにより、透過波の減衰は内部構造の不均質性が起因する散乱が原因ではないかという結論に至った(横浜市立大学、海洋開発研究機構 [課題番号：1409])。

(AE 広帯域計測)

微小破壊(AE)活動の統計的性質の時間変化を調べ、巨視的破壊の直前に、エネルギー放射率の加速度的増加、b 値の減少、フラクタル次元と相関距離が減少から増加へ転じることが確認された(産業技術総合研究所 [課題番号：5007])。これまで、実験で使用できるセンサーの周波数特性が平坦でないため、AE の震源パラメータが求められないことが、自然地震との関係を理解するうえで障害になっていたが、封圧下の岩石破壊試験において発生する AE を広帯域センサーで収録することに成功し、経験的グリーン関数法を用いて AE の破壊継続時間を推定することに成功した(立命館大学[課題番号：1410]、Kawakata et al., 2009)。

(破壊現象の規模依存性)

滑り実験によって、摩擦滑りに伴う AE の発生頻度や規模分布が、断層の滑り量と滑り速度に依存することを明らかにした。この関係を東北日本太平洋下のプレート境界で発生する微小地震に適用して、プレート境界面上の摩擦特性分布を推定した。得られた摩擦特性分布は、過去に発生した大地震の滑り域(アスペリティ)の分布と矛盾しないものであった。また、室内実験と自然地震の間には、時空

間的に規模が数桁異なっているが、これを埋めるために、南アフリカ大深度金鉱山において、断層直近での地震観測を行った。南ア金鉱山のひとつであるムポネン金鉱山に AE 観測網を展開し、100kHz を超える高周波の地震観測に成功した。この観測網から 10m 程度のところで、M2.1 の地震が発生し、1 万個を超える高周波の余震を観測した。本震断層上では、三ヶ月程度前から AE が発生していた(東北大学[課題番号:1205]、Nakatani et al., 2008、Naoui et al., 2008a, b、Yabe, 2008、Yabe et al., 2008)。天然の断層の階層的幾何学構造から、地震のサイズと破壊エネルギー等の関係を予測するモデルが提出された(東北大学[課題番号:1410])。

(破壊にともなう副次的諸現象)

岩石破壊にともなうガス放出に関しては、もともと岩石中に含まれていたガスの物理放出と、破壊表面形成時の化学反応によるものの 2 種があり、破壊実験時のデータから区別できることが示された。断層からのガス放出の解釈には、複数の化学種のモニターが必要なため、連続測定システムと、小型 4 重極子質量分析計を開発した(東京大学理学系研究科 [課題番号:1410]、東京大学理学系研究科 [課題番号:1501])。岩石破壊時の可視光の放射に関しては、従来の考えとは違って、圧電による電場からの放電現象によるものが圧倒的に優勢であることが分かった(京都大学[課題番号:1410])。一方で、圧電鉱物を含まない岩石の固着滑り実験において不安定滑り時に、顕著な電界変動をともなわない大きな磁界変動が捉えられた(産業技術総合研究所 [課題番号:5007]、Tsutsumi and Shirai, 2008)。

イ. 地殻・上部マントルの物質・物性と摩擦・破壊構成則パラメータ

(地震発生条件下での蛇紋岩等の観測可能物性)

岩石学的考察からは、沈み込みプレート境界の巨大地震発生域の中・深部および、安定な定常滑りへの遷移域においては、沈み込みによって運ばれてくる物質から放出される水によって、マントルウェッジ等の無水カンラン岩が化学反応を起こし、蛇紋岩化することが期待される。蛇紋岩は、地殻・マントルの大部分をしめる硬珪酸塩鉱物からなる岩石に比べて、不安定な地震性の滑りを起こしにくい力学的性質をもっており、地震発生力学に対して大きな影響をもつ。一方で蛇紋岩は、その弾性波速度も、他の地殻・マントル物質とは大きく異なる値をもつことが知られており、近年発達してきたトモグラフィ等で求められた沈み込み帯等の弾性波速度の分布から、蛇紋岩の存在と、その地震発生様式との相関が示唆されていた。従来解釈に用いられたのは、低温型蛇紋岩の弾性波速度データだが、これは 300°C 以上の温度では脱水分解して別の鉱物になってしまうため適切でなく、実際、観測結果と整合しない点も指摘されていた。そこで、本計画においては、高温型蛇紋岩の P 波速度、S 波速度を、地震発生場の高温・高圧を再現して計測した(富山大学、大阪大学[課題番号:1410]、産業技術総合研究所[課題番号:5008]、鏡味他, 印刷中、渡辺他, 印刷中)。さらに、蛇紋岩は鉱物の結晶方向が普通はよくそろい、異方性の強い岩体を形成するため、速度異方性についても実験データを取得した。これらのデータを、従来、低温型蛇紋岩のデータとの比較から蛇紋岩の存在が示唆されていた関東地方のトモグラフィ結果と比べてみると、高温型蛇紋岩自体の弾性波速度だけではトモグラフィで示唆されるほど低い弾性波速度にはならず、さらに、間隙水が存在していることが必要であるとの結論を得た(図 30)。また、蛇紋岩は非常に高い電気伝導度を示すことがあり、電磁気学的手法での観測的検出が期待されるが、蛇紋岩の試料分析と、さまざまな温度での電気伝導度測定の結果、電気伝導度が高くなるのは、蛇紋岩生成時に副産物として生成される磁鉄鉱が、連続性よく分布した場合にのみ生じる結果であり、その条件がみたされないときは、カンラン岩と同程度低い電気伝導度

であることが分かった(東京大学地震研究所、富山大学[課題番号：1410])。沈み込み帯の具体的物質については、統合国際深海掘削計画 (IODP) で南海掘削試料の回収が始まっており、その実験によって、今後ますます現実的な物性データが得られるだろう(海洋開発研究機構 [課題番号：4003]、千葉大学、東京大学地震研究所[課題番号：1409]、Kuramoto et al., 2008、木下他, 2008)。

(岩石の物性測定のための人工合成岩石の開発)

電気伝導度、透水性などの岩石物性測定に用いる天然試料はそれが地上にでてくる際の応力開放によってできた微小亀裂を含むという問題がある。このために亀裂が全くない細粒多結晶体を得るための合成法を開発した。この人工岩石は、粒界の化学的性質に支配される地震発生層最深部以深の物性や変形過程を、常温・常圧のもとで再現することができるため、脆性－塑性遷移領域での物性研究を刷新する画期的なものである(東京大学地震研究所[課題番号：1410])。

(弾性波透過による摩擦固着状態のその場観察)

地震シミュレーション等では、時々刻々変化する摩擦面の固着状態と、載荷せん断応力のかねあいで滑り速度が決まるという形の摩擦構成則を用いる。固着状態(摩擦強度)は断層を滑らせるのに必要な応力は、各瞬間の摩擦面の物理的状態で決定される量であるから、それを別の方法ではかれば、非破壊的にモニターすることが可能である。適切な周波数の弾性波の断層面を透過させることで、これが定量的に可能なことが示され、固着滑り実験においては、載荷せん断応力がピーク値に達するより前に、物理的な固着のはがれは大方完了することが分かった(図 31)(東京大学地震研究所[課題番号：1410]、Nagata et al., 2008)。また、予め断層面のない岩石に破断面ができるときも、周波数によって、弾性波の透過率の変化が大きく異なることが分かった(立命館大学 [課題番号：1410]、Yoshimitsu et al., 2008)。

(地殻岩石中における間隙水のふるまい)

断層面を含む大きな岩石試料に封圧をかけて透水性をはかれる実験装置を開発し、断層面は、高い封圧をかけても高い透水性を保つことが示された(Nemoto et al., in press、Watanabe et al., 2008)。さらに、地震発生層深部での熱水化学反応による亀裂の充填(Okamoto et al., 2008)を予測する基礎データとして、水-NaCl-H₂O系の地殻流体の臨界温度周辺での状態方程式を実測する装置を開発した。さらに、誘電率を鍵として、様々な組成の地殻流体の溶解度を少数の実験データから予測する理論的枠組みが開発された(東北大学、広島大学[課題番号：1410])。粘土鉱物を含む断層ガウジの摩擦試験においては、粘土鉱物の存在比に依存する摩擦強度・浸透率の変遷、水を内包する粘土鉱物・蛇紋岩などの脱水が断層内の間隙水圧を上昇させる過程などが明らかになった(産業技術総合研究所 [課題番号：5008])。

展望と課題

「地震発生の素過程」は第2次新地震予知研究計画から始まった研究計画であるが、当初の予定以上に多くの画期的な成果がだされた。これは、地震予知という目標に対して、実験分野の多くの研究者が協力して装置の開発を含む研究にとりくみ、新たな発想での学際的アプローチを始めたことが要因であろう。近年構造探査等で詳細にわかっている弾性波速度についても、物質科学的な解釈を与えられるようになってきた。今後の課題としては、より広範囲での条件でのデータの取得と、物性

の基礎的理解の深化により、天然の条件への知識の適用の妥当性を、様々な項目において適切に判断していくことがあげられる。

参考文献

- Harigane, Y., Michibayashi, K. and Ohara, Y., 2008. Shearing within lower crust during progressive retrogression: structural analyses of gabbroic rocks from the Godzilla Mullion, an oceanic core complex in the Parece Vela backarc basin. *Tectonophysics*, 457, 183-196.
- Hatano, T., "Scaling properties of granular rheology near the jamming transition", *J. Phys. Soc. Jpn.* 77, 123002, 2008.
- 井元 恒・道林克禎・大内智博・中村美千彦. ゼル・ゲル法による石英結晶試料の合成. 静岡大学地球科学研究報告, 35, 45-54, 2008.
- 鏡味 芳宏, 渡辺 了, 弾性波速度測定に基づく跡津川断層周辺浅部地殻物質の推定, 地震2, 6 1 (2), 印刷中.
- Kawakata, H., N. Yoshimitsu, N. Takahashi, and M. Takahashi, A new system of broad-band elastic wave measurement in laboratory under triaxial compressive conditions, IASPEI meeting, 2009.
- 木下正高・Harold Tobin・芦寿一郎・Siegfried Lallemand・木村学・Elizabeth Screamton・Moe Kyaw Thu・眞砂英樹・Daniel Curewitz・IODP第314/315/316航海乗船研究者, 南海トラフ巨大地震震源域への掘削調査を開始, 科学, 78, No. 6, 2008
- Kono, Y., Ishikawa, M., Harigane, Y., Michibayashi, K. and Arima, M., 2009. P- and S-wave velocities of lowermost crustal rocks from the Kohistan arc: Implications for seismic Moho discontinuity attributed to abundant garnet. *Tectonophysics*, in press.
- Kuramoto, S., Curewitz, D., Moe Kyaw Thu, Masago, H. and the Exp. 314, 315, and 316 Science Parties, 2008, The first D/V Chikyu IODP operations: successful logging and coring during NanTroSEIZE Stage 1 expeditions. *Scientific Drilling*, 6, 38-42. doi:10.2204/iodp.sd.6.05.2008.
- Michibayashi, K., Hirose, T., Nozaka, T., Harigane, Y., Escartin, J., Delius, H., Linek, M. and Ohara, Y., Hydration due to high-T brittle failure within in situ oceanic crust, 30° N Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 275, 348-354, 2008.
- Nagata, K., M. Nakatani, and S. Yoshida, Monitoring frictional strength with acoustic wave transmission, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L06310, doi:10.1029/2007GL033146, 2008.
- 中谷 正生・永田 広平, 速度・状態依存摩擦とその物理, 地震2, 6 0周年特集号, 印刷中
- Nakatani M. *et al.*, Acoustic emission measurements in a deep gold mine in South Africa -Project overview and some typical waveforms, Seismological society of America, 2008 annual meeting, Santa Fe, NM, USA. April 17, 2008,
- Naoi, M. *et al.*, Very high frequency AE (<200 kHz) and micro seismicity observations in a deep South African gold mine - Evaluation of acoustic properties of site by in-situ transmission test., Seismological society of America, 2008 annual meeting, Santa Fe, NM, USA, April 17, 2008a.
- Naoi, M. *et al.*, Aftershock distribution of a M 2.1 earthquake near a geologic structure boundary in a deep South African gold mine, D American Geophysical Union fall meeting, San Francisco,

USA, Dec. 17, 2008b

- Nemoto, K., N. Watanabe, N. Hirano and N. Tsuchiya, Direct Measurement of Contact Area and Stress Dependence of Anisotropic Flow through Rock Fracture with Heterogeneous Aperture Distribution, Earth and Planetary Science Letters, in press.
- Okamoto, A., T. Kikuchi and N. Tsuchiya, Mineral distribution within polymineralic veins in the Sanbagawa belt, Japan: implications for mass transfer during vein formation, Contributions to Mineralogy and Petrology, 1-14, 2008.
- Shimizu, I., 2008, Theories and applicability of grain size piezometers: The role of dynamic recrystallization mechanisms, J. Struct. Geol., 30, 899-917. doi:10.1016/j.jsg.2008.03.004.
- Takahashi, M., K. Mizoguchi, and K. Masuda (2009), Potential of phyllosilicate dehydration and dehydroxylation reactions to trigger earthquakes, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2008JB005630, in press.
- Tasaka, M., Michibayashi, K. and Mainprice, D., B-type olivine fabrics developed in the fore-arc side of the mantle wedge along a subducting slab. Earth and Planetary Science Letters, 272, 747-757, 2008.
- Tsutsumi, A. and N. Shirai, Electromagnetic signals associated with stick-slip of quartz-free rocks, Tectonophysics, doi : 10.1016/j.tecto.2008.01.001., 2008.
- Watanabe, N., N. Hirano and N. Tsuchiya, Determination of aperture structure and Fluid Flow in a rock fracture by high-resolution numerical modeling on the basis of a flow-through experiment under confining pressure. Water Resource Research, 44, 1-11, 2008.
- 渡辺 了, 地殻・マントル物質の地震波速度と電気伝導度: 沈み込み帯の水を探る, 地震2, 60周年特集号, 印刷中.
- Yabe, Y., Evolution of source characteristics of AE events during frictional sliding, EPS, 60, e5-e8., 2008
- Yabe, Y. *et al.*, AE activity prior to an M2.1 earthquake in a South African deep gold mine, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Japan, Nov. 26, 2008.
- Yoshimitsu, N. H. Kawakata, N. Takahashi, Frequency dependent change in amplitude of elastic wave transmitting through fracturing Westerly granite, ASC meeting, X3-015, 2008.

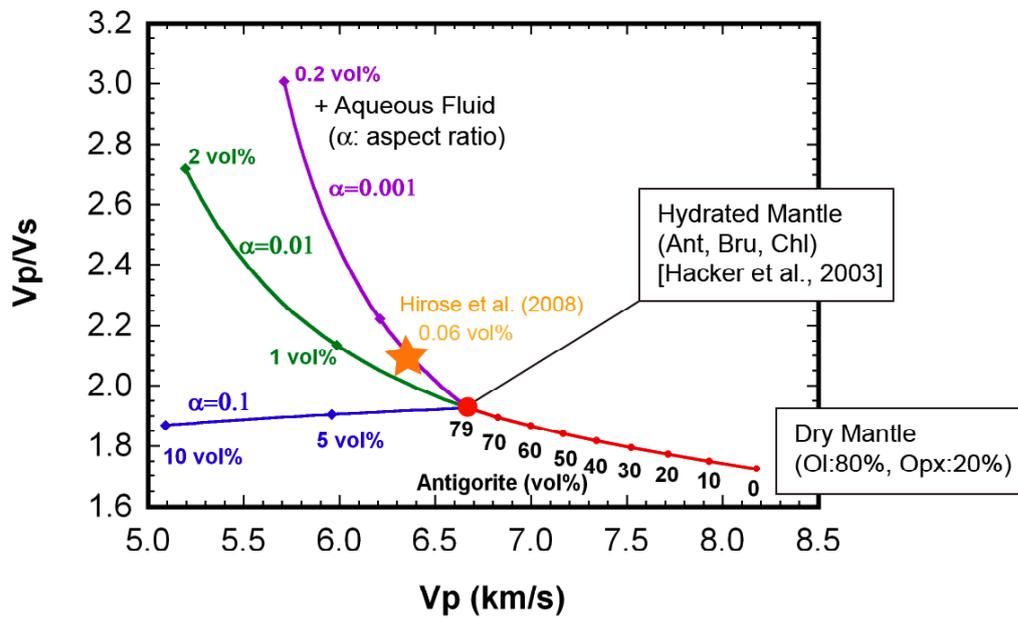


図 30: 高温型蛇紋岩の弾性波速度。赤線は蛇紋岩化に伴う速度変化(水を含まないとき)。紫、緑、青は蛇紋岩に水が含まれる場合(割れ目のアスペクト比がそれぞれ 0.001, 0.01, 0.1) (富山大学[課題番号: 1410])。

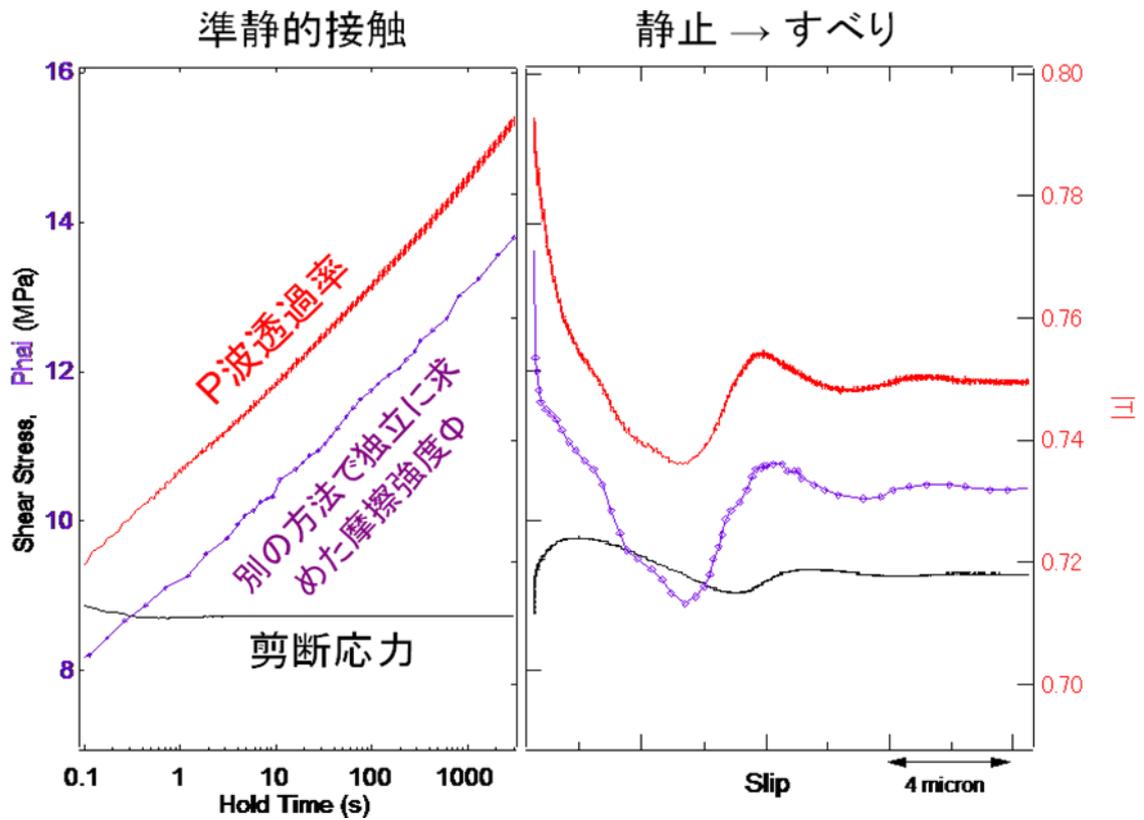


図 31: 岩石滑り実験における固着状態の変化。準静的接触時に回復した固着(摩擦強度)がわずかな滑りによって減少する。その変化は P 波透過率でモニターできる(東京大学地震研究所[課題番号: 1410])。

2. (1) 「破壊活動予測シミュレーションモデルの構築」
研究計画

2. (1) 「地殻活動予測シミュレーションモデルの構築」研究計画

「地殻活動予測シミュレーションモデルの構築」研究計画の目標は、北米、太平洋、フィリピン海、ユーラシアの四つのプレートが複雑に相互作用する日本列島域を一つのシステムとしてモデル化し、常時観測網からの膨大な地殻活動データをリアルタイムで解析・同化することで、プレート相対運動によって駆動される広域応力の増加から準静的な震源核の形成を経て動的破壊の開始・伝播・停止に至る大地震発生過程の定量的な予測を行うことである。本研究計画では、上記の目標を達成するために、「ア. 日本列島域」を対象とした地殻活動予測シミュレーションモデルを開発した。また、稠密な観測が行われている「イ. 特定の地域」においては、より詳細な地域モデルを開発し、地殻変動データや地震活動データをリアルタイムで取り込んだ予測シミュレーションを行った。さらに、「ウ. 予測シミュレーションモデルの高度化」のために、地震発生の物理・化学過程に関する基礎的シミュレーション研究を推進した。

ア. 日本列島域

(日本列島域の地殻活動シミュレーションモデルのプロトタイプ (CAMP モデル) の構築と準静的応力蓄積過程－動的破壊－波動伝播の連成シミュレーションの試み)

プレート運動による準静的歪蓄積モデルと動的地震破壊伝播モデルをシステム結合することにより、地殻マントルの弾性－粘弾性構造、プレート境界の三次元形状、断層構成則の環境依存性等を考慮した、日本列島域の地殻活動シミュレーションモデルのプロトタイプ (CAMP モデル) を構築した (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502])。このモデルを用いて、1968 年 (昭和 43 年) 十勝沖地震 (M7.9) の震源域における巨大地震の発生予測シミュレーションを試み、震源域の応力が十分に大きくなっていないと何らかの要因で動的破壊が開始されたとしても大地震には発展しないこと、逆に震源域の応力が臨界状態に達していると動的破壊は加速され大地震に発展することが再現できた (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502]、防災科学技術研究所 [課題番号: 3016])。また、2003 年十勝沖地震について、準静的応力増加－動的破壊伝播－地震波動伝播の連成シミュレーションを行い、理論的に予測された地震波形と実際に観測された地震波形が概ね一致することを示した (図 32) (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502]、防災科学技術研究所 [課題番号: 3016]、Fukuyama et al., 2009)。

(GPS データ逆解析による北海道・東北地域のプレート境界面の固着状態の推定)

直接的及び間接的先験情報を観測データと結合した統計モデルを構築し、地殻変動データ解析の新しい逆解析手法を定式化することに成功した。この新しい定式化に基づく、北海道－東北地域の GPS データ解析により見出された、プレート境界面上での大きな滑り遅れ領域は、過去に発生した大地震の震源域とほぼ一致し、過去の大地震の震源域は現在固着していることが分かった (図 33) (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502]、Hashimoto et al., 2009)。

(CMT データ逆解析による日本列島全域の三次元地殻応力パターンの推定)

地震破壊は震源域周辺の応力場を反映するという考えに基づき、地震の CMT データから地震発生応力場を推定する逆解析手法を開発した (Terakawa and Matsu' ura, 2008)。この新しい応力逆解析手法を防災科学技術研究所の 15,000 個の地震の CMT データに適用し、日本列島域の三次

元地殻応力分布を求めた(図 34) (東京大学理学系研究科 [課題番号:1502])。

イ. 特定の地域

(三陸沖プレート境界型地震発生サイクル・シミュレーションモデルの構築)

三陸沖のプレート境界では、1968 年十勝沖地震の際に破壊された二つのアスペリティのうち一つだけが 1994 年三陸はるか沖地震 (M7.6) で破壊された。このような地震サイクルは二つのアスペリティの摩擦特性の違いにより説明可能である。摩擦特性の不均一性を考慮したシミュレーションにより、1994 年三陸はるか沖地震の余効滑りと最大余震 (M7.2) を含めて、三陸沖のプレート境界地震の繰り返しを説明するアスペリティモデルを構築した。これにより、摩擦特性の大きな分布について知見が得られた(図 35、36) (東京大学地震研究所 [課題番号:1411]、Kato, 2008)。また、速度・状態依存摩擦則と媒質の粘弾性をともに考慮したモデルを構築した。これにより、粘弾性による応力変化を考慮した地震サイクルモデルや、余効滑りと媒質の粘弾性変形をともに考慮した地殻変動のモデルに関する研究を進めることができるようになった (東京大学地震研究所 [課題番号:1411]、海洋研究開発機構[課題番号:4001])。

(南海トラフ沿い巨大地震発生サイクル・シミュレーションモデルの構築)

地球シミュレータを用いた半無限弾性媒質中の平面断層モデルで、南海トラフに沿って変化するプレート相対運動速度、プレート境界面の三次元形状、沈み込む海山等による摩擦パラメータの不均質空間分布等を考慮した数値シミュレーションを行い、南海トラフ沿いの過去の巨大地震発生系列の主要な特徴を再現することができた。1944 年東南海地震や 1946 年 (昭和 21 年) 南海地震 (M8.0) のように、フィリピン海プレートが高角度で沈み込む紀伊半島沖で破壊が開始する可能性が高いことがシミュレーション結果から示唆された (名古屋大学[課題番号:1704]、東京大学地震研究所[課題番号:1411]、海洋研究開発機構[課題番号:4001]、気象庁[課題番号:7008]、高山・他、2008)。

しかしながら、シミュレーションにプレート三次元形状を導入すると歴史地震で生じている連動・非連動が再現できなかった。その他にも、平面モデルでも再来間隔が平均値の半分程度から二倍程度までの範囲で大きく変化することが再現できないなどの課題があった。摩擦特性のうち速度依存性を規定するパラメータではなく、特徴的滑り量に不均一を与えることで、上記の問題が解決可能であることが分かった (名古屋大学 [課題番号:1704]、海洋研究開発機構[課題番号:4001])。

東海地域に発生したゆっくり滑りと想定東海地震の関連について、東海地域におけるゆっくり滑りの領域、滑り量などの観測結果と整合するようモデルを構築し、ゆっくり滑りが繰り返した後に東海地震に至る可能性を指摘した (気象庁[課題番号:7008]、弘瀬・他, 2008)。さらに、ゆっくり滑りの発生要因について、プレートの形状に注目した研究 (名古屋大学 [課題番号:1704]) や、遷移領域の摩擦構成則を考慮したモデル化が行われた。ゆっくり滑りについてのシミュレーション研究について、これまでに提案されているモデルを整理した (東京大学地震研究所 [課題番号:1411]、芝崎, 2009)。

ウ. 予測シミュレーションモデルの高度化

摩擦パラメータの推定や、現在の地殻活動予測シミュレーションでは考慮されていない以下の

物理過程（間隙流体・非弾性）の組み込みなど、予測シミュレーションの高度化を行った。

（GPS データ時間依存逆解析（余効変動）による摩擦パラメータ推定）

GPS データを用いて地殻応力変化やプレート境界面上の摩擦パラメータを推定する手法の開発を進め、実際のデータに適用して、その手法の有効性を検証した。2003 年十勝沖地震の余効滑りと 2000 年から始まった東海地方でのゆっくり滑り等について、GPS データからプレート境界面上の滑りと応力の時空間変化を復元し、摩擦構成則パラメータの推定を行った（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]、Fukuda et al., 2008）。

（熱多孔質媒質中での破壊伝播シミュレーション）

熱多孔性媒質を仮定して自発成長する二次元動的破壊の理論的研究を行った。数値シミュレーションから、摩擦発熱を考慮した場合、空隙率の非弾性的な増加率とせん断変形帯幅の積に比例する量である無次元パラメータを用いて多様な動的断層滑りを統一的に説明できることが分かった（図 37）。いくつかの観測事実と照らし合わせることにより、このパラメータのとるべき範囲についての推定を行った。この範囲内においては、ほぼ、一般的に滑り強化が起きていることが確認された（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）。

（離散要素法による粉体シミュレーション）

断層の摩擦構成則の研究として、断層ガウジ（断層帯内の細粒破砕物）を模擬した粉体層の摩擦強度回復過程をモデル化した計算コードを使用して不安定滑りの動的過程の数値シミュレーションを行い、薄い粉体層では地震的な高速滑りと非地震的な低速滑りの両方が発生することが発見された（図 38）。低速滑りは、粉体層の速度強化的な摩擦法則に起因することが分かった。粉体層が滑りの全過程において弱化を続けるため、臨界滑り長が全滑り量に等しくなることも発見された（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]、Hatano, 2008）。

（内陸地震のモデル化に向けた粘弾塑性有限要素法（FEM）コードの開発）

東北日本脊梁山脈を対象に、非線形粘弾性と塑性を考慮した有限要素法により、変形特性の空間的不均一性を考慮した三次元の変形と断層形成過程のモデル化を行った（図 39）（Shibazaki et al., 2008）。シミュレーション結果から、北上低地西縁断層帯と横手盆地東縁断層帯に相当する断層が形成され、北部と南部に存在する高温地帯で断層帯の走向が高温地帯に向かうように変化することがわかった（図 40）。2008 年岩手・宮城内陸地震は、北上低地西縁断層帯の南部延長から、火山地帯に近づくような走向で破壊が生じたが、これはシミュレーションで得られた断層の走向と調和的であった（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）。

（有限要素法およびその拡張によるプレート境界域周辺の地殻変動シミュレーション）

2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島南東沖の地震の余効変動に関して、沈み込み帯の三次元構造を考慮して、粘性緩和による変動を有限要素法による数値計算により推定した。東海および紀伊半島周辺の GPS 連続観測の時系列データから、粘性率が $10^{18} \sim 10^{19} \text{Pa} \cdot \text{s}$ であると推定された。地震発生後三年間で粘性緩和による変動量は、志摩半島周辺で南方向に 1 cm 弱、東海地方周辺で南西方向に 5 mm 弱の大きさと推定され、2000 年秋以降浜名湖直下で発生しているゆっくり滑り

による変動の推定には、余効変動の影響を取り除く必要があることが分かった（国土地理院 [課題番号：6024]、水藤・小沢, 2009）。

（不均質媒質における破壊伝播シミュレーションモデルの高度化）

FEM- β 法により、不均質媒質中における地震断層の準静的成長に関する定量的シミュレーションを行い、地表堆積物の層構造での横ずれ断層成長停止機構を調べた（Kame et al., 2008）。地表堆積層の剛性率と初期せん断応力を深部の半無限媒質のそれらの 1/10 とし、破壊伝播による応力を計算して、境界面に向かう破壊伝播のシミュレーションを行った。破壊が境界を横切ると歪が連続であっても弾性定数が不連続に 1/10 になることにより応力レベルが低下して、断層成長が層の途中で停止する可能性がある。また、不均質媒質中において非平面地震断層の動的破壊解析を行うため、境界積分法と有限差分法を組み合わせた新たな数値解析手法の開発を行った（Kame and Aochi, 2009）（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）。

課題と展望

これまで、地殻・マントルの弾性-粘弾性構造、プレート境界の三次元形状、断層構成則の環境依存性を考慮した、日本列島域の地殻活動シミュレーションモデルの原型を地球シミュレータ上に構築し、プレート境界での準静的応力増加-動的破壊伝播-地震波動伝播の連成シミュレーションに成功した。しかし、このモデルによるシミュレーションが真に予測としての意味を持つためには、広域地震/地殻変動観測データから予測シミュレーションに必要な情報を様々な方法で抽出する必要がある。地震発生サイクルシミュレーションなどを通じて、プレート境界面の摩擦構成則パラメータの空間分布についての知識は次第に充実したものになってきている。また、地殻変動データ逆解析により、地殻変動データから日本列島周辺域のプレート境界での滑り分布の変動履歴を復元することが可能になりつつある。また、地震の CMT データを用いた応力逆解析手法を広域地震活動データに適用する研究も進められている。今後は、これまでの研究成果を集約した標準モデルを設定し、各種データとシミュレーションを統合した研究をより充実させる必要がある。

現在の地殻活動予測シミュレーションでは考慮されていない物理過程として、流体の移動および空隙の非弾性的生成を考慮した破壊伝播のシミュレーションなどが行われた。また、粉体のシミュレーションも行われ、微視的なものも含め、破壊や摩擦の物理過程に関する理解は深まった。しかしながら、これらが大規模な地殻活動予測シミュレーションモデルに組み込む努力は不十分であり、今後の重要な課題である。また、不均質媒質中での破壊伝播を扱う新たな数値解析手法が開発され、今後の応用に期待できる。地殻活動予測シミュレーションでは、主としてプレート境界型地震を対象としているが、有限要素法により内陸地震発生機構のためにモデルも開発されている。これについても今後の進展に期待がもてる。

参考文献

- Fukuda, J., S. Miyazaki, T. Higuchi, and T. Kato, Geodetic inversion for space-time distribution of fault slip with time-varying smoothing regularization, *Geophys. J. Int.*, 173, 25-48, 2008.
- Fukuyama, E., R. Ando, C. Hashimoto, S. Aoi and M. Matsu'ura, Simulation of the 2003 Tokachi-oki,

- Japan, earthquake to predict strong ground motions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(6), doi:10.1785/0120080040, 2009 (in press).
- Hashimoto, C., A. Noda, T. Sagiya, and M. Matsu'ura, Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion, *Nature Geoscience*, 2, 141-144, 2009.
- Hatano, T., Scaling Properties of Granular Rheology near the Jamming Transition, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 77(12), 123002, 2008.
- 弘瀬冬樹・前田憲二・高山博之, 東海地域の長期的スロースリップイベントの再現—その3—, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会予稿集, S142-P010, 2008.
- Kame, N., S. Saito, and K. Oguni, Quasi-static analysis of strike fault growth in layered media, *Geophys. J. Int.*, 173, 309-314, 2008.
- Kame, N. and H. Aochi, A hybrid FDM-BIEM approach for earthquake dynamic rupture simulation, 12th International Conference on Fracture Proceedings, Ottawa, Canada, 2009, accepted.
- Kato, N., Numerical simulation of recurrence of asperity rupture in the Sanriku region, northeastern Japan, *J. Geophys. Res.*, 113, B06302, doi:10.1029/2007JB005515, 2008.
- 芝崎文一郎, 沈み込み帯深部で発生するスロースリップイベントのモデル化, *地震*, 2, 受理, 2009.
- Shibazaki, B., K. Garatani, T. Iwasaki, A. Tanaka, and Y. Iio, Faulting processes controlled by the nonlinear flow in the deeper crust and upper mantle beneath the northeastern Japanese island arc, *J. Geophys. Res.*, 113, B08415, doi:10.1029/2007JB005361, 2008.
- 水藤尚・小沢慎三郎, 東海地方の非定常地殻変動—東海スロースリップと 2004 年紀伊半島南東沖の地震の余効変動, *地震*, 61, 113-135, 2009.
- 高山博之・前田憲二・弘瀬冬樹, 南海トラフ大地震の開始位置に与えるプレート境界の形状の効果, *地震*, 60, 279-284, 2008.
- Terakawa, T. and M. Matsu'ura, CMT data inversion using a Bayesian information criterion to estimate seismogenic stress fields, *Geophys. J. Int.*, 172, 674-685, 2008.

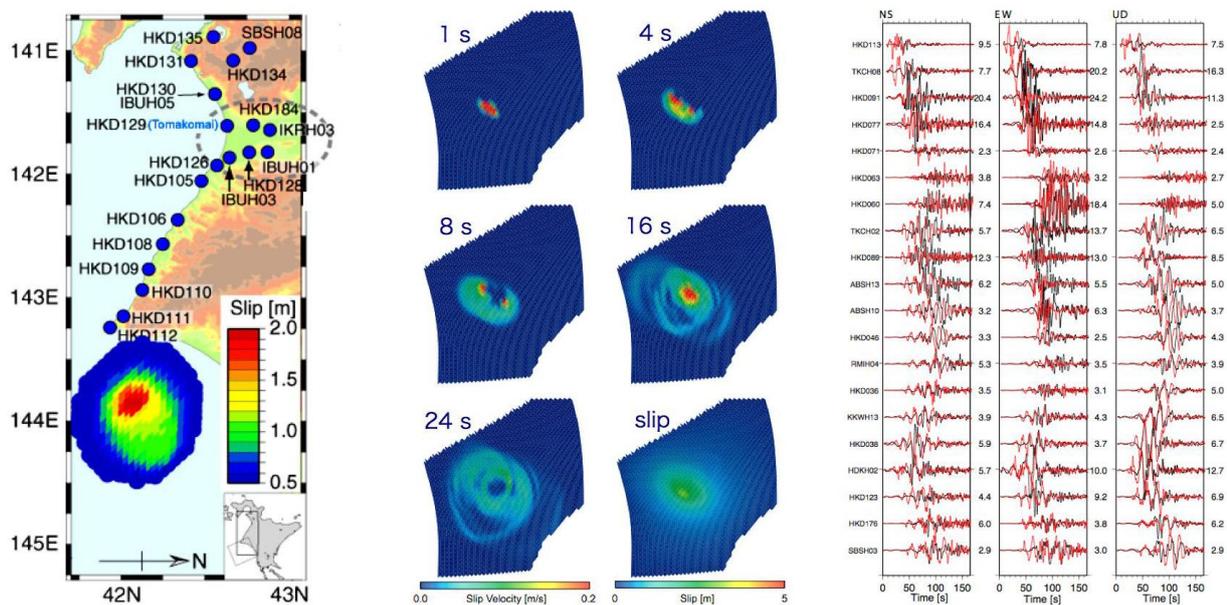


図32：2003年十勝沖地震における準静的応力蓄積－動的破壊－波動伝播の練成シミュレーション。
 (左図) 2003年十勝沖地震の震源域と観測点分布。(中図) 震源域における滑り速度の時間発展と最終滑り変位。(右図) 各観測点における波動伝播シミュレーションにより合成波形(赤)と観測波形(黒)(防災科学技術研究所 [課題番号: 3016]、Fukuyama et al., 2009)。

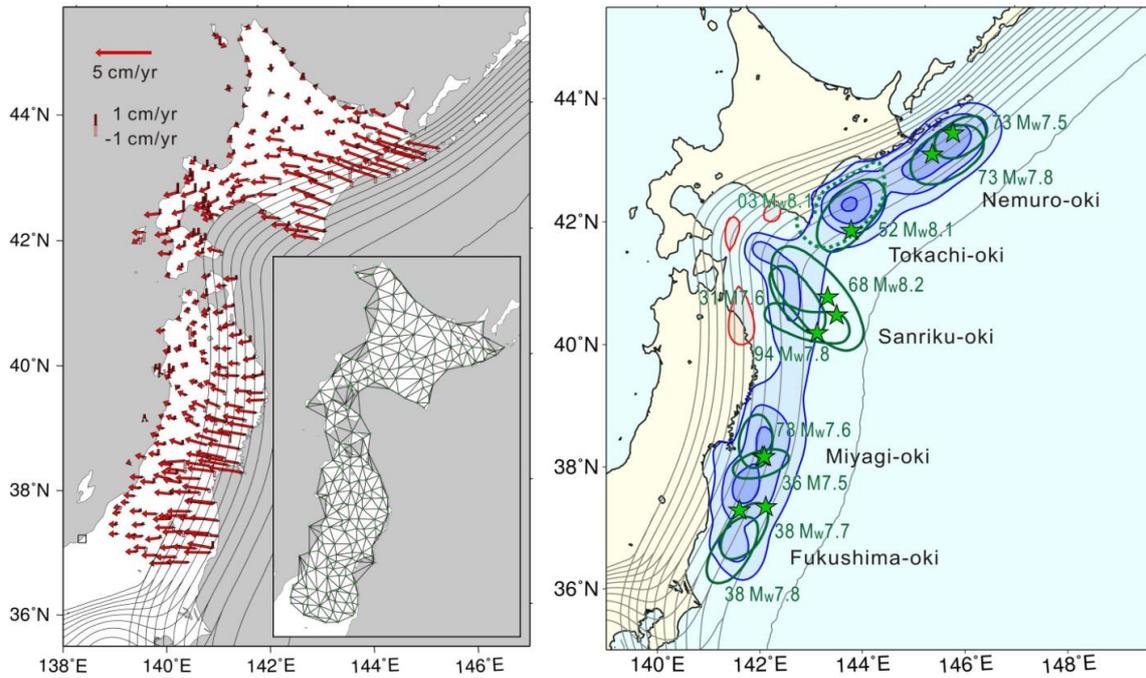


図33: GPSデータの逆解析で推定した北海道・東北地域の北米-太平洋プレート境界面の固着状態。(左図) 解析に用いたGPS水平速度データと三角網。(右図) 北米-太平洋プレート境界面での滑り遅れ(青)と滑り過剰(赤)速度分布。コンター間隔は3cm/yr。緑の星印と楕円、過去に発生したプレート間地震の震央位置および津波波源域を示す(東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502]、Hashimoto et al., 2009)。

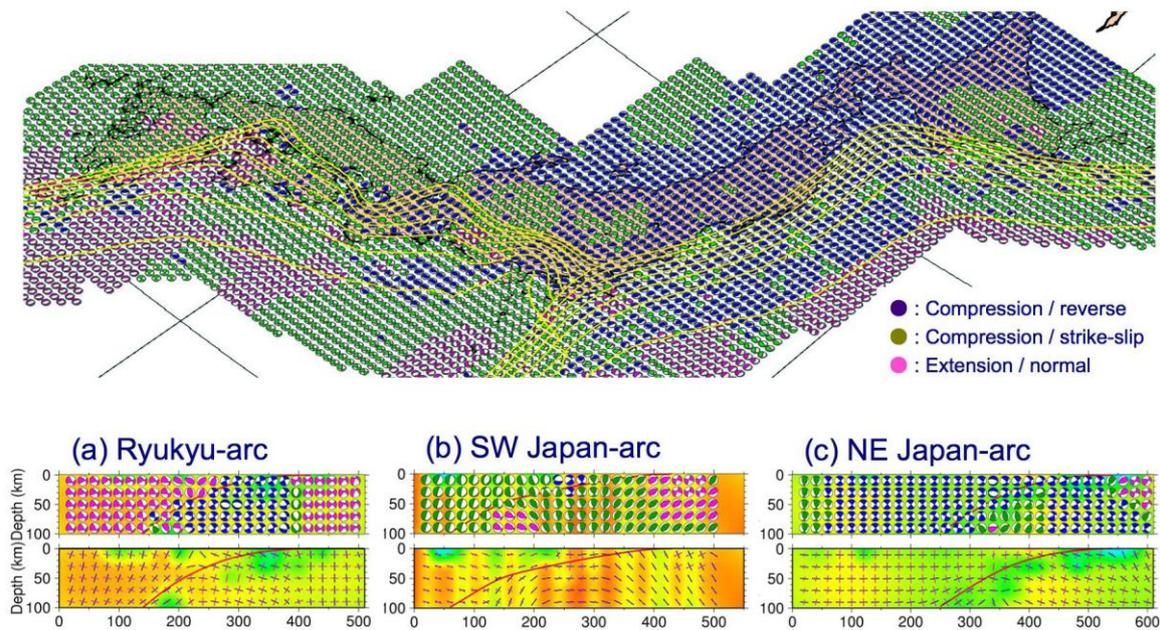


図 34: CMT データ逆解析により推定された日本列島全域の三次元地殻応力パターン (東京大学理学系研究科 [課題番号: 1502]、Terakawa and Matsu'ura, 2008)。(上図) 震源球で表された応力場 (青: 圧縮場・逆断層解、緑: 圧縮場・横ずれ断層解、伸張場・正断層解)、(下図 a) 琉球断面図: 伸張場が卓越、(下図 b) 西南日本断面図: 横ずれ断層が卓越、(下図 c) 東北日本断面図: 逆断層が卓越。

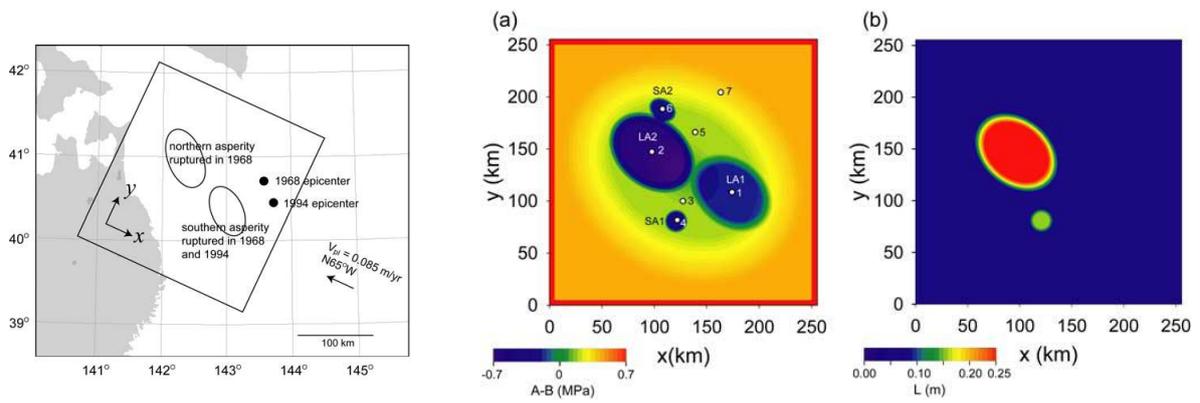


図35：三陸沖地震発生サイクルシミュレーション(東京大学地震研究所 [課題番号：1411]、Kato, 2008)

(左図) 1968年十勝沖 (中図のLA1)、1994年三陸はるか沖地震 (中図LA 1 & LA 2) とモデル設定。(中図) 摩擦パラメータ (A-B) 分布。SA1は三陸はるか沖地震の最大余震、SA2は青森沖地震。(右図) 摩擦パラメータ (特徴的長さL) 分布。

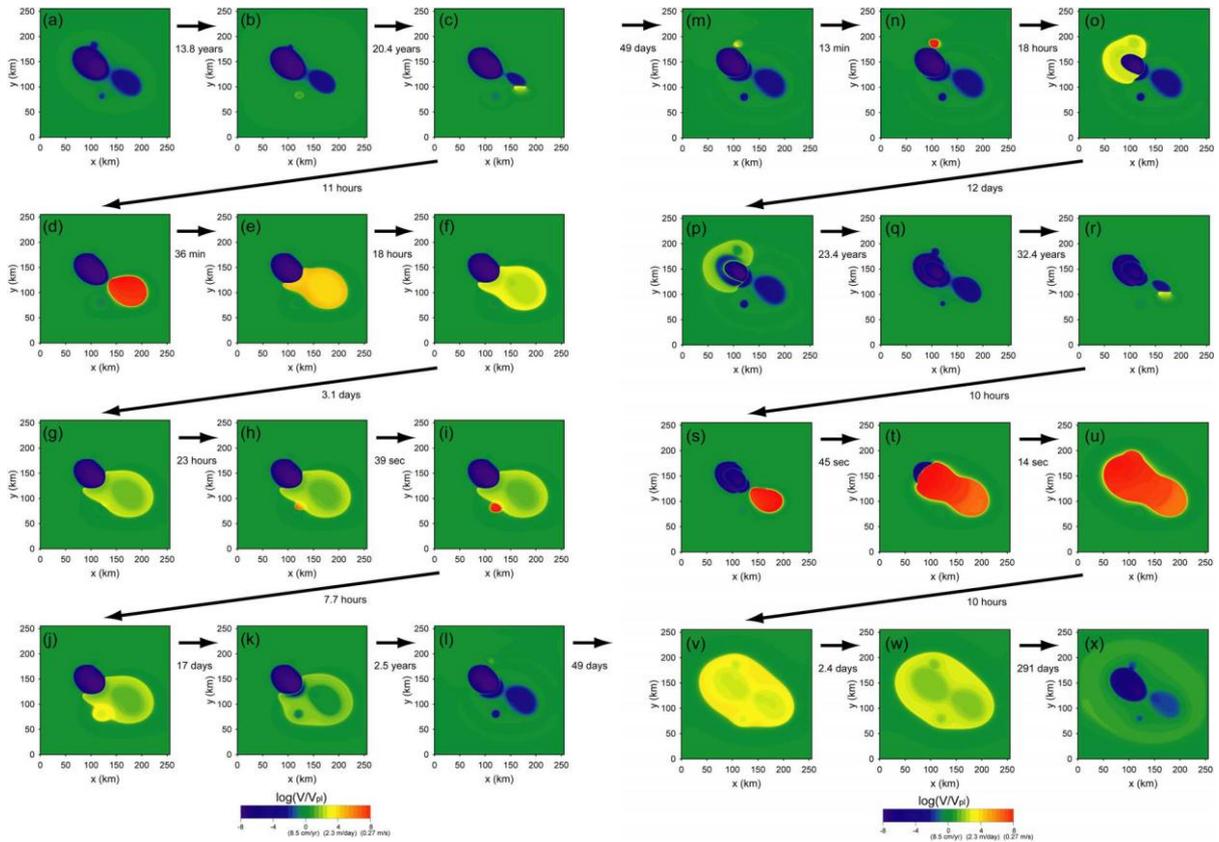


図36：三陸沖地震発生サイクルシミュレーション(東京大学地震研究所 [課題番号：1411]、Kato, 2008)

シミュレーション結果：プレート速度 V_{p1} で規格化した滑り速度のスナップショット。1994年三陸はるか沖に対応するLA1の単独破壊 (d)、余効変動により引き起こされた余震に対応数SA1の破壊 (i)、青森沖の地震に対応するSA2の破壊 (n)、1968年十勝沖地震に対応するLA1とLA2の連動破壊 (t, u)。

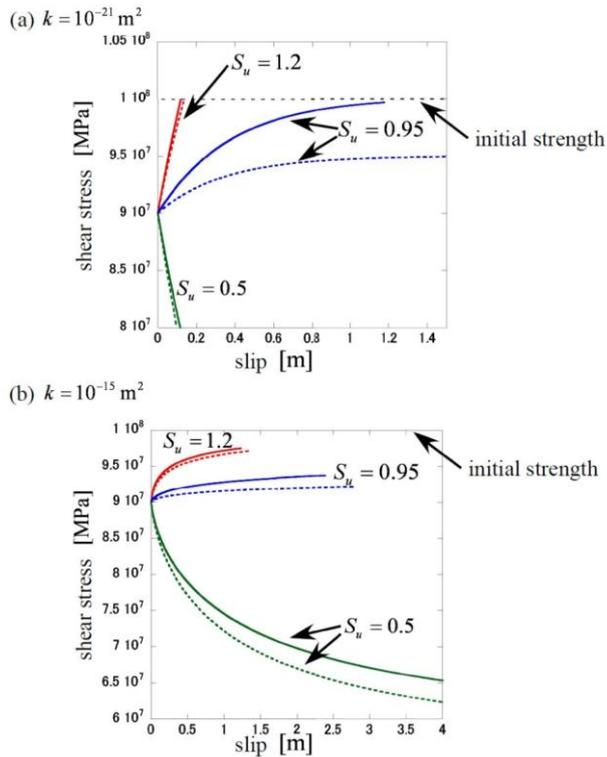


図 37：熱多孔質媒質中で二次元動的破壊シミュレーション（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）。

断層面上の滑りとせん断応力の関係。

k は透水率、 S_u は空隙率の非弾性的な増加率とせん断変形体幅の積に比例する無次元量である。 S_u の値により、滑り開始後に滑り弱化特性を示す場合と滑り強化特性を示す場合があることが分かった。

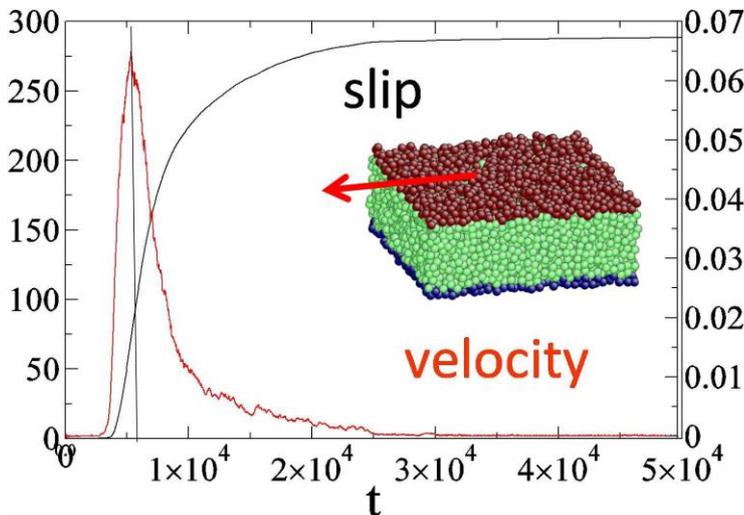


図 38：離散要素シミュレーションで再現された粉体層の滑りの様子。黒線は滑り量、赤線は滑り速度を表す。急加速する初期過程と非常にゆっくりした減速を示す後期過程に分かれている（東京大学地震研究所 [課題番号：1412]）。

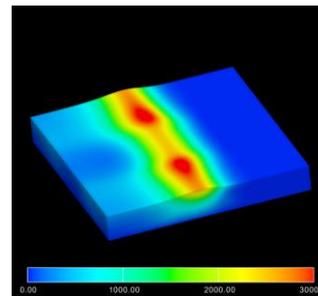
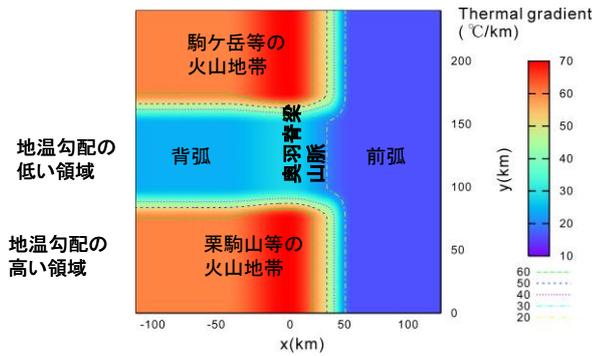
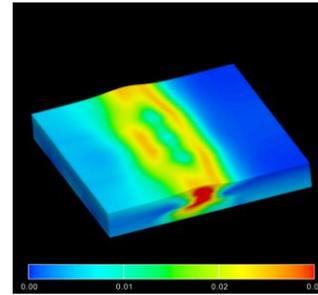
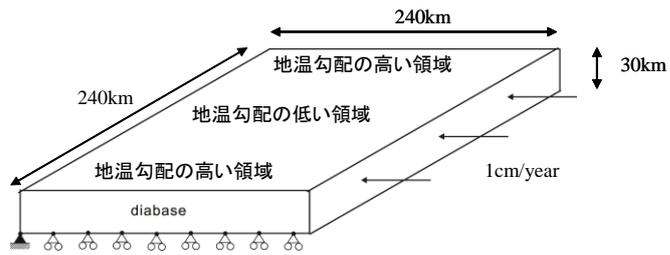


図 39 : (上図) 三次元のモデル。(下図) 地温勾配の分布。赤色の部分で温度が高く、青色の部分で温度が低い (東京大学地震研究所 [課題番号 : 1412]、Shibazaki et al., 2008)。

図 40 : 5000 年間に生じる (上図) 全歪と (下図) 隆起量 (cm) (東京大学地震研究所 [課題番号 : 1412])。

2. (2) 「地殻活動モニタリングシステムの高度化」
研究計画

2. (2) 「地殻活動モニタリングシステムの高度化」研究計画

日本列島全域の地殻活動モニタリングは、政府の地震調査研究推進本部が策定した基盤的調査観測計画の下で整備が進められた地震及びGPS連続観測網により行われ、今日では、その観測データ及び解析結果は広く公開されている。モニタリングシステムによって得られるデータは、地殻活動予測シミュレーションモデルの構築やシミュレーション結果の検証において不可欠なものである。また、過去のデータとともに日本列島地殻活動情報データベースとして整備されることにより、大地震発生時の即時対応等にも活用できる。列島規模の広域のモニタリングシステムだけでなく、想定東海地震震源域や東南海・南海地震震源域等、大地震の発生が予想される特定の地域における地殻活動モニタリングの高度化も重要である。

本研究計画では、関連研究者の連携の下、モニタリングシステム高度化のために、新たなモニタリング手法の研究開発、既存のモニタリング手法の改善、既存の観測網やデータ流通網等の整備や改善、地殻活動モニタリングに有用なその他諸観測の整備等を実施した。また、特定地域においては更に高密度かつ多項目の観測を実施した。

ア. 日本列島域

(地殻変動データによる地殻活動モニタリングシステムの高度化)

基盤的調査観測として、GEONET等GPS観測網による日本列島の広域地殻活動モニタリングを実施しており、そのデータは広く公開されて多くの研究者に活用されているとともに、解析結果は、地震調査研究推進本部地震調査委員会や地震予知連絡会等の重要な検討資料となっている(国土地理院[課題番号:6004]、海上保安庁[課題番号:8005])。またGEONETデータによる地殻変動解析精度を向上させるため独自の精密単独測位法による解析法を開発し、準リアルタイムでモニターすることができるようになった(東京大学地震研究所[課題番号:1413])。これに加えて、VLBI測量、高精度三次元測量(水準測量)、高度地域基準点測量(GPS測量)等を実施しGEONETによる観測データを補足する詳細な地殻変動情報を提供している。例えば2008年岩手・宮城内陸地震において高精度な上下変動測量結果を提供し、震源断層に関する重要な情報を提供するなど、大地震発生時に迅速に測量を実施した(国土地理院[課題番号:6001、6008、6009])。またGPSや光波測距を用いた変動地形調査を、平成20年度には川奈、有峰湖、三鷹、切山地区で実施し、5カ年では全国28地区(緊急観測2地区を含む)で実施した(国土地理院[課題番号:6017])。

リアルタイムで取得可能になったGEONETの1秒毎のデータを利用し、震源断層の即時解析手法の開発を進めた。事前に設定した60点の電子基準点のリアルタイム解析を可能とし、気象擾乱時等を除きM7程度の地震の震源断層モデル推定に耐えうる精度の地殻変動を地震後10分以内に得るための基礎技術を確立した(図41)(国土地理院[課題番号:6026])。

(地震観測データによる地殻活動モニタリングシステムの高度化)

Hi-net等の地震観測データを用い、震源、地震モーメント、発震機構解等の自動解析が可能となった。また、超低周波地震解析システムを開発し、日本付近の超低周波地震の自動検出が可能になった。相似地震の自動検出システムを開発し、東海から東北における相似地震はほぼリアルタイムで検出可能となった(防災科学技術研究所[課題番号:3007])。

全国地震データ流通ネットワーク(JDXnet)によりリアルタイムで配信されている広帯域地震計データを用いた、地震の発生・位置・発震機構解の自動決定システムを開発し、日本列島地域

のモニタリングに適用した（東京大学地震研究所[課題番号：1413]）。

地震活動度の変化を自動的に検出するため、統計的手法によるシステムを運用し、静穏化・活発化などに関するデータ蓄積を進めている。また検出結果を判定会等に報告している（気象庁[課題番号：7020]）。地震活動と応力変化、固着や滑り域との関係を統計的に見出した（気象庁[課題番号：7004]）。

陸域においては観測点高度が震源精度に与える影響を、海域においては堆積層が震源精度に与える影響を評価した。補正後の震源計算結果と気象庁一元化震源カタログとを比較した結果、全体として震源が浅くなるほか、震源分布が集中する傾向があることが分かった。また三次元速度構造を用いた震源決定を、想定東海地震の震源域へ適用するとともに、それ以外の地域へも適用範囲を広げた。（気象庁[課題番号：7005]）。三次元不均質構造による震源の再計算を海域にまで拡大することにより、沖合の震源の深さ精度が向上することを確認した（気象庁[課題番号：7004]）。定常的な一元化初動発震機構処理業務への自動処理の導入による決定能力の向上、F-netや海外の広帯域地震計の波形データの導入によるCMT解の決定時間の短縮・精度向上を進めた（気象庁[課題番号：7006]）。

微小地震の発生頻度は応力変化に依存するというモデルがある。この考えに基づき微小地震カタログデータから応力変化の状態の抽出を試みた。またP波初動極性の統計的解析により応力を推定する方法を考案し、浦川沖周辺地域に適用した（北海道大学[課題番号：1009]）。

（地殻活動モニタリング高度化に資する諸観測の実施）

日本列島域における地磁気基準点（柿岡、女満別、鹿屋、父島）の観測を実施し、地磁気基準値の精度向上とデータ取得の安定化を図った（気象庁[課題番号：7003]）。また、全国11点の地磁気連続観測、5カ年で地磁気連続観測点及び一等磁気点27点で絶対観測等を実施した（国土地理院[課題番号：6003]）。伊豆諸島（八丈島）における地磁気全磁力、地磁気三成分の連続観測を実施した（海上保安庁[課題番号：8006]）。

地殻変動の監視のため、全国25験潮場で30秒間隔の潮位観測を実施するとともに、得られた30秒潮位、毎時潮位、日平均潮位、月平均潮位等のデータをホームページで公開している（国土地理院[課題番号：6007]）。全国20カ所で潮位観測を継続して実施し、観測された潮汐から平均水面を求め、この変動から地殻変動をリアルタイムで集中監視している（海上保安庁[課題番号：8004]）。全国71ヶ所で潮位観測を継続し、ホームページで公開するとともに、各機関が所有する176カ所の潮位データを一元化して国交省防災情報提供センターホームページにて公開している（気象庁[課題番号：7017]）。

地殻変動の監視のため、5カ年で全国25カ所で絶対重力を測定した（国土地理院[課題番号：6013]）。

（観測データ流通ネットワークの高度化）

全国の大学等へのデータ配信機能を衛星回線から超高速・高機能研究開発テストベッドネットワーク（JGN2plus）やフレッツグループなどの地上の高速広域ネットワークに移行し、新しい全国地震データ流通ネットワーク（JDXnet）が構築したことに加え、新たに国立情報学研究所の国立情報学研究所の次世代会術情報ネットワーク（SINET3）を利用したデータ流通ネットワークの運用を開始し、より確実なデータ流通網が確立した。また地震観測点のチャンネル情報の分散管理システム（CIMS）の運用を開始した。これは、ウェブによる入力を可能にするなど、各大学独自

の観測を維持しつつ、効率的な情報共有化を可能にするものである(東京大学地震研究所[課題番号:1413])。

イ. 東海地域

大地震の発生が予測されている東海地域においては、列島規模のモニタリングに加えて、より高度化された地殻活動モニタリングのための研究開発が実施されている。

前兆滑りや短期的ゆっくり滑りの早期発見及び把握のために、気象庁以外のデータを用いた同時異常の監視を可能にし、その有効性を確認した(気象庁[課題番号:7007])。東海地震の予知手法高度化のため東海地震に到るまでのシミュレーション精度向上、海底地震観測の実施、精密制御震源(アクロス)によるモニタリング手法の開発、地殻の上下変動の潮位やGPSによる精度向上、レーザー式変位計の技術開発などを実施した。シミュレーションについては長期的ゆっくり滑りが繰り返した後に東海地震が発生する可能性を示した(図42)(気象庁[課題番号:7008])。東南海沖に新たなケーブル式海底地震計システムを敷設し、運用を開始した。(気象庁[課題番号:7019])。

GPSを用いた高密度地殻変動観測では、GEONET観測網と相補的になるように58点の観測点をGPS大学連合により設置し、得られたデータを用いて歪解析を実施した。その結果、地震活動に基づく固着域の推定結果と整合する面積歪分布が得られたほか、短期的ゆっくり滑りによる変動を見出すことができた(東京大学地震研究所[課題番号:1414])。駿河湾内での海底地殻変動観測および^{ズニ}銭洲岩礁におけるGPS観測が実施され、周囲のGEONETと整合的な結果が得られている(図43)(名古屋大学[課題番号:1705])。

地震防災対象強化地域を中心とした高精度三次元測量(水準測量)を5カ年でのべ7000km実施した。また、御前崎においては800m深井戸の歪計・傾斜計・長距離水管傾斜計等の連続観測の実施、切山観測点では長距離水管傾斜計、館山では水晶管伸縮計・水管傾斜計の連続観測を実施した。御前崎において繰り返し絶対重力観測を実施した(国土地理院[課題番号:6011、6012、6013])。また東海地震震源域直上の豊橋、御前崎のほか静岡県菊川における繰り返し絶対重力測定を開始した(図44)(東京大学地震研究所[課題番号:1414])。

地殻変動により地下水の移動および化学成分の変化を解明するための研究が行われた。東海地域の地下水観測設備の高速サンプリング化・リアルタイム化するとともに、いくつかの遠地地震による地下水への影響が地震の揺れによりもたらされることを示した(産業技術総合研究所[課題番号:5009])。化学成分検出のための検出装置の改良を進めた(Tsunomori and Notsu, 2008)。帯水層内の亀裂の状態変化を調べるためにラドン・ヘリウム・透水係数・電気伝導度を調べるのが効果的であることを示した(東京大学理学研究科[課題番号:1503])。さらに地下水の間隙水圧および隣接する帯水層が地殻歪測定へどのように影響を及ぼすかについて、神岡および野島のボアホールを用いて推定した(京都大学防災研究所[課題番号:1810])。

ウ. 東南海・南海地域

南海トラフ沿いの地震活動をより詳細に把握し、沈み込むフィリピン海プレートの詳細な形状を明らかにするために、平成15年から平成19年12月まで東南海地震と南海地震の境界が位置すると考えられる潮岬沖の海底においてトラフ軸を超えた領域まで観測網を広げて長期連続地震観測を実施し、震源決定を行った(図45)(東京大学地震研究所[課題番号:1415])。

東南海・南海地震域における地殻変動特性を研究するために5カ年で16点のGPS観測点を増

設し、ゆっくり滑りのモニタリングを行った結果、浜名湖周辺の東海地域でのゆっくり滑りが沈静化後、その周囲で滑りが発生していることが分かった（国土地理院 [課題番号：6025]）。また、高精度三次元測量（水準測量）を牡鹿地区、三浦東地区、首都圏・神奈川地区及び室戸西地区で実施した（国土地理院 [課題番号：6014]）。

東南海・南海地震予測のため 12 点の地下水等総合観測施設を新たに整備した。この施設は歪計や地震計も併設し、四国一紀伊半島周辺直下のプレート境界で生じる M6-6.5 に相当する短期的ゆっくり滑りを検出可能である（図 46）（産業技術総合研究所 [課題番号：5009]）。

エ. その他特定の地域

大地震の発生が予測されているその他の特定の地域においても、列島規模のモニタリングに加えて、より高度化された地殻活動モニタリングのための研究開発が実施された。

（宮城県沖）

近い将来の地震発生が懸念されている宮城県沖においては、プレート境界の固着および滑りのリアルタイムモニタリングに向けた研究が実施されている。プレート境界の固着に関しては、陸上の GEONET 観測点および沿岸域に増強した GPS 観測点のデータを用い、準リアルタイム処理技術を開発し、改良された時間依存逆解析法により、固着域分布とその変化を推定した。その結果、1994 年三陸はるか沖地震の震源域における固着の回復、深部における弱い固着域の存在、およびその固着が 2005 年の宮城県沖の地震により解消されたことが明らかになった。また相似地震（小繰り返し地震）を用いたプレート境界の滑りモニタリングに関しても準リアルタイム処理技術を開発し、非定常的な滑りを見出すことができるようになった（図 47）（東北大学 [課題番号：1206]）。

宮城県沖では、長期繰り返し海底地震観測が平成 14 年度以来東京大学地震研究所、気象庁、東北大学により共同で実施されている。この観測は長期観測型海底地震計を用いて、海底地震計の位置の空間配置を一定に保つことにより地震活動の時間変化の推移把握を容易にすることである（東京大学地震研究所 [課題番号：1416]、気象庁 [課題番号：7010]）。この記録と陸上の地震観測点との併合処理を行った結果、2005 年宮城県沖の地震は 1978 年の地震の際の破壊域の一部を再破壊したものであり、大部分は未破壊のまま残されていることが明らかになった。また震源域付近の地震は、アスペリティ近傍と余効滑りの大きな地域に発生し、余効滑りの大きな時期に発生していることが分かった。地震波速度構造を解析した結果、プレート間地震のアスペリティの分布に対応するような地震波速度構造不均質を見出すことに成功した（東北大学 [課題番号：1206]、Yamamoto et al. 2008）。

（糸魚川－静岡構造線）

平成 17 年度から 5 ヶ年計画で、重点的調査観測が行われているこの地域で、プロジェクトのデータを活用して、断層周辺の三次元的な速度構造を明らかにし、地震の震源と断層との関係を調査した。その結果、三次元速度構造を用いた震源決定を行うことにより、定常的な観測網での震源決定精度が向上することが分かった。また地震活動は活断層の断層面ではなく、その下方で活発であることが分かった（東京大学地震研究所 [課題番号：1416]）。

断層帯北・中部の約 30 観測点において GPS 繰り返し観測を実施し、詳細な地殻変動分布を明らかにした。北部では逆断層運動を示唆する変形が断層付近に集中し、中部では右横ずれを示唆する変形がやや広域に分布していることが分かった（国土地理院 [課題番号：6016]）。

(南関東とその周辺域、伊豆半島東部)

ノイズレベルの高い南関東地域の都市部において浅いボアホール底に設置された地震観測ネットワーク(首都圏地震観測網:MeS0-net)の記録を調べた結果、M3以上の地震を良好に記録できることなどが明らかになった(東京大学地震研究所[課題番号:1416])。

伊豆半島東部では、地電位差、比抵抗、全磁力連続観測が実施された。1994年の地震活動が活発であった時期に比べ、一部の地域で見かけ比抵抗が数%高くなっていることが明らかになった(東京大学地震研究所[課題番号:1416])。

(日本海溝・千島海溝周辺)

5カ年に分け、順次、根室沖から房総沖にかけての地域に18台から49台の海底地震計による長期連続地震観測を実施した。これらの観測によって得られる高精度震源分布から、日本列島下に沈み込む太平洋プレートの形状の精度が向上した。そして、その形状と過去に起きた大地震のアスペリティや現在の地震活動との関係が明らかになった(東京大学地震研究所[課題番号:1415])。

(その他)

5カ年に、地殻活動が活発な地域である地域として、樽前山、有珠山、北海道駒ヶ岳、岩手山、磐梯山、浅間山、富士山、箱根、伊豆大島、伊豆東部、新島、三宅島、八丈島、硫黄島および東海地震の予想震源域や牡鹿半島においてGPS観測を実施した。伊豆大島では自動光波測距を実施した。また硫黄島には機動的GPS観測点を設置し測量を開始した。新潟県中越沖地震および岩手・宮城内陸地震発生にともない緊急水準測量を実施し、新潟県中越、静岡県中西部、瀬戸内および福岡県西方沖を震源とする地震に伴いGPS機動連測観測点を設置した(国土地理院[課題番号:6018])。

走査型震源決定法(Source-Scanning Algorithm)の改良を実施するとともに、飛騨山脈脊梁部および跡津川断層周辺における低周波地震の調査を行った(京都大学防災研究所[課題番号:1809])。

歪速度が日本よりも一桁大きい台湾において、現地の研究機関が、日本からの技術移転等によって16点の地下水等観測網を構築しモニタリングを実施している(産業技術総合研究所[課題番号:5009])。

課題と展望

モニタリングデータは、地殻活動予測シミュレーションモデルの構築やシミュレーション結果の検証に利用されることを通じて、予測シミュレーションの精度向上に寄与する。

この5カ年では、モニタリング研究では、次の進歩があった。

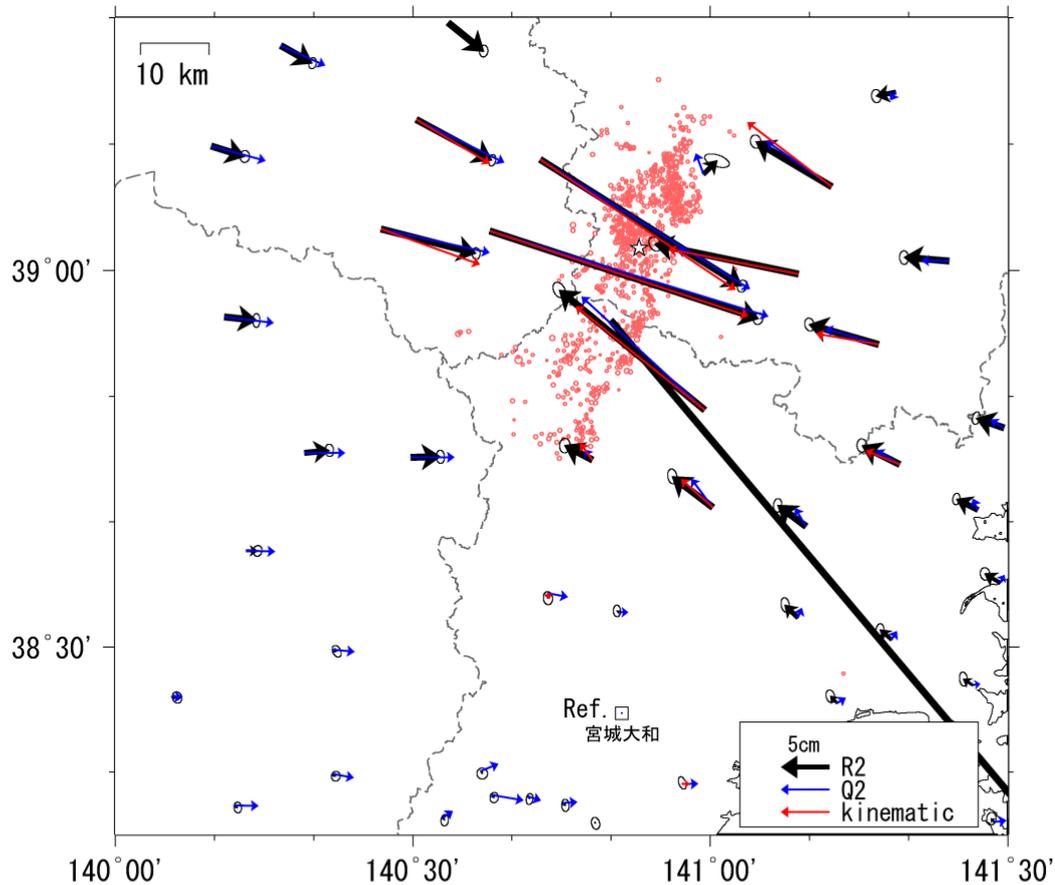
従来から観測データの自動取得や流通がなされていたが、最近はその解析の自動化・迅速化が図られている。震源決定だけでなくCMT解などについても自動的に解析・公開されるようになった。また相似地震や深部低周波微動についても自動検出が行われ、プレートの沈み込み運動をリアルタイムでモニターすることが可能になり、その後の研究に役立っている。海底地震観測は、長期連続多点観測がすでに標準的な手法となり、陸域の観測網と同程度の質・量・密度での観測から海域における震源分布や地殻構造が次々に明らかになってきた。海底地殻変動についても、

数 cm の精度で測定できることが示され、各海域での観測結果が実際の地震研究に役立つ段階となっている。

今後は、プレート境界における地殻活動予測シミュレーション研究や内陸地震発生の物理モデルの開発研究との連携を進め、どのようなデータが必要か、観測値をどのように予測シミュレーションに組み込むか等を検討する。さらに、取得されたデータを組み込んだ予測シミュレーションシステムを実際に動かし、その結果を観測の高精度化や新たなモニタリングシステムにフィードバックすることが必要である。

参考文献

- Tsunomori, F. and K. Notus, Simultaneous monitoring of gas concentration and groundwater level at the Omaezaki 500-m well, central Japan: Spike-like concentration change of methane level change, *Geochemical Journal*, 42(1), 85-91, 2008
- Yamamoto, Y., R. Hino, K. Suzuki, Y. Ito, T. Yamada, M. Shinohara, T. Kanazawa, G. Aoki, M. Tanaka, K. Uehira, G. Fujie, Y. Kaneda, T. Takanami, and, T. Sato, Spatial heterogeneity of the mantle wedge structure and interplate coupling in the NE Japan forearc region, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23304, doi:10.1029/2008GL036100, 2008.



R2: 基準期間 2008/06/03 - 2008/06/12
 Q2: 基準期間 2008/06/13 00:00 - 18:00
 kinematic: 基準期間 2008/06/13 23:37:46 - 23:42:46
 本震発生時刻: 2008/06/13 23:43:45.36(気象庁一元化震源)

比較期間 2008/06/14 - 2008/06/23
 比較期間 2008/06/14 03:00
 比較期間 2008/06/13 23:46:46 - 23:49:46

※日付, 時間は全て協定世界時 (UTC)

図 41: 1 秒ごとに取得される GPS データを用いた解析結果 (Kinematic) と、通常の GEONET 解析結果 (R2, Q2) を 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動で比較したもの。R2, Q2 はそれぞれ 1 日のデータを平均した GEONET 速報解と 6 時間のデータを平均した GEONET 迅速解であり、震源近傍においては 1 秒ごとのデータを用いた解析結果でも十分な精度で地殻変動を推定できることを示している (国土地理院 [課題番号: 6026])。

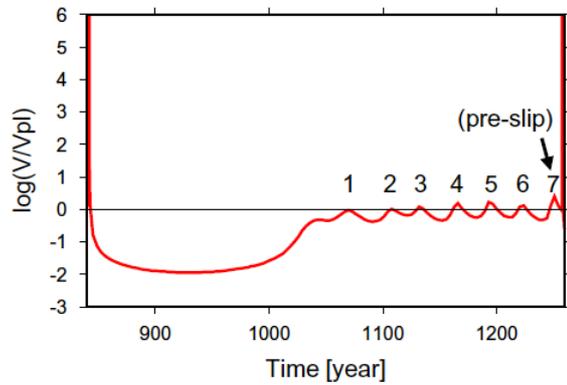
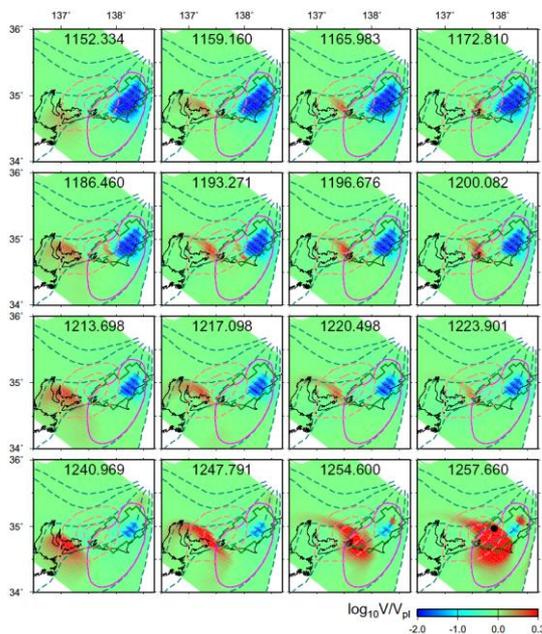


図 42：シミュレーションによるゆっくり滑りの再現。(左)フィリピン海プレート境界面上の滑り速度分布の時間変化。青は陸のプレートとフィリピン海プレートが固着している領域、赤は滑りを開始している領域を表す。図中の数字は計算開始からの経過時間（年）である。(右) 浜名湖直下のプレート境界における滑り速度の時間変化（気象庁[課題番号：7008]）。

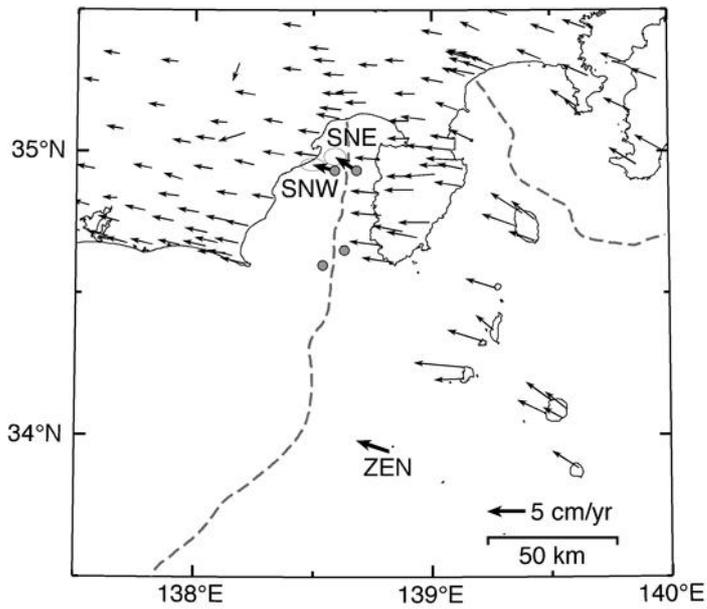


図 43 駿河湾、銭洲岩礁周辺における変位速度ベクトル。アムールプレートに対する変動を示す。SNW、SNE は名古屋大学ほかの海底地殻変動観測による結果。ZEN は銭洲岩礁での GPS 観測結果。陸上の矢印は、国土地理院 GEONET による観測結果（畑中ほか [2003] による）。丸印は海底局設置地点（名古屋大学 [課題番号：1705]）。

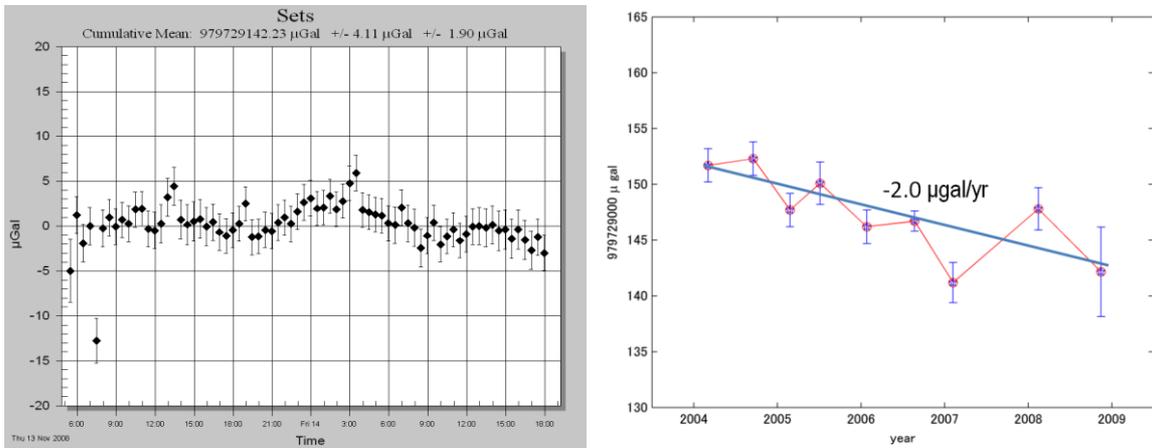


図 44：(左) 2008 年 11 月の豊橋（名古屋大学三河観測所）の基準重力点における絶対重力測定結果。(右) 2004 年からの重力経年変化（エラーバーは重力計測値の標準偏差を示す）（東京大学地震研究所 [課題番号：1414]）。

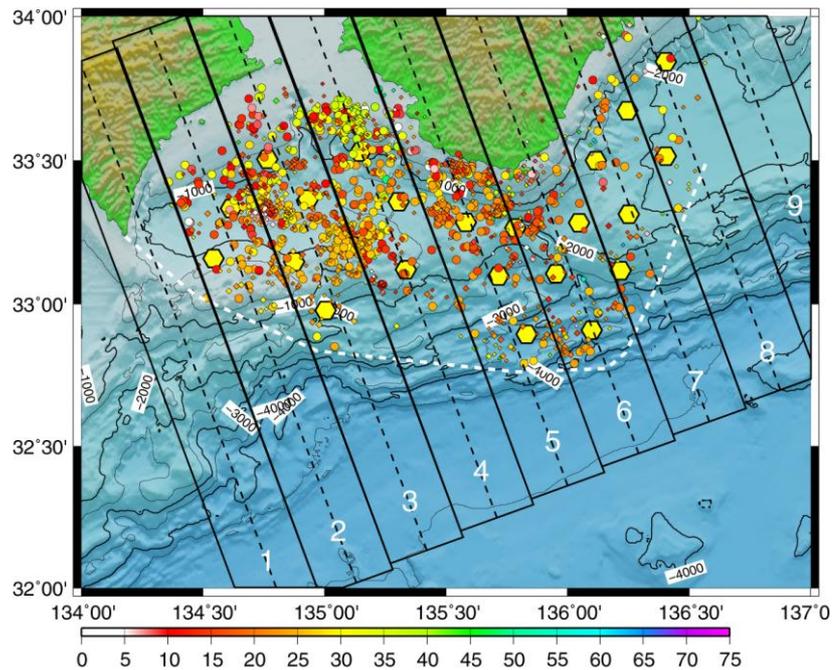


図 45：平成 15 年から平成 18 年までの海底地震計の観測データから求められた地震の震央分布。震源決定誤差が 5km 未満の決定精度が高い地震のみを表示している（東京大学地震研究所 [課題番号：1415]）。

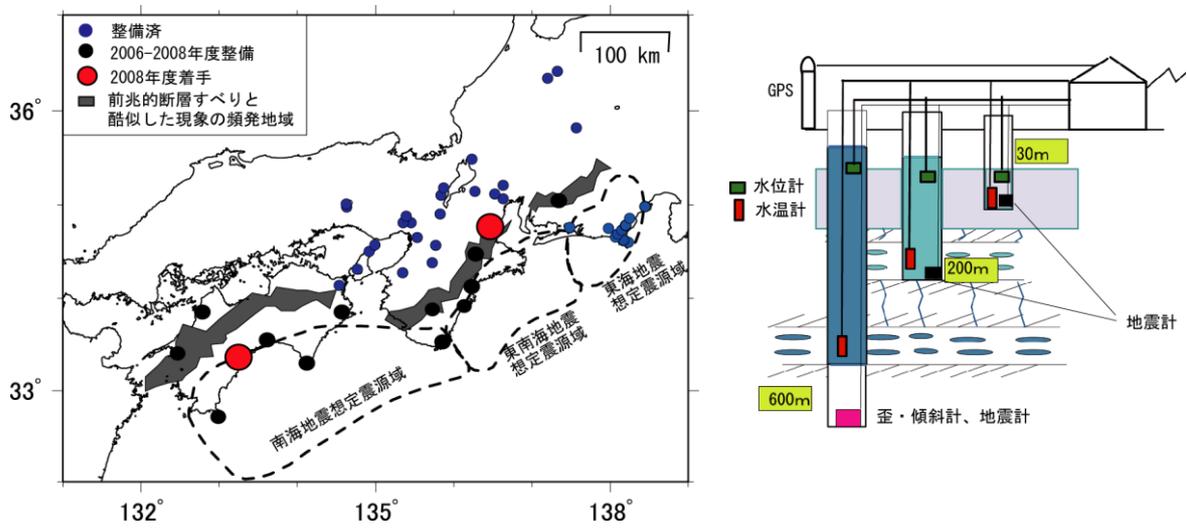


図 46：紀伊半島～四国周辺における新規観測網（左図）と観測施設の概念図（右図）（産業総合技術研究所〔課題番号：5009〕）。

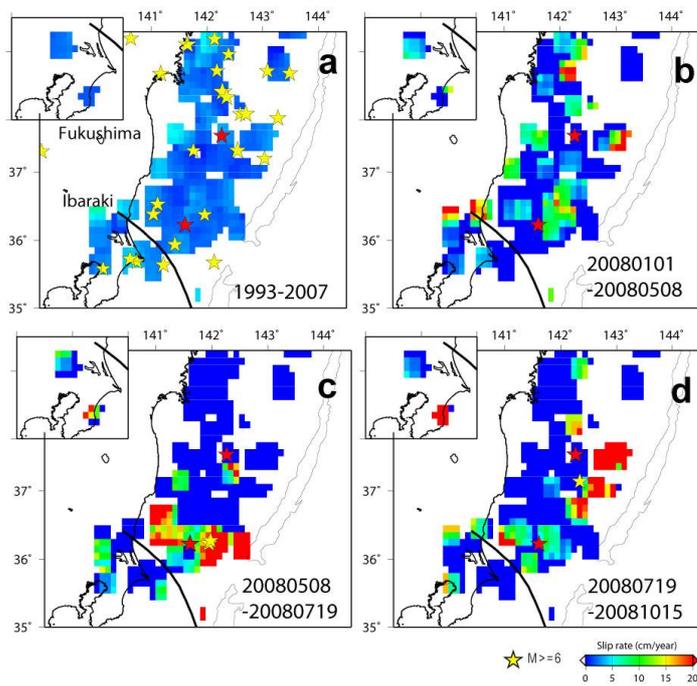


図 47：小繰り返し地震データより推定されたプレート境界での滑り速度の分布。a-d はそれぞれ、1993-2007 年、2008/1/1-2008/5/8（茨城県沖 M7.0 の地震前まで）、2008/5/8-2008/7/19（福島県沖 M6.9 の地震前まで）の期間のものである。赤星は、2008 年 5 月 8 日茨城県沖 M7.0 の地震及び 2008 年 7 月 19 日福島県沖 M6.9 の地震の震央を示す。黒太線はフィリピン海プレートの北東限、挿入図はフィリピン海プレート上面での滑りレートを示す(東北大学 [課題番号：1206])。

2. (3) 「地殻活動情報総合データベースの構築」
研究計画

2. (3) 「地殻活動情報総合データベースの構築」研究計画

「地殻活動情報総合データベースの構築」の研究は、地殻活動予測シミュレーションモデルの開発の基礎となる観測データを整備し、地殻活動モニタリングシステムから有効に情報を取り出すために必要不可欠である。本研究計画では、これまで蓄積されてきた日本列島規模の各種の基礎データを整理・統合する「ア. 日本列島地殻活動情報データベースの構築」を実施するとともに、地殻活動モニタリングシステムからの多種・大量の観測データを有効処理するための「イ. 地殻活動データ解析システムの開発」を目指してきた。

ア. 日本列島地殻活動情報データベースの構築

日本列島全域を網羅する高精度で稠密な重力データベースの構築を目指して、北海道内の重力データ空白地域について、既存データの収集と新たな観測を行った。日高地域では、平成 16 年度～17 年度にわたり新たに 287 点で測定し、既存データと合わせて重力異常マップを作成した。これにより、戸蔭別岩体の形状が明らかになり、島弧衝突地域の地殻変動の様子も明瞭になった。北海道北部地域はオホーツクプレートとアムールプレートの境界域である可能性があり、2004 年の 12 月には留萌支庁南部で M6.1 の地震が発生している。当地域において、平成 19 年度に北海道大学内の一等重力点を基準とする合計 478 点の相対重力測定を行い、重力データベースに追加した。さらに平成 20 年度には天塩町及び遠別町周辺において合計 325 点の重力測定を行った。この地域は、基本的に日本海東部地域に連なる南北方向の褶曲構造が発達している地域であるが、重力測定の結果によると、本震の震源は背斜構造の中でドーム状に高密度岩体が高まった所の南端にあり、それから北にドーム状構造の中に余震が広がっていることが示された。また、幌延断層に対応して、北北西-南南東方向に直線上に重力異常の水平勾配が高い領域の存在が明らかになった（北海道大学 [課題番号：1010]）。

強震計(SMAC 型)の強震記録のフィルム作成作業を実施し、デジタル画像の作成を行った。これは、今後データベース化して活用される予定である。また、世界の大地震について収集された記録およそ 500 枚を画像化(tiff 形式)し、研究者が迅速に利用できるようなインデックスデータベース作成と公開に適した新しい画像形式である zooma への変換を行った。日本付近の過去の大地震について、古い地震記象や津波記録、測地記録などの所在情報とそのスキャンデータのデータベース化を行い、研究者が必要なときに迅速に利用できるようなシステムの構築を行った。所在データベース作成にあたっては、関係機関の協力のもと日本列島に散在する過去の大地震の記録を調査し作成を行った。東京大学地震研究所所蔵の歴史地震記象検索システム・津波波形画像検索システム等はウェブから利用可能なシステムとなっている（東京大学地震研究所 [課題番号：1417]）。

全国の高感度地震観測施設と基盤強震観測施設、強震観測施設から得られるデータを効率的に収集・処理・蓄積し、日本列島全域における地震観測データベースを逐次的に追加・更新した（防災科学技術研究所 [課題番号：3011]）。

過去さまざまな機関で実施された活断層調査の情報を網羅的に収集した活断層データベースを構築し、インターネット上での公開を行った。平成 20 年度中に、既存文献の断層位置情報については、主な断層帯の調査データの入力をほぼ完了した。また、断層位置情報の表示に Google マップを導入し、英語版においても断層位置を表示できるようにしたほか、日本語版も従来の電子国土に加えて Google マップにも対応させた（産業技術総合研究所 [課題番号：5010]）。

10,000km²を達成目標として、活断層の詳細な位置、関連する地形の分布等の情報を、1:25,000

都市圏活断層図として整備・公表してきた。平成 20 年度には、高山周辺の活断層「高山東部」「高山西部」「高山西南部」3 面、岩国断層帯とその周辺「岩国」「下松」2 面を公表した。合計 30 面、約 12,000km² を整備し目標を達成した（国土地理院 [課題番号：6019]）。

GPS 連続観測データクリアリングハウスの整備として、電子基準点（GEONET 観測点）や機動観測点等の国土地理院が運用する GPS 観測点の観測データの関連情報を定期的に更新した。地震調査研究機関等が所有する GPS 連続観測点の諸元情報、観測データの所在情報など、GPS データに関する各種情報をウェブ上で提供するシステムの構築・運用を行ってきた（国土地理院 [課題番号：6029]）。

柿岡・女満別・鹿屋・父島で観測された地磁気観測データを整理し、平成 16 年度に策定した統一的なデータフォーマットへ変換した。変換が終了したデータは、改定を進めている地磁気永年変化標準磁場（JGRF）の作成にも利用された。現存する 1897～1912 年の地磁気観測の 1 時間値データについて、印刷資料からデジタル化するとともに、デジタル化したデータを点検し、必要な補正を施したファイルを作成した。さらに、観測測器情報のデータベースへの登録形式の検討および柿岡・女満別・鹿屋で過去に使用された観測測器情報の調査を実施した（気象庁 [課題番号：7013]）。

一元化処理による全国地震カタログの作成作業を継続して行い、平成 15 年 12 月～平成 20 年 11 月分の地震・火山月報（カタログ編）、平成 15 年～平成 19 年分の地震年報（平成 15 年～平成 18 年分は CD-ROM 版、平成 19 年分は DVR-ROM 版）を刊行した（気象庁 [課題番号：7014]）。震源カタログの高精度化と均質化を図るための過去の震源計算と総合的な地震カタログの作成も継続しており、1969～1970 年を対象に精度よく決まる可能性がある地震について、気象庁火山観測点の検測を行い再計算を実施した。1965～1975 年の大学等関係機関の検測値をコード化するとともに、1965・1969・1970 年の震源再計算を実施した（気象庁 [課題番号：7015]）。これらに加え、各官署に保存してある地震記象紙について、保存・廃棄の基準を明確にするとともに、1960 年代に撮影し、すでに劣化が進んだマイクロフィルムを新たに複製する等の作業も行われた（気象庁 [課題番号：7012]）。

イ. 地殻活動データ解析システムの開発

地殻活動総合解析システムの開発、運用を行っているが、新たに行われた観測データの追加、水準測量の原データのフォーマット変更への対応、水準測量データの整合性の確認、潮位データの修正、GPS データにおけるデータベース項目の追加、GEONET の新解析戦略による解析結果への更新など、データベース内容の確認と更新を実施した。また、システムのバグの修正や利用環境の改良、SAR（合成開口レーダー）視線方向の変動量計算機能の追加などの機能拡張を行った（国土地理院 [課題番号：6020]）。

課題と展望

データベースを構築するためには、基礎となる多項目で大量の観測データを効率よく整理・統合することが必要不可欠である。基礎データの収集蓄積とこれを整理統合するためのデータベース構築についてはそれぞれの関係機関により精力的に進められた。しかしながら、本計画の 5 カ年では、データ入力を担う「地殻活動モニタリングシステムの高度化」の課題やデータベースを利用する「地殻活動シミュレーション」の課題との連携が必ずしも密ではなかった感がある。今後は、これらの課題とも密接に連携して、最終的な目標である地殻活動予測シミュレーションモデルに寄与するためのデータベースを効率的に構築する必要がある。

3. 「新たな観測・実験技術の開発」研究計画

3. 「新たな観測・実験技術の開発」研究計画

「新たな観測・実験技術の開発」研究では、これまでとらえることが困難、または不可能であった現象を見るための「道具」を開発し、第2次新計画の推進に貢献した。

この研究計画は、観測対象あるいは観測手段の観点から、次の四つの項目に分類される。

- (1) 海底諸観測技術の開発と高度化
- (2) ボアホールによる地下深部計測技術の開発と高度化
- (3) 地下構造と状態変化をモニターするための技術の開発と高度化
- (4) 宇宙技術等の利用の高度化

本研究計画の最終目標は、ここで開発された観測・実験技術が、第2次新計画の他の研究課題でも利用され、第2次新計画全体の研究成果の向上に資することである。観測・実験技術の開発研究は、他の研究課題と共同で実施されることが多く、この研究計画と関連の深いものであっても、他の研究計画の中で実施されている技術開発もあるが、それらについては当該項目で報告されている。

(1) 海底諸観測技術の開発と高度化

海域で発生する地震を研究して、プレートの沈み込みに伴う大地震発生機構を解明するには、陸域の観測網だけでは不十分で、海底諸観測技術開発と高度化が不可欠である。これにより、海域を含めた十分な広がりや空間分解能を持つ観測網が構築でき、高精度の観測データを取得できる。そのため、次のような開発研究を実施した。

(GPS-音響測距結合方式による海底測位計測システムの高度化)

複数の研究機関が互いに連携し、宮城県沖、駿河湾、熊野灘等において観測船や曳航ブイを用いたGPS音響結合方式の精密海底測位の繰り返し観測を実施するとともに、測位精度向上に関する研究も継続した (Ikuta et al., 2008、海上保安庁, 2008a, b、望月・他, 2008、長田・他, 2008、佐藤・他, 2008、田所・他, 2008、藤田, 2009、杉本・他, 2009b、渡部・他, 2009)。

GPS音響結合方式による精密海底測位の最大の問題点は、水中音速構造の影響を強く受け、それにより観測精度が低下することである。この影響を軽減するため、水中音速構造の観測値と数値モデルを併用する解析手法の開発 (名古屋大学[課題番号:1706]、武藤・他, 2008、杉本・他, 2009a)を進めるとともに、5台の音響測位海底局を用いて海中音速構造の水平勾配も未知数として解く手法も考案した (東北大学[課題番号:1207]、Kido et al., 2008)。更に、長期連続観測を目指して係留ブイを用いた観測システムを開発し、試験観測を実施した (東北大学[課題番号:1207]、藤本・他, 2008)。

(海底における圧力・傾斜変動観測の高度化)

長期間の海底圧力観測を実施するのに障害となる、海水による圧力センサーの腐食について、その解決策を見出し、長期観測への道を開いた (東北大学[課題番号:1207])。

(海底ケーブル利用システムの開発)

これまで、光ファイバー海底ケーブルを利用した海底観測システムを、伊豆半島東方沖や三陸釜石沖に構築してきた。今後これを発展させ、数百点規模の観測ノードを持つ海底ネットワークが必要となることから、その開発を進めた (東京大学地震研究所[課題番号:1418]、Kanazawa et al.,

2008)。開発されたシステムは、IT 技術と最新半導体技術により観測ノードの小型化を実現し、設置費用の削減を志向したことが特長である。この観測ノードの小型化により、観測ノードを海底に埋設も容易になり、観測精度の向上も期待できる。平成 22 年には、日本海中越沖に設置する予定である。

多項目観測を目的とした海底ネットワークによるリアルタイム長期総合海底観測システムの開発を継続し、地震計、水圧計、電位差磁力計などのセンサーを接続したネットワークシステムを豊橋沖に設置した（海洋研究開発機構[課題番号:4004]）。また、水中での増設や交換を可能とする着脱コネクタ、高精度時刻分配を可能とする同期システムなどの要素技術開発研究も行った。

（海底における長期地震観測の高度化）

加速度計を追加した多項目センサーを持つ海底地震計の開発を継続し、海底強震・高感度地震計を実用化した。平成 19 年から、直径 65 c m のチタン球を耐圧容器とする海底強震計 1 台を含む海底地震観測網を、茨城沖に展開して観測を行っていたところ、平成 20 年 5 月 8 日に M7.0 の地震が発生した。この前震一本震一余震に至る一連の地震活動を、震源域直上で広いダイナミックレンジで観測することに成功した。海底強震計により、波形が飽和しない本震の記録を得ることができ、本震の S 波の到着時刻の観測値から、その震源位置の精度向上に役立った（図 48）（東京大学地震研究所[課題番号：1418]）。

（2）ボアホールによる地下深部計測技術の開発と高度化

ボアホール利用による地下深部計測技術は、雑音の大きい地表から離れることによって高感度のデータを得るだけでなく、震源核に近づいて地殻応力状態や断層物質を直接測定するための重要な技術の一つである。この研究項目では次のような研究を実施した。

（地殻応力測定の高度化）

水圧破砕法の問題点から逃れることができるボアホールジャッキ式応力測定法は、ジャッキと岩盤壁面の接触状態により感度が増えるため、測定精度が低いという欠点があった。数値解析と岩石の室内実験から、接触領域を狭くすると感度がほぼ一定となり、この問題を解決できることが分かった。一方、深度 4～5km の程度の高圧環境での地殻応力測定では、接触領域を広くすれば良いことが明らかになった（東京大学地震研究所[課題番号：1419]、横山・他、2008）。

深度 500m 程度の高圧環境でも利用可能なインテリジェント型ボアホール歪計を用いた地殻応力測定法の開発研究を継続した（名古屋大学[課題番号：1707]）。この測定法の問題点である歪計固定の際に用いるモルタルの残留応力による効果の評価法が分かり（東京大学地震研究所 [課題番号：1419]）、実用化の目途が立った。

岐阜県神岡鉱山坑内の深度 0.6km、跡津川断層より水平距離 1.1km の地点での、水圧破砕法、高剛性水圧破砕法、埋設型応力解放法及びボアホールジャッキ式による地殻応力測定の比較試験（図 49）を実施した際に得られたデータから、この地域の最大圧縮応力方向は跡津川断層に垂直であることが分かった。これは測定地点近傍の跡津川断層が、大きなせん断応力を支えていないことを示唆している（名古屋大学[課題番号：1707]、防災科学技術研究所[課題番号：3013]、東京大学地震研究所[課題番号：1419]、佐野、2009）。

（ボアホール間隙水圧測定）

神岡鉦山坑道内の近接した二つのボアホールや野島断層のボアホールで間隙水圧の連続観測を継続し、その大気圧応答、理論地球潮汐や地震波に対する応答を詳しく解析した。このような解析から、地殻応力の推定には、地殻歪だけでなく、岩盤の間隙水圧も同時に観測し、歪と間隙水圧の相互作用を考慮した間隙弾性論を用いる必要があることが示された（京都大学防災研究所〔課題番号：1810〕、Kano et al., 2008a, b）。

（光干渉計測技術等先端技術の導入）

地殻歪を高精度で計測するためのレーザー変位計の開発研究を継続した（東京大学地震研究所〔課題番号：1419、1420〕）。狭い測定範囲であるが高分解能の干渉計と、低分解能ではあるが広い計測範囲のものを併用したシステムを開発した。測定精度の向上を目指して、デジタル方式光軸制御システムを組み込んだ結果、地震時の歪ステップが安定して測定できるようになった。

（3）地下構造と状態変化をモニターするための技術の開発と高度化

地殻内の微小な応力変化、散乱体や地殻内流体の分布の変動、プレート境界での反射強度の時間変動、地殻深部の物質移動地殻比抵抗の時空間変化、地殻内の水の状態変化などをモニターするため、以下のような技術開発研究が実施された。

（精密制御震源技術の高度化）

名古屋大学三河地殻変動観測所（豊橋）に設置した2台のアクロス震源装置の、発振信号の位相と振幅とを独立に制御した実験を行い、振動の伝播方向を制御することを試みた。その効果はある程度確認できたが、理論的に予想した結果と一致しないため、解析の見直しと高度化を進めている（生田・他、2008）。三河観測所のアクロス震源装置はおおむね順調に稼働しており、遠隔モニタリング、遠隔操作のシステムの構築を継続した（名古屋大学〔課題番号：1708〕）。

アクロス制御震源からの振動波群の時間変化を検討するために、Hi-net 鳳来観測点（N. HOUH）の連続観測記録の解析を行った（Hasada et al., 2008）。平成17年と平成18年に実施した愛知県新城市の愛知県民の森での観測記録も再解析し、観測されたアクロス制御震源からの信号に、高い再現性と安定性があること、検出された波群はアクロス制御震源からの信号であること、後続波群が地殻深部からの反射波と解釈できることが確認された（Yamaoka et al., 2008、Yamazaki et al., 2008）。この解析結果を図50に示す。

Hi-net 鳳来観測点（N. HOUH）の約2年間の連続観測記録の解析から、初動付近の波群の相関係数や走時は、わずかながら年周変化のような変動を示すこと。また、後続波群のそれらの変動は初動付近よりも大きいこと。更に、相関係数や走時は深部低周波微動の活動が開始すると変動し、終了後は元に戻る傾向を示すことなどが明らかになった（Furukawa et al., 2008）。これは興味深い観測事実であるが、現時点でこの変動を説明できるモデルは構築できていない。

精密に発振時刻を制御したパルス波形とそれと同期した計測装置を用いて岩盤内を伝わる弾性波速度、波動減衰などの特性を計測し、応力変化などの岩盤内部の状態変化を推定することを目的とした試験観測を継続した。神岡鉦山に設置した弾性波速度計測装置は、同じ場所に設置されているレーザー伸縮計や地下水観測装置などと比較するための観測を継続している（東京大学地震研究所〔課題番号1420〕）。

（平坦な周波数特性を持ちかつ高感度な地震計の開発）

レーザー伸縮計、超伝導重力計、レーザー地震計は、平坦な周波数特性を持つことから、広帯域地震計として利用できる。これらの性能が、従来の広帯域地震計に比べ、どのような差異があるかを調べるため、同一観測点での並行観測を行い、観測された波形の振幅と周波数特性を比較した。レーザー地震計は制御回路の低雑音化とデータ取得時間の最適化を行えば、測定精度を約1%以内まで向上させる見込みが得られた。これにより、従来の広帯域地震計よりも長周期側に帯域の伸びた1mHz～50Hzで平坦な周波数特性を持つ地震計ができることが実証できた（東京大学地震研究所[課題番号：1419 および 1420]）。

（マントル起源のヘリウム放出量計測技術開発）

地下深部の状態変化を観測するため、地下深部からしみ出してくるマントル起源の揮発性物質であるヘリウムガス（以下、マントルヘリウム）の浸出量を観測する技術の開発を継続した。四国地方の中央構造線や、トルコ・アナトリア断層におけるマントルヘリウムの放出特性を調査し、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ が構造線上で高いことがわかった。これはマントルヘリウムが断層に沿って放出されていることを示唆している（東京大学理学系研究科[課題番号：1505]）。

（4）宇宙技術等の利用の高度化

GPS や SAR に代表される宇宙技術の利用は地殻変動観測に革命をもたらした。ここでは次のような研究が実施された。

（GPS 測位技術の高度化研究）

GEONET 観測データの解析から得られる地殻変動は、地震予知研究に不可欠なものとなっている（国土地理院, 2008、2009a）。1秒ないし10秒サンプリングによる観測データを用いて、変位を推定する高度なキネマティック解析手法の開発も進展した。この手法より、2008年中国・四川地震からの表面波が、震央距離3000km付近でもGPSで観測できることが明らかになった（図51）（京都大学防災研究所[課題番号：1811]、京都大学防災研究所・他, 2008）。GPSの解析誤差の軽減のため、数値気象モデルから推定された水蒸気分布から大気伝播遅延の効果を見積もることや、電離層遅延および非潮汐海洋質量による荷重変形の効果の補正する手法の開発が行われ、誤差軽減に役立った（国土地理院 [課題番号：6027]、Munekane et al., 2008）。

（干渉 SAR による地殻変動観測手法の高度化研究）

干渉 SAR は、地殻変動を面的に稠密に計測できる利点がある。地球観測衛星「だいち」の SAR データを利用した干渉解析が実施され、2007年新潟県中越沖地震、2007年ソロモン諸島地震に伴う地殻変動などが検出された（鈴木・他, 2008、Aoki et al., 2008a, b、森・他, 2008）。2008年岩手・宮城内陸地震、2008年中国・四川地震では、広域に高密度な地殻変動をとらえ、震源断層の形状や断層面上の滑り分布の推定に利用した（図52、53）（国土地理院[課題番号：6022、6030]、雨貝・他, 2008、国土地理院, 2009b）。干渉 SAR から推定される地殻変動の補正法についての手法開発が実施され、大気遅延や衛星軌道の補正が重要であることが明らかになった（東京大学地震研究所[課題番号：1421]、国土地理院[課題番号：6032]、防災科学技術研究所[課題番号：3015]、情報通信研究機構[課題番号：0101]）。

（次世代テレメータ衛星通信システムの開発）

低消費電力で、周波数帯域の利用効率の高い地震観測用 VSAT 衛星テレメータシステムの開発を行った（東京大学地震研究所[課題番号：1421]）。ここで開発された技術を用いて、機動的に多点の地震観測を実現できる衛星テレメータシステムが実用化された。

課題と展望

新たな観測・実験技術の各開発課題については、第2次新計画で当初掲げた到達目標達成に向けて進展した。GPSと音響測距を利用した海底測位では、目標とした繰り返し観測精度2～3cmが達成された。また実用化のための試験観測で得られた観測記録が、地震断層のパラメータの推定にも使われたことは、この技術が既に実用の域に達していることを示すものである。今後は、現時点で実現できていない連続測定に向けた開発が望まれる。精密制御震源技術開発に関しては、複数のアクロス震源を位相制御して利用する試みが始められたが、地下構造の状態をより詳細に推定するためには、更なる開発が必要であると。GPS解析手法の開発では、すでに一定の成果が得られているが、測位精度を向上させるためには、さまざまな誤差要因を取り除く補正手法の開発を継続することが重要である。干渉SARによる地殻変動の推定は、大きな地殻変動に対しては変動量の推定が実現でき、成果が上げられている。今後は、更に小さな地殻変動であっても検出可能となるよう、水蒸気遅延等の大気補正手法の高度化を図る必要がある。

参考文献

- 雨貝 知美・鈴木 啓・和田 弘人・藤原 みどり・飛田 幹男・矢来 博司, 2008, 衛星合成開口レーダーを用いた平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, No.117, 15-20.
- Aoki, Y., M. Furuya, and T. Kato, 2008a, Coseismic deformation due to the 2007 Chuetsu-oki earthquake (Mw=6.8), *Earth Planet. Space*, 60, 1075-1080.
- Aoki, Y., J. Oikawa, M. Furuya, and M. Iguchi, 2008b, Ground deformation of Suwanose-jima volcano as viewed from ALOS/PALSAR InSAR, *EOS Trans. AGU, Fall Meeting Suppl. Abstract V11B-2041*.
- 藤本博己・木戸元之・長田幸仁・金田義行, 2008, GPS/A方式海底地殻変動連続観測に向けた観測システムの開発, *測地学会誌*, 54 (3), 181-187.
- 藤田雅之, 2009, 海底地殻変動観測のための精密海底測位手法の確立などの海洋測地学への貢献, *測地学会誌*, 55 (1), 1-15.
- Furukawa, T., Watanabe, T., Hasada, Y., Yamaoka, K., Yamazaki, K. and Ikuta, R., 2008, Time variation of wave phases of 2 years of ACROSS continuous transfer function observed at Hi-net Hourai station, 第7回アジア国際地震学連合(ASC)総会・2008年日本地震学会秋季大会合同大会, Y3-223.
- Hasada, Y., Watanabe, T., Yamaoka, K., Fujii, N., Kumazawa, M., 2008, Simultaneous Near-Field Monitoring During Active Monitoring by seismic ACROSS, *Eos Trans. AGU*, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract NG51A-1199.
- Ikuta, R., K. Tadokoro, M. Ando, T. Okuda, S. Sugimoto, K. Takatani, K. Yada, and G. Besana, 2008, A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: Application to the Nankai Trough, *J. Geophys. Res.*, 113, B02401, doi:10.1029/2006JB004875.

- 生田領野, 國友孝洋, 羽佐田葉子, 山岡耕春, 渡辺俊樹, 2008, 地震波 ACROSS 震源アレイを用いた弾性波信号の干渉実験, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, S144-P005.
- 海上保安庁, 2008a, 海上保安庁によるGPS地殻変動監視観測 (地震予知連絡会報、第 79 号)
- 海上保安庁, 2008b, 東海沖における海底地殻変動観測 (地震予知連絡会報、第 79 号)
- Kanazawa, T., M. Shinohara, S. Sakai, O. Sano, H. Utada, H. Shiobara, Y. Morita, T. Yamada, and K. Yamazaki, 2008, A new compact ocean bottom cabled seismometers system for spatially dense observation on sea floor, OCEANS 2008 - MTS/IEEE Quebec.
- Kano. Y., A. Araya, W. Morii, and T. Yanagidani, 2008a, Coupling Between Pore Pressure and Strain: Coseismic Offset and Seasonal Variation, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, Fall meeting, Tsukuba, X3-090.
- Kano. Y., Y. Kitagawa, A. Mukai, and T. Yanagidani, 2008b, Permeability Around the Nojima Fault Estimated Using Barometric Response of Pore Pressure, 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and Seismological Society of Japan, Fall meeting, Tsukuba, X4-053.
- Kido, M., Osada, Y., and Fujimoto, H., 2008, Temporal variation of sound speed in ocean: a comparison between GPS/acoustic and *in situ* measurements, Earth Planet. Space, 60, 229-234.
- 国土地理院, 2008, 地震予知連絡会会報, 第 80 巻, 578p.
- 国土地理院, 2009a, 地震予知連絡会会報, 第 81 巻, 605p.
- 国土地理院, 2009b, 中国・四川省の地震, 地震予知連絡会会報, 第 81 巻, 578-581.
- 京都大学防災研究所・京都大学大学院理学研究科・チュラロンコン大学理学部地質学科, 高サンプリング GPS で捉えた 2008 年 5 月 12 日中国・四川省の地震の地震波形, 地震予知連絡会会報, 第 80 巻, 539-542, 2008.
- 望月将志・浅田昭・浦環・藤田雅之, 2008, 海中ロボットを利用する次世代海底地殻変動観測システムの開発、測地学会誌, 54 (3), 189-197.
- 森真希子, 加藤照之, 古屋正人, 落唯史, 宮崎真一, 青木陽介, 2008, SAR データに基づく 2007 年 4 月 1 日ソロモン諸島地震(Mw=8.1)の震源過程, 日本地球惑星科学連合大会, D205-011.
- Munekane, H., Y. Kuroishi, Y. Hatanaka, and H. Yurai, 2008, Spurious annual vertical deformations over Japan due to mismodelling of tropospheric delays, Geophys. J. Int., 176, 831-836.
- 武藤大介・田所敬一・杉本慎吾・奥田隆・渡部豪・木元章典・生田領野・安藤雅孝, 2008, 海底ベンチマーク位置決定精度における海中音速構造の時空間変化の影響に関する数値実験、測地学会誌, 54 (3), 143-162.
- 長田幸仁, 水上知子, 木戸元之, 太田雄策, 対馬弘晃, 三浦哲, 藤本博己, 2008, 10Hz GPS 受信機導入による海底地殻変動観測高度化の試み, 測地学会誌, 54 (3), 141-151.
- 佐野修, 2009, 孔内計測について, 地震 2, 印刷中.
- 佐藤まりこ・木戸元之・田所敬一, 2008, GPS/音響測距結合方式による海底地殻変動観測～観測成果と新たな取り組み～, 測地学会誌, 54 (3), 113-125.
- 杉本慎吾・田所敬一・生田領野・渡部豪・奥田隆・佐柳敬造・武藤大介・木元章典・安藤雅孝, 2009a, 制約音速による海底測位手法の改良とその評価、測地学会誌, 55 (1), 53-63.
- 杉本慎吾・長田幸仁・石川直史・浅倉宜矢・田所敬一・渡部豪・奥田隆・高谷和典・生田領野・安

藤雅孝, 2009b, 基線長別移動体測位実験によるキネマティック GPS ソフトウェアの評価、測地学会誌, 55 (1), 65-85.

鈴木啓・雨貝知美・藤原みどり・和田弘人・飛田幹男・矢来博司(2008):衛星合成開口レーダーを用いた平成 19 年(2007 年)中越沖地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, No. 114, 47-53.

田所敬一・杉本慎吾・武藤大介・渡部豪・生田領野・安藤雅孝・奥田隆・木元章典・佐柳敬造・久野正博, 2008, 駿河ー南海トラフにおける海底地殻変動繰り返し観測、測地学会誌, 54 (3), 127-139.

渡部豪・田所敬一・杉本慎吾・奥田隆・生田領野・安藤雅孝・武藤大介・木元章典・久野正博, 2009, 熊野灘での海底地殻変動観測によるプレート固着状態推定、測地学会誌, 55 (1), 39-51.

Yamaoka, K., Watanabe, T., Ikuta, R. and Kunitomo, T., 2008, Temporal variation of seismic propagation property by ACROSS system, Eos Trans. AGU, 89(53), Fall Meet. Suppl., Abstract S51E-06.

Yamazaki, K., Watanabe, T., Hasada, Y., Furukawa, T., Yamaoka, K., Nakamichi, H. and Ikuta, R., 2008, Analysis of ACROSS signal from Toki using Horai seismometer array in 2006, 第 7 回アジア国際地震学連合 (ASC) 総会・2008 年日本地震学会秋季大会合同大会, Y3-222.

横山幸也, 佐野 修, 板本昌治, 中山芳樹, 平田篤夫, 水田義明, 2008, 乾式破碎法による地殻応力測定法の開発, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム論文集, p. 289 - 296.

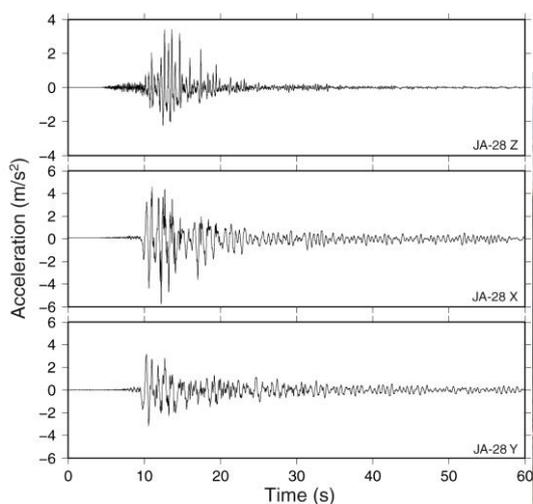


図 48 : 平成 18 年に茨城沖に設置した 5 台の海底強震・高感度地震計(上)、および平成 20 年 5 月 8 日に発生した茨城県沖の地震 (M7.0) の震央近傍での加速度記録(下) (東京大学地震研究所[課題番号:1418])

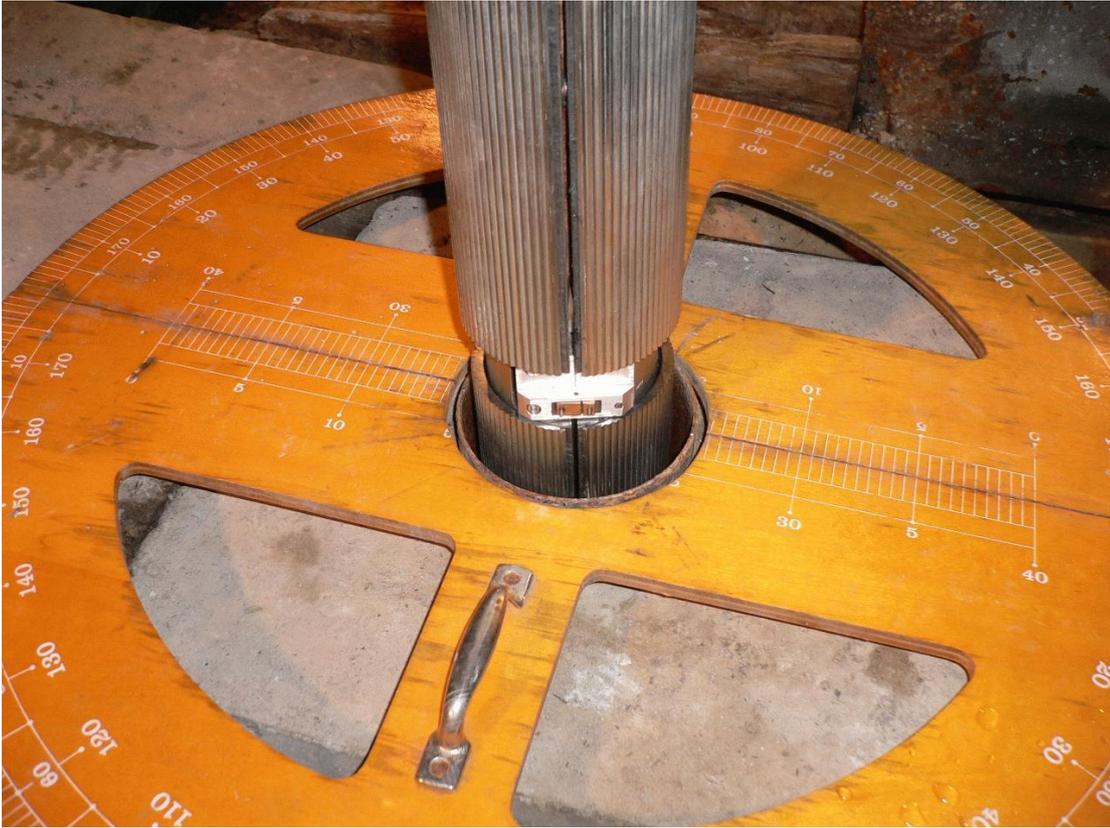


図 49：新たに開発されたボアホールジャッキ式応力測定プローブ。神岡鉱山跡津川坑内のボアホールに投入される直前。図中、油圧ジャッキが図中左右に開きボアホール壁を押し、きれつを押し開く。図の中央部がきれつ開口を検出するための変位センサー。東京大学地震研究所[課題番号：1419]。

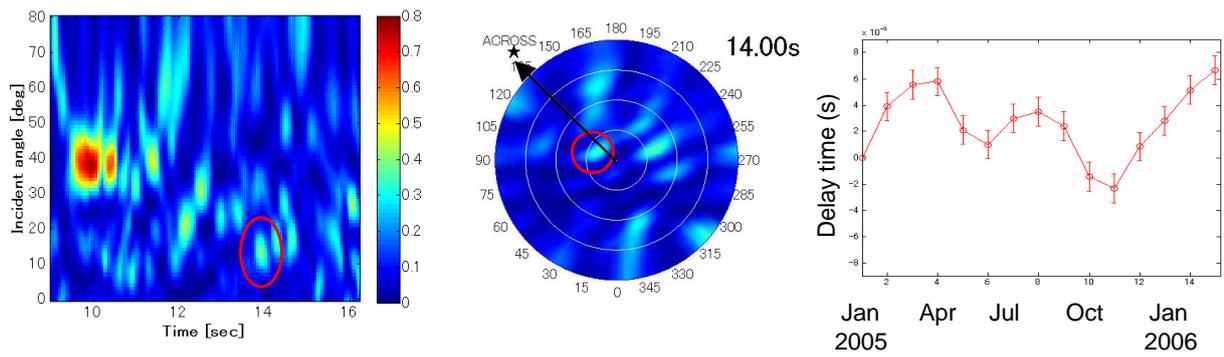


図 50：地震計アレイおよび Hi-net で観測された土岐アクロス信号の伝達関数。(左) 震源から到来する方向のセンブリランス。(中) 到達時刻 14 秒の波群の到来方向。(右) その波群の到達時刻の長期時間変動(名古屋大学[課題番号：1708])

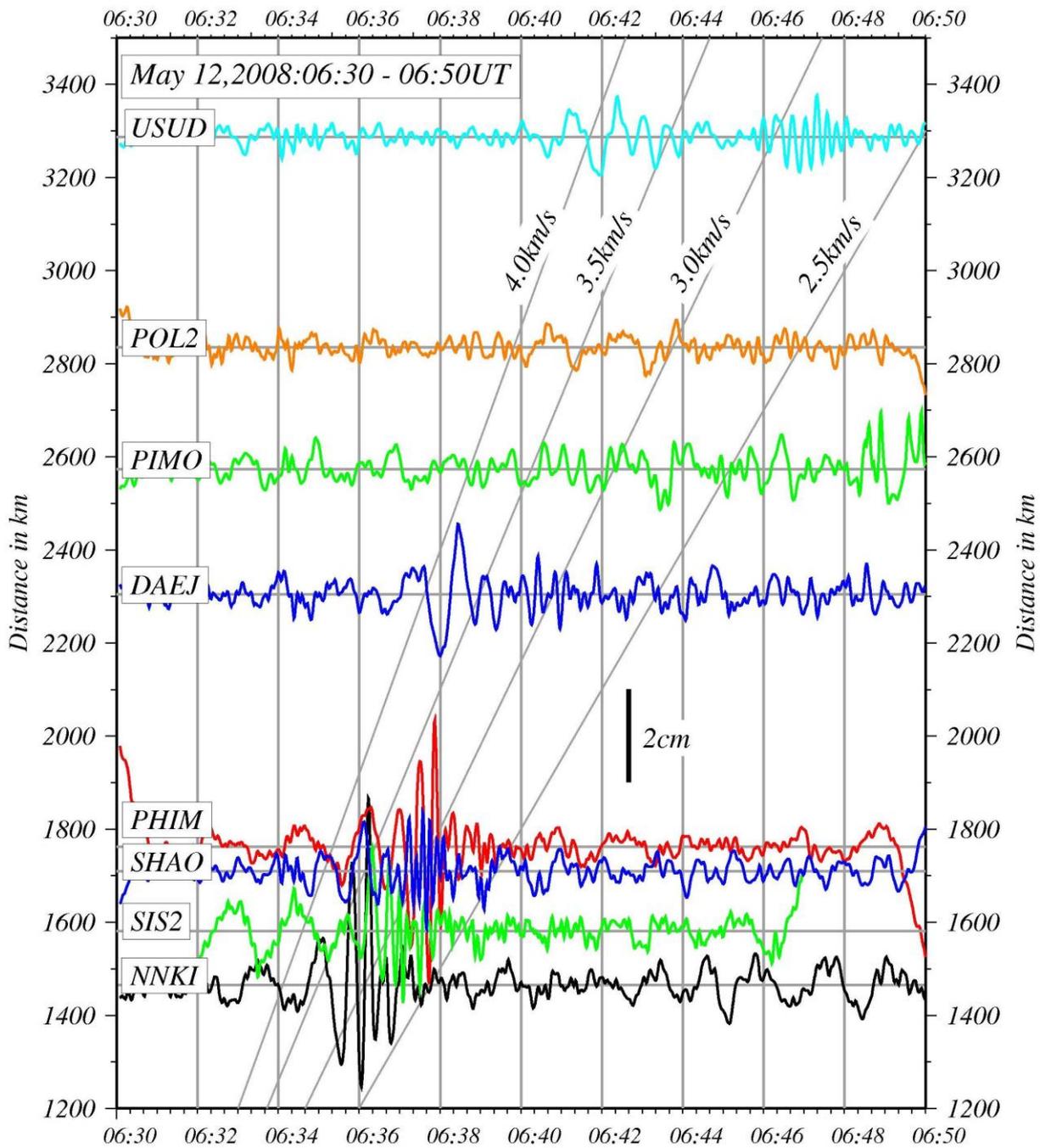
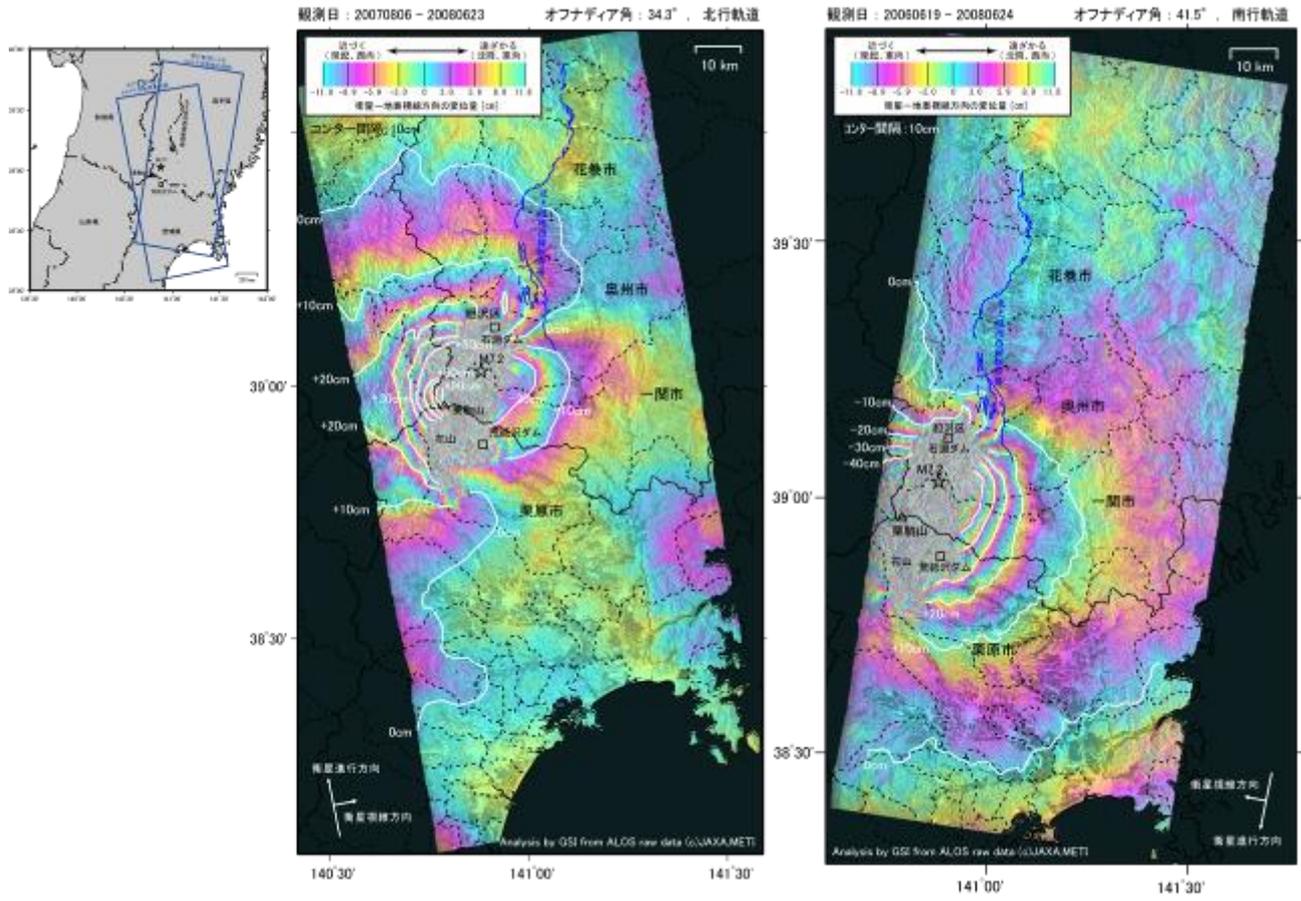


図 51 : 1 秒サンプリング GPS データの解析で得られた 2008 年 5 月 12 日中国・四川地震の地震波の transverse 成分。震央距離は 1400km から 3300km まで Love 波を捉えているものと思われる。また、きれいな分散が認められる (京都大学防災研究所 [課題番号 : 1811])。



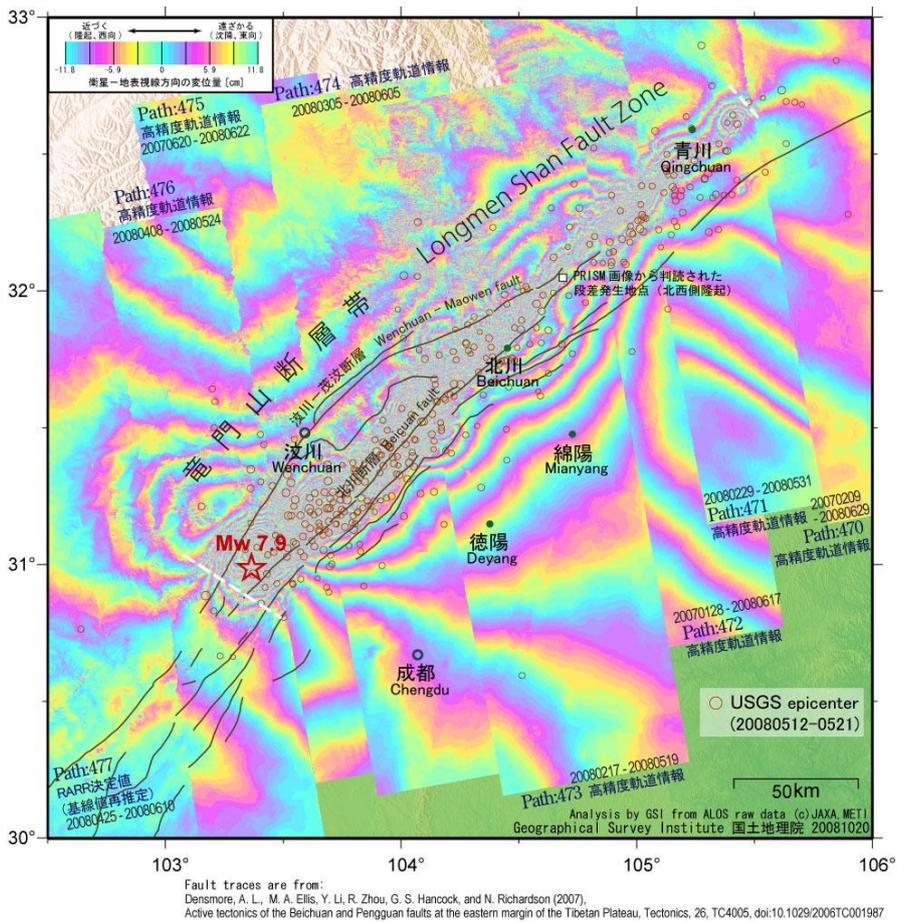


図 53：平成 20 年中国・四川地震に伴う地殻変動分布。「だいち」SAR 干渉画像。この干渉画像から、1) 龍門山断層帯で大きな地殻変動が生じたこと、2) 震源断層の長さは約 285km であること、3) 断層運動は右横ずれ成分を含む逆断層型であること、4) 北西側でローブ (lobe) 状の干渉縞が数箇所見られ、断層面上のすべりが不均質であったこと、等が判明した。(国土地理院 [課題番号：6030])

科学技術・学術審議会測地学分科会地震火山部会
観測研究計画推進委員会

〒100-8959 東京都千代田区霞ヶ関3-2-2

文部科学省研究開発局地震・防災研究課

電話:03-6734-4137 FAX:03-6734-4139

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gjyutu/gjyutu6/index.htm