

( 1 ) 実施機関名：

京都大学防災研究所

( 2 ) 研究課題(または観測項目)名：

断層面および断層周辺の不均質性に基づく断層への応力集中過程の解明

( 3 ) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 2 ) 地震・火山噴火に至る準備過程

( 2-1 ) 地震準備過程

ウ．ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

( 4 ) その他関連する建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

( 3 ) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

( 3-2 ) 地震破壊過程と強震動

ア．断層面の不均質性と動的破壊特性

( 4 ) 地震発生・火山噴火素過程

イ．地殻・上部マントルの物性の環境依存性

( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

本研究課題は、次期計画中の「地震準備過程」に関する研究課題のひとつとして位置付けることができる。特に、建議中にある「内陸地震に関しては、地震発生層である上部地殻と下部地殻・最上部マントルの不均質とその変形の空間分布を把握し、ひずみ集中帯の形成・発達と地震発生に至る過程に関する定量的なモデルの構築を目指す」に沿った研究課題である。この研究課題の実施により、断層への応力集中を解明するための基礎的モデル構築に貢献する。

( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

平成 21～23 年は主に各地域での手法開発の期間とし、鳥根県東部から鳥取県西部地域において応力集中過程の解明のため、満点システムによる微小地震観測を開始し必要なデータを取得する。また、新しい応力逆解析手法の開発も合わせて開発する。長野県西部地震及び鳥取県西部地震の震源域における稠密地震観測データを用い、震源断層や破壊開始点、アスペリティの位置の推定手法の開発を行なう。また、鳥取県西部地域でこれまでに取得されたデータ及び補充観測によるデータをもとに更に深部までの比抵抗構造を求め地震断層周辺の不均質性の把握を行う。一方、山崎断層で、ひずみ計、臨時地震観測とハイドロフォンを使用した極微小地震の活動変化を解明するとともに、近畿地方北部のいくつかの活断層で地震波散乱解析による深部不均質構造の推定を行う。なお、山崎断層では断層の定常的な変位をモニターするため、断層をまたぐ伸縮計によるひずみ観測を実施する。また、平成 23 年からは上述の研究内容に加えて、花折断層・有馬高槻断層系、山崎断層系の地域をカバーする SAR データを入手し、他課題において開発される予定の InSAR 時系列解析を適用・拡張する。

平成 24～25 年は、平成 21～23 年の期間に実施した観測を必要に応じて継続するとともに、それまでに各地域で高度化されたそれぞれの手法をそれぞれ近畿地方中北部の断層（花折断層・有馬高槻断層系、山崎断層系）へ適用するとともに、地震波散乱解析により近畿地方北部の広い地域での地殻不均質構造の時空間分布特性の違いに着目して断層系への応力集中機構を解明するための特徴的な構造を抽出する。さらに、InSAR 時系列解析により地殻変動の詳細な時空間パターンをとらえ、花折断層・有馬高槻断層系、山崎断層系などでの応力集中機構のモデル化を図る。

（ 7 ）計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

満点システムを用いた稠密地震観測、および、跡津川および濃尾合同地震観測、能登半島地震合同余震観測、ひずみ集中帯における重点的調査観測等のプロジェクトによって得られた、内陸地震の断層への応力集中機構とひずみ集中帯の形成に関する成果は以下のように要約出来る。

(1) 長野県西部地震、能登半島地震の震源域や山陰地方の地震帯において、断層や地震帯の下部地殻への延長部のゆっくり滑りにより説明可能な、応力場の空間変化が推定された (Yukutake et al., 2010, Kawanishi et al., 2009, Kato et al., 2011)。

(2) 跡津川断層付近の下部地殻に低速度異常域および低比抵抗異常域が推定されているが (Nakajima et al., 2010, Yoshimura et al., 2009), GNSS による変動の解析結果から (Ohzono et al., 2011), 異常域の端に、幅の狭い断層帯が存在し、そこに変形が局所化していると考えられる。

(3) 能登半島地震の余震域の中央部直下に見出された低速度異常および低比抵抗異常 (Kato et al., 2008, Yoshimura et al., 2008) は、その拡がり余震域に比べて小さいことが特徴であるが、上記の跡津川断層周辺の下部地殻内の異常域は大規模なものであり、断層直下だけでなくその両端部直下を含めて Weak Zone となっている (Nakajima et al., 2008; Yoshimura et al., 2009)。下部地殻の不均質構造が個々の断層を超えて広がっている場合にひずみ集中帯が形成されると考えられる。

(4) 琵琶湖西岸地域においてイメージングされた S 波の反射面 (青木・他, 2013) の端付近にモホ面の段差が推定されたが、琵琶湖西岸断層帯が高角で下部地殻まで伸びていると仮定すると解釈可能である (ひずみ集中帯プロジェクトによる)。

(5) 新潟-神戸ひずみ集中帯に属する堆積盆では、短縮ひずみ速度が大きいにも関わらず、大規模な沈降が起こっており、断層の上盤側が海水準下にあるものもある (飯尾, 2009, 西村・他, 2012)。

これらの知見を総合し、新潟-神戸ひずみ集中帯の南西端に位置し、花折断層・有馬高槻断層系など活断層が集中している近畿地方中北部において、ひずみ集中機構および断層への応力集中機構の解明のため、定量的な物理モデルを構築した。図 1 に、近畿地方の活断層の分布とモデル化した断層を示す。当地域には多数の活断層が知られているが、その中から主要なものとして図に示す 10 個を選び、図 2 に示すように、単純な平面断層で近似して、有限要素モデルを構築した。モデル化においては上記の知見から、下部地殻において変形は断層帯に局所化していること、上部地殻の断層は高角で下部地殻への延長部を持ち、それはモホ面まで直線的に伸びていること、新潟-神戸ひずみ集中帯においては下部地殻も含めて断層帯が水平方向に連続していることを考慮した。地殻は弾性体、マントルは粘弾性体と仮定し、各断層は幅 1km のガウジゾーン (上部地殻) と延性せん断帯 (下部地殻) とした。南北および東側の側面をローラー境界 (境界に鉛直な変位を拘束) とし、西側の面に変位 (1km) を与えた。図 3 に、長期間の変形の結果を示す。本来は、上部地殻で地震を定期的に発生させ、下部地殻・上部マントルの応答が安定した後の計算結果を示すべきであるが、簡単のため、断層帯は上部・下部地殻とも粘弾性体と仮定して、十分長い時間が経過し、断層帯及びマントルで応力緩和が起こった後の上下変動を示している。琵琶湖、大阪湾や奈良盆地で沈降、その周辺で隆起しており、堀川 (2003) による基盤構造とも調和的である。断層の上下変位は、例えば、琵琶湖西岸断層帯において約 600m となっている。この地域において年間 1cm 程度の東西短縮レートであるとする、1km の変位は 10 万年分に相当し、上下変位速度は 0.6cm/年となる。また、大阪湾の周辺では、中心に近い断層ほど断層の上盤側も低い位置にあり、飯尾 (2009) の指摘した現象を再現している。また、当然ながら、琵琶湖から大阪湾にかけてひずみが集中しているが、断層端が他の断層に連続していない、三峠や有馬高槻断層帯

の西端付近では、変形は非常に小さくなっている。断面を見ると、上町断層や生駒断層の直下においてマントルで下向きの変位が、六甲断層の西側で上向きの変位が起こっており、堆積盆地の沈降には、断層スケールを越えたマントルの流動が関与している可能性を示唆している。また、この図では見えないが、沈降域は大阪湾から琵琶湖の方へ連続している。さらに、上部地殻の断層を弾性体とすることにより応力集中機構をモデル化した。走向が南北に近い断層帯周辺においては逆断層的な、走向が北西-南東あるいは北東-南東に近い断層帯周辺では、横ずれ型の応力集中が発生することが分かった。地震活動の推移に関してもその詳細をモニターするため、微小地震活動が活発な山崎断層において、臨時地震観測点3点による観測を追加し、微小地震の高精度の震源分布および発震機構を求めてきた。山崎断層周辺のやや長期的な地震活動について調べるため、M4以上の地震に着目すると、1984年以降、20年近く発生がなく静穏化していたこと、最近の小さな地震の活動は、2005年初頭から南東側で活発化していることがわかった。より小さな地震の発生状況と断層の状態(地震活動)の相関について調べるためのハイドロフォン観測からは、1日あたり1~20個の微小イベントが検出される場合があることがわかった。断層の定常的な変位をモニターするため、断層をまたぐ伸縮計によるひずみ観測を継続した。なお、東北地方太平洋沖地震後、山崎断層周辺では明瞭な地震活動の変化はみられなかった。

また、本研究課題では、活断層周辺での応力集中の様子を空間的にモニターするための手法開発の基礎的な研究として、琵琶湖西岸地域や山崎断層周辺で、ALOS衛星PALSAR画像を用いてInSAR時系列解析を行った。以下に示す例は、山崎断層周辺の例で、2006年12月28日から2010年8月23日の3年8か月の期間に南行軌道から撮像された10枚のSAR画像を用いたものである。InSAR時系列解析では、まず干渉性がよいと考えられる垂直基線長1000m以下のペアで干渉画像を計算し、さらに目視で干渉性が悪いものを取り除いたあとで、最小二乗法で変動時系列を求めた。また、干渉画像には電離圏の電子密度擾乱等による長波長ノイズが認められたため、変動時系列を解く際、長波長ノイズを一次曲面で近似して取り除いた。

得られた視線方向(東上方向)の平均速度(図4)には、大きさが数mm/year程度の空間的に相関を持つゆらぎが認められるが、これは主に対流圏のマイクロ波伝播遅延による見かけ上のものであると考えられる。また、山崎断層帯周辺に断層運動あるいは断層の固着に起因する変形があるならば、断層帯を挟んだ相対変位があるはずであるが、このような傾向は見られず、これは山崎断層周囲のひずみレートがかなり小さい(1mm/year以下)ことを示唆している。なお、解析範囲の山崎断層帯主部は左横ずれが卓越することが知られているが、これは北側が南側に対して遠ざかる(図では北が寒色系、南が暖色系になる)ことに対応する。InSAR解析により明らかになった小さなひずみレートは、過去の三角測量やGPS測量の結果と整合的である。

(8)平成25年度の成果に関連の深いもので、平成25年度に公表された主な成果物(論文・報告書等):  
京都大学防災研究所地震予知研究センター、山崎断層の地震(2013年11月2日、Mj=4.0)について、  
第202回地震予知連絡会資料、2014年2月17日。

(9)実施機関の参加者氏名または部署等名:

担当者:大志万直人

参加者:飯尾能久、片尾浩、澁谷拓郎、西上欽也、加納靖之、James MORI、吉村令慧、徐培亮、橋本学、福島洋、中尾節郎、西村和浩、他:計約14名

他機関との共同研究の有無:有

鳥取大学、神戸大学、高知大学との共同研究(参加人数 約4名)

(10)公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名:京都大学 防災研究所 地震予知研究センター

電話：  
e-mail：  
URL：<http://www.rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

(11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：大志万直人  
所属：京都大学防災研究所 地震防災研究部門

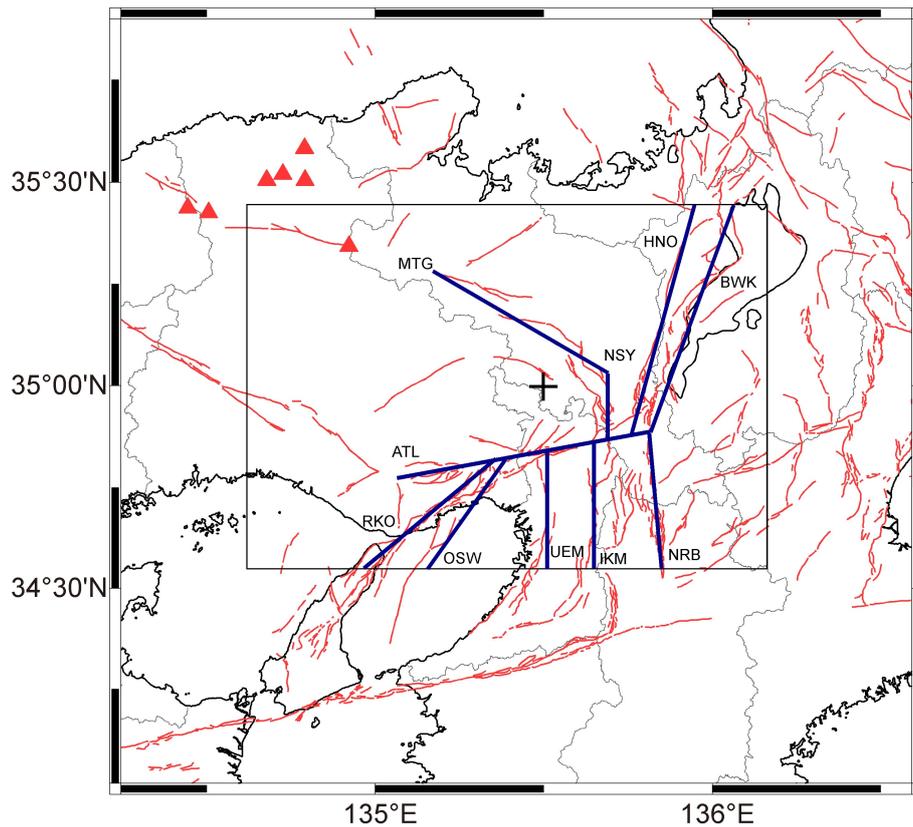


図1：近畿地方の活断層の分布(赤)とモデル化した断層(青)

黒四角が有限要素モデルを作成した領域(140km × 100km)。BWK:琵琶湖西岸，HNO:花折，NSY:西山，MTG:三峠，ATL:有馬高槻，NRB:奈良盆地東縁，IKM:生駒，UEM:上町，OSW:大阪湾，RKO:六甲淡路の各断層帯。産総研地下構造可視化システムにより作成した。

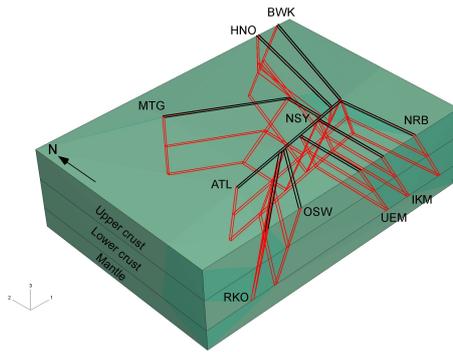


図 2：有限要素モデル

黒：断層帯の地表トレース．赤：断層帯の地下形状．断層の傾斜角は，BWK, NSY, NRB, IKM, UEM, OSW が 60 度，ATL, RKO が 80 度，HNO, MTG が 90 度．モデルの大きさは，東西 140km，南北 100km，鉛直 90km である．上部・下部地殻，マンツルの厚さは，それぞれ 15km, 15km, 60km とした．この図には深さ 40km 以深は図示されていない．

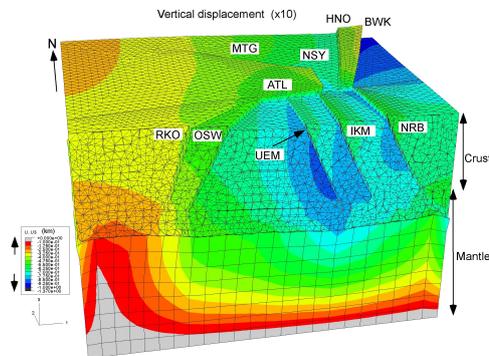


図 3：長期間の変形の結果

西側の側面全体に 1km の変位を与えた (1cm/年の短縮速度で 10 万年分に相当)．コンターは上下変位で赤いほど相対的に隆起，青いほど相対的に沈降となっている (赤と青の差は約 900m)．変形は 10 倍に拡大して表示されている．黒細線はメッシュで，深さ 40km 以浅は 4 面体，40km 以深は 6 面体とした．

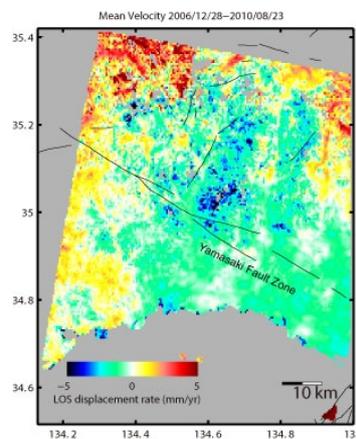


図 4：山崎断層周辺での InSAR 時系列解析により得られた視線方向 (東上方向) の平均速度

InSAR 時系列解析には，2006 年 12 月 28 日から 2010 年 8 月 23 日の 3 年 8 ヶ月の期間に南行軌道から撮像された 10 枚の PALSAR 画像を用いたものである．