

- ( 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：  
近畿地方北部における地殻活動異常と地震先行現象の関心の解明

- ( 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  
( 3 ) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程  
( 3-1 ) 地震発生先行過程  
イ．先行現象の発生機構の解明

- ( 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  
( 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

- ( 5 ) 本課題の 5 か年の到達目標：

既往の研究により、近畿地方北部の地殻活動には、地震発生帯周辺に存在する流体が大きく関与していると予想される。地震学的な 3 次元速度構造・反射・散乱解析等に加え、電磁気学的な比抵抗構造解析によって地下流体の分布とその挙動を明らかにする。また、微小地震の発震機構、GPS・SAR の解析により詳細な応力場とその時間変化を把握する。それらの結果と実際に観測されている微小地震活動や地殻変動に見られる変化との相関関係の解析から、当該地域における地殻活動変化をもたらすメカニズムの解明をめざす。異常地殻活動のみならず、本研究により丹波山地における定常的な地震活動の原因、すなわち地震活動の地域性は何によるものかといった長年の疑問に対しても一定の答えが得られるものと期待される。同時に、間隙水圧測定等により地殻応力をモニターする方法の確立をめざす。本計画で得られる知見は、近畿地方内陸部の地殻活動の基本的な理解だけでなく、南海トラフ巨大地震の発生予測や関連する内陸地震活動の予測研究にも重要であると考えられる。

- ( 6 ) 本課題の 5 か年計画の概要：

[平成 21 年度]

- ・近畿地方中北部において次世代型地震・火山観測システムを用いる 10 点程度の観測点を選定し、観測に着手する。これを定常観測網や別途実施されている臨時観測のデータと統合し解析する体制を構築する。
- ・これまで蓄積された地震データ及び稠密観測データを用いた反射波・散乱波解析により、近畿地方北部における地殻内の詳細な不均質構造の推定を行う。
- ・近畿地方北部山地において多点の MT 観測を行う。
- ・地殻変動連続観測によるひずみ変化のモニターと、過去とくに兵庫県南部地震前後の地殻変動データの検討。

- ・地殻変動連続観測点（逢坂山，阿武山，屯鶴峯）におけるひずみと地下水（水位，湧水量）の観測値を比較対照し，地殻ひずみの観測値への地下水変化の影響の大きさを見積る．
- ・神岡鉱山での間隙水圧測定を継続する。流量モニターのデータ取得を行う。

[平成 22 年度]

- ・次世代型地震・火山観測システムによる臨時観測点を約 30 か所追加設置し観測を継続する。発震機構、反射・散乱構造の解析を行う。
- ・比抵抗観測（広帯域 MT、長周期 MT）及び比抵抗構造の推定を行う。
- ・1995 年兵庫県南部地震に至る地震・地殻変動データの収集を継続。データの再解析に着手する。
- ・神岡鉱山での間隙水圧測定・流量モニターを継続する。近畿の過去の地殻変動・地下水観測のデータ整理を行う。

[平成 23 年度]

- ・次世代型地震・火山観測システムによる地震観測・解析を継続する。トモグラフィ解析に着手する。
- ・比抵抗の補充調査及び比抵抗モデルの高度化。3 次元的比抵抗構造を把握する。
- ・1995 年兵庫県南部地震前後の地殻活動変化のモデリング。
- ・神岡鉱山での間隙水圧測定・流量モニターを継続する。神岡鉱山・近畿の地殻変動・地下水観測の間隙弾性論による先行現象抽出手法の開発を行う。

[平成 24 年度]

- ・次世代型地震・火山観測システムによる地震観測・解析を継続する。レシーバ関数解析に着手する。地震関係解析結果をまとめる。
- ・地震・電磁気等多項目の観測結果の統合解析。
- ・神岡鉱山での間隙水圧測定・流量モニターを継続する。近畿地方で間隙水圧観測を開始する。神岡鉱山・近畿の地殻変動・地下水観測の間隙弾性論による先行現象抽出手法の開発を継続する。

[平成 25 年度]

- ・次世代型地震・火山観測システムによる地震観測・解析を継続する。
- ・現在進行中並びに 1995 年兵庫県南部地震前後の地殻活動変化の統一的なモデル化
- ・近畿地方神岡鉱山での間隙水圧測定・流量モニターを継続する。先行現象抽出手法のリアルタイム化を進める。

#### （ 7 ）計画期間中（平成 21 年度～25 年度）の成果の概要：

大阪府北部から京都府中部にかけての丹波山地，さらに琵琶湖西岸に至る地域は定常的に微小地震活動が活発である．地震発生レートは中期的には極めて安定しているが，過去に活動度が大きく変化した例が知られており，応力場に敏感に反応する側面もあると考えられている．また近年においても，2003 年以降地震活動の低下が指摘されている．特定の活断層に沿わず面的広がりを持つ定常的な地震活動は日本列島においてもあまり類例のない特異なものと考えられるが，地震活動の原因自体はほとんど分かっていない．これまでの多くの研究により示唆されている丹波山地下の地下流体の存在が，定常活動の成因とその活動変化に大きく影響しているものと考えられるが，その解明のためには詳細な地下構造に関する情報が必要である．本研究では，従来の観測密度をはるかに凌駕する多項目の観測を実施することにより，高解像度で地下構造を把握し，この地域の地震活動の原因およびその時間変化の要因をさぐることを目的としている．

#### 【稠密地震観測】

基盤観測網の整備により，平均約 20km 間隔で地震観測点が全国をカバーするようになったが，内陸地震の原因究明のため十分な解像度を得るためには，さらに稠密な臨時地震観測を行う必要がある．平成 20 年度末より文科省の「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」の一環として，琵琶湖西岸から丹波山地にかけて 45 点の臨時観測点を設け，さらに平成 21 年度から本研究により 38 点の臨時観測点を増設し観測を継続している．観測網中央部における観測点間隔は 5km 以下となっている．観測機材としては「次世代型の地震・火山観測システム」（通称満点システム）を用いてオフラインで行って

おり、回収された地震波形連続データは既存の定常観測点データと統合してデータベース化されている。稠密地震観測により得られた成果を以下に挙げる。

#### ・発震機構および応力場

地震の発震機構は、地殻応力を知るための貴重な情報であるが、定常観測網だけでは、 $M_{JMA}2.0$  程度より小さいものでは発震機構の推定は困難であった。本研究の稠密観測網を用いると、丹波山地において  $M_{JMA}0.5$  クラスの地震でも P 波初動極性による発震機構推定が可能である。 $M_{JMA}0.5$  はこの地域での気象庁一元化震源カタログにおける検知能力の下限に一致し、それより大きな地震については、ほぼもれなく精度のよい発震機構を求めることができる。これにより短期間でも大量のメカニズムデータを得ることができるようになり、解析の空間・時間分解能が大幅に向上した。近畿地方北部に 5km 間隔のグリッドを設け各格子点を中心とした 10km 四方の小領域において応力テンソルインバージョンを行い、近畿地方北部の応力場の時空間変化を調べた。先行研究とは異なり 1 年程度の短い期間でも十分な地震数があるため長期の時間変化の可能性を排除でき、かつデクラスタ操作により地震活動の偏りによるバイアスを排除したデータを用いた。近畿地方北部全域で  $\sigma_1$  は東西方向であり、琵琶湖西岸地域は一貫して逆断層タイプの応力場だったのに対し、丹波山地では、多くの小領域で  $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  が分離できない推定結果となった。その境界は必ずしも活断層に沿った直線的なものではなく複雑な形状であることがわかった。丹波山地では  $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  がほぼ同じ応力場であり、逆断層、横ずれ断層、その中間タイプ地震がほぼまんべんなく起きていることが分かった。これらは完全にランダムに分布するのではなく、局所的なクラックの特定方向への配向があり、それが 1km 程度のスケールで変化している状態にあることが考えられる。

#### ・地殻内反射面のイメージング

北摂・丹波地域の微小地震では、初動の 9~12 秒後に顕著な S 波の後続波が観測されることが多く、それらは深さ約 20 km ~ 30 km の間に存在する北傾斜の反射面によってもたらされるものであることが知られている（片尾，1994）。本研究による稠密地震観測のデータを用い、同地域に東西と南北の測線をそれぞれ 11 ずつ設定して反射法解析を行い、反射面の 3 次元的なイメージングを行った。その結果深さが約 25 km ~ 30 km にほぼ水平に反射面が存在すること、またこの反射面の存在範囲は丹波地域の微小地震発生域と概ね一致し、琵琶湖西岸地域までは及んでいないことが明らかとなった。平成 25 年度には、より定量的に反射面の広がりやを推定するために、領域を小さなブロックに区切り、各々のブロックを通過するトレースの振幅をスタックし、その平均振幅をとる方法を用い、下部地殻における反射面のイメージングに成功した（図 1）

#### ・レシーバファンクション解析による深部構造

遠地震を用いたレシーバファンクション解析では、モホ面深度の詳細なマッピングを行い、琵琶湖南部地域においてモホ面が浅くなっていることがわかった。また、丹波山地の下へフィリピン海プレートが東方から急角度で沈み込んでいる様子を捉えた。これらの結果は、従来は定常観測点の密度が稀薄なためはっきりしたイメージを得られなかったものを、本研究の高密度観測によって明確な「像」を結ばせることに成功したものである。

#### ・高解像度 3 次元地震波速度構造

平成 25 年度には、丹波地域に 2008 年以降展開している 83 点のオフライン臨時観測点の観測データを基に従来よりも高解像度の 3 次元地震波速度構造を推定した。トモグラフィーには Rawlinson et al., (2006) による FMTOMO を用いた。これまで近畿地方北部におけるトモグラフィーによる地震波速度構造研究では、長期にわたる定常観測データを用いても、グリッド間隔は水平方向 0.2 度が限界であった。一方、本研究では 1 年間分のデータ（地震数 4714）であってもグリッド間隔 0.1 度以下の十分な解像度が得られることがわかった。P 波および S 波速度構造には、おおむね丹波地域の微小地震が活発な領域に重なるように、かつ地震発生層の下端に沿うように低速度異常が見られた。地震発生層上部は比較的高速度で、浅部では琵琶湖西岸から丹波地域や大阪平野にかけて帯状に低速度異常が広がっているが、P 波と S 波は速度異常の領域は必ずしも一致しない。また、琵琶湖西岸地域の深さ 3km 以浅には、帯状に広がる高  $V_p/V_s$  かつ低 S 波速度域が存在する。地震発生層下部における低速度は、地

殻内流体の局所的な分布が地震活動にもその影響を与えていることを強く示唆している。また浅部の帯状の低速度分布は、従来の疎らな観測点分布の解析では見られなかったもので、活断層や表層地質に対応している可能性がある（図2）

#### 【比抵抗構造】

丹波山地における定常的な微小地震活動の成因に構造視点から迫るために、地震波速度構造などの他の物理量と比較することを目指して、本研究では比抵抗構造の3次元マッピングを課題として挙げている。京都府北部・琵琶湖西岸域・福井県南部の40km四方の領域において、面的な広帯域MT観測網を設定している。平成21年度は太陽活動度が低いことが予想されていたため、研究対象領域において比較的ノイズレベルの低いと思われる、北部地域において20点の広帯域MT観測を実施した。研究領域は、都市部近郊に位置し、直流電車等からの人工ノイズの影響が大きい。平成21年度は想定通りMTの信号となる磁気擾乱が低調でかつ前述のノイズの影響が大きかったが、花折断層から以西においては、周期10秒程度までのMT応答が得られた。得られたデータから、2本の測線を設定し、予察的に2次元解析を行ったところ、花折断層を境界に顕著な比抵抗構造コントラストが検出された。この結果は、既存のMT調査（花折断層中部を通る測線）の結果と調和的で、この地域に共通の特徴を示すものと考えられる。平成25年度には、調査対象領域の南部（高ノイズ域）を中心に、12点において、広帯域MT観測を実施した。これまで推定した2次元比抵抗構造に加えて、新規に1測線の2次元逆解析を実施した。得られたイメージは、花折断層を境界に東部で高比抵抗、西部で低比抵抗という、これまでの特徴と調和的な結果であった。（図3）加えて、京北地域の地震活動の高い領域では、その震源分布と低比抵抗領域に明瞭な対応関係が見られた。次年度以降引き続き広帯域MT観測を継続し、3次元解析を試みる予定である。

#### 【間隙水圧測定】

応力・ひずみ場をより直接測定する手段として間隙水圧に注目し、神岡鉱山坑道内の被圧ボーリング孔に水圧計を設置して観測した。間隙水圧はきわめて鋭敏な体積ひずみ計としての挙動を示し、長期のトレンドが伸縮計等の地殻変動観測と調和的であるばかりでなく、中越沖地震やスマトラ地震など各地の地震波形を広帯域高ダイナミックレンジで捉えることも可能であることがわかった。神岡鉱山におけるレーザー伸縮計、超伝導重力計のデータを収集し、間隙水圧の自然のじょう乱（大気圧変化や地球潮汐による岩盤の変形）に対する応答を調べることで、断層破砕帯の透水性の推定を行なった。水理拡散率の推定値は $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ であった。東北地方太平洋沖地震では、これまでの大地震と同じように間隙水圧による地震記録が収録されたほか、地震によるコサイスミックなひずみ変化による周辺の間隙水圧変化もみられた。ボアホールひずみ計では、コサイスミックなひずみ変化、ひずみ地震動、余効変動が明瞭に記録された。また、余効変動の変動源の移動をとらえた。平成25年度は、近畿地方での既存の間隙水圧・地下水位観測のデータの解析を実施し、神岡鉱山・近畿の地殻変動・地下水観測の解析から、特に遠方で発生した地震による観測点近傍の透水性変化について検討した。近畿地方の地殻変動連続観測のデータについて、1940年代以降の紙記録の解析可能性を検討した。

#### 【丹波山地の地殻活動と構造の特徴】

これまでに「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」および本研究で明らかになってきたことを整理すると以下ようになる。発震機構/応力場は、琵琶湖西岸地域は一貫して東西圧縮の逆断層的な応力場であるが、花折断層より西方の丹波地域では東西圧縮ながら $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ が区別しにくい応力場であることが示された（青木裕晃,2012）。下部地殻に存在するS波反射面は北摂・丹波地域では顕著であるが、琵琶湖西岸地域には分布していないことがわかった（青木将,2013）。レシーバファンクション解析では、丹波地域と琵琶湖西岸ではモホ面の形状に違いがあり、その下のフィリピン海プレートが急激に西下がりに傾斜している様子が捉えられた（佐々木,2011）。電気比抵抗観測によると、花折断層を境に西側の丹波山地では地殻浅部まで低比抵抗であるのに対し、琵琶湖側は比較的高比抵抗であることが示されている（吉村ほか,2005）。微小地震活動は丹波側で定常的に活発であるのに対し、近江盆地ではほとんど微小地震は発生しない。地震発生層の深さは花折断層付近を境に東西で段差がある。高解像度の3次元地震波速度構造解析でも微小地震発生層の下部に沿った低速度層が認められ

る．このように北摂・丹波地域と琵琶湖西岸両地域は多くの対照的な特徴を示すことがわかる．これらの特徴の中には，本研究に先行する研究でも個別に知られていたものがあるが，稠密地震観測に代表される本研究の高解像度の観測によって，その分布範囲や，両地域での特徴の差異が従来より格段に鮮明に認識できるようになったものである．これらの特徴の違いは地殻内の流体分布の違いによる可能性が高く，さらに地殻下のフィリピン海プレートの形状が地殻内流体の発生や地殻の力学的状態に大きな影響を与えていると考えられる（片尾，2013）．

- ( 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）：  
青木 将・飯尾能久・片尾 浩・三浦 勉・米田 格・澤田麻沙代（2013）：近畿地方北部における地殻内 S 波反射構造の推定（2），日本地震学会 2013 年度秋季大会，B21-05．  
片尾 浩（2013）：稠密地震観測による近畿地方北部の地震活動と地殻構造，京都大学防災研究所年報，56, B, 167-172.  
海谷絵未・片尾浩・澁谷拓郎・飯尾能久・三浦勉（2013）：近畿地方北部における地震波速度構造と地震活動，日本地球惑星科学連合 2013 年大会，S-SS26-P12．  
海谷絵未・片尾浩・澁谷拓郎・飯尾能久・三浦勉（2013）：近畿地方北部における地震活動と地震波速度構造，日本地震学会 2013 年度秋季大会，P1-32．  
木下千裕・加納靖之・伊藤久男（2013）：東北地方太平洋沖地震の前後で観測された間隙水圧とその潮汐・大気圧応答の時間変化，日本地球惑星科学連合 2013 年大会，SSS29-P10.  
木下千裕・加納靖之・伊藤久男（2013）：東北地方太平洋沖地震の前後で観測された間隙水圧とその潮汐・大気圧応答の時間変化，日本地球惑星科学連合 2013 年大会，SSS29-P10.  
木下千裕・加納靖之・伊藤久男（2013）：間隙水圧観測から検出された東北地震に伴う透水性変化，日本地震学会 2013 年度秋季大会，D31-04.

- ( 9 )実施機関の参加者氏名または部署等名：

担当者：片尾浩

参加者：飯尾能久、澁谷拓郎、西上欽也、大志万直人、吉村令慧、大谷文夫、森井互、加納靖之、福島洋、柳谷俊ほか（京都大学防災研究所）約 1 2 名

他機関との共同研究の有無：無

- ( 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：0774-38-4194

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：片尾浩

所属：京都大学防災研究所

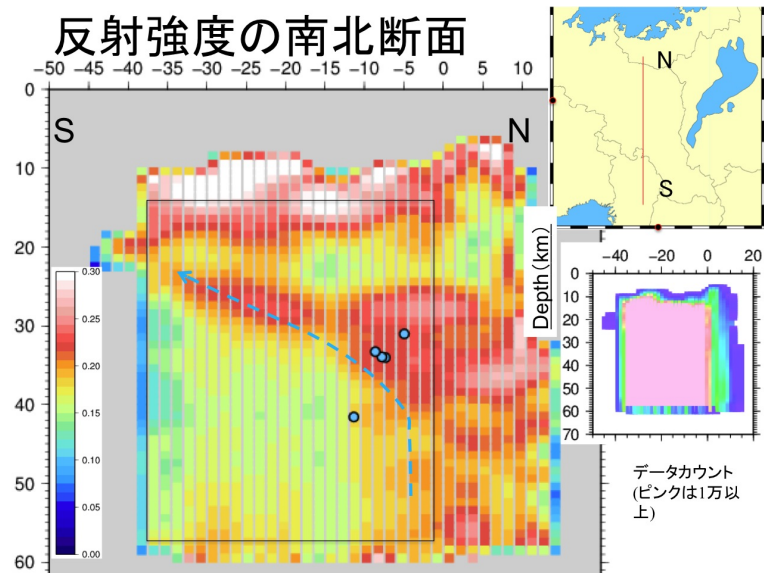


図 1 : 近畿地方北部における地殻内反射面のイメージング ( 青木 , 2013 )

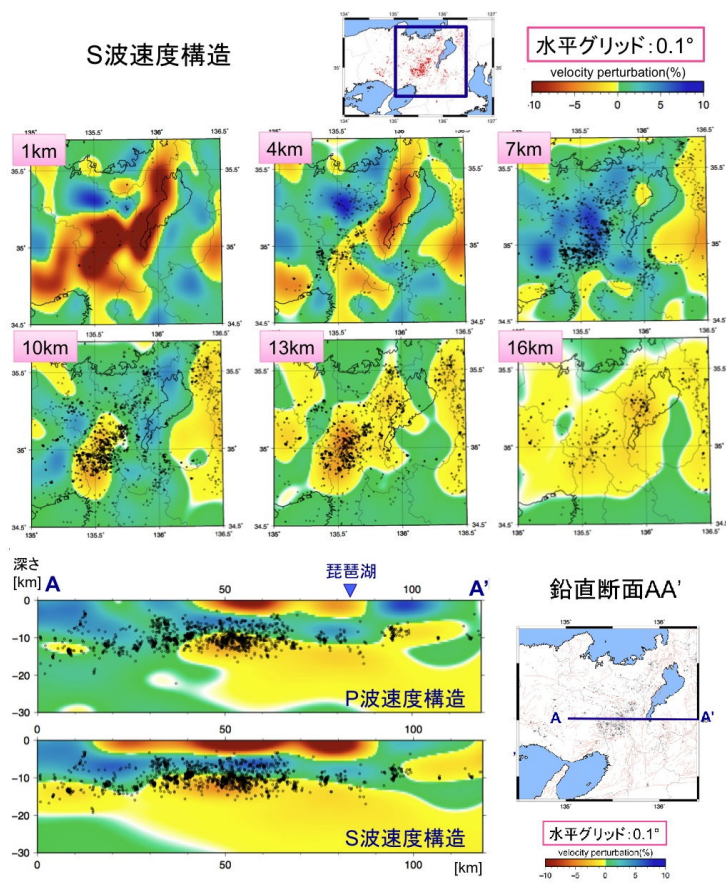


図 2 : 近畿地方北部の 3 次元地震波速度構造 ( 海谷 , 2014 )

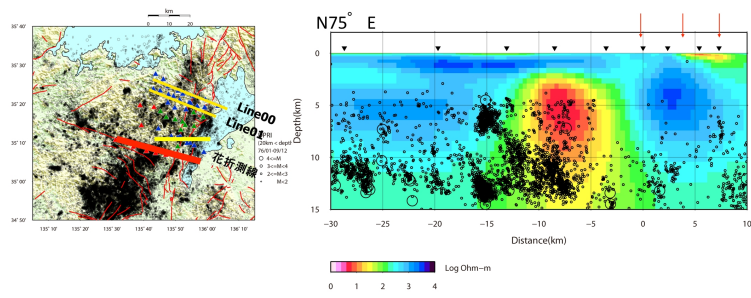


図 3 : 2013 年度に行われた比抵抗構造探査測線 ( 太赤線 ) と 2 次元逆解析結果 ( 吉村ほか 2014 )