

3. 4. 2 自然地震・制御震源を用いた内陸活断層の深部モデルと地殻内三次元構造モデルの構築に関する研究

3. 4. 2. 1 活断層の深部形状モデルに関する研究

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：活断層の深部構造モデルに関する研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
京都大学防災研究所	助教授	西上 欽也	nishigam@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

(c) 業務の目的

活断層の深部構造、すなわち断層面の形状、連続／不連続性、および地震破壊に関連する構造特性(破壊開始点、主破壊域)等を既存地震観測網により蓄積された波形データベースをもとに推定し、強震動予測の高精度化のための断層モデル構築に資することを目的とする。

(d) 5ヵ年の年次実施計画

- 1) 平成14年度：解析手法の検討、データ前処理、処理・解析プログラムの準備等を実施した。
- 2) 平成15年度：山崎断層、跡津川断層、等における断層深部構造の解析、および断層トラップ波の三次元差分シミュレーション手法の開発を行った。
- 3) 平成16年度：跡津川断層、野島断層、等における断層深部構造の解析。断層トラップ波、直達波走時パターンのモデリング高度化。これらに基づき、断層深部構造モデルを作成する作業仮説の提示。
- 4) 平成17年度：地震波散乱係数の分布に基づいて断層深部構造モデルを作成するための作業仮説の検証。近畿圏中央部の活断層地域における不均質構造(序報解)の推定。
- 5) 平成18年度：近畿圏中央部の主な活断層(琵琶湖西岸断層帯、三方・花折断層帯、有馬高槻構造線)の深部構造モデルの作成。

(e) 平成18年度業務目的

平成17年度までに提示した活断層深部構造モデル作成のための作業仮説に基づいて、近畿圏中央部の主な活断層(琵琶湖西岸断層帯、三方・花折断層帯、有馬高槻構造線)における深部構造モデルの作成を行う。

(2) 平成18年度の成果

活断層の深部形状モデルに関する研究

西上 欽也（京都大学防災研究所）

nishigam@eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

強震動予測の高精度化をはかるためには、地震破壊に関わる詳細な断層構造モデルの作成が必要である。本業務では、地震観測網により蓄積された波形データを用いて散乱波（コーダ波）のインバージョン解析を行い、近畿圏活断層の深部不均質構造（地震波散乱係数の三次元空間分布）を推定し、それらと他の地震学的情報に基づいて活断層の深部構造モデルの作成を行う。これまでに、本業務および従来の研究により行われた散乱波解析（サンアンドレアス断層系、2000年鳥取県西部地震の震源断層、山崎断層系、跡津川断層系、2004年新潟県中越地震の震源断層、等）の結果に基づいて、震源域における地震波散乱係数の分布特性と地震破壊に関わる断層深部構造を関係づける作業仮説を提示した。また、本業務の他の研究課題では、活断層に沿う地震分布、*b* 値、速度構造等の特性が調べられてきた（澁谷，17年度および本年度報告；大見，本年度報告）。18年度は、近畿地方中央部のいくつかの活断層に沿う散乱係数の分布を推定し、地震分布、*b* 値、速度構造の結果も合わせて、本業務の最終目的である、近畿地方中央部の主な活断層（琵琶湖西岸断層帯、三方・花折断層帯、有馬高槻構造線）の深部構造モデルを作成した。

(b) 業務の成果

1) はじめに

活断層の詳細な深部構造モデル、すなわち断層面の形状（地下深部における位置、傾斜、広がり）、連続／不連続性（分岐、セグメント構造）、および地震破壊に関連する構造特性（破壊開始点およびアスペリティの位置）を推定する地震学的手法の一つとして、散乱波のインバージョン解析が有効と考えられる。この方法では、近地地震のコーダ波を地殻・上部マントル内部の不均質構造による散乱波の集合と考えて、一次等方散乱モデルの仮定の下で、高密度観測網で収録されたデータを用いて地震波散乱係数の三次元分布を推定する（Nishigami, 1991¹⁾；Nishigami, 1997²⁾）。

これまで、サンアンドレアス断層系における解析により、断層に沿って散乱係数が相対的に大きいこと、断層のセグメント構造を推定できること、散乱係数が相対的に小さい領域（セグメント）と M6-7 クラス地震の震源域が対応すること、等が示された（Nishigami, 2000³⁾）。2000年鳥取県西部地震（Asano and Hasegawa, 2004⁴⁾）および2004年新潟県中越地震の震源域における解析により（Nishigami, 2006⁵⁾；西上, 2006⁶⁾）、本震断層面上のすべりの大きい領域（アスペリティ）は相対的に散乱係数の小さい領域に相当することが示された。2004年新潟県中越地震の解析では、本震および M5-6 クラスの余震の震源（破壊開始点）は相対的に散乱係数の大きい不均質領域の近傍に位置することも示された（Nishigami, 2006⁵⁾）。また、山崎断層系と跡津川断層系について、散乱係数の空間分布

と断層構造あるいは地震活動特性との対応が示された（西上, 15、16 年度報告）。以上のように、散乱波インバージョン解析は、高密度の観測網データに対して有効であり、散乱係数の分布特性から活断層の深部形状および地震破壊に関わる詳細な断層構造を推定可能であることが分かった。

本業務においては、活断層の深部構造モデルを作成する手順として、上述の地震波散乱係数に基づく作業仮説（17 年度報告）、および、地震活動特性、速度構造に基づく作業仮説（澁谷, 17 年度報告；大見, 本年度報告）を用いる。具体的には以下のとおりである。

- a) 活断層の深部形状：基本的には地震分布に基づいて、また、地震波散乱係数が相対的に大きい領域の空間分布も参照して、推定する。
- b) M7 クラス地震の主破壊域(アスペリティ)：活断層に沿う地震活動域の中で相対的に散乱係数が小さく、より均質と考えられる領域、および、地震活動度が低く、固着の程度がより強いと考えられる領域、および、地震波速度が相対的に速い領域を候補とする。
- c) M7 クラス地震の破壊開始点(震源)：活断層に沿う地震活動域の中で特に散乱係数の大きい不均質領域の近傍、および b 値が小さく応力集中していると考えられる領域を候補とする。

2) 近畿地方中央部における散乱係数の三次元分布の推定

近畿地方中央部における散乱波インバージョン解析を行った。解析領域（東西 260km、南北 240km、深さ 0-60km）を図 1 に示す。この中央部付近に分布する 50 観測点（京大防災研、防災科研 Hi-net、気象庁、産総研）、および 2003 年 1 月～12 月に発生した 52 個の地震 ($2.0 \leq M \leq 4.4$) を解析に用いた。合計 758 個の地震波形トレースに対して、7-15Hz のバンドパスフィルターをかけ、0.5 秒間隔でコーダ波エネルギーの揺らぎ（インバージョンに用いる観測量）を算出した。一次等方散乱モデルを適用するために、コーダ波の経過時間を発震時から 30 秒以内に限定した。インバージョンに際しては、解析領域を水平方向 10km、深さ方向 5km のブロック（7,488 個）に分割した。得られた結果を図 2 に示す。深さ 0-5km～25-30km における相対的な散乱係数の分布をプロットしたものであり、○は解析領域全体の平均よりも散乱係数が大きく、●は平均よりも小さいことを示す。解の resolution（行列対角成分）は、解析領域の中心部（おおむね次節で述べる 3 つの活断層を含む範囲）では 0.5 以上の値を持つ。

まず、近畿地方における特徴的な散乱構造として、図 2 の X-X' 測線（N10° E）に沿う鉛直断面を図 3（上）に示す。X-X' を中心に幅 20km の範囲をプロットした。この図より、有馬高槻構造線（ATL）の北側の深さ 20-30km の範囲に強い散乱体が分布していることが分かる。近畿地方中央部においては、有馬高槻構造線より北側（いわゆる丹波山地地域）で定常的な微小地震活動がきわめて活発である。また、これらの微小地震発生域の直下、深さ 20-25km 付近には、図 3（下）に示すように、北側に傾斜した S 波反射体が存在することが反射波の鏡像法解析により推定されている（京都大学防災研究所地震予知センター, 1993⁷⁾）。今回の散乱波解析による結果は、従来の反射波解析による後続波（S 波反射波）の解析結果とたいへん良く一致することが分かり、散乱波のインバージョン解析が信頼できることを示す。なお、地殻深部における S 波反射体の分布は地殻内流体の存在を示

唆し（例えば、片尾, 2005⁸⁾）、反射体直上の丹波山地地域の活発な地震発生にも大きく関わるものと考えられる。今後、さらに散乱波解析を進めて、この地域の地震発生特性の解明につなげる必要がある。

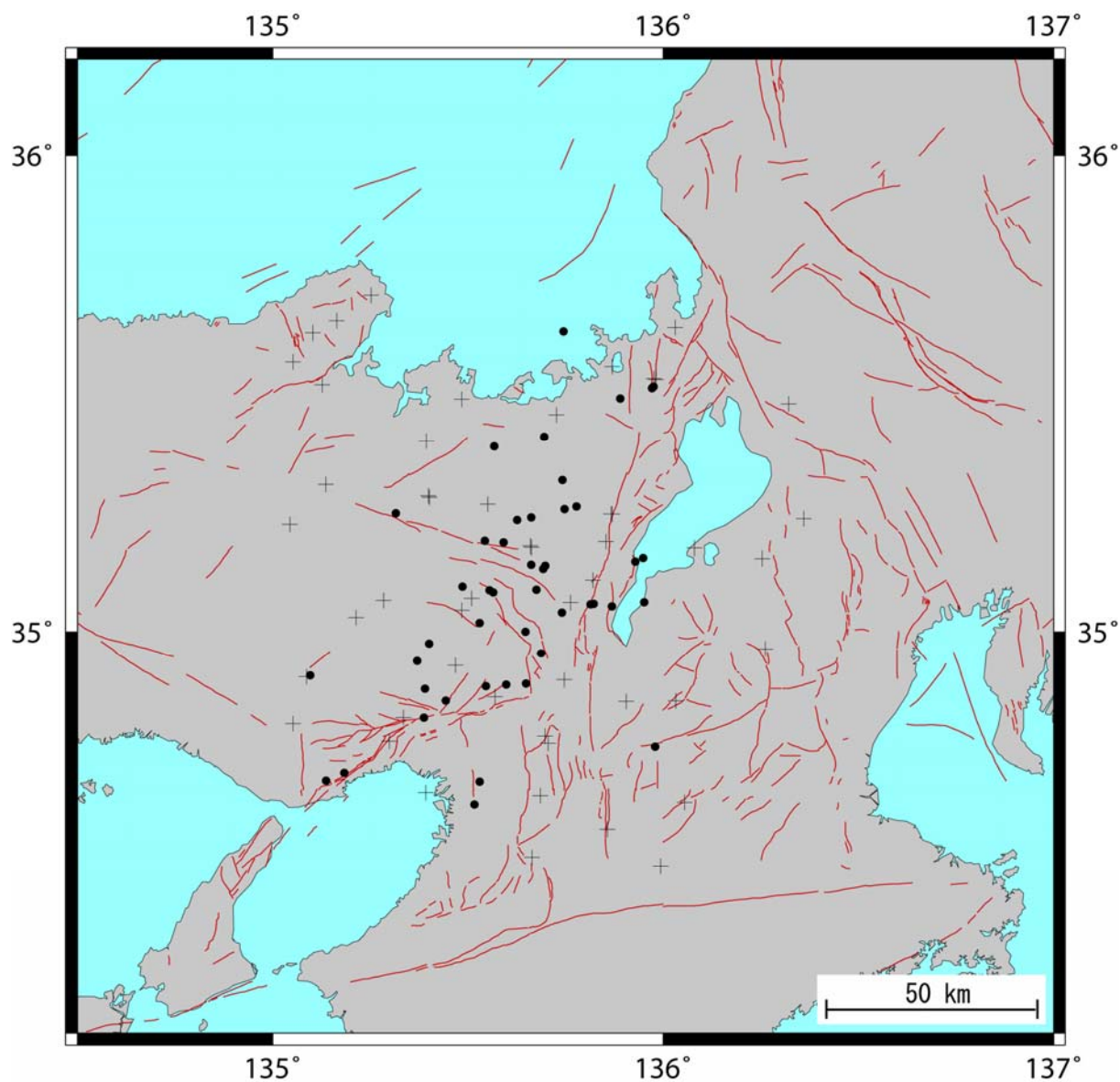


図 1 近畿地方中央部における散乱波インバージョン解析の領域、および解析に用いた地震（・）、観測点（+）の分布。

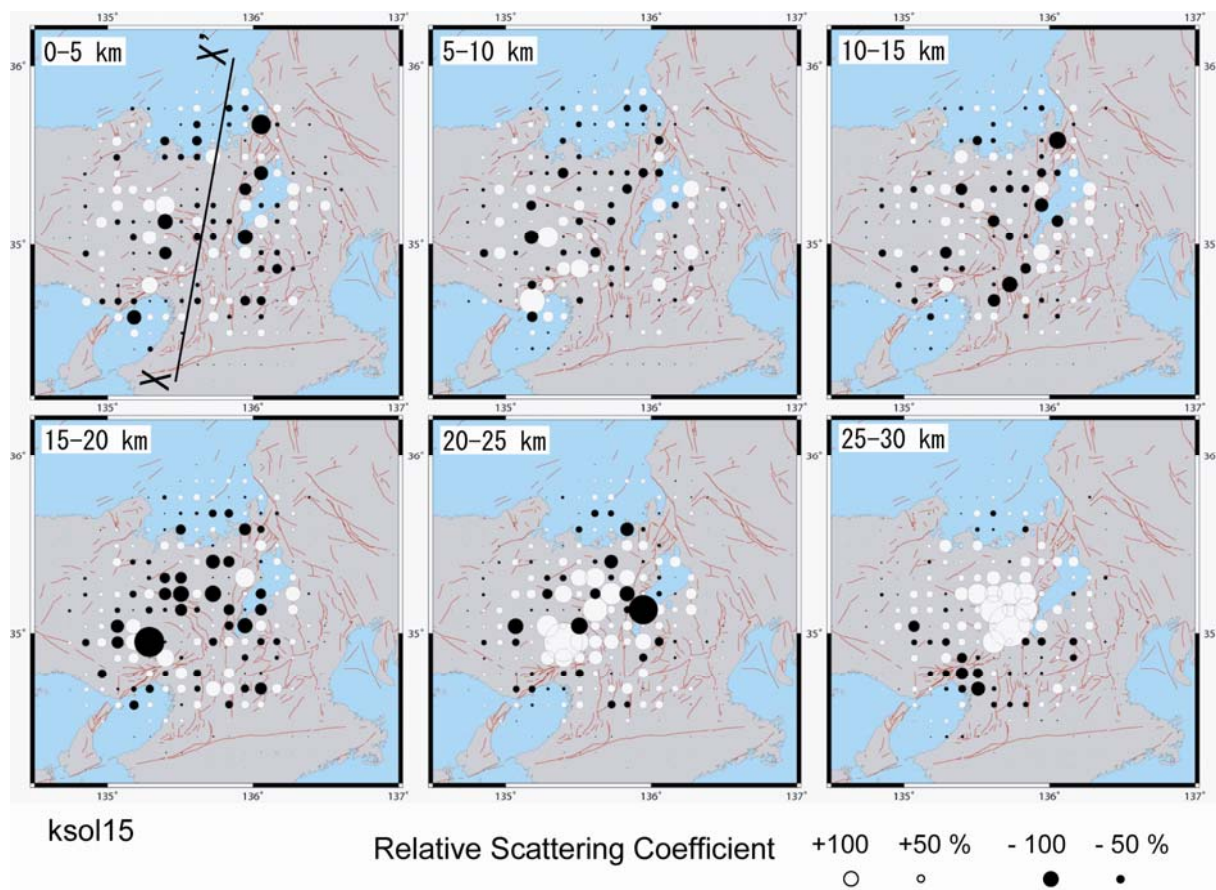


図 2 近畿地方中央部における散乱波インバージョン解析の結果。深さ 0-5km～25-30km における相対的な散乱係数の分布（解析領域全体の平均からの揺らぎ）を示し、○：散乱係数が平均より大きい、●：平均より小さい。X-X'に沿う鉛直断面を図 3 に示す。

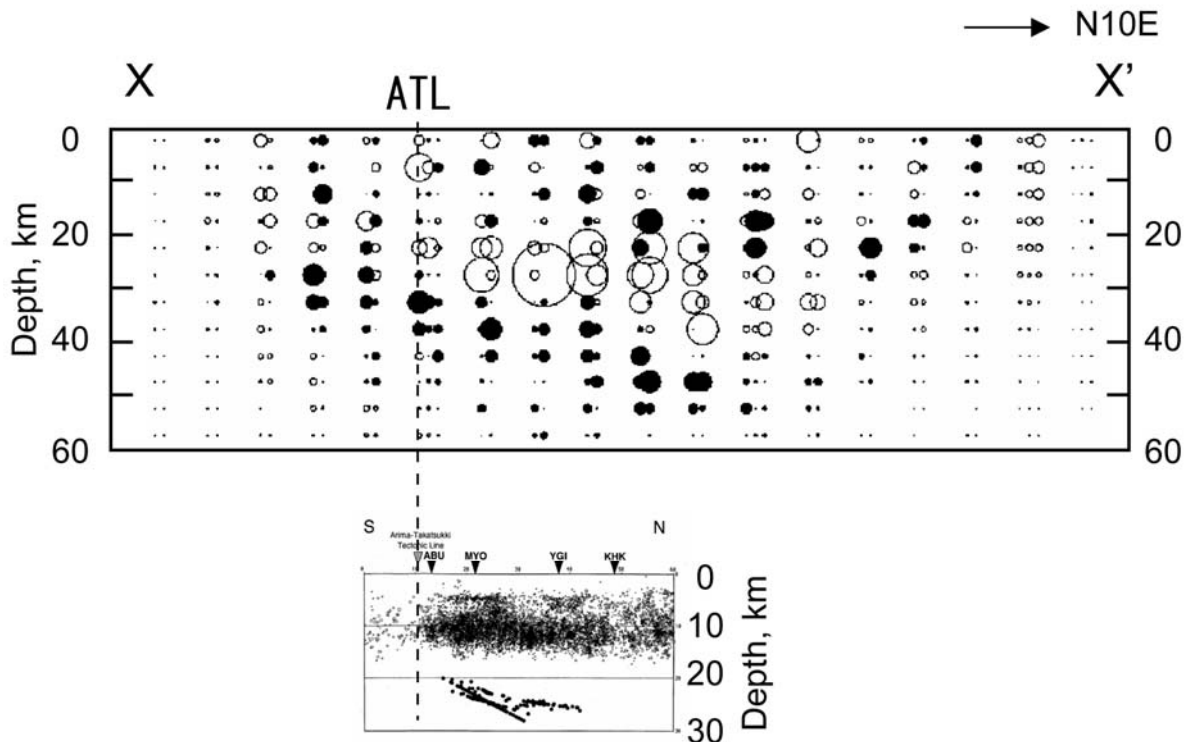


図 3 上：図 2 の X-X' 測線に投影した相対的な散乱係数の鉛直分布。○：散乱係数が平均より大きい、●：平均より小さい。下：有馬高槻構造線（ATL）の北側、丹波山地における活発な微小地震活動域、および、それらの直下に見いだされた S 波反射体の分布（京都大学防災研究所地震予知研究センター，1993⁷⁾）。

3) 近畿地方中央部の主な活断層の深部構造モデルの作成

得られた散乱係数の三次元分布（図 2）から、近畿地方中央部の主な活断層に沿う散乱係数の分布図を作成した（図 4～6）。同じ領域に対して作成された地震分布（澁谷，17 年度および本年度報告）、P 波速度分布（大見，本年度報告）とも比較検討し、上述の作業仮説に基づいて、断層の深部構造モデル（破壊開始点、アスペリティの候補位置）を作成した。なお、後で述べるように各断層深部における傾斜が不明であるので、鉛直な領域を切り出した。また、切り出した領域の幅は、散乱係数：6km、地震分布：8km（ただし、有馬高槻構造線のみ 4km）、速度分布：5km であり、多少異なるが、中心線（A-A'）は平均的な断層帯の位置として共通に取った。以下、個々の活断層のモデルについて説明する。

a) 琵琶湖西岸断層帯

琵琶湖西岸断層帯を構成する複数の断層を含むような直方体領域を切り出し、A-A' 測線に沿う、地震、P 波速度、および散乱係数の鉛直分布を図 4 に示す。地震の低活動域はすでに澁谷（17 年度報告）により指摘されている（図 4、上から 2 段目の赤丸領域）。図に示すように、この低活動領域の P 波速度は速いとは言えないものの、散乱係数は相対的に小さく、アスペリティの候補と考えられる。澁谷（17 年度報告）では指摘されていないが、

この低活動域の約 20km 北北東にも地震の少ない領域がある。この領域の散乱係数は相対的に小さく、アスペリティの候補と見なせるかも知れない。

破壊開始点の候補については、琵琶湖西岸断層帯周辺について推定された b 値の水平分布（澁谷, 17 年度報告）に基づき、 b 値の小さい領域 2 カ所が候補としてあげられる（図 4、最上段の青丸領域）。これらの領域では、散乱係数が相対的に大きい傾向があり、前述の作業仮説とも適合する（図 4、最下段の青丸）。

活断層の深部における位置、傾斜の推定は、断層構造モデル作成するうえでもっとも基本的、かつ重要な情報である。しかしながら、琵琶湖西岸断層帯に沿う地震分布は複雑であり（断層帯全体として、また、個々の断層としても面的な地震分布を示さない）、地震分布に基づく断層面の推定はかなり難しい（澁谷, 17 年度報告）。散乱係数による推定についても、さらに空間分解能を上げた解析が必要である。従って、現時点では、断層帯全体としてほぼ鉛直とみなすのが妥当と思われ、今後、さらに解析を進めることが必要である。

b) 三方・花折断層帯

三方・花折断層帯を含む直方体領域（A-A'測線）に沿う、地震、P 波速度、および散乱係数の鉛直分布を図 5 に示す。2 カ所の地震低活動域が澁谷（17 年度報告）により指摘されている（図 5、上から 2 段目の赤丸領域）。図に示すように、この領域の散乱係数は、いずれも相対的に小さい。P 波速度については高速度域とは見なせないが（特に、北北東側の低活動領域）、ここでは前 2 者の特性に基づいて、アスペリティの候補とした。

破壊開始点の候補については、三方・花折断層帯周辺について推定された b 値の水平分布（澁谷, 17 年度報告）に基づき、 b 値の小さい領域 3 カ所が候補としてあげられる（図 5、最上段の青丸領域）。これらの領域では、いずれも散乱係数が相対的に大きく、前述の作業仮説とも合致する（図 5、最下段の青丸）。

三方・花折断層帯の場合も、琵琶湖西岸断層帯と同様に、地震分布から断層の深部位置、傾斜を推定することは難しい。両断層帯の地震分布が近接した地域もあり、今後、地震分布以外の情報、特に、散乱係数分布の空間分解能を上げる等の解析が必要である。

c) 有馬高槻構造線

有馬高槻構造線を含む直方体領域（A-A'測線）に沿う、地震、P 波速度、および散乱係数の鉛直分布を図 6 に示す。断層全体にわたって、低速度領域、および散乱係数の大きい領域が広く分布するように見える。これらは、断層中央より東側では 10km 以浅に分布するのに対して、西側では深さ 20km 付近まで分布し、速度構造と散乱係数の分布パターンが比較的よく対応している。断層中央より東側の 10km 以深は、P 波速度が相対的に速く、散乱係数も相対的に小さいので、アスペリティの候補と見なすことができる（図 6、上から 3、4 段目の赤丸）。この領域は、断層に沿う地震の低活動領域の一部とも合致する（澁谷, 本年度報告、図 5 の低活動領域Ⅲ）。

破壊開始点の候補については、有馬高槻構造線周辺について推定された b 値の水平分布（澁谷, 本年度報告）に基づき、 b 値の小さい領域が候補としてあげられる（図 6、最上段の青丸領域）。この領域では散乱係数が相対的に大きく、前述の作業仮説とも合致する（図 6、最下段の青丸）。

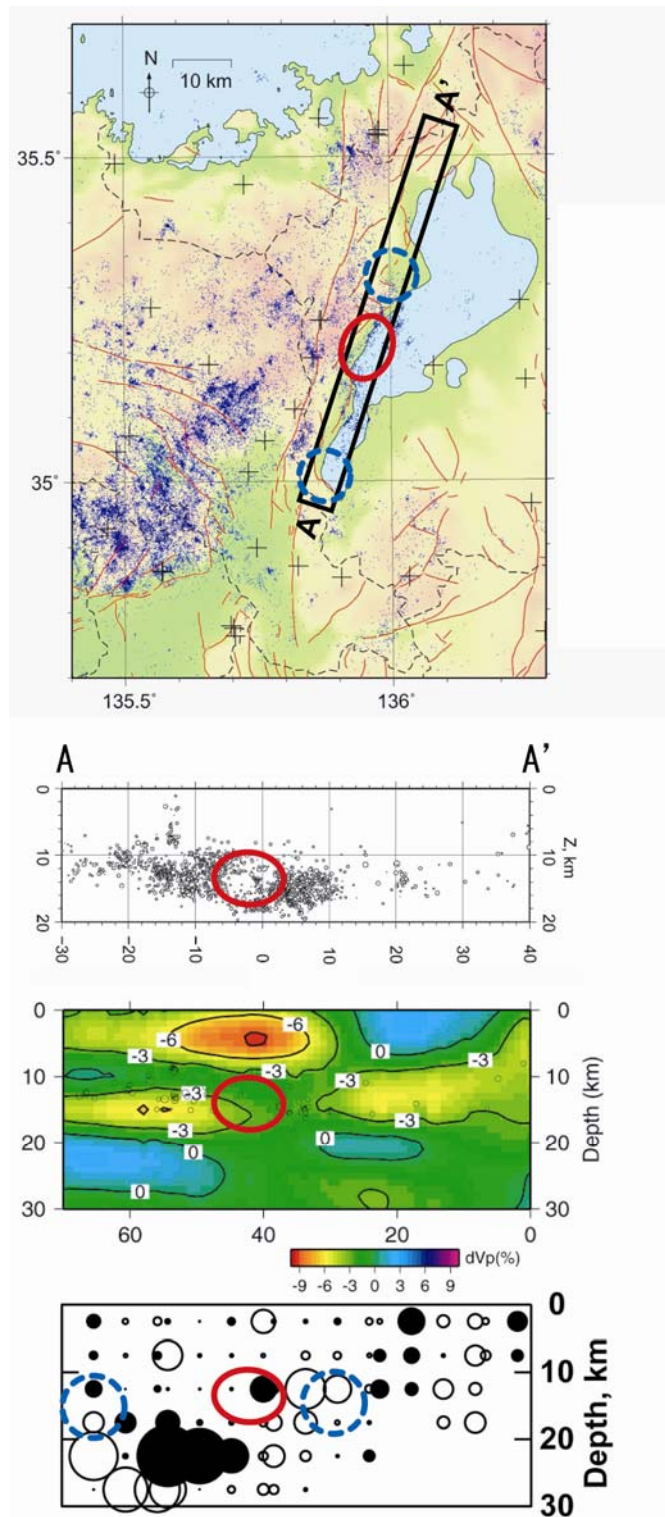


図 4 琵琶湖西岸断層帯における、アスペリティ（赤丸）、破壊開始点（青丸）の候補の推定。上から順に、A-A'断面の範囲、地震分布（澁谷，17 年度報告）、P 波速度の偏差（大見，本年度報告）、相対的な散乱係数の分布（○：散乱係数が平均より大きい、●：平均より小さい）。

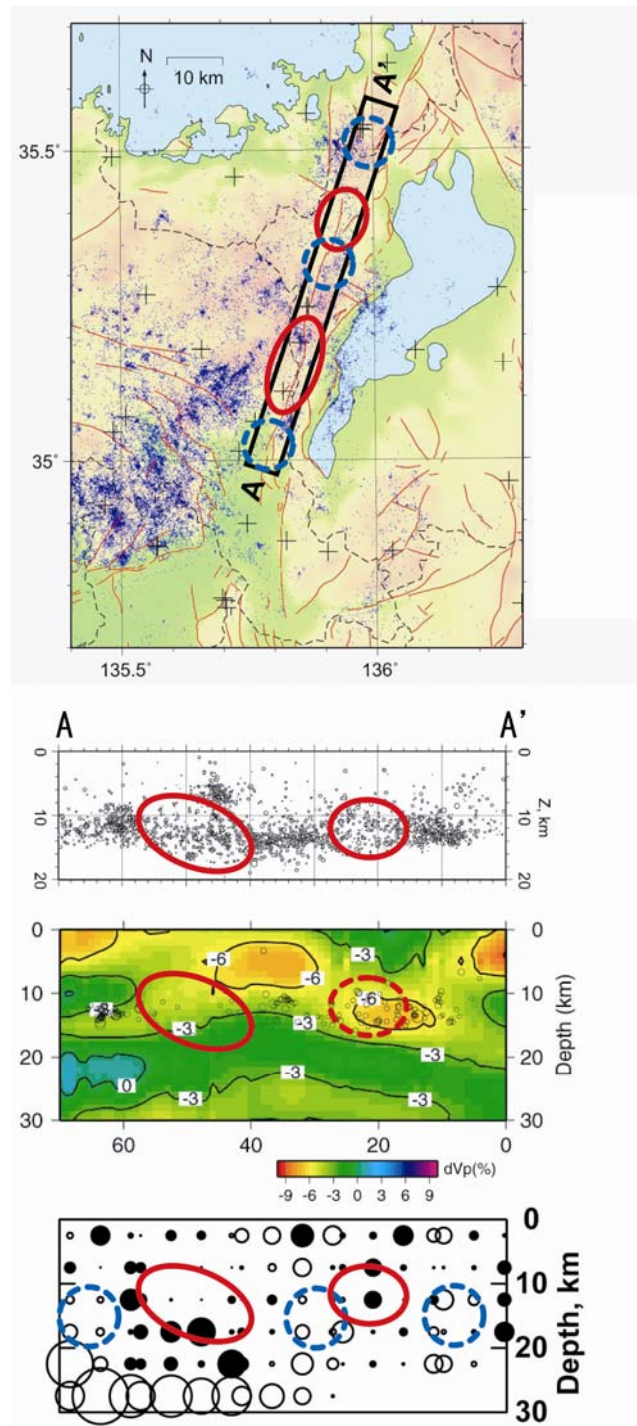


図 5 三方・花折断層帯における、アスペリティ (赤丸)、破壊開始点 (青丸) の候補の推定。上から順に、A-A' 断面の範囲、地震分布 (澁谷, 17 年度報告)、P 波速度の偏差 (大見, 本年度報告)、相対的な散乱係数の分布 (○: 散乱係数が平均より大きい、●: 平均より小さい)。

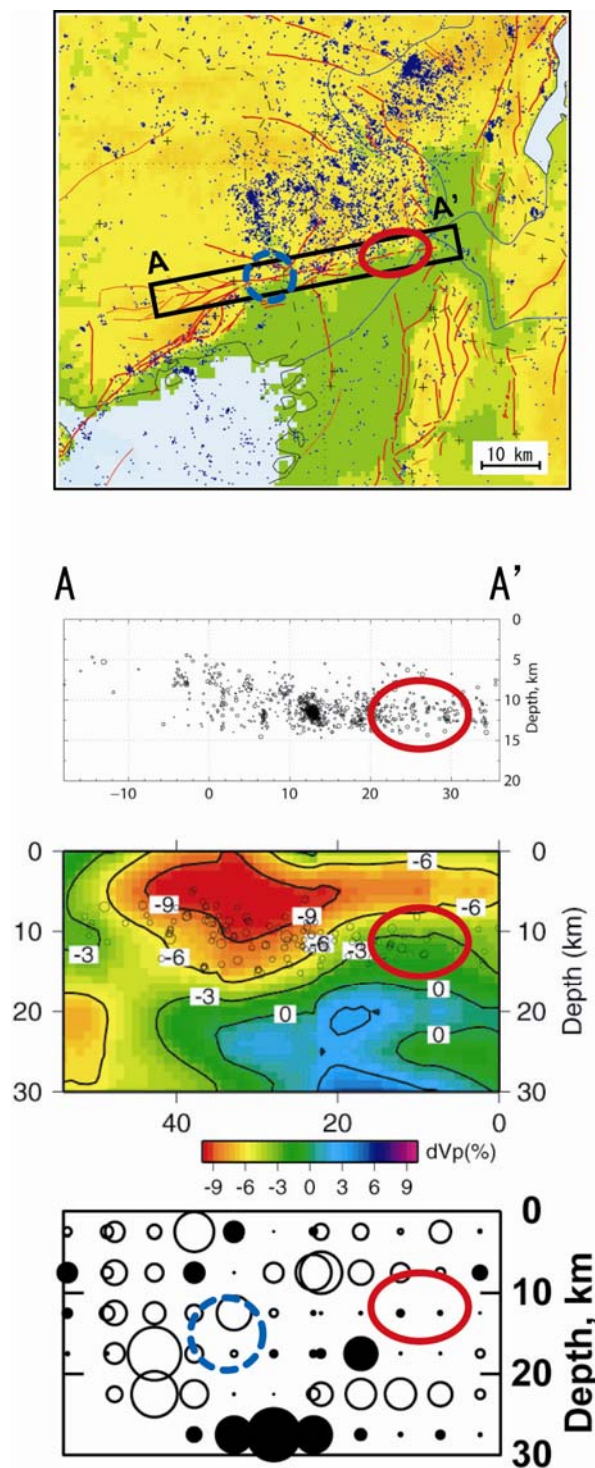


図 6 有馬高槻構造線における、アスペリティ（赤丸）、破壊開始点（青丸）の候補の推定。上から順に、A-A' 断面の範囲、地震分布（澁谷，本年度報告）、P 波速度の偏差（大見，本年度報告）、相対的な散乱係数の分布（○：散乱係数が平均より大きい、●：平均より小さい）。

有馬高槻構造線は、活発な地震活動域の境界付近に位置するが、断層に沿う面的な地震分布が見られる場所もあり、そこでは鉛直な断層面が示唆される（澁谷，本年度報告）。図 3 に示す断面図は有馬高槻構造線に斜交するものの、散乱係数の分布からも、有馬高槻構造線がほぼ鉛直であることを示唆する。上述の 2 つの断層帯と同様に、散乱波解析の空間分解能を上げる等、更に解析を行うことが必要である。

(d) 結論ならびに今後の課題

平成 18 年度は、近畿地方中央部の主な活断層（琵琶湖西岸断層帯、三方・花折断層帯、有馬高槻構造線）に沿う散乱係数の分布を推定し、地震分布、 b 値、速度構造について得られた結果とも合わせて、これらの活断層の深部構造モデルを作成した。具体的には、各活断層について、1~2 個のアスペリティ、1~3 個の破壊開始点の候補位置を示した。作成された複数個（有限個）の断層モデルは、これらの不確定性による強震動の変動幅を含めて検討することにより、強震動予測の高精度化に対して貢献しうると考えられる。

今後の課題としては、今回提示した断層構造モデルの妥当性を検証するとともに、さらに解析を進めてモデルを改善していくことである。特に、地震分布に基づく断層の深部位置・傾斜の推定については、複雑な地震分布や不活発な地震活動域に対しては難しい場合が多いので、例えば、散乱係数分布の分解能を高めること等が有望と思われる。従来の活断層調査に基づく断層構造モデルに対して、今回提示した地震学的な手法は新たな（より現実的な）断層深部構造の情報を追加すると考えられるので、さらに解析手法の改善、および地震学的な情報と断層構造をつなぐ作業仮説の改善を進めることが必要である。

謝辞： 本業務を行うにあたり、大学、Hi-net（防災科学技術研究所）、気象庁、産業技術総合研究所の地震観測データを使用させていただいた。以上記して感謝する。

(e) 引用文献

- 1) Nishigami, K.: A new inversion method of coda waveforms to determine spatial distribution of coda scatterers in the crust and uppermost mantle, *Geophys. Res. Lett.*, 18, pp. 2225-2228, 1991.
- 2) Nishigami, K.: Spatial distribution of coda scatterers in the crust around two active volcanoes and one active fault system in central Japan: Inversion analysis of coda envelope, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 104, pp. 75-89, 1997.
- 3) Nishigami, K.: Deep crustal heterogeneity along and around the San Andreas fault system in central California and its relation to the segmentation, *J. Geophys. Res.*, 105, pp. 7983-7998, 2000.
- 4) Asano, Y. and A. Hasegawa: Imaging the fault zones of the 2000 western Tottori earthquake by a new inversion method to estimate three-dimensional distribution of the scattering coefficient, *J. Geophys. Res.*, 109, B06306, doi:10.1029/2003JB002761, 2004.
- 5) Nishigami, K.: Crustal heterogeneity in the source region of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake: Inversion analysis of coda envelopes, 163, No.2/3,

Pure Appl. Geophys., 163, pp. 601-616, 2006.

- 6) 西上 欽也: 散乱波・トラップ波による断層帯の深部構造のモニタリング, 日本地震学会講演予稿集, 2006 年度秋季大会, B028, 2006.
- 7) 京都大学防災研究所地震予知センター: 近畿地方の微小地震活動域直下に存在する顕著な地殻内反射面, 地震予知連絡会会報, 50, pp. 512-515, 1993.
- 8) 片尾 浩: 陸の上の水っぽい話—特に近畿地方内陸部における深部流体について—, 月刊地球, 号外 51, pp. 286-292, 2005.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
西上 欽也	2004 年新潟県中越地震の震源域における不均質構造	日本地球惑星科学連合 2006 年大会	平成 18 年 5 月 17 日
西上 欽也	散乱波・トラップ波による断層帯の深部構造のモニタリング	日本地震学会 2006 年秋季大会	平成 18 年 11 月 1 日
K. Nishigami	Deep heterogeneous structure of active faults in the Kinki region, southwest Japan: Inversion analysis of coda envelopes	American Geophysical Union 2006 Fall Meeting	平成 18 年 12 月 14 日

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

名称	機能
なし	

3) 仕様・標準等の策定

なし