

### 3.6 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

#### 3.6.1 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

活断層の深部形状モデルに関する研究

###### (b) 担当者

西上欽也（京都大学防災研究所 助教授）

###### (c) 業務の目的

活断層の深部構造、すなわち断層面の形状、破砕帯構造、およびその連続／不連続性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および活断層における新たな観測データをもとに推定し、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カ年の年次実施計画

平成14年度： 解析手法の検討、データ処理の開始

平成15年度： 跡津川断層、花折断層、山崎断層に関する解析の実施。トラップ波のシミュレーション手法の開発。

平成16年度： 跡津川断層、花折断層、山崎断層の深部構造モデルの作成

平成17、18年度： 他のいくつかの近畿圏活断層についても解析を行い、各活断層の深部モデル作成、断層に沿った不均質構造（セグメント構造、固着域の存在等）の推定、および活断層深部構造の一般的特性の検討、活断層深部構造の解析手法の開発、等に関して取りまとめる。

###### (e) 平成14年度業務目的

まず、活断層の深部不均質構造を地震学的に推定する手法、従来の解析の成果等について検討し、本業務で使用する手法を確定し、15年度からの本格的な解析に向けたデータ取得、波形データ前処理等の準備を開始する。

## (2) 平成14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@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

#### (a) 業務の要約

本業務においては、活断層の深部構造モデル、すなわち断層面の形状(広がり、深部延長、傾斜) 破砕帯の構造(幅、速度、減衰パラメータ)、破砕帯の連続/不連続性(分岐、セグメント構造)、および断層に沿った不均質性分布(固着領域の同定)等を既存地震観測網により蓄積された波形データおよび活断層における新たな観測データをもとに推定し、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。今年度は解析手法について検討を行った。その結果にもとづき、来年度は跡津川断層、花折断層、山崎断層について散乱波トモグラフィー、断層トラップ波解析による断層深部構造モデルの推定を行う。

#### (b) 業務の実施方法

##### はじめに

活断層の深部構造を地震学的に推定する手法としては、断層を透過する地震波の走時データの解析、断層において反射あるいは散乱した地震波の解析、断層内部に沿って伝播する波動(断層トラップ波)の解析等がある(Nishigami, 2002)。本業務で用いる手法としては、散乱波のトモグラフィー解析および断層トラップ波解析の2つの手法が有効と考えられる(図1参照)。前者は地震観測網のデータを用

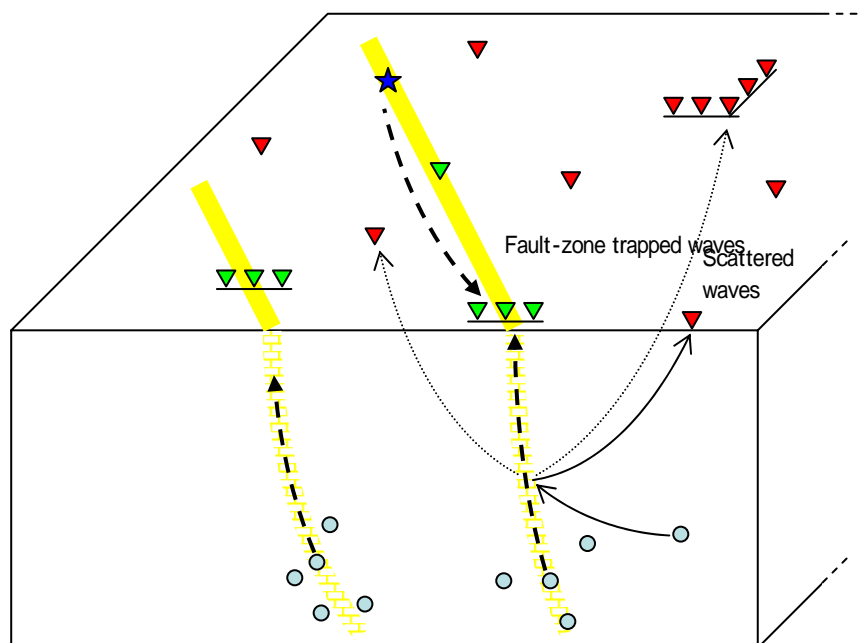


図1 活断層(黄色太線)の深部構造調査に用いる散乱波(実線および点線)およびトラップ波(破線)の模式図。 :地震、 :観測点(ネットワークおよびアレイ) :人工地震。

いて比較的広い領域(数10~200km四方)の地震波散乱強度の三次元分布を推定するもので、活断層と

その周辺における不均質構造を広くサーベイすることができる。後者は活断層上に設置された観測点データを用いて、断層破碎帯に沿って伝播する特別な波動（断層トラップ波）の検出・解析を行うもので、特定の活断層の詳細な破碎帯構造を推定することができる。これらの手法を合わせ用いることで、活断層の深部構造を従来の手法（速度構造トモグラフィー、反射法探査等）以上に詳細に推定することが可能となる。以下、これらの手法と研究例について紹介し、本業務への適用について検討する。

### 散乱波トモグラフィー

近地地震のコーダ波（直達S波に続く後続波部分）は地殻・上部マントルの不均質構造により散乱された波群で構成される。ある地震波形（1つの地震-観測点ペア）におけるコーダ波エネルギーの揺らぎは、一次等方散乱モデルの仮定のもとで対応する散乱波生成領域内の地震波散乱強度に関する情報を与える。従って、これを観測データとして多数の地震、観測点の組み合わせに対するトモグラフィー解析を行うことにより、地震波散乱強度の三次元空間分布を推定することができる（Nishigami, 1991; 西上, 2001）。この手法の有効性は、Nishigami (1997)が中部日本・北陸地域の微小地震観測網（京大防災研）データに対して、また Nishigami (2000)がアメリカ・カリフォルニア州中北部の高密度地震観測網（NCEDC）データに対して示した。一例として、カリフォルニア州中北部における解析例を図2、3に示す。サンアンドレアス断層系の各断層に沿って散乱強度が高いこと、深さ20km付近まで各断層は

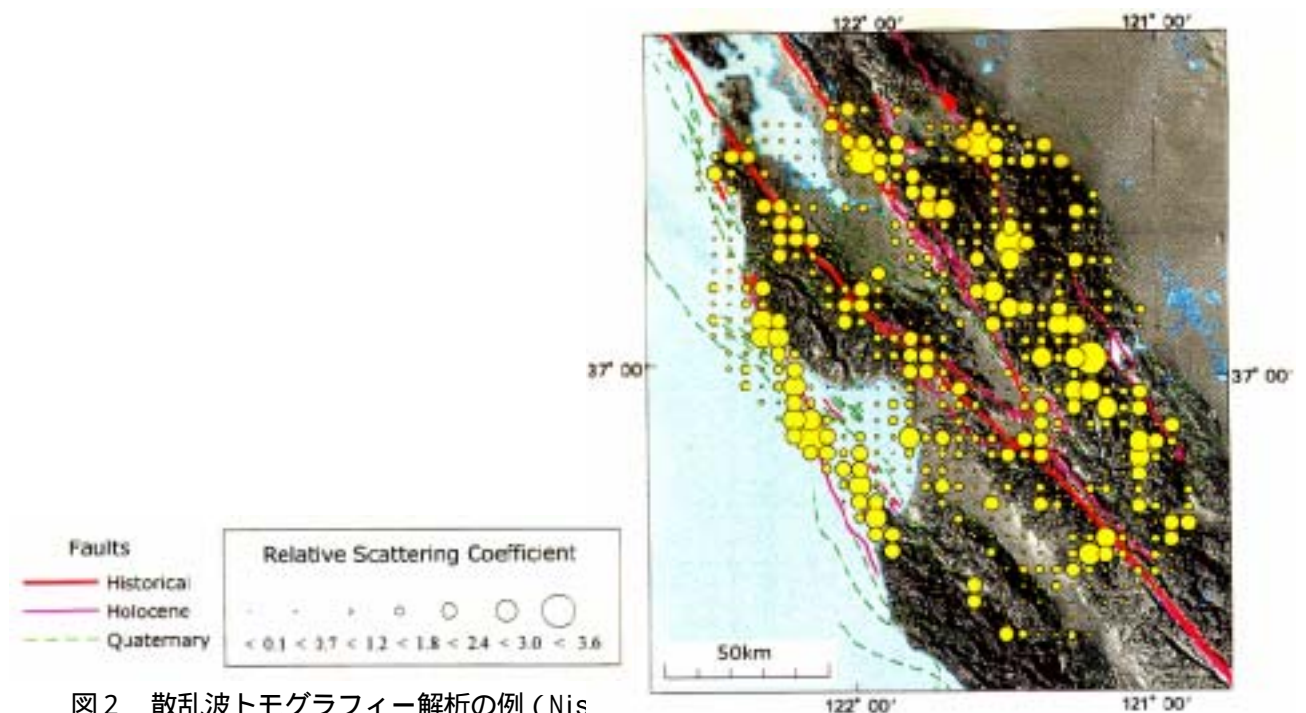


図2 散乱波トモグラフィー解析の例（Nis 0-5km における相対的な地震波散乱強度の分布（ が大きいほど散乱強度が大きい）。実線および破線はサンアンドレアス断層系等の地表トレース。

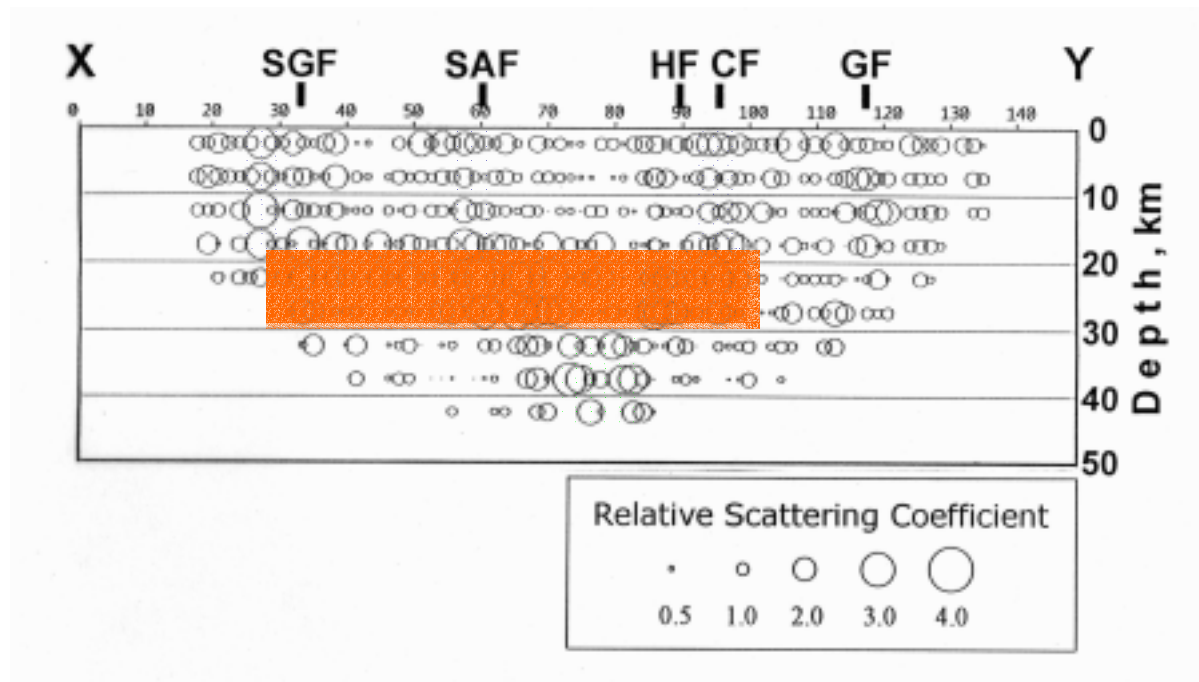


図3 図2の中央部から北側にかけての矩形範囲(X-Yは南西-北東方向に対応)における散乱強度の深さ分布(Nishigami, 2000)。記号はサンアンドレアス断層系の各断層を示す(SGF: サングレゴリオ、SAF: サンアンドレアス、HF: ヘイワード、CF: カラベラス、GF: グリーンビル断層)。

ほぼ鉛直であること、下部地殻上面付近(深さ 20-25km)に各断層をつなぐデタッチメント構造が推定されること、等が見いだされた。また、サンアンドレアス断層に沿った散乱強度の非一様な分布はこの地域のセグメント構造とよく対応することも示された。

### 断層トラップ波

活断層が周辺岩盤に比べて低速度の破碎帯を持つことは、例えば、断層破碎帯を通過する地震波の見かけ速度が低下すること(Nishigami, 2002)、高密度地震観測データに基づく速度構造トモグラフィー(例えば、Thurber et al, 1997)等から示される。一般的に地震波は速度境界において低速度側に屈折し、地震波エネルギーは低速度層内に流れ込む傾向がある。さらに極端な場合には低速度層内で多重反射を繰り返し、波動エネルギーの大部分が低速度層内にトラップされて伝播する。実際の活断層においても、破碎帯ごく近傍で発生した地震を破碎帯内部の観測点で観測するとこのような地震波動(断層トラップ波あるいはガイド波と呼ばれる)が検出される(例えば、Li et al., 1994)。1992年 Landers 地震(M7.2、カリフォルニア)以降、地表地震断層を生じた最近の内陸大地震ではほぼ例外なくトラップ波が観測されている。トラップ波の励起(波形)は破碎帯の内部構造(幅、速度低下率、減衰)および震源・観測点と破碎帯との位置関係に敏感であり、これらのパラメータをインバージョンにより推定する試みも進められている(例えば、Michael and Ben-Zion, 1998)。トラップ波検出の有無は震源-観測点間に破碎帯が連続的に存在するかどうかを示すので、断層のセグメント構造の推定にも利用できる。トラップ波の観測例として、1995年兵庫県南部地震の余震を野島断層上(平林)で観測した例を図4に示す(Nishigami, 2002)。断層付近の観測点では直達S波の後に震幅の大きい波群が観測されているこ

と分かる、この解析からは、破砕帯幅 20m、速度低下率 40%、減衰パラメータ Q 値=20 と推定された。

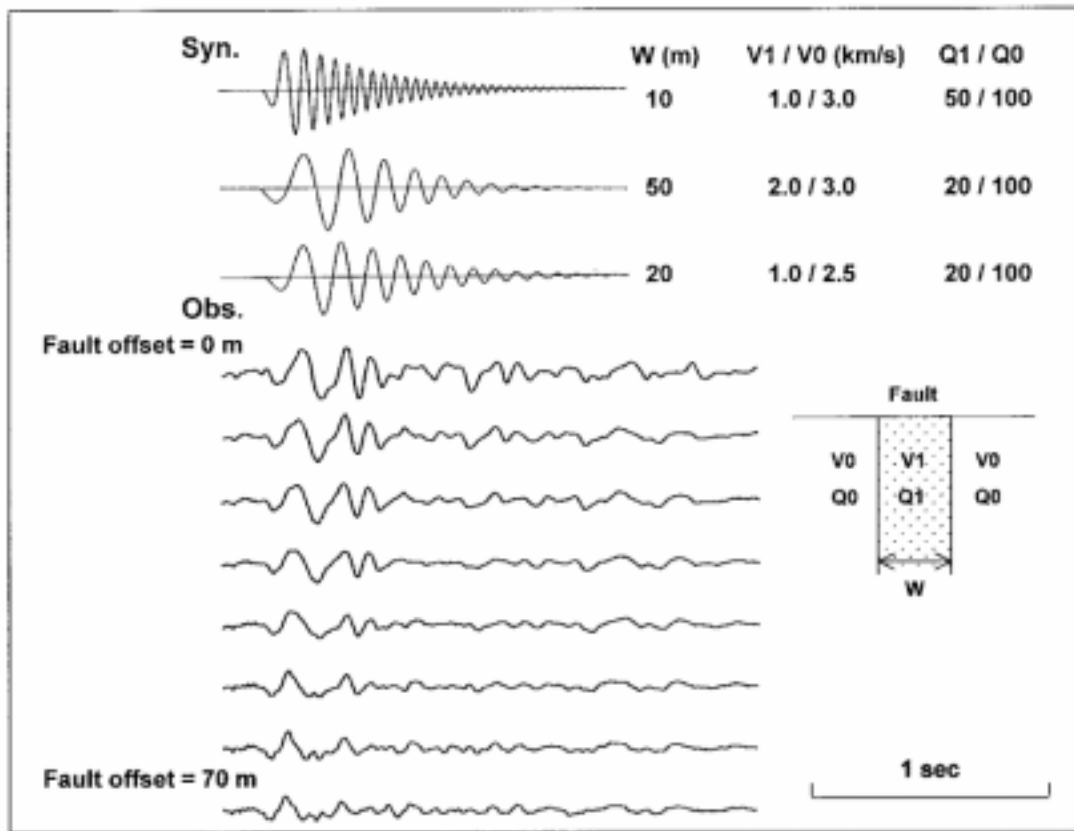


図4 断層トラップ波の観測・モデリングの例 (Nishigami, 2002)。観測波形 (下方の 8 トレース) は野島断層の直上から上盤側に 10m 間隔で配置された 8 点での記録。モデル計算 (上方 3 トレース) は破砕帯幅 10、20、50m に対して Ben-Zion and Aki (1990) の方法で計算したもの。

### (c) 業務の成果

#### 解析結果と考察

本業務で用いる断層深部構造の解析手法について検討を行い、既存の膨大な観測網データを活用できる散乱波トモグラフィー、および断層破砕帯の内部構造を推定できる断層トラップ波の解析を有効と考えた。両者とも比較的新しい解析手法ではあるが、既に国内外の研究において有効な適用例がある。

散乱波トモグラフィーでは、これまでの解析例 (福井地震断層、サンアンドレアス断層) により、散乱強度の高い領域が活断層の深部位置に対応することが示され、活断層の深部延長、傾斜、形状等に関して有効な情報を与える。サンアンドレアス断層での解析から、活断層の固着領域の分布、セグメント構造を推定できる可能性があり、より現実的な強震動予測を試みる上で重要な情報を与えることが期待される。散乱波トモグラフィー解析では、地震、観測点の分布が稠密かつ多数であることが詳細で信頼性のある不均質構造の推定につながる。また、あらゆる定常および臨時観測網のデータを合わせて解析することができる。これらを考慮して跡津川断層、花折断層、山崎断層を解析の対象領域として選んだ。山崎断層に関しては、Hi-net および大学のデータベースに対して地震データ収集、波形の前処理を開始した。

断層トラップ波の解析では、多数の地震が断層に沿って分布している場合には、断層面の形状（深部延長、傾斜）を散乱波トモグラフィーよりも精度よく（地震の震源決定と同程度の精度で）推定できる。また、断層上に観測点が複数設置されている場合には、断層セグメント構造を推定することも可能である。しかしながら、震源決定を主目的とする定常観測網では、確実な断層破砕帯上に地震計が設置されていることはほとんど期待できず、本業務において、臨時観測点を設置することが必要となる。本業務では、花折断層の直上（1カ所）に新たに臨時地震観測点を設置する。しかしこれだけでは不十分であるので、既に多数の地震計を断層上に設置している跡津川断層でのデータも参照し、断層トラップ波の解析手法の開発に利用する。

(d) 結論ならびに今後の課題

今年度は本業務で使用する解析手法の検討を行い、散乱波トモグラフィーと断層トラップ波解析を有効と判断した。さらに、散乱波トモグラフィー解析を行うためのデータ収集、波形の前処理を開始した。来年度は、跡津川断層、花折断層、山崎断層に対して散乱波トモグラフィーによる深部構造の推定を行う。花折断層については、断層トラップ波解析のための地震観測点を確実な破砕帯直上に設置し、データを蓄積しつつ解析を開始する。また、既に断層上での地震データをある程度蓄積している跡津川断層について、そのデータを参照し、断層トラップ波の解析手法の開発を行う。三次元差分法によるトラップ波のシミュレーション手法の開発も行う。

(e) 引用文献

- 1) Ben-Zion, Y. and K. Aki: Seismic radiation from an SH line source in a laterally heterogeneous planar fault zone, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 80, 971-994, 1990.
- 2) Li, Y. G., Aki, K., Adams, D., Hasemi, A. and Lee, W. H. K.: Seismic guided waves trapped in the fault zone of the Landers, California, earthquake of 1992. *J. Geophys. Res.* 99: 11705-11722, 1994.
- 3) Michael, A. and Y. Ben-Zion: Inverting fault zone trapped waves with genetic algorithms, *EOS Trans., AGU*, 79, Fall Meet. Suppl., F584, 1998.
- 4) 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, 2225-2228, 1991.
- 5) 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, 75-89, 1997.
- 6) 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, 7983-7998, 2000.
- 7) 西上欽也: コーダ波エンベロープの解析による散乱強度非一様分布の検出、*地震*、第2輯、第54巻、185-191, 2001 .
- 8) Nishigami, K.: Seismological investigation of deep structure of active faults using scattered waves and trapped waves, *Seismogenic Process Monitoring*, Ed. by Ogasawara, H., T. Yanagidani, and M. Ando, Rotterdam, Balkema, 245-256, 2002 .
- 9) Thurber, C., S. Roecker, W. Ellsworth, Y. Chen, W. Lutter, and R. Sessions: Two-dimensional seismic image of the San Andreas fault in the northern Gabilan Range, central California:

Evidence for fluids in the fault zone, Geophys. Res. Lett., 24, 1591-1594, 1997.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
	なし		

2) 口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
	なし		

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 15 年度業務計画案

跡津川断層、花折断層、山崎断層について、大学、気象庁、および Hi-net 観測網データを用いた散乱波トモグラフィ解析を実施する。花折断層については、断層トラップ波解析のための観測を開始し、データを蓄積しつつ解析を開始する。また、既に断層上での地震データをある程度蓄積している跡津川断層系について、そのデータを参照し、断層トラップ波の解析手法の開発を行う。三次元差分法によるトラップ波のシミュレーション手法の開発を行い、これを用いて跡津川断層系の詳細な破砕帯構造の推定を行う。近畿圏ボアホールデータを用いた解析も行う。これに従い、桑原保人(産業技術総合研究所)、儘田 豊(京都大学防災研究所研究員)が研究に参画する。