

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 21 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22510192

研究課題名（和文） 詳細な力学的地殻不均質と活断層の震源特性との関係

研究課題名（英文） Relationship between crustal velocity structure and asperity of active faults

## 研究代表者

小田 義也 (ODA YOSHIYA)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号：30336523

研究成果の概要（和文）：地震防災を考えるうえで、地下深部に存在する震源の特性，特にアスペリティ分布の把握は極めて重要である。そこで，本研究では，地下深部の力学的特性，すなわち地震波速度構造を詳細に推定する新しいトモグラフィ手法を開発した。さらに，2000年鳥取県西部地震震源域の深部構造を推定し，本震時のアスペリティ分布との比較を行った。その結果，力学的強度が大きい領域とアスペリティとが比較的良好な対応を示すことがわかった。

研究成果の概要（英文）：To reduce earthquake disaster, it is important to understand source characteristics of active faults. Especially information about the asperities is one of the most important properties. I developed, therefore, two new methods to explore crustal structure using neural network technology and full-waveform inversion method. To evaluate the applicability, the new methods have been applied to numerical experiments and we obtained satisfactory results. Then, three-dimensional crustal structure of focal area of the 2000 western Tottori earthquake has been obtained by applying the new method using neural network technology to aftershock data observed by dense temporary seismic network. As the results, relatively high velocity (over approx. 6km/s) area on the fault plane corresponds with large slip area of the main shock.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：自然災害科学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：自然地震・トモグラフィ・アスペリティ・ニューラルネットワーク

## 1. 研究開始当初の背景

大地震が発生した際に，どこがどの程度揺れるのかを事前に予測すること（地震動予測）は地震防災・減災を考えるうえで極めて

重要である。そして，浅部の地盤情報のみならず，地下深部に存在する震源の特性，特にアスペリティの分布は地震動に大きく影響するため，これらを事前に把握することが地

震動予測の精度向上において重要な課題となっている。しかし、震源断層を含む地下深部の様子を把握することは非常に難しく、地震動予測における震源特性の設定は、多くの仮定に基づいて行われている。したがって、地震動予測の分野では、震源特性をより正確に推定する手法の確立が強く望まれている。

一方、既往の研究では、2000年鳥取県西部地震の余震データを用いて従来の走時トモグラフィを行い、震源断層を含む領域の速度構造をイメージングしている。その結果、断層に沿った断面から本震時のすべり量が大きい領域（アスペリティ）が地震波速度の速い領域に対応している可能性を示した。しかし、精度と分解能の不足から詳細な検討には至っていない。すべり量分布と速度構造の関係を議論するためには、従来の走時トモグラフィの分解能を向上させる手法の開発が必要である。

## 2. 研究の目的

このような背景をふまえ、本研究では自然地震の観測データを用いてより高精度、高分解能なトモグラフィ手法の開発、そして、震源断層を含む地下深部の地震波速度構造の推定、さらに、速度分布と本震時のすべり量分布と比較することにより、力学的特性とアスペリティとの関係を考察することを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究では、目的を達成するために以下の方法で研究を行った。

(1) 予備的な解析として既往の研究と同様に、従来型のトモグラフィ手法を用いて、2000年鳥取県西部地震震源域および2004年新潟県中越地震震源域の地下構造を推定し、本震のすべり量分布との比較を行う。

(2) 新しい手法として、ニューラルネットワークを用いたトモグラフィ手法の開発を行う。地下深部をイメージングする場合、データとして自然地震の利用が不可欠になるが、自然地震の場合、震源を制御できないため、震源の分布に偏りが生じる。解析領域の波線密度にも偏りが生じるが、解析領域を離散化する際には波線密度の低い領域に合わせて離散化するのが一般的であり、分解能を低下させる原因となっている。そこで、優れた汎化能力を持つニューラルネットワークを用いた新しいトモグラフィ手法を開発する。ニューラルネットワークを用いることにより、解析領域を離散化する必要がなくなり、波線密度に応じた分解能を得ることが可能となる。

(3) 新しい手法として、波形情報を用いたフルウェーブ・インバージョン手法の開発を行う。フルウェーブ・インバージョンでは、速度構造のみならず震源特性も未知数となるため、不安定な解析になるが、ここでは、各観測点での観測波形を基準観測点の観測波形で正規化することにより、震源特性の除去を行うことにより安定化をはかる。研究開始当初は、点震源を仮定できる微小地震を用いた方法を採用する予定であったが、より安定した解析が可能である正規化する手法を採用することとした。

(4) 開発した新手法を用いて、2000年鳥取県西部地震震源域を対象とした地下構造のイメージングを行い、本震のすべり量分布との比較を行う。用いた新手法はニューラルネットワークを用いたトモグラフィ手法である。フルウェーブ・インバージョンについては、実データに適用するための検証が不十分であること、そして、観測データの精度が十分ではない可能性があることから、今回は適用を見送った。今後継続して検討する予定である。

## 4. 研究成果

(1) 従来型トモグラフィ手法における解析結果1—2000年鳥取県西部地震—

解析には、2001年2月7日—4月7日に震源域で行われた稠密余震観測のデータを用いた。観測点数は43点、解析に用いた地震数は1091個である。解析領域は東西32km×南北40km、深度方向に-2km—14kmとし、解析領域の離散化は水平方向4km、鉛直方向2kmとした。解析にはDDトモグラフィ(Zhang and Thurber, 2003)を用いた。図1右が解析結果、図1左がすべり量分布(関口・岩田, 2000)である。図1より、すべり量の大きい領域と速度の早い領域が概ね対応していることが確認できる。

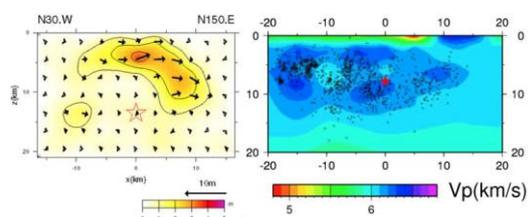


図1 鳥取県西部地震震源域のトモグラフィ結果(右)とすべり量分布(左)

(2) 従来型トモグラフィ手法における解析結果1—2004年新潟県中越地震—

解析には2005年3月2日から4月22日まで行われた稠密余震観測データを用いた。観測点数は20点、解析に用いた地震数は465

個である。解析領域は東西 24km×南北 18km、深度方向に-1km～15kmとし、解析領域の離散化は水平方向が 4km×3km、深度方向が 3km である。解析には (1) と同様に DD トモグラフィを用いた。図 2 は解析結果を示す。図 2 右が解析結果、図 2 左がすべり量分布 (本多ほか, 2005) である。

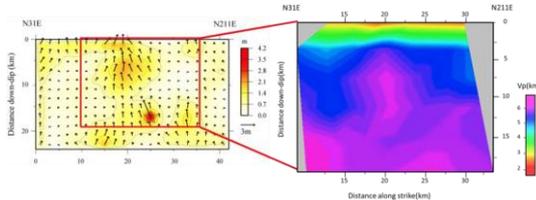


図 2 新潟県中越地震震源域のトモグラフィ結果 (右) とすべり量分布 (左)

図 2 より、鳥取県西部地震の結果同様、すべり量の大きい領域と地震波速度の速い領域が概ね対応しているといえる。

以上のように、従来型トモグラフィ手法を用いた解析の結果では、すべり量の大きい領域と地震波速度の速い領域が概ね一致しているといえる。しかし、従来型のトモグラフィ手法は、初期モデルによる影響が大きいため、地震波速度の絶対値についての議論には注意が必要である。そのため、本研究では、新しいトモグラフィ手法を開発した。

### (3) ニューラルネットワークを用いたトモグラフィ手法の開発結果

従来型のトモグラフィ手法は、地下構造を離散化する必要がある。そして、解析結果の分解能は、地下構造を離散化した際の要素サイズによって決まる。特に自然地震トモグラフィでは、震源が均等に分布することがないため、波線密度が疎な領域と密な領域が存在し、解析を安定化させるため、要素サイズは波線密度が疎な領域に合わせて決定される。波線密度に応じて複数の要素サイズを設置する試みも行われているが、最適な要素サイズを決めることが容易ではない。

また、従来型のトモグラフィ手法は、初期モデルが真のモデルに近いことを前提とした非線形最小二乗法を用いている。したがって、解析の際には、適切に初期モデルを決定しなくてはならない。特に、解析によって得られる地震波伝播速度について、その相対的な大小関係だけでなく、絶対値の定量的な評価を行うためには、適切な初期モデルの決定が課題である。

これらの課題を克服するため、本研究ではニューラルネットワークの利用を行った。本研究で採用したニューラルネットワークは、空間座標を入力とし、その座標におけるスローネス (地震波速度の逆数) を出力とする階層型ネットワークである。ネットワークの学

習には、一般的に用いられている誤差逆伝搬アルゴリズムを用いた。ただし、通常は教師信号が存在して学習を進めるが、ここでは、教師信号が求めるスローネスであることから、波線に沿った標本点の座標をニューラルネットワークに入力し、出力されたスローネスを線積分することにより理論走時を算出し、これと観測走時との誤差を最小化することにより学習を進めた。

まず、新手法の適用性を評価するため、2つのモデルで数値実験を実施した。数値実験の解析領域は、20km (南北) × 20km (東西) × 16km (深度) とした。震源は、領域内の深さ 5km から 15km にランダムに 200 点配置し、観測点は、地表面に 36 点ランダムに配置した。このモデルから疑似観測走時を算出し、

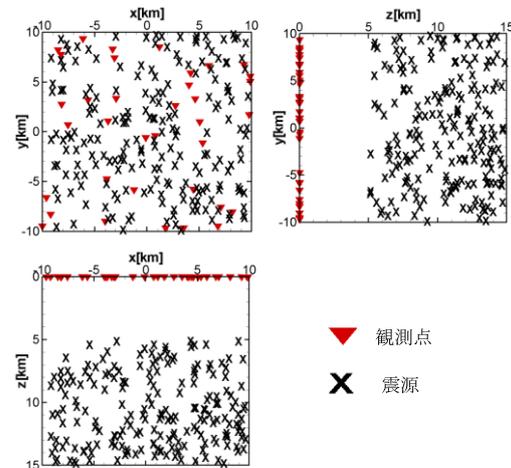


図 3 数値実験における震源と観測点の配置

それをデータとして地下構造を推定する。すべての地震をすべての観測点で観測したものとした。すなわち、走時データは  $200 \times 36 = 7,200$  個となる。図 3 に数値実験における震源と観測点の配置を示す。

自然地震トモグラフィでは、地下構造だけでなく、震源要素 (震源位置および地震発生時刻) も未知数となる。そこで、解析を実施する際の初期震源位置について  $x, y, z$  方向それぞれに  $\pm 1\text{km}$  の範囲でランダムに誤差を、地震発生時刻については、 $\pm 0.3\text{sec}$  の範囲でランダムに誤差を与えた。

最初の数値実験モデルは図 4 に示す水平成層構造モデルである。そして、図 5 が新手法による解析結果である。図 5 より水平成層構造が精度よく再現されていることがわかる。このときの RMS 残差は  $0.079\text{sec}$  であった。また、従来型のトモグラフィ手法による RMS 残差は  $0.84\text{sec}$  であった。

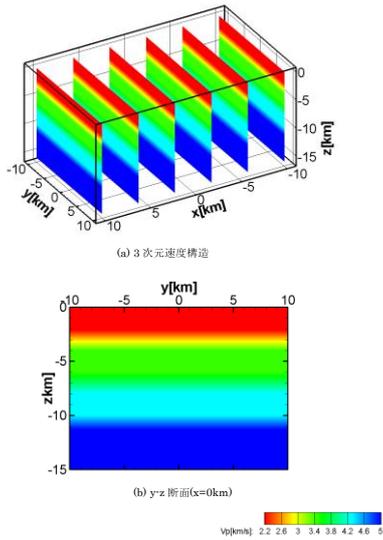


図 4 水平成層モデル

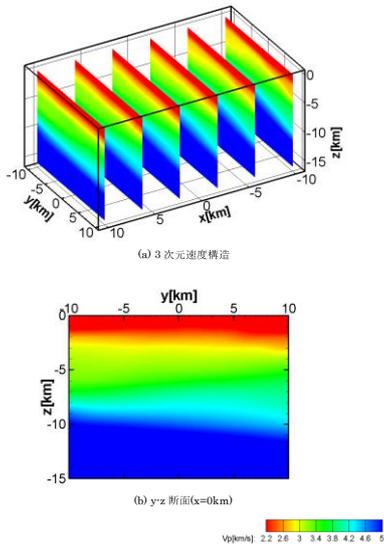


図 5 水平成層モデルの解析結果

次に図 6 に示すような断層を想定した構造を対象として解析を行った。その結果が図 7 である。解析結果を見ると  $y=2\text{km}-10\text{km}$  深さ  $10\text{km}$  以深において速度の絶対値が真のモデルに比べやや低速度の結果になったが、断層構造など全体的な構造は精度良く推定できていることがわかる。RMS 残差は新手法が  $0.181\text{sec}$ 、従来手法が  $1.098\text{sec}$  であった。

以上の数値実験結果から、ニューラルネットワークを用いた新しいトモグラフィ手法の適用性が確認された。特に、初期モデルの設定が不要であるにもかかわらず、絶対値が極めて正確に再現されていることは、定量的な議論を行う上で極めて有用と考えられる。

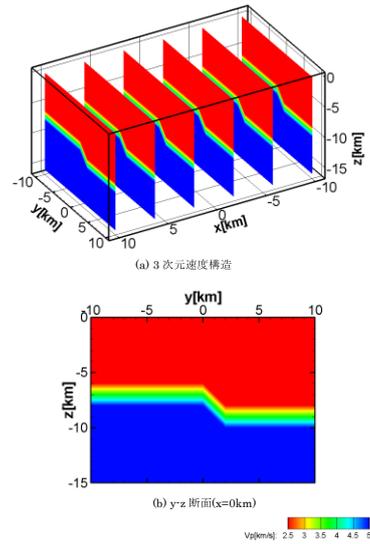


図 6 断層モデル

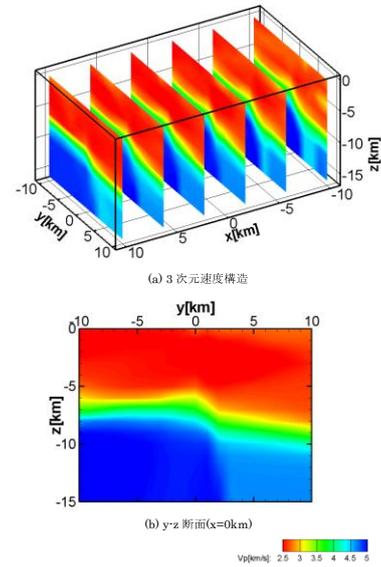


図 7 断層モデルの解析結果

(4) 波形情報を用いたフルウェーブ・インバージョンの開発結果

地震波データを用いてより高精度・高分解能な地下構造を推定するためには、観測波形が持つ情報のごく一部である初動情報のみならず、波形全体を利用することが不可欠である。一方で、波形全体を用いるためには、震源関数を未知数として解かなくてはならないため、解析が極めて不安定になってしまう。そこで、本研究では、観測波形から震源関数を除去した波動場を算出し、その波動場を用いたフルウェーブ・インバージョン手法の開発を行い、数値実験により有用性を評価した。

震源関数の除去は、複数の観測点のうち、任意の1観測点を基準点として設定し、次式に示すように、基準点の観測波形で他の観測波形をデコンボリューションすることにより行う。

$$\frac{R_A(\omega)}{R_B(\omega)} = \frac{G_A(\omega)S(\omega)}{G_B(\omega)S(\omega)} = \frac{G_A(\omega)}{G_B(\omega)}$$

ここで、 $\omega$ は各周波数、 $R$ は観測波形、 $G$ は震源から観測点までのグリーン関数、 $S$ は震源関数を意味する。また、 $A, B$ の添字はそれぞれ、観測点  $A$  と基準観測点  $B$  を意味する。震源関数はどの観測点でも同一であるとすると、上式のように観測点  $A$  の観測波形を基準観測点  $B$  の観測波形で除すれば震源関数が除去できる。

本研究では5ケースの数値実験を行ったが、ここでは図8に示すような基盤形状が複雑な2次元2層構造モデルにおける数値実験について述べる。

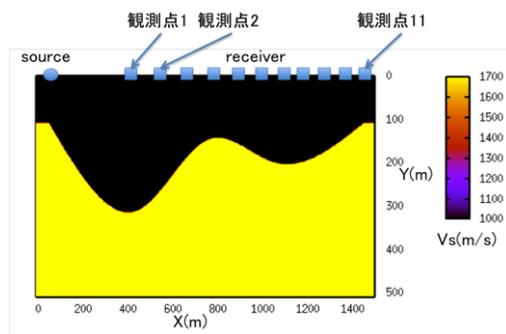


図8 数値実験に用いた2次元2層構造モデル

ここで、震源は人工地震を想定して地表に1点、観測点は同じく地表に11点とした。なお、基準観測点は震源に最も近い観測点1である。インバージョンにおける最適化手法は安定的に解析が実施できる焼きなまし法を採用し、未知数は、第1層、第2層の地震波速度、震源および観測点1, 4, 7, 11直下の基盤深度とした。それぞれの推定点間の基盤深度はスプライン補完により補完した。

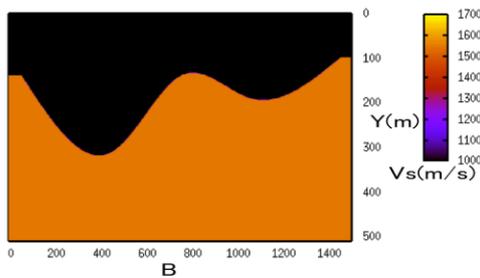


図9 フルウェーブ・インバージョンによる解析結果

図9が本研究の手法による解析結果である。図8と比較すると、第2層の地震波速度が9%程度低速になっているが、第1層の地震波速度、基盤形状はほぼ正確に再現できていることがわかる。図10には観測点4, 7, 11の観測波形と初期モデルから算出した理論波形、そして、解析結果(図9)から算出した理論波形の比較をしめた。解析結果から算出した理論波形が観測波形と良く一致していることがわかる。

以上より震源関数を除去することにより、精度良く安定した解析が可能となることが明らかになった。ただし、本研究では2次元解析の開発にとどまっていることから、次の活断層における適用は前出(3)のニューラルネットワークによる手法を適用することとした。

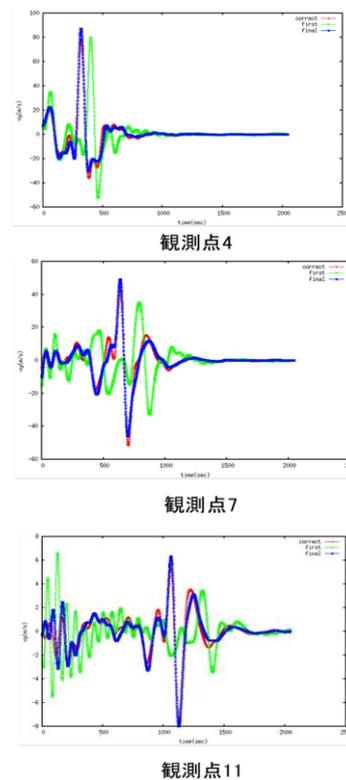


図10 観測波形と理論波形の比較

#### (5) 2000年鳥取県西部地震震源域の地下構造とすべり量分布の比較

ここでは、本研究で開発したニューラルネットワークを用いた自然地震トモグラフィ手法を用いて2000年鳥取県西部地震震源域および震源断層面内の地震波速度構造を推定し、すべり量分布との比較を行った。解析に用いたデータは本震発生後に行われた稠密余震観測(青柳ほか, 2001)の観測データ(地震数1091)である。図11に観測点分布および震源分布を示す。

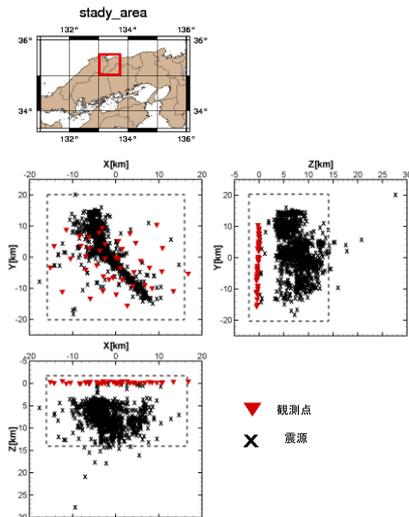


図 11 観測点および震源分布

図 12 に本震のすべり量分布(関口・岩田, 2000)と本研究の手法で得られた 3 次元構造から断層面に沿った垂直断面を抽出したものを合わせて示す。この図から、地震波速度が 6km/s を越える領域で大きいすべりが生じていたことがわかる。ただし、震源の N30W (図面左) 側に存在する顕著な高速度領域では必ずしも大きなすべりが生じていなかった。

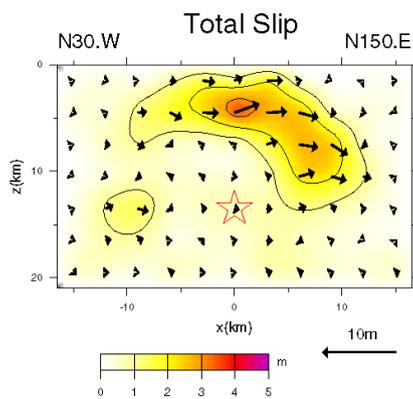


図 5.4 本震のすべり分布(関口・岩田,2000)

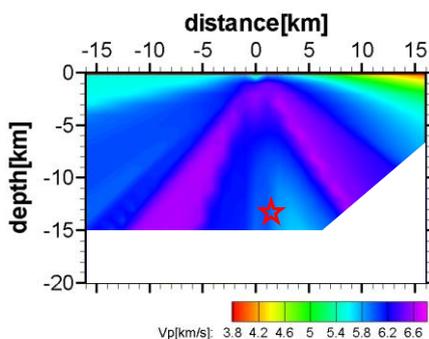


図 12 本震すべり量分布(上図)と地震波速度構造(下図)

本研究期間は本年度で終了するが、今後継続して同様の解析を行い、すべり量分布と地震波速度構造、すなわち力学的構造の関係を検討する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yoshiya Oda, Tomohisa Ishiyama and Shinya Yokono, Travel time tomography using neural networks, Proceedings of 15th WCEE, 査読有, 2012 年, Paper no. 1929
- ② Yoshiya Oda and Tomohisa Ishiyama, Travel time tomography by use of neural networks, Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, 査読有, 2011 年, 88-91, doi: 10.1190/segj102011-001.22

[学会発表] (計 6 件)

- ① Tomohisa Ishiyama and Yoshiya Oda, Travel time tomography by use of neural networks, AGU Fall Meeting, Abstract S41A-2353, 2012 年 12 月 6 日, サンフランシスコ (アメリカ合衆国)
- ② Ishiyama, T. and Oda, Y., Travel time tomography by use of neural network, The 16th International Symposium on Recent Advances in Exploration Geophysics, 2012 年 11 月 19 日, 京都大学
- ③ Yoshiya Oda, Tomohisa Ishiyama and Shinya Yokono, Travel time tomography using neural networks, Proceedings of 15th WCEE, 2012 年 9 月 27 日, リスボン (ポルトガル)
- ④ 横野真也, 小田義也, ニューラルネットワークを用いた自然地震トモグラフィに関する研究, 第 126 回物理探査学会学術講演会, 2012 年 5 月 6 日, 早稲田大学
- ⑤ 石山智久, 小田義也, ニューラルネットワークを用いた走時トモグラフィ, 第 124 回物理探査学会学術講演会, 2011 年 5 月 10 日, 早稲田大学

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小田 義也 (ODA YOSHIYA)

首都大学東京・都市環境科学研究科・准教授

研究者番号: 30336523