寄 書

アレイ観測による2000年鳥取 県西部地震震源域周辺の短波長 不均質構造のイメージング

九州大学大学院理学研究院*・防災科学技術研究所**
九州大学大学院理学府*

松本 聡・小原一成・木村尚紀
中村めぐみ

Imaging P-wave Scatterer Distribution around the
Focal Area of the 2000 Western Tottori
Earthquake (Mw6.6)

Satoshi MATSUMOTO

Faculty of Sciences, Kyushu University,
Shimabara 855-0843, Japan

Kazushige OBARA, Naoki KIMURA

National Research Institute for Earth Science and
Disaster Prevention, Tsukuba 305-0006, Japan

Megumi NAKAMURA

Graduate School of Sciences, Kyushu University,
Shimabara 855-0843, Japan

(Received March 25, 2002; Accepted June 26, 2002)

§1. はじめに

短波長不均質構造とは特徴的な空間スケールが地震波の波長と同程度あるいはそれ以下のものを指し、走時解析から検出することが難しく、散乱体として振る舞うことが知られている。短波長不均質構造内を伝播する地震波は散乱されてさまざまな方向、強度を持つ散乱波を生み出すことになる。これらの散乱波を検出することにより、短波長不均質構造を推定することができる。一方、アレイ観測は波の伝播方向、速度などの性質を特定することが可能で、散乱波の検出にもっとも適切であると考えられる。短スパン（地震計間隔が数十m）の地震計アレイ観測から不均質構造を推定する試みは Matsumoto

et al. (1998), 松本・他(1999)によってなされている。

2000年鳥取県西部地震震源域において非爆発型震源であるパイプレタによる実験が行われた。ここではこの実験の際に展開された稠密アレイ観測で得られたデータを用いて地震発生域周辺の不均質のイメージングを試みる。

§2. 観測およびデータ

鳥取県西部地震震源域において、防災科学技術研究所および東京大学地震研究所によって人工地震実験が行わ

Fig. 1. Map showing locations of the present seismic array and artificial sources. Square and circles show the array and the sources, respectively. Dots denote epicenters of aftershocks of the 2000 Western Tottori earthquake determined by Joint Group for Dense Aftershock Observation of the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake (2001). Black and white stars indicate locations of initiation point for initial and main ruptures, respectively [Hirata *et al.* (2001)]. Lower map shows the array configuration. Symbols denote locations of seismometer deployed. Open triangle and circle show vertical and three components seismometer, respectively.

* 〒855-0843 島原市新山2-5643-29 九州大学大学院理学研究院地震火山観測研究センター

** 〒305-0006 つくば市天王台3-1

れた。震源はバイブレータを用い、各地点で100回の発振を行った。われわれはこの実験にあわせて1 Hz 3成分および2 Hz 上下動地震計によって構成される240 chのアレイを震源域のほぼ中央に位置する鳥取県西伯郡西伯町鴨部に展開した。地震計間隔は20~40 mである。アレイにおいてはデータ収録装置によってバイブレータ発振のためのスイープ信号と同期して収録、相関を取った後ディスクに保存した。これらを震源ごとに重合して観測データを得た。5カ所の発振点のうち本研究ではS/N比の良好な4点の発振による記録を用いて解析することにする。解析に用いた発振点はFig. 1中に示されている。

§ 3. データ処理法

地殻不均質構造を求めるために、松本・他(1999)の方法によって地震波散乱体の分布を推定する。これは各震源ごとにアレイ観測波形をすべての方位、構造モデルに基づくスローネスに対してsemblance enhanced slant stackを行い、発振時からの経過時間より散乱体の3次元的位置を求めるものである。

ここではバイブロサリスを震源として用いているために、散乱体はP-P散乱をするものと仮定し処理を行った。処理は上下動地震計での観測波形に6~12, 24~48 Hzのバンドパスフィルターをかけた後行った。アレイ観測においてターゲットとする周波数が高ければ高いほど分解能は上がる。ここで6~12, 24~48 Hzの帯域を

Fig. 2. Map showing estimated relative scattering strength distributions at the depths of 5, 10, 15, and 20 km for 24~48 Hz range. Dark areas correspond to those with high strengths of scattering. Small and large stars indicate locations of initiation point for initial and main ruptures, respectively. Open square and cross show location of the array and the shot point, respectively. Open triangle denotes Mt. Daisen.

それぞれ低、高周波数帯と呼ぶことにする。これらの波形データに松本・他(1999)で述べられている処理、すなわち静補正、ミュート、振幅回復、semblance enhanced stack 処理を行った。アレイに到達する波線ごとに分解された波形から不均質構造の空間分布を求めるための速度構造は簡単のために深さの一次関数で変化する速度構造を仮定した。すなわち、ある深さ z における速度は $V(z)=5.75+0.038z$ km/sec で与えられる。この速度構造は京都大学によるこの地域の震源決定に用いられている構造 [伊藤・他(1995)] をスムージングして深さの一次元構造にしたものである。以上のような処理を4つの震源に対して行い、これらを重合することで相対的散乱強度の3次元分布の最終的なイメージを得た。イメージは $0.5\text{ km} \times 0.5\text{ km} \times 0.5\text{ km}$ のブロックごとに求めた。

本解析の検知能力を調べるため空間的に等方散乱体を水平方向に10 km、深さ方向に5 km 間隔で分布させ、各周波数帯域においてレゾリューションのチェックを行った。ここでは実際に用いた4点の発振-アレイの組み合わせで波形を合成し入力データとした。その結果、イメージングの分解能はアレイを中心として動径方向には30 km 以内の距離で2 km 以下である。一方、角度方向には10 km 以内の距離では2 km 以下であるが、20 km 程度で4 km、30 km 程度の距離で5 km 程度の分解能しかない。また、低周波数帯においてアレイ直下では分解能は半分程度に低下する。さらに、距離が20 km 以上離れると分解能が角度方向に10 km 程度まで低下する。よって、深部においては角度方向の分布は詳細に議論できない。一方、本解析では直達波部分はミュート処理をしているためこの時刻付近に到達する散乱波は検知できない。この影響によって分布を議論できない領域はアレイを中心として水平方向に約10 km、深さ方向に5 km 程度である。

§4. P 波散乱体分布

ここではアレイと4箇所のパイプロサイス震源から得られたデータを重合した結果を示す。解析した周波数帯は先に述べたように6~12、24~48 Hz であるが、ここでは最も空間分解能の高い高周波数帯について、5~20 km まで5 km ごとの水平分布を示す (Fig. 2)。なお、低周波数帯についてもほぼ同じ傾向を示している。図は、各深さを中心として $\pm 2\text{ km}$ の深さ範囲で3次元ブロックを重合した結果得られた散乱体の水平分布である。ここで得られる強度分布は相対的なものである。この図のスケールはもっとも特徴が現れやすい値を基準として表示した。基準値よりも大きな部分をすべて

黒で表示している。これらの図から、深さ5、10 km においては余震域の南東端の部分や北西端の部分に相対的散乱強度が強い部分が見られる。深さ15 km においては本震の震央位置および震源域直下に強度の強い部分が見られる。さらにアレイの東側、震源域と大山火山の間

Fig. 3. Vertical cross-sections of relative scattering strength for 24~48 and 6~12 Hz ranges. a) and b) show N150°E and N60°E cross-sections, respectively. Symbols are the same as in Fig. 2.

でも散乱強度が強いことが見て取れる。Fig. 3 にアレイの位置をとおり、余震域の広がりの方とそれに直交する方向、すなわち $N150^{\circ}E$ および $N60^{\circ}E$ の方向でとった相対散乱強度鉛直断面を示す。ここでは高周波数帯、低周波数帯を示す。これらの断面はそれぞれ中心線の両側 2 km の幅で 3 次元ブロックの重合を行って得られたものである。図中では平田・他 (2001) による本震の初期破壊開始点、主破壊開始点を☆☆で、合同観測班による余震域を破線で囲んで示している [2000 年鳥取県西部地震合同観測班余震観測グループ, (2001)]。これらを見ると破壊の開始点直下は相対散乱強度が高い。また、この部分よりやや北西側の深さ 20 km に強い散乱体が存在していることが明らかになった。破壊開始点より南東側では、強い散乱体が北西側よりも浅い領域まで達していることがわかる。関口・岩田 (2001) はこの地震の断層面上のすべりをインバージョンによって求めている。彼らは主破壊の開始点の浅部および南東側深さ 10 km 程度まですべりが大きいことを報告している。ここでの散乱強度の強い部分を避けているようにも見られる。ここで取り扱った地震波の波長は 100 m~400 m 程度であり、この程度の波長の不均質が地震時のすべりに影響を与えている可能性がある。一方、余震分布は南東側と北西側で異なった分布をしている。このように南東側と北西側で余震分布や散乱体分布の違いが存在しており、地震発生メカニズムを考える上で今後短波長不均質構造の影響を検討する必要がある。低周波数帯では深さ約 34 km 程度に高い強度の部分がある。これらはモホ面の強い不均質を反映していると考えられる。高周波数帯でこれらが見られないのは下部地殻内においては平均的に散乱強度が高く、モホ面の散乱強度とのコントラストが弱いために本論文の処理では検出できなかった可能性も考えられる。

本研究の高周波数帯における結果は、波長 100~400 m 程度の不均質構造を反映していると考えられるが、この波長の不均質構造は地震発生メカニズムを考える上で重要と考えられる。兵庫県南部地震の震源域直下に見

出された不均質構造も余震域下部に強い散乱を示す部分が見出されている [Matsumoto *et al.* (1998)]。彼らと本研究の結果は、内陸地震の発生と下部地殻の強い不均質構造が密接に関連している可能性を示唆している。

謝 辞

2000 年鳥取県西部地震合同観測班余震観測グループによる震源分布を使わせていただいた。また、それにあたり片尾 浩博士に便宜を図っていただいた。本論文に対し 2 名の匿名査読者からは有益な指摘をいただいた。本研究は防災科学技術研究所および東京大学地震研究所によるパイププレート発振を使用させていただいた。記して感謝の意を表します。

文 献

- 2000 年鳥取県西部地震合同観測班余震観測グループ, 2001, 観測余震観測による 2000 年鳥取県西部地震震源域の余震分布とメカニズム解について, 日本地震学会ニュースレター, 13(3), 23-27.
- 平田美佐子・梅田康弘・川方裕則・伊藤 潔, 2001, 2000 年鳥取県西部地震の初期破壊について (2) 初期破壊と主破壊の震減衰決定とスペクトル, 日本地震学会講演予稿集, P129.
- 伊藤 潔・松村一男・和田博夫・平野憲雄・中尾節郎・渋谷拓郎・西上欽也・片尾 浩・竹内文朗・渡辺邦彦・渡辺 晃・根岸弘明, 1995, 西南日本内帯における地殻内地震発生層, 京都大学防災研究所年報, 38, B1, 1-11.
- Matsumoto, S., K. Obara, and A. Hasegawa, 1998, Imaging P-wave scatterer distribution in the focal area of the 1995 M7.2 Hyogo-ken Nanbu (Kobe) Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1439-1442.
- 松本 聡, 小原一成, 吉本和生, 斎藤竜彦, 長谷川昭, 伊東明彦, 1999: 短スパンアレイ観測による奥羽脊梁山地周辺の地殻不均質構造のイメージング, 地震 2, 52, 283-297.
- 関口春子・岩田知孝, 2001 震源過程が支配する震源近傍強震動—2000 年鳥取県西部地震—, 日本地震学会講演予稿集, A73.