

2004年新潟県中越地震震源域南端部の微小地震活動と速度構造

Microearthquake activity and velocity structure in the southernmost part of source region of the 2004 mid-Niigata earthquake

干野 真¹・桑原保人²・今西和俊³・長 郁夫⁴・武田哲也⁵

Makoto Hoshino¹, Yasuto Kuwahara², Kazutoshi Imanishi³, Ikuo Cho⁴ and Tetsuya Takeda⁵

^{1,2,3,4} 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, GSJ/AIST, m-hoshino@aist.go.jp)

⁵ 防災科学技術研究所 (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention)

Abstract: We deployed a temporal seismic network in the seismic gap adjacent to the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake. The detailed velocity structure and hypocentral distribution in and around the seismic gap are revealed by travel time inversion of many manually picked arrival times of aftershocks using the Double-Difference tomography method. A belt-like shaped high velocity zone is found in about 10 km depth at the south part of the Niigata basin. The folding zone that are bounded by termination of folding axes in geological map corresponds to the high velocity zone. The southeast extension of northern boundary of the folding zone separates the aftershock area from seismic gap area by termination of earthquake cluster.

キーワード: 2004年新潟県中越地震, Double-Difference トモグラフィ, 六日町断層
Keywords: 2004 mid-Niigata earthquake, Double-Difference tomography, Muikamachi fault

1. はじめに

2004年新潟県中越地震(10月23日, $M_{JMA}=6.8$)は、褶曲運動が活発な新潟堆積盆地南部地域の東縁の新発田-小出構造線(SKTL)と呼ばれる北東-南西方向の構造線沿いの地域で発生した。本震の震源メカニズムは、北北東約35度の走向をもつ逆断層タイプである。本震に続いて5つの $M_{JMA}6$ クラスを含む多数の余震が発生している。余震分布および本震メカニズムから推定される本震断層面の傾斜は西下がり約60度である。そして、大きな余震のメカニズムおよび余震分布からは、本震断層面と平行および共役な複数の断層面が推定されている(Korenaga *et al.*, 2005; Sakai *et al.*, 2005; Aoki *et al.*, 2005)。余震分布から推定されるこれらの断層面の位置形状には、この地域の地殻構造の複雑さが反映されていると考えられている(Kato *et al.*, 2006)。Sagiya *et al.* (2000)によると、この地域は新潟-神戸歪集中帯(NKTZ)に含まれ、歪みレートが非常に高い場(圧縮率で $200 \cdot 10^{-9}$ strain/year)であり、大地震の多発する地域である。本地震発生域の近隣地域では、歴史的に新しい大地震として、三条地震(1828, $M6.9$)と善光寺地震(1847, $M7.4$)が発生している(第1図)。また最近では、中越地震発生から約三年後の2007年7月17日には、西北西40kmで新潟県中越沖地震($M_{JMA}=6.8$)が発生した。NKTHに沿って、善光寺地震震源域の北側の、中越地震の震源域を含む南西-

北東約140kmの地域は大竹・他(2002)により、地震空白域「ギャップD」という名で指摘されていた。その後、「ギャップD」の中間域で発生した中越地震の北部が「ギャップD-1」、南部が「ギャップD-2」として指摘されている(大竹, 2005)。

本地震の余震は南部ではSKTLの南端に位置する六日町断層に平行に沿って分布している。そして、六日町断層南部では余震がほとんど発生していない(Imanishi *et al.*, 2006)。また、六日町断層の変位速度は、北部で0.8~1.0 m/ky、南部で1.4~2.0 m/kyと非常に大きく、その差もまた非常に大きい(金, 2004)。これらのことから、第1図に示す本震域と「ギャップD-2」(大竹, 2005)との境界部における構造上の特徴を調べることは有意義であると考えられる。

我々は、2004年11月から震源域南部に臨時地震観測網を展開し、その後も2005年、2006年の夏期に観測を行った。本稿では、Double-Difference トモグラフィ手法(Zhang and Thurber, 2003)による、上述の境界部周辺の広域的な地下速度構造の解析結果から、余震域南端からギャップD-2への遷移境界と関係があると思われる速度構造の特徴について報告する。

2. データと手法

本論文におけるトモグラフィ解析に用いたデータ

は、2001年10月～2004年12月の気象庁一元化データ、および、我々が2004年11月25日から2006年11月まで随時展開した、臨時地震観測網によって得られたものである。臨時観測に際して、この地域は地滑り地帯が多く、表層付近に露出する硬い岩を探すのは困難であった。そのため、ほとんどの地震計は、砂防ダムのコンクリートの上に設置した。これらの期間中に得られた波形記録に対して読み取りを行い、同時に気象庁一元化データに対する再読み取りも行った。第1表に解析対象としたイベント数、読み取り数を示す。観測開始前の気象庁一元化データから吟味した震源も合わせてイベント数2544個、P波ピック数57218個、S波ピック数66551個を観測走時データとした。

解析には、Zhang and Thurber (2003) による Double-Difference Tomography コード tomoDD を使用した。初期震源位置には、気象庁一元化震源を用いた。また、イベントペアの作成には、初期震源位置に対し、HypoDD (Waldhauser and Ellsworth, 2000) 付属のコード ph2dt を使用した。

構造を表すグリッドは第1図に示すように、SK TL に合わせて北から時計回りに30度回転した座標を配置した。座標原点を観測点の一つ (N37.0623°, E138.8315°) として、グリッド位置は km 単位で、X 方向 (南東) に -40, -30, -20, -10, 0, 10, 25, 40, Y 方向に -72, -60, -48, -36, -24, -16, -8, 0, 8, 16, 24, 36, 48, 60, 72, 深さ方向に 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 34 とした。

初期速度構造は第2表に示す一次元の速度構造を用いた。

3. トモグラフィ解析結果と考察

3.1 解析結果

トモグラフィ解析結果のP波水平グリッド断面を第2図に示す。リファレンス速度は初期モデルの一次元構造である。信頼度の目安として、Derivative Weight Summation (Thurber and Eberhart-Phillips, 1999) を用いた。Derivative Weight Summation (以下DWS) は本震近傍の深さ9 km のグリッドで最大となり、値は20000程度である。信頼できる範囲として、DWSが1000以上のグリッドに(+)マークを入れた。

深さ6 km 断面では、六日町断層の断層トレースの西側に、およそ20 km (この区間のグリッドのY方向間隔は8 km) に渡って、コンターラインの配列が周辺よりも比較的密で、且つ直線的で等間隔となっている領域がある。これは、速度勾配が一様の領域が南北に単調に続いていることを意味している。したがって、深さ6 km では、余震域から地震空白域への遷移と関係がありそうな速度構造の変化は見られない。一方、深さ9 km 断面では、南側のグリッドの一つ (第2図中の大きな+) マーク) が、その南北のグリッドよりも若干高速度になっており、コンター

ラインは少し北西に張り出している。この特徴は以下に詳しく述べるが、この位置より北西側の新潟堆積盆地南部地域の速度構造と関連していると考えられる。

3.2 帯状の高速度域

新潟堆積盆地南部地域において、第2図の深さ9 km と12 km 断面に示す領域に北西-南東方向の帯状の高速度域が見られる。ここでの高速度域とは、リファレンス速度に対しての速度の高低ではなく、南北方向の隣接グリッドとの速度差である。この帯状の高速度域は、位置的に、この地域の褶曲構造と関連があるように思われる。この地域の褶曲の背斜軸と向斜軸 (産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2004a, b) をプロットしたものを第3図に示す。この地域の褶曲軸は、比較的直線的な境界で揃って終端または屈曲しており、帯状の褶曲帯を形成しているように見える。第3図中、帯状の褶曲帯の境界線と思われる位置に主観的に破線を引いた。第2図と第3図を見比べると、帯状の高速度域と褶曲帯は、ほぼ位置的に対応していることが分かる。この帯状の高速度域における10 km 付近の等速度面の起伏と褶曲帯との位置関係を把握するため、P波速度6.15 km/sec の等速度面を深さで色付けした図を、第4図に示す。二本の破線の内側は深さが12 km 付近から10 km 程度まで盛り上がった南東-北西に伸びる帯状の地域として確認できる。北西側がどこまで続くかは、今回の解析領域を外れているので分からない。少なくとも今回の解析結果から、幅はおよそ15 km で南東側は六日町断層南部にはじまり、東頸城丘陵を通り、北西側は米山までの長さ50 km 以上におよぶ。P波速度6.15 km/sec の等速度面として見たとき、盛り上がりの高さは約2 km である。

3.3 余震クラスターと帯状の高速度域の関係

第3図および第4図において帯状の褶曲帯の北側に引いた境界線を、南東へ余震域南部まで延長すると、余震のクラスターの南端で地震の数が減少する辺りに到達する。このクラスターが終端する辺りを境に、六日町断層沿いの余震活動と深部の速度構造には南北の差が生じているようである。ここで、この余震クラスターの位置と中越地震との関係について考察してみる。第4図にはOkamura *et al.* (2007) が褶曲地形をもとにバランス断面法によって推定したすべり面をメッシュで描いてある。この推定すべり面とクラスターの位置関係を示すために、斜め60度上方より東側から見た三次元図を第5図に示す。推定すべり面は、ほぼ平行な二つの面と、それらを斜めに繋ぐ面で構成されているように見える。そして、クラスターは本震断層に対応している上側の面の南側の延長上に存在していることが分かる。このクラスターは明確な面を構成してはいないが、位置

的には本震断層の南側の延長として伏在する断層面である可能性がある。

3.4 今後の課題

東頸城から米山付近への帯状の褶曲帯（第3図）については、Okamura (2003) は褶曲軸の終端が揃う例の一つとして触れており、バランス断面法において設定されるデタッチメント上のステップの存在によって解釈できるとしている。この帯状の褶曲帯と位置的に対応する等速度面の起伏が深さ10 km付近に見られたことは、褶曲の形成過程と関連があるかもしれない。しかし、対応しているのはあくまで速度構造の起伏の位置だけであって、グリッド間隔が大きいことによる分解能の低さから境界のイメージは明らかではない。したがって、これらの関連を追求するには、より分解能を高める努力が必要である。今回の解析で使った気象庁一元化データは、中越地震発生以前のものとして臨時観測期間内のものである。今後、臨時観測期間外のデータも使って解析することで、もう少し細かなグリッドで詳細なイメージを得ることが一つの課題である。

4. まとめ

2004年新潟県中越地震の震源域南部の地震空白域において行った臨時観測データを用い、Double-Difference トモグラフィによって、空白域とその周辺部の速度構造を推定した。新潟盆地南部の深さ10 km付近に、幅およそ15 kmの北西-南東方向の帯状の高速度域が存在し、帯状の褶曲帯と位置的に一致していることが分かった。この高速度域は深さ6 kmの断面には見られなかったことから、深さ10 km付近の深部に固有の特徴と推定される。また、六日町断層沿いに見た位置として、この高速度域に対応する褶曲帯の北側境界付近を境に南側で余震の数が減少していることが分かった。

文 献

- Aoki, S., Nishi, M., Nakamura, K., Hashimoto, T., Yoshikawa, A. and Ito, H. M. (2005), Multi-planar structures in the aftershock distribution of the Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004, *Earth Planets Space*, 57, 411-416.
- Imanishi, K., Kuwahara, Y., Takeda, T. and Haryu, Y. (2006), The seismicity, fault structure, and stress field in the seismic gap adjacent to the 2004 Mid-Niigata earthquake inferred from seismological observations, *Earth Planets Space*, 58, 831-841.
- Kato, A., Sakai, S., Hirata, N., Kurashimo, E., Iidaka, T., Iwasaki, T. and Kanazawa, T. (2006), Imaging the seismic structure and stress field in the source region of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake: Structural zones of weakness and seismogenic stress concentration by ductile flow, *J. Geop. Res.*, 111. doi:10.1029/2005JB004016.
- 金 幸隆 (2004), 魚沼丘陵の隆起過程と六日町断層の活動累積, *活断層研究*, 24, 63-75
- Korenaga, M., Matsumoto, S., Ito, Y., Matsushima, T., Uehira, K. and Shibutani, T. (2005), Three dimensional velocity structure around aftershock area of the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake (M6.8) by the Double-Difference tomography, *Earth Planets Space*, 57, 429-433.
- Okamura, Y. (2003), Fault-related folds and an imbricate thrust system on the northwestern margin of the northern Fossa Magna region, central Japan, *The Island Arc*, 12, 61-73.
- Okamura, Y., Ishiyama, T. and Yanagisawa, Y. (2007), Fault-related folds above the source fault of the 2004 mid-Niigata Prefecture earthquake, in a fold-and-thrust belt caused by basin inversion along the eastern margin of the Japan Sea, *J. geophys. Res.*, 112. doi:10.1029/2006JB004320.
- 大竹政和, 平 朝彦, 大田陽子 (2002), 日本海東縁の活断層と地震テクトニクス, 東京大学出版会
- 大竹政和 (2005), 第160回地震予知連絡会資料-会長資料
- Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T. (2000), Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan, *Pure Appl. Geophys.*, 157, 2303-2322.
- Sakai, S., Hirata, N., Kato, A., Kurashimo, E., Iwasaki, T. and Kanazawa, T. (2005), Multi-fault system of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake and its aftershocks, *Earth Planets Space*, 57, 417-422.
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004a), 20万分の1数値地質図幅集「関東甲信越及び伊豆小笠原諸島」
- 産業技術総合研究所地質調査総合センター (2004b), 20万分の1数値地質図幅集「東北」
- Thurber, C. and Eberhart-Phillips, D. (1999), Local earthquake tomography with flexible gridding, *Comput. Geosci.*, 25, 809-818.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W. L. (2000), A double-difference earthquake location Algorithm: Method and application to the Northern Hayward fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, (6), 1353-1368.
- Zhang, H. and Thurber, C. H. (2003), Double-Difference tomography: The method and application to the Hayward fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 93, (5), 1875-1889.

(受付: 2007年10月1日, 受理: 2007年11月1日)

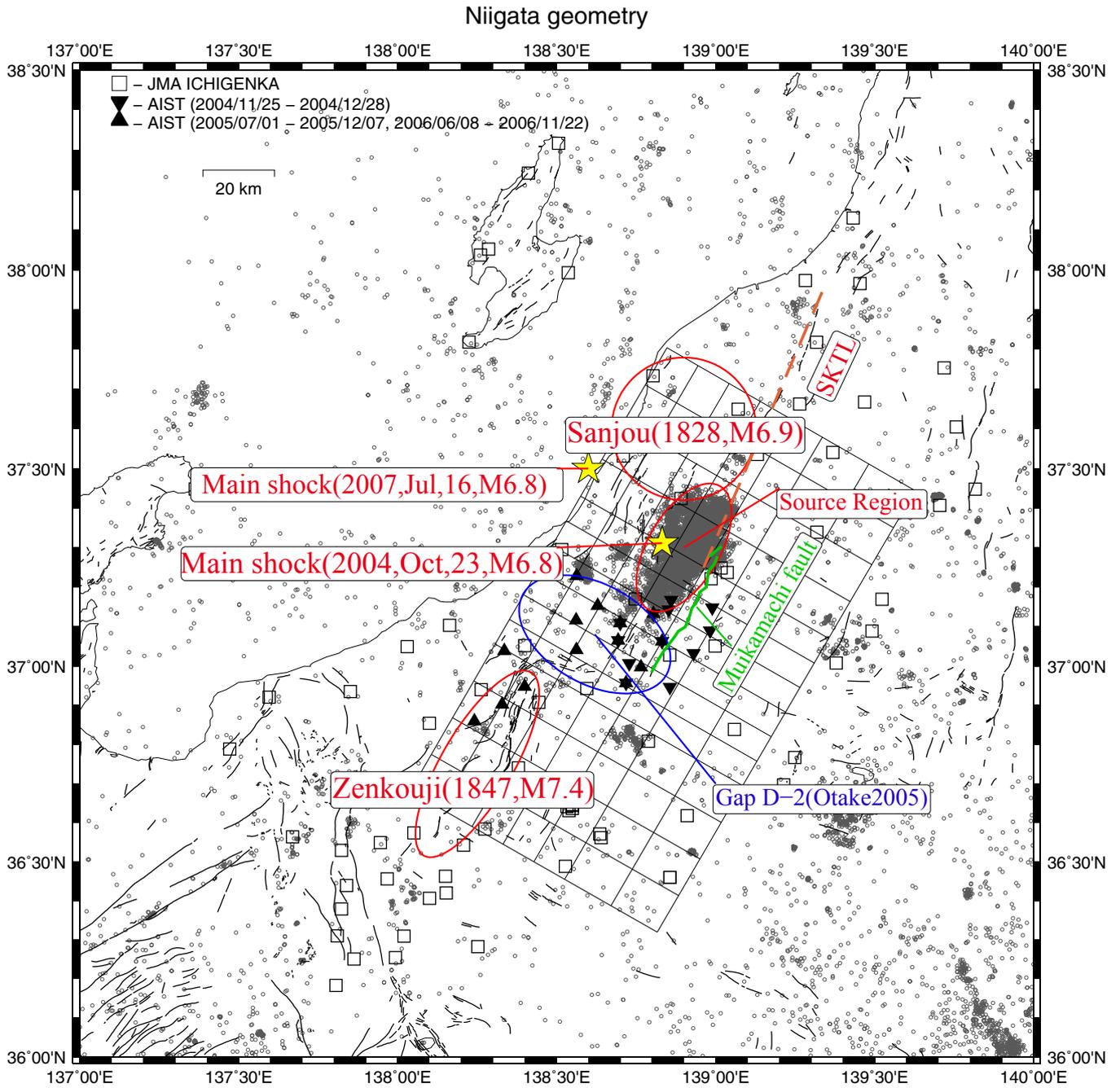
第1表. 解析に使用した震源数および読み取り走時数の各観測期間の総計.
 Table 1. The number of picks and hypocenters used in this study for three periods of the observation by AIST.

period	station	earthquake	P-wave	S-wave
2004/11/25 -2004/12/28	12	148	1968	2024
2005/7/1 -2005/ 12/7	13	977	28833	34230
2006/6/8 -2006/11/21	14	485	12083	15972

第2表. 初期 P 波速度構造(tomoDD への入力). S 波は P 波構造の全グリッドに $V_p/V_s=1.73$ を与えた.

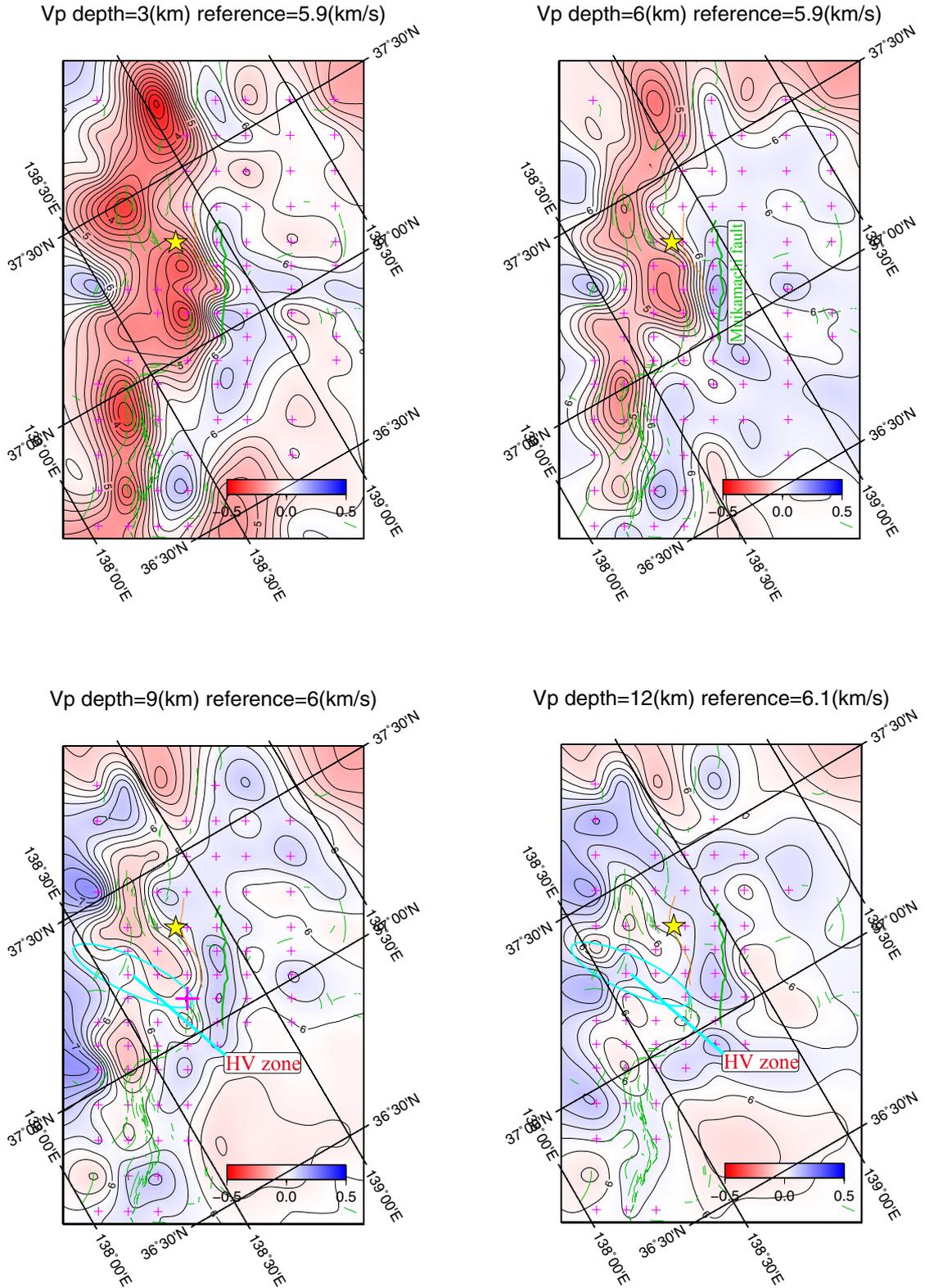
Table 2. Initial P-wave velocity structure for tomoDD. $V_p/V_s=1.73$ at all grid.

depth of z-grid (km)	0	3	6	9	12	15	18	34
P-wave velocity (km/sec)	5	5.9	5.9	6.0	6.1	6.2	6.5	7.8



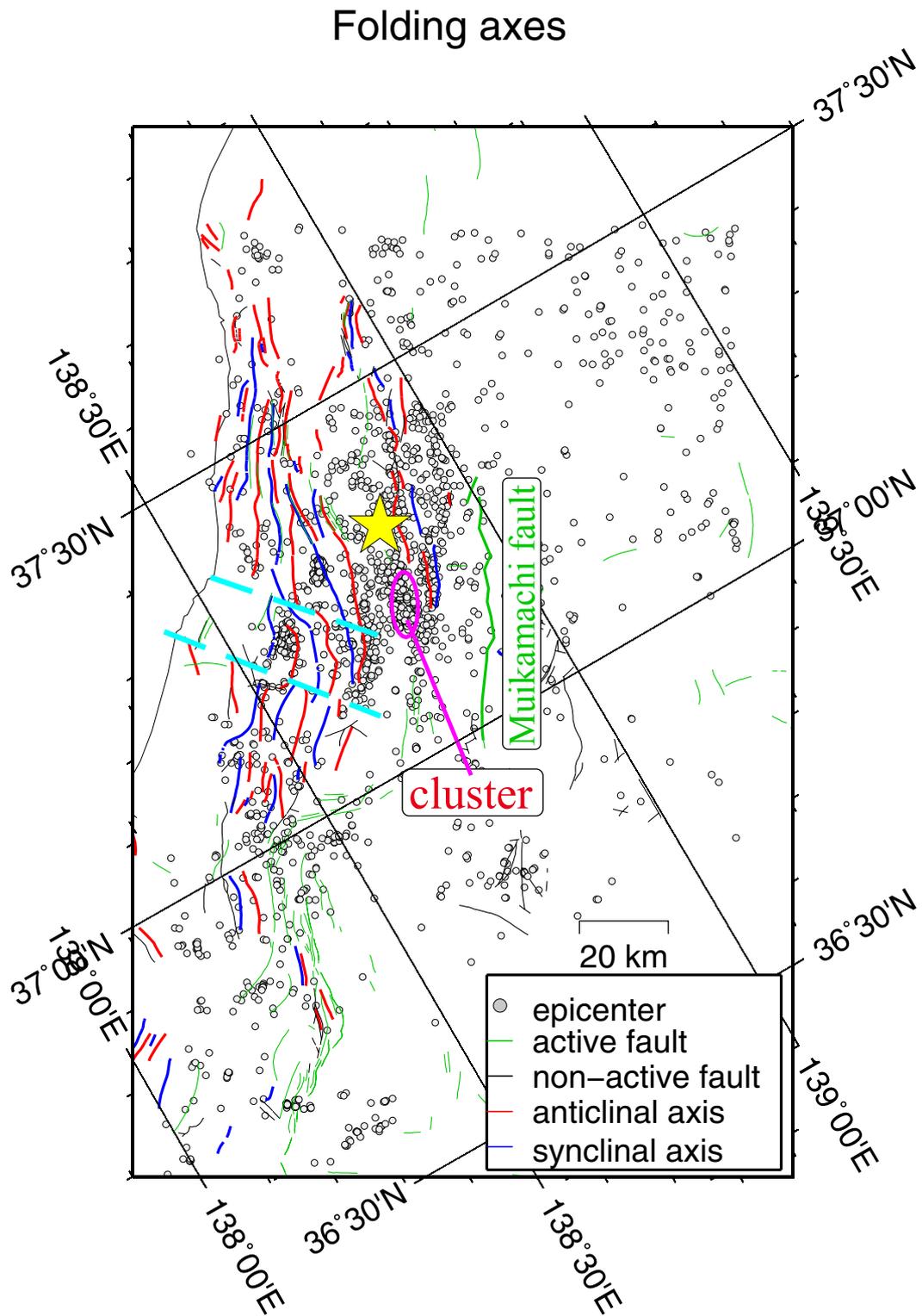
第1図. 2004年新潟県中越地震震源域の広域概観図. 気象庁一元化観測点は□で表され, 本研究で設置した臨時観測点は▲および▼で表されている. 黒丸は2004/10/23 から2006/12/31までの, 気象庁によって決定された一元化震源 ($M_{JMA} > 1.0$) を表している.

Fig. 1. Overview of the source region of 2004 mid-Niigata prefecture earthquake, Japan. The permanent and temporal seismic stations used in this study are described as square and triangle respectively. The dots indicate the location of earthquakes ($M_{JMA} > 1.0$) determined by JMA for the period from October 23, 2004 to December 31, 2006.



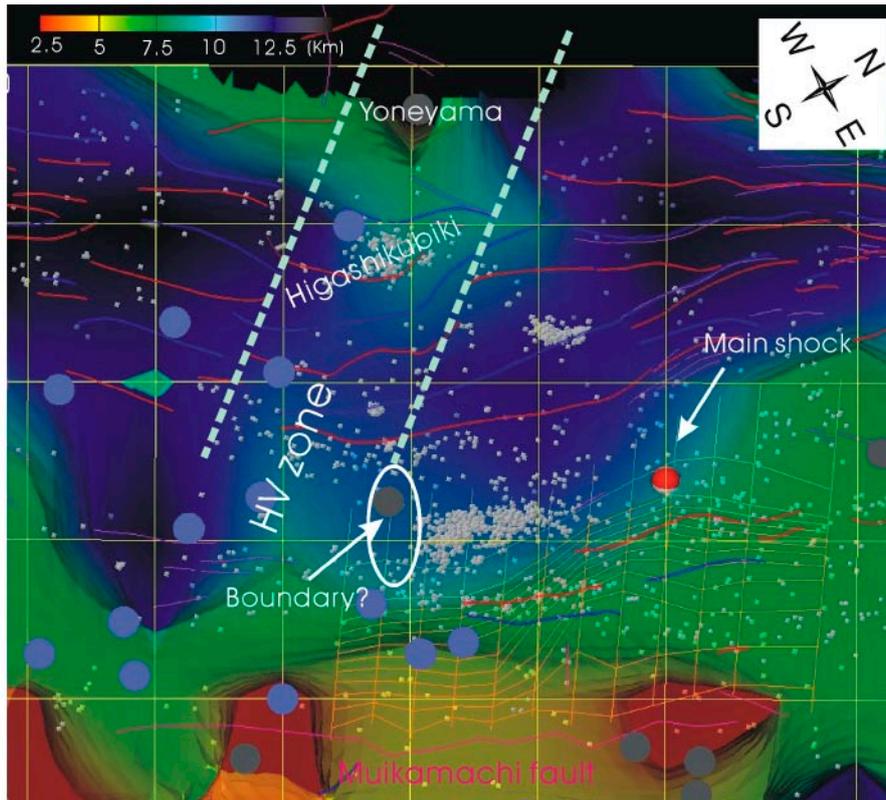
第 2 図. P 波トモグラフィ結果の水平グリッド断面図。カラースケールは、 $(V_p - \text{reference}) / \text{reference}$ を表している。青色の楕円は本文で着目する帯状の高速度域を示している。緑の線と黄色の星印は活断層トレースと本震の震源位置を表している。+ マークは DWS が 1000 以上のグリッドを表している。

Fig. 2. Horizontal slice views of P-wave velocity structure. Color scale indicates $(V_p - \text{reference}) / \text{reference}$. Blue ellipsoid indicates the belt-like high velocity zone that are focused in the main text. Green lines indicate the active faults in this area. Yellow star indicates the epicenter of the main shock. The marked grid with (+) indicates the reliable grid in this study (i.e. DWS > 1000).



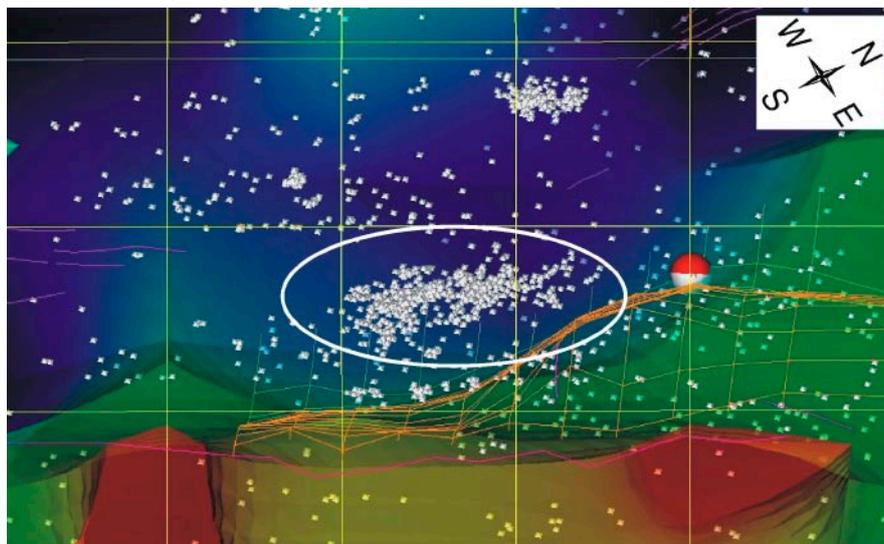
第3図. 褶曲軸の位置(青と赤の線)と褶曲帯の境界(水色の破線). 黒丸は本研究のトモグラフィおよび震源決定に用いられた震源を表している.

Fig. 3. Overview of the position of the folding axes (blue and red lines) and boundaries of folding belt (light blue dashed lines). Dots indicate the earthquakes selected for tomography and relocation in this study.



第4図. 6.15 km/sec の等速度面の概観図. 面の深さを色で表している. 左上にカラー
スケールバーを示した. 図中の赤と青の線は, それぞれ背斜軸と向斜軸を
表している. 青丸と黒丸は臨時観測点と気象庁一元化観測点を表している.

Fig. 4. Overview of isovelocity (6.15 km/sec) surface of source region. The colored scale
bar at upper left corner indicates the depth. The red and blue lines indicate the
anticlinal and synclinal axes respectively. The blue and black circles indicate the
temporal (AIST) and permanent (JMA, Ichigenka) station respectively.



第5図. 60度(本震断層傾斜を意味する)斜め上方東側から見た余震分布. 白の楕円は注目
する余震のクラスター(本文参照)を示す. オレンジのメッシュラインは Okamura *et al.*
(2007) によって推定されたすべり面を表している. 等速度面のカラーと深さの対応は
第4図と同じ.

Fig. 5. Overview of hypocenter distribution from upper direction of 60 that means the main
shock dip angle. White circle indicates the cluster of aftershocks (see text). The guide
mesh (orange line) indicate the estimated slip surface (Okamura *et al.*, 2007). The color
of isovelocity surface indicates the depth value as same as Fig. 4.