

火山地域・歪み集中帯における三次元地震波速度構造

中島淳一・長谷川昭

東北大学大学院理学研究科地震・噴火予知研究観測センター

E-mail: nakajima@aob.geophys.tohoku.ac.jp

Three-dimensional seismic velocity structure in volcanic areas and high-strain-rate zone in Japan

Junichi Nakajima and Akira Hasegawa

Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions,
Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, JAPAN

Since the pioneering work by Aki and Lee (1976), travel-time tomography has been applied to various regions and provided crucial constrains on understanding heterogeneous structure in the earth. Here we address tomographic imaging of detailed crustal structures of a volcanic area and a high-strain-rate zone. Beneath the Onikobe volcanic area, NE Japan, a narrow conduit is revealed in the upper crust, which is connected to a low-velocity and high- V_p/V_s zone in the lower crust and uppermost mantle. The V_p/V_s values in the conduit are moderate to low and can be explained by the existence of H_2O with large aspect ratios. We estimate 3D velocity structure beneath the Niigata-Kobe Tectonic Zone (NKTZ), which is known as a high-strain-rate zone with contraction rates of a few times larger than the surrounding regions. The results show that the depth extent of the low-velocity zone varies along the NKTZ and the NKTZ is divided into three regions on the basis of the velocity structure. These results suggest that the origin of the high-strain-rate zone varies along the NKTZ.

1. はじめに

地震波速度トモグラフィーとは、観測点での観測走時（標準モデルから期待される理論走時と観測値との差）を用い、地球内部の速度構造を推定する方法である。Aki and Lee (1976) が地震波速度トモグラフィーの最初の論文である。彼らは地球内部を複数のブロックに分割し、その内部で速度は一定であると定式化を行った。解析には、32個の地震、60の観測点を用い、サンアンドレアス断層に沿った低速度域を見出した。その後、Thurber (1983) により地球内部に格子点を配置し、その点での速度を未知数として構造を推定するグリッドインバージョン法が提案され、以後グリッドインバージョンが主流となっている。沈み込み帯においては、Zhao et al. (1992) が開発した手法が多く使われている。彼らは、地球内部の速度不連続面（モホ面・プレート上面境界など）を考慮に入れたインバージョン法を開発し、東北日本沈み込み帯に適用した。その結果、マントルウエッジに沈み込むスラブにほぼ平行な傾斜した低速度域の存在が明らかになり、

それはプレートの沈み込みによって誘発された二次対流の上昇流部分に相当すると解釈されている。

地球内部で進行しているダイナミクスを理解する上で、トモグラフィーで得られた結果（地震波速度異常）の解釈が重要になってくる。一般的には、低速度異常の解釈として、温度の影響および流体の存在を考慮に入れる場合が多い。そのうち、流体ポアを含む媒質の地震波速度については、多くの研究がなされており、特に流体の圧縮率が V_p/V_s 比に大きく影響することが知られている。しかし、ポアの形状も V_p/V_s 比に大きく影響することはあまり知られていない。Takei (2002) は、「等価アスペクト比」という概念を用いて、固液複合計の地震波速度に与える流体の体積分率、ポア形状、そして流体の物性の影響を系統的に整理し、これらの性質を地震波速度データの逆解析により知り得ることを示した。これまでの多くの研究では、水が存在すると V_p/V_s 比が大きくなるという議論・解釈を行っているが、Takei (2002) よればその形状によっては V_p/V_s 比が小さくなることもある。図 1 に Takei (2002) の結果を示す。図 1(a) は縦軸が P 波と S 波の速度低下率の比 ($d \ln V_p / d \ln V_s$) であり、トモグラフィーなどにより観測可能な量である。図中の曲線は固相と液相の物性によって決まる曲線であるため、それらの物性を仮定すれば観測値からポアの形状（横軸）を推定することができる。また、図 1(b) を用いれば、得られたポア形状と S 波の速度低下率から流体の体積分率が計算出来る。このようにして、P 波と S 波の速度低下率から、ポアの形状と流体の体積分率を求めることができるのである。Nakajima et al. (2005) は、東北地方のマントルウエッジにイメージングされている斜めの低速度域について、Takei (2002) のモデルを適用し、深さによるポア形状の変化を明らかにした。彼らは、生成域では平衡状態にあるメルトが上昇に伴いダイクやクラック状に変化すると指摘している。

上述のように、マントルにおいては、トモグラフィーで得られた結果の定量的解釈がなされつつある。今度、観測精度の向上および手法の改良により、より精度の高い不均質構造の推定が可

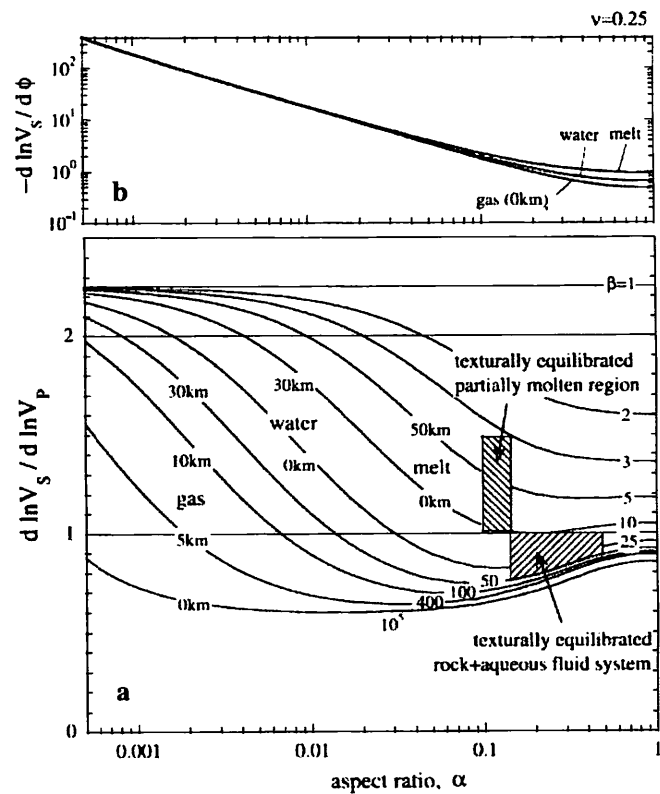


図 1. (a) $d \ln V_p / d \ln V_s$ とアスペクト比, (b) アスペクト比と体積分率 f との関係 (Takei, 2002)

Fig. 1. (a) Relationship between $d \ln V_p / d \ln V_s$ and aspect ratio, and (b) that between aspect ratio and volume fraction, ϕ (after Takei, 2002).

能になれば、地球内部で進行しているダイナミクスの理解が深まるであろう。

一方、地殻内については、構成鉱物が変化に富んでおり、速度不均質構造の定量的な解釈を行うまでには至っていない。しかしながら、地殻についても流体を含むポアの形状や流体の体積分率の情報は、地震発生様式および島弧火山活動の理解やそのモデル化のためには不可欠であるため、今後は地殻についても定量的な解釈を行っていく必要がある。以下では、地殻内不均質構造の例として、深部から流体が供給されていると考えられる火山地域と歪集中帯の速度構造を報告する。

2. 火山地域の速度構造～宮城県鬼頭地域を例に～

2-1. 宮城県鬼頭地域

宮城県鬼頭地域は日本でも有数の火山地帯であり、地熱活動が活発なことで知られている。この地域には、栗駒山、鳴子山の二つの活火山および多数のカルデラが存在し、鬼頭地域では、過去約10年おきに比較的規模の大きな地震が発生していることが知られている（1976年 M4.9；1985年 M5.3, 1996年 M5.9, M5.7）。1996年の地震発生直後には27点、翌年には44点のオフラインの臨時地震観測点を展開し、余震観測を行った。その結果、M5.9の地震は逆断層型、M5.7の地震は横ずれ型であること、これらの地震はカルデラとカルデラの間（カルデラの縁）で発生したことが、余震の多くは深さ10km以浅で発生していること、などが明らかになった（海野・他, 1998）。

Nakajima and Hasegawa (2003)は、これらの臨時観測点で得られたデータに加えて、東北大微小地震観測網で得られた約2年間のデータも同時に用い、地震波速度構造を推定した。ここでは、その研究内容を簡単に紹介する。

Nakajima and Hasegawa (2003)は、これらの臨時観測点で得られたデータに加えて、東北大微小地震観測網で得られた約2年間のデータも同時に用い、地震波速度構造を推定した。ここでは、その研究内容を簡単に紹介する。

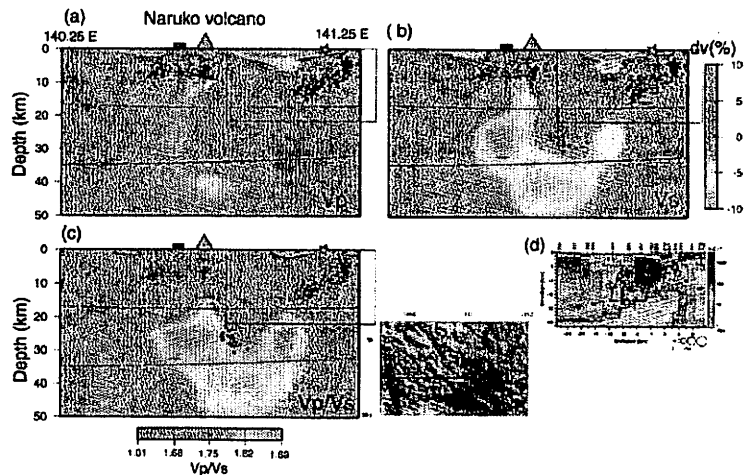


図2. 北緯38.75度に沿った(a) P波、(b) S波速度パーターベーション、(c) V_p/V_s 比の東西鉛直断面図。赤丸は低周波地震、赤線はS波反射面、黒点は微小地震である。(d) 比抵抗構造(Mitsuhata et al., 2001)。

Fig. 2. (a-c) Vertical-cross section of (a) P-wave and (b) S-wave velocity perturbation, and (c) V_p/V_s ratio along the latitude of 38.75N. Red circles, red lines, and dots represent deep, low-frequency earthquakes, S-wave reflectors, and microearthquakes, respectively. (d) Results of resistivity model (Mitsuhata et al., 2001).

2-2. データ・手法

解析には、96, 97年の余震観測点で観測された地震732個と1997年10月から2000年12月までに東北地方で発生し

た地震 5096 個を用いた。解析領域内を通過する波線の数は、P 波が 53131 本、S 波が 38587 本であった。

解析領域は宮城県鬼頭地域であるが、解析領域の端や深部構造を精度良く推定するために、前述のように東北地方全域の地震を解析に用いた。その際、解析領域の外側の構造は、Nakajima et al. (2001a,b)の三次元地震波速度構造で固定し、解析領域内 (38.75-39.125N, 140.5-140.875E, 0-15km) の速度のみをインバージョンで推定するという方法をとった。全ての震源はインバージョン前に Nakajima et al. (2001a,b)の構造で再決定している。

グリッド間隔は水平方向 0.0625 度、鉛直方向 5-7km とした。地殻内の不連続面としては、コンラッド面・モホ面を考慮に入れた。6 回のイタレーションで回はほぼ収束し、走時残差は P 波で 0.17 秒から 0.15 秒に、S 波で 0.25 秒から 0.23 秒に減少した。

2-3. 結果と議論

図 2 は鳴子火山を通る東西鉛直断面である。Nakajima et al. (2001b) で指摘されているように、最上部マントルから下部地殻にかけては低速度・高 V_p/V_s 領域が存在する。東北日本の火山地域の地温勾配は深さ 20km 程度で玄武岩のウェットソリダスと交わるため、最上部マントル・下部地殻の低速度異常は部分熔融によるものと考えられる。図 2 (a), (b)をみると、鳴子火山西側の上部地殻には細い管状の低速度域が P 波、S 波ともに存在している。注目すべきことに、この管状の低速度域では V_p/V_s 比が大きくないという特徴がある。

Takei (2002) によると、深さ 10 km 程度の温度・圧力条件下で P 波、S 波が低速度で V_p/V_s 比はほとんど変化しないという速度異常を生じるのは、岩石中の包含物として H_2O か気体を考えた場合である。地表付近の浅部においては包含物として気体を考えることもできようが、深さ 5-15 km という高圧下では気体を想定することは無理であろう。そこで、鳴子火山下 5-15 km の低速度の管を生じる要因として H_2O の存在を仮定する。鳴子火山西側の上部地殻に存在する管状の低速度域は $d \ln V_s / d \ln V_p = 0.8-1.2$, $-d \ln V_s = 5-10\%$ であり、Takei (2002) の結果を用いて空隙のアスペクト比と流体の体積率を推定すると、空隙のアスペクト比は 0.02 より大きく、流体の体積率は 0.3-5 % と見積もることができる。この結果は、上部地殻内の管状の低速度域内には周囲に比べ H_2O が多量に存在することを示唆している。しかしながら、物性の不均質および温度不均質の効果を考慮していないため、今後さらなる検討が必要である。

図 2 では最上部マントル・下部地殻の低速度、高 V_p/V_s 域から東に延びる低速度域も確認できる。特に S 波で顕著な低速度になっており、 V_p/V_s 比も周囲に比べやや大きくなっている。前弧

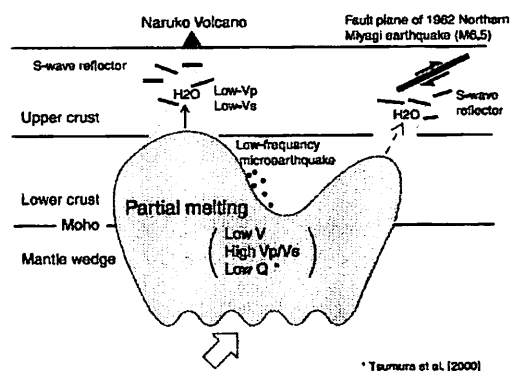


図 3. 鳴子火山を通る東西鉛直断面の模式図。
Fig.3. Schematic figure of the crust crossing the Naruko volcano.

側にみられる低速度域は、東に向かって浅くなりその先端は深さ 10 km 程度まで達している。図 2 をみるとわかるように、低速度域の先端付近では微小地震活動が活発である。この地域では、1900 年に M7.0、1962 年に M6.5 の宮城県北部地震が発生しており、以前から微小地震活動が活発な場所として知られている。宮城県北部地震の震源域周辺で MT 観測が行われ、図 2 (d) のような比抵抗構造が得られた (Mitsuhashi et al., 2001)。図 2(d) をみると、宮城県北部地震の震源域直下には極めて低比抵抗の領域が存在することがわかる。Mitsuhashi et al. (2001) はこの低比抵抗領域は下部地殻から供給された H₂O によって生じていると指摘している。この低比抵抗領域は火山フロント側から東に向かって浅くなっているようにもみえ、本研究で得られた S 波の低速度域と空間的によく対応する。

これらの観測事実に基づき、図 3 のような模式図が提案された。最上部マントルの低 V_p・低 V_s・高 V_p/V_s 領域は部分熔融していると推定され、下部地殻ではそれが火山フロント直下とその前弧側の二つに分離している。下部地殻の部分熔融域から上部地殻に H₂O が供給され、一方は鳴子火山や鬼首カルデラに向かい、他方は宮城県北部地震の震源域直下まで上昇してきていると推定される。両地域で多数見つかっている S 波反射面は上部地殻内にトラップされた H₂O をみているのかもしれない。

3. 新潟-神戸歪集中帯の深部構造

3-1. 新潟-神戸歪集中帯

国土地理院の GEONET (GPS Earth Observation NETwork) により、新潟から神戸に至る歪集中帯 (新潟-神戸歪集中帯 : NKTZ) の存在が明らかになった (Sagiya et al., 2000)。歪集中帯は北東-南西方向に長さ約 500km、幅約 100km であり、周囲よりも数倍短縮歪速度が大きいことが知られている。このような歪集中帯の存在は、過去百年の三角測量によっても見出されている (Hashimoto and Jackson, 1993)。

Iio et al. (2002) は、この歪集中が上盤 (陸) 側のプレート内の変形であると考え、上盤側プレートのある地域の下部地殻が弱くなっており、上盤側プレートが海洋プレートによる loading を受けて変形をする時に、この地域の上部地殻が大きな変形速度を持つという解釈を行った。Hyodo and Hirahara (2003) は、この考えを数値モデル化して検証し、弾性的な地殻の厚さが半分 (上部地殻相当部分)、かつその剛性率が半分であるか、弾性的厚さが 5 km であるれば、観測事実を説明出来ると結論づけた。一方、Yamasaki and Seno (2005) は、フィリピン海プレートと上盤側とのカップリング

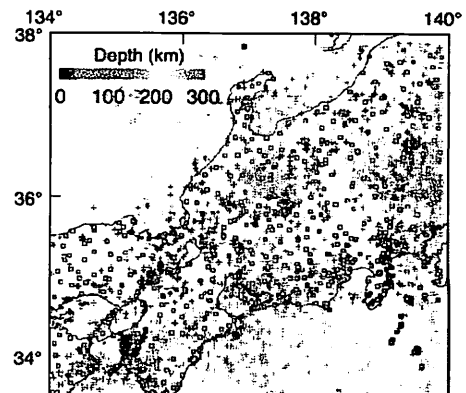


図 4. 解析に用いた地震 (+) と観測点 (□) 分布。

Fig.4. Distribution of earthquakes (crosses) and seismograph stations (squares) used in this study.

によって loading を与え粘弾性変形を計算し、歪集中帯下の最上部マントルおよびその海側のマントルウエッジに低粘性領域を考えれば、歪集中のパターンを説明出来るとした。

このような数値モデルにより歪集中帯の変形を説明することは可能であるが、地下の不均質構造の情報とは独立に構築されたモデルである。歪集中帯の原因を理解するためには、詳細な三次元不均質を推定しそれを考慮に入れたモデルを構築することが必要である。ここでは、Nakajima and Hasegawa (2007) により推定された三次元地震波速度構造を報告する。

3-2. データ・手法

1997年10月から2005年に発生したM2以上の地震4413個から得られたP波・S波到着時刻データ(P波:337423, S波:217056)を解析に用いた。使用した観測点は796点である。地震と観測点分布は図4に示してある。解析には、Zhao et al. (1992)の手法を用い、グリッドは水平方向に0.2度間隔、鉛直方向に5-20km間隔で設置した。初期速度構造はJMA2001を用いた。解は5回のイタレーションでほぼ収束し、P波走時残差は0.32秒から0.23秒に、S波走時残差は0.58秒から0.41秒に減少した。

解の信頼度を確かめるために、解析に用いた地震と観測点の組み合わせでシンセティックデータを作成し、チェッカーボードレゾリューションテストを行った。図には示していないが、上部地殻・下部地殻・最上部マントルとも、解の戻りは非常によく、今回推定された構造の信頼度は高いと考えられる。

3-3. 結果と議論

新潟-神戸歪集中帯に沿ったP波、S波速度および V_p/V_s 構造を図5に示す。歪集中帯に沿っては、下部地殻に顕著な低速度異常が存在することがわかる。この結果は特にP波で顕著である。また、歪集中帯の北東部では最上部マントルも低速度になっている。

我々は、速度構造の特徴から、新潟-神戸歪集中帯を三つの領域(領域A, B, C)に分割した。領域Aは大阪湾から琵琶湖の東部に至る領域で、その直下

にフィリピン海プレートが低角で沈み込んでいる。そのため、最上部マントルは高速度異

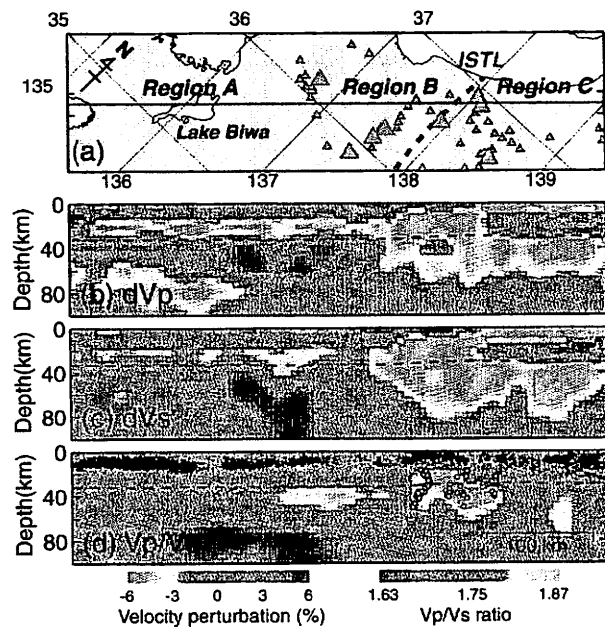


図5. 新潟-神戸歪集中帯に沿ったP波、S波速度パーターベーション、 V_p/V_s 構造。白丸は低周波地震、黒点は微小地震である。

Fig. 5. Vertical-cross section of P-wave and S-wave velocity perturbation, and V_p/V_s ratio along the NKTZ. White circles and dots represent deep, low-frequency earthquakes and microearthquakes, respectively.

常になっている。下部地殻の低速度異常域の直下のフィリピン海プレートが存在することから、下部地殻の低速度異常は不フィリピン海プレートからの脱水によって生じた水が原因である可能性がある。

領域 B は火山地域に対応し、その東端はほぼ糸魚川-静岡構造線に対応する。この地域の特徴は、低速度域が最上部マントルから上部地殻まで連続的に分布することである。この低速度域は、太平洋プレートやフィリピン海プレートから放出された水によって引き起こされた部分熔融域であると推測される。下部地殻の高 V_p/V_s (~ 1.85) は、東北日本の火山地域で観測されている値とほぼ同じであり、そこは部分熔融していることが示唆される。

領域 C は糸魚川-静岡構造線より北東側に相当し、上部地殻と最上部マントルが低速度である。上部マントルの低速度域は領域 B と同様に、部分熔融域を反映していると考えられる。一方、上部地殻の低速度域は、日本海拡大時に堆積したこの地域特有の厚い堆積層によって生じていると推測される。興味深いことに、領域 C では下部地殻に低速度域は存在しない。

これらの結果は、新潟-神戸歪集中帯はその走向方向で深部構造の特徴が異なることを示している。Iio et al. (2002, 2004) で指摘されている下部地殻の低粘性領域は、領域 A, B でイメージされている低速度域に対応すると考えられる。一方、領域 B, C においては、最上部マントルにも低速度域が分布しており、Yamasaki and Seno (2005) で指摘されているように、最上部マントルの低粘性領域も考える必要がある。歪集中帯の原因をよりよく理解するためには、下部地殻・最上部マントルの不均質構造を考慮に入れたモデル化を行い、歪集中帯の走向方向に沿った変化も議論していく必要があるであろう。

参考文献

- Aki, K., and W.H.K. Lee, Determination of three-dimensional velocity anomalies under a seismic array using first P arrival times from local earthquakes, 1. A homogeneous initial model, *J. Geophys. Res.*, **81**, 4381-4399, 1976.
- Hashimoto, M., and D.D. Jackson, Plate tectonics and crustal deformation around the Japanese islands, *J. Geophys. Res.*, **98**, 16149- 16166, 1993.
- Hyodo, M. and K. Hirahara, A viscoelastic model of interseismic strain concentration in Niigata-Kobe Tectonic Zone of central Japan, *Earth Planets Space*, **55**, 667-675, 2003.
- Iio, Y., T. Sagiya, Y. Kobayashi, and I. Shiozaki, Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **203**, 245-253, 2002.
- Iio, Y., S. Takeshi, and Y. Kobayashi, Origin of the concentrated deformation zone in the Japanese Islands and stress accumulation process of intraplate earthquakes, *Earth Planets Space*, **56**,

- 831-842, 2004.
- Mitsuhashi, Y., Ogawa, Y., Mishina, M., Kono, T., Yokokura, T., Uchida, T., Electromagnetic heterogeneity of the seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4371-4374, 2001.
- Nakajima, J., and A. Hasegawa, Tomographic imaging of seismic velocity structure in and around the Onikobe volcanic area, northeastern Japan: Implications for fluid distribution, *J. Vol. Geotherm. Res.*, **127**, 1-18, 2003.
- Nakajima, J., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, D. Zhao, Three-dimensional structure of V_p , V_s and V_p/V_s beneath the northeastern Japan arc: Implications for arc magmatism and fluids. *J. Geophys. Res.* **106**, 21843-21857, 2001a.
- Nakajima, J., Matsuzawa, T., Hasegawa, A., Zhao, D., Seismic imaging of arc magma and fluids under the central part of northeastern Japan. *Tectonophysics* **341**, 1-17, 2001b.
- Nakajima, J., Y. Takei, and A. Hasegawa, Quantitative analysis of the inclined low-velocity zone in the mantle wedge of northeastern Japan: A systematic change of melt-filled pore shapes with depth and its implications for melt migration, *Earth, Planet. Sci. Lett.*, **234**, 59-70, 2005.
- Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada, Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, *Pageoph*, **157**, 2303-2322, 2000.
- Takei, Y., 2002. Effect of pore geometry on V_p/V_s : From equilibrium geometry to crack. *J. Geophys. Res.* **107**, 2043, 10.1029/2001JB000522, 2002.
- Thurber, C.H., Earthquake locations and 3-dimensional crustal structure in the Coyote Lake area, central California, *J. Geophys. Res.*, **88**, 8226-8236, 1983.
- 海野徳仁・松澤 暢・堀 修一郎・中村綾子・山本 明・長谷川 昭・吉田武義, 1996 年 8 月 11 日宮城県鬼首付近に発生した地震について, *地震* **2**, **51**, 253-264, 1998.
- Yamasaki, T., and T. Seno, High strain zone in central Honshu resulting from the viscosity heterogeneities in the crust and mantle, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **232**, 13-27, 2005.
- Zhao, D., A. Hasegawa, and S. Horiuchi, Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan. *J. Geophys. Res.*, **97**, 19909-19928, 1992.