

# 火山フロント前面の地殻中深部の低比抵抗域

三品 正明

東北大学大学院理学研究科

## Low Resistivity Zone at the Middle and the Lower Crust

### of Forearc Region of Volcanic Front

Masaaki Mishina

Graduate School of Science, Tohoku University

#### Abstract

Wideband magnetotelluric surveys were performed in the central part of the Tohoku district. Three observation lines were located crossing volcanic front along the Ou mountains. Characteristic distributions of resistivity are as follows.

(1) To the west of the volcanic front, remarkably low resistivity areas were located in the lower and the middle crust. These low resistivities were considered to be concerned with volcanic activities of active or quaternary volcanoes in the Ou Mountains. Low frequency earthquakes in the deeper crust were located by the side of the low resistive region.

(2) To the east of the volcanic front, there exist two types of low resistive zone. One is located near the volcanic front, and another is far from the front. The former is in the upper crust and is connected to the low resistive area to the west of the front through low resistive belt. So, we can conclude the low resistivity is caused by fluids supplied from volcanic front. The latter may be caused by fluid passing through different path.

(3) Almost all the low resistive area corresponds to low velocity area of seismic waves, especially S-wave (e.g. Nakajima et al., 2001).

(3) Eastern low resistive areas are located near the steep zone of Bouguer anomalies. We can think about the eastern low resistive area as the trapped water by cap rocks of the Kitakami Mountains.

#### 1. 火山フロント付近での広帯域 MT と低比抵抗域の分布

東北日本の脊梁山地東縁には、火山フロントが山脈に沿って走っている。火山フロント付近の地殻中深部には、低周波地震が発生することが知られている（例えば、岡田・長谷川，2000）。東北地方中部では、活火山あるいは第四紀火山とされる鳴子火山付近、栗駒火山付近、焼石岳付近などで地殻深部の低周波地震が発生している。岡田・長谷川(2000)や Nakamichi et al.(2003)が指摘しているように、これらの低周波地震の発震機構には流体が関与しているものと考えられている。流体の

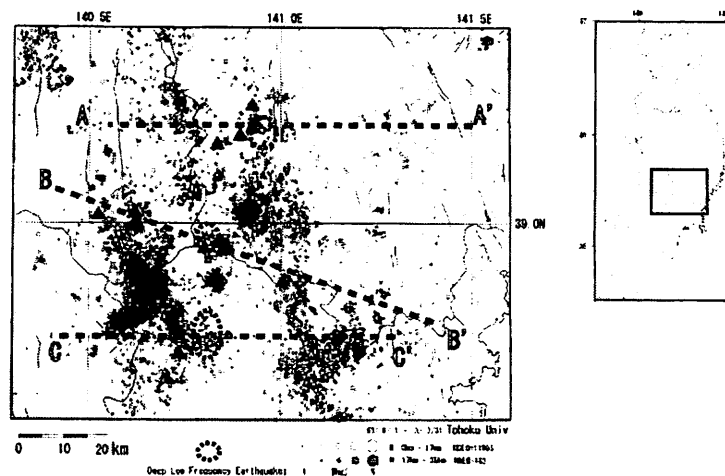


Fig. 1 Map of observed area. A-A', B-B' and C-C' are observation lines of wide band magnetoterrulic survey. Small circle denotes epicenter of micro-earthquake respectively. Grey circles enclosed by dotted lines denote deep low frequency earthquakes. Solid triangles are active and quaternary volcanoes.

存否を知るためには、比抵抗分布の情報が非常に有用である。筆者は科学研究費の交付を受け、2004年から2006年にかけての3ヵ年に、東北日本弧中部の脊梁山地を横断する3測線で広帯域MT観測を実施した。Fig.1は広帯域MT観測を実施した地域の図である。図で▲が活火山あるいは第四紀火山の位置（日本火山学会、1999）である。その近くに破線で囲んだ灰色の六角形が地殻深部低周波地震の震央である。黒の六角形は普通の（低周波ではない）地殻内地震の震央である。図のように地殻深部低周波地震は火山フロント近傍のごく限られたところにしか起きていない。これらの低周波地震発生域をとる3本の太破線（A-A'、B-B'、C-C'）が、広帯域MT観測の測線である。

これらの3測線での観測データを、Ogawa and Uchida(1996)による2次元インバージョン手法により解析し、それぞれの比抵抗分布を得た。Fig.2にその結果を示す。上から焼石岳付近を通る測線（A-A'）、栗駒山付近を通る測線（B-B'）、鳴子火山付近を通る測線（C-C'）の結果である。この図は縦横比が1:1で、黒が高比抵抗、白が低比抵抗を表している。それぞれにFの表示は火山フロントの位置で、細い破線は地殻深部低周波地震の震源域を囲んでいる。図で明らかなように、低周波地震は地殻下部あるいは地殻中部にある顕著な低比抵抗域（白色部）の縁辺部にある。このことは前述の低周波地震発生への流体の関与を支持する事実と考えられる。

Fig.2では、火山フロントの東側（前弧側）の地殻内にも顕著な低比抵抗域がある（太い破線部）。各測線について、観測データとの整合の度合いから、このような顕著な低比抵抗値の确实度を検討した。たとえば、焼石岳測線（A-A'）の場合、火山フロントのすぐそばの上部地殻にある低比抵抗域は、 $10\Omega\cdot\text{m}$ 以下は确实と判定された。ほかも同様で、それぞれに程度の差はあるが、3測線のいずれの低比抵抗域も有意なものとなる。

## 2. 火山フロント前面の低比抵抗域

前述のように、火山フロントの前弧側にも地殻内の顕著な低比抵抗域がある。これらの低比抵抗域は、ここに挙げた3測線で見られるだけでなく、多くの測線に共通に見られるものである。ほかの研究も含めて得られた比抵抗断面から地殻中・下部の低比抵抗域のみを地図上に示すと Fig.3 の

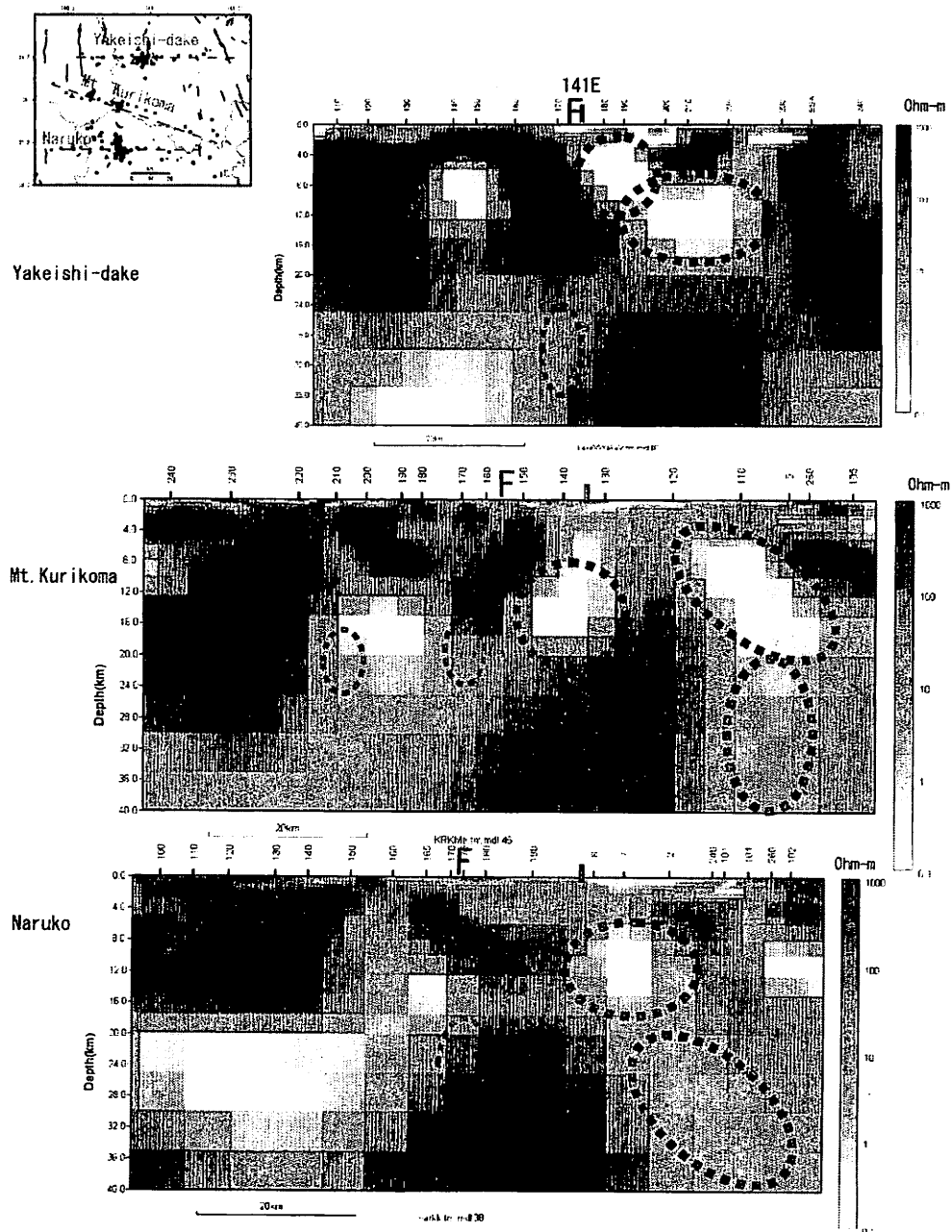


Fig.2 Two-dimensional resistivity distribution along three observation lines. High and low resistivity are denoted by black and white color, respectively. F denotes the volcanic front on each line. Thin broken lines denote areas of deep low frequency earthquakes. Forearc side low resistivity zones are denoted by thick broken lines.

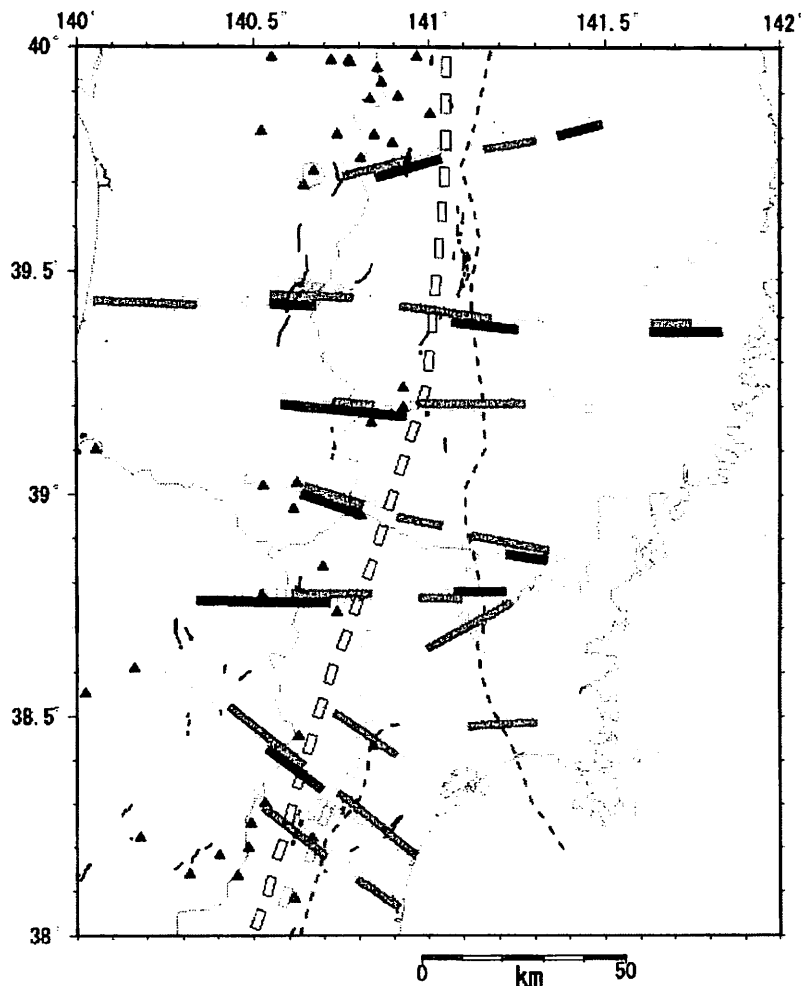


Fig. 3 Distribution of low resistive zone within middle and lower crust. Thick dark grey lines denote low resistive zone in the lower crust, and light grey lines do that in the middle crust. Thick white broken line and thin grey broken line denotes volcanic front and steep gradient zone of Bouguer anomaly. Solid triangle and thin black line denotes active or Quaternary volcano and active fault, respectively.

ようになる。この図では、○あるいは□は広帯域 MT 観測が行われた測点の位置である。それぞれの測線で 2 次元解析の結果地殻下部に顕著な低比抵抗域があるところを濃い灰色の線で、地殻上部あるいは地殻中部に顕著な低比抵抗域があるところを薄い灰色の線で表している。図中の▲印は活火山あるいは第四紀火山を、黒線は活断層を表している。白の太い破線は火山フロント、細い灰色破線は重力異常(ブーゲー異常)急変帯を表している。この図からわかるように、火山の近くでは、火山フロントの背弧側に地殻下部の低比抵抗域があり、火山がないところでは、そのような低比抵抗域は顕著ではない。火山フロントの前弧側では、地殻中部の低比抵抗域が発達している。また、前弧側の地殻中部低比抵抗域は、重力異常の急変帯とも関係しているように見える。前弧側の低比抵抗域には、火山フロント直近のものと、火山フロントから離れた位置にあるものがある。Fig.2 の

断面図を見ると、火山フロントに近い地殻中部低比抵抗域は、火山フロントの背弧側の地殻中・深部低比抵抗域に繋がるような分布になっていて、この低比抵抗が背弧側の低比抵抗域から地殻流体（熱水）が供給されることによって形成されていることを想起させる。同様に Fig.2 の比抵抗分布では、火山フロントから離れた地殻中部の低比抵抗域は、その下（地殻下部）の低比抵抗域に連なっていて、火山フロント付近の低比抵抗域とは繋がっていない。このことから、火山フロントから離れた低比抵抗域は、背弧側から供給される地殻水とは別の供給路をもつ地殻水が起源と考えられる。重力異常の急変帯は、北上山地など中・古生代基盤岩分布域の西縁と考えられ、その西側の中新世以降の堆積層との境界は明瞭な構造境界である。低比抵抗域の分布と重力異常急変帯との相関が良いことは、この構造境界が地殻深部まで達していて、地殻下部から地殻中・上部への地殻水供給路となっていることを示唆している。本稿の比抵抗分布は、上部マントルまでの解像度を持たないので、前弧側の地殻下部への地殻水の供給路を推定できない。中島(1999)の地震波トモグラフィの結果を見れば、背弧側から上昇してきた流体（マグマあるいは水）が、火山フロント下の最上部マントルで分岐したものととも考えられる。

Fig.3 では、重力異常急変帯から東方に遠く離れた位置、すなわち北上山地の中部あるいは東部にも地殻中・下部に低比抵抗域が見られる。北部の低比抵抗域の地域では、堀ほか(2004)が自然地震の観測から、深さ約 25km および 30km 付近に S 波反射体があることを報告している。また、北上山地東部では、深さ 15km に P 波反射層があることが人工地震の観測から報告されている(Iwasaki et al., 1994; 長谷見ほか, 1994)。地震波の反射層と低比抵抗域とが同じような深さに分布していることから、北上山地の下でも、地殻中・深部に流体層があるものと推定できる。

### 3. 議論

低比抵抗域の分布をもとに、東北日本弧の地殻内の流体分布を模式的に表すと、Fig.4 のように考えられる。この図を作るにあたって、長谷川ほか(2004)や Hasegawa et al.(2005)による流体分布の模式図をもとにした。ここで使った MT 観測データには、上部マントルでは比抵抗分布を議論できるほどの精度がないので、前述の地震波トモグラフィの結果をもとに考える。沈み込む太平洋プレートの脱水によって、マントル中に出された流体が、マントル中を上昇し、地殻下部に供給されて、脊梁山地の下と火山フロントの前弧側とに溜りを作る。脊梁山地下の流体溜りから、地殻上部へまっすぐ上昇する流体（マグマも含まれる）は、脊梁山地で火山を形成する。脊梁山地の両翼には断層帯があり、それらの構造的な弱線に沿って上昇する流体が、背弧側および前弧側の地殻中・上部の低比抵抗域（流体溜り）を形成する。前弧側の下部地殻に供給される流体は、地震波トモグラフィから推定されるように背弧側の最上部マントルで分岐したものと考えられるが、スラブから脱水した流体が直接上昇するものもあるかも知れない。地震波の反射層（体）としては、厚さは必要としない。たとえば、北上山地の下深さ 15km にある反射層の厚さは、Iwasaki et al.(1994)は 0.5~1km と推定し、長谷見ほか(1994)も 0.5km と推定している。いずれも反射体は地震波の低速度層としている。また、仙台近郊の地殻中部にある反射体については、Umino et al.(2002)が厚さ 50m の水を多く含む層と推定している。低速度の原因を流体の存在と考えると、低比抵抗域が反射体とほぼ同じ深さにあることの説明にはなるが、ここに推定されているような厚さでは、地表での MT 観

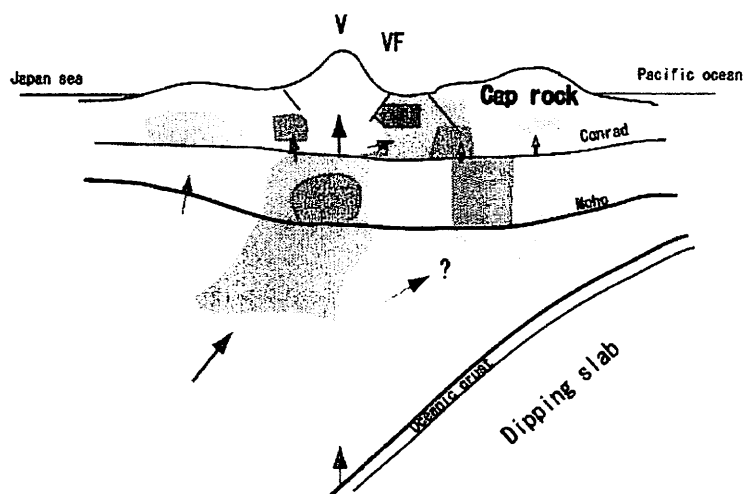


Fig.4 Schematic view of distribution of fluid illustrated by referring to the results by Hasegawa et al.(2004). Shaded area denotes fluid rich zone estimated from resistivity distribution. Arrows denote estimated fluid flows. V and VF denotes volcano and volcanic front, respectively.

測から地殻中・下部の低比抵抗域として検知することは難しい。

北上山地の下の地震波速度構造の研究には、レシーバ関数を用いたものも知られている。例えば、Nakamicih et al.(2002)による HMK(姫神)観測点下の構造には、深さ 10km 付近と、深さ 30km 付近とにそれぞれ厚さ 10km 程度の S 波の低速度層がある。宗田ほか(2001)の解析でも、HMK の下深さ 15km と深さ 30km 付近とに、厚さ約 5km の低速度層が  $V_p$ ,  $V_s$  ともに見られる。また、宗田ほか(2001)の結果では、DIT (大東) の下深さ 30km 付近や、KGJ (遠野) の下深さ 20 から 30km 付近にも、低速度層があることが示されている。この低速度層が低比抵抗層に対応すると考えるならば、MT 観測で検知可能なものとなり得るので、本稿で指摘している北上山地の下など前弧側地殻中深部にある低比抵抗域は、これらを見ているものと考えることができる。

地殻深部からの流体供給の有無の指標として、地温勾配を考える。田中ほか (2004) の地温勾配のデータベースによれば、火山フロントおよびその背弧側で勾配が大きくなっている。前弧側では火山フロントから離れていても重力急変帯では地温勾配が比較的大きくなっていて、地殻深部からの流体供給の可能性を支持する分布となっている。

#### 4. まとめ

脊梁山地を横断する広帯域 MT 観測の結果から、火山フロントの前弧側の地殻中・深部にも、背弧側のそれに匹敵する顕著な低比抵抗域があることがわかった。フォワード計算による感度試験の結果から、これらの低比抵抗域の存在は有意なものである。前弧側の低比抵抗域は、火山フロントに接するものと、火山フロントから離れたものがある。火山フロントに接するものには、火山フロント側から地殻水が供給されていることを示唆するような比抵抗分布がある。火山フロントから離れた低比抵抗域は、火山フロント側に連なる低比抵抗帯のほかに、顕著な低比抵抗帯が下方へと続いていることも特徴のひとつである。前弧側の内陸地震の活動とも関係する地殻水の供給路を示すものと考えられる。

謝辞 本稿を書くにあたって、以下のかたがたの MT 観測および解析結果を使用させていただいた。記して感謝の意を表します。高橋(2002), Ogawa et al.(2001), Mitsuata et al.(2001), 佐藤ほか(2005), Ogawa et al.(2004).

#### 参考文献

- Hasegawa, A., J. Nakajima, N. Umino, and S. Miura, 2005, Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity, *Tectonophysics*, 403, 59-75.
- 長谷川昭・中島淳一・海野徳仁・三浦哲・諏訪謡子, 2004, 東北日本弧における地殻の変形と内陸地震の発生様式, *地震* 2, 56, 413-424.
- 長谷見晶子・松澤暢・長谷川昭・海野徳仁・河野俊夫・堀修一郎・伊東明彦・鈴木貞臣・石川春義, 1994, 北上山地中央部における爆破地震動の観測, *地震* 2, 47, 263-271.
- 堀修一郎・海野徳仁・河野俊夫・長谷川昭, 2004, 東北日本弧の地殻内 S 波反射面の分布, *地震* 2, 56, 435-446.
- Iwasaki, T., T. Yoshii, T. Moriya, A. Kobayashi, M. Nishiwaki, T. Tsutsui, T. Iidaka, A. Ikami, and T. Masuda, 1994, Precise P and S wave velocity structure in the Kitakami massif, Northern Honshu, Japan, from a seismic refraction experiment, *J. Geophys. Res.*, 99, 22187-22204.
- Mitsuata, Y., Y. Ogawa, M. Mishina, T. Kono, T. Yokokura, and T. Uchida, 2001, Electromagnetic heterogeneity of seismogenic region of 1962 M6.5 Northern Miyagi Earthquake, northeastern Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4371-4374.
- 中島淳一, 1999, 東北日本弧の三次元地震波速度構造に関する研究, 東北大学修士論文, 121p.
- Nakajima, J., T. Matsuzawa, A. Hasegawa, and D. Zhao, 2001, Seismic imaging of arc magma and fluids under the central part of northeastern Japan, *Tectonophysics*, 341, 1-17.
- Nakamichi, H., S. Tanaka, and H. Hamaguchi, 2002, Fine S wave velocity structure beneath Iwate volcano, northeastern Japan, as derived from receiver functions and travel times, *J. Vol. Geotherm. Res.*, 116, 235-255.
- Nakamichi, H., H. Hamaguchi, S. Tanaka, S. Ueki, T. Nishimura, and A. Hasegawa, 2003, Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan, *Geophys. J. Int.*, 154, 811-828.
- 日本火山学会, 1999, 日本の第四紀火山カタログ (CD-ROM).
- Ogawa, Y. and T. Uchida, 1996, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76.
- Ogawa, Y., M. Mishina, T. Goto, H. Sato, N. Oshiman, T. Kasaya, Y. Takahashi, T. Nishitani, S. Sakanaka, M. Uyeshima, Y. Takahashi, Y. Honkura, and M. Matsushima, 2001, Magnetotelluric imaging of fluids in intraplate earthquake zones, NE Japan back arc, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3741-3744.

- Ogawa Y., M. Mishina, Y. Honkura, K. Takahashi, and S. B. Tank, 2004, Electromagnetic imaging of the Nagamachi-Rifu Fault and its deep extension, The 2nd Int. Symp. on Slip and Flow Processes in and below the Seismogenic Region, Mar. 10-14, 2004, Tokyo.
- 岡田知己・長谷川昭, 2000, 東北地方地殻深部に発生する低周波微小地震の活動とモーメントテンソル解, 火山, 45, 47-63.
- 佐藤秀幸・光畑裕司・内田利弘・三品正明・小川康雄・本蔵義守・西谷忠師・坂中伸也, 2005, 広帯域 MT 法による 2003 年宮城県北部地震震源域周辺における比抵抗構造探査, 2005 年 CA 研究会, 2005 年 12 月 20 日-21 日, 東京.
- 宗田靖恵・松澤暢・長谷川昭, 2001, レシーバ関数による東北日本弧の地殻・最上部マントル速度構造の推定, 地震 2, 54, 347-363.
- 高橋幸祐, 2002, 岩手山-秋田駒ヶ岳付近の地震発生域の比抵抗構造に関する研究, 東北大学修士論文, 92p.
- 田中明子・矢野雄策・笹田政克, 2004, 日本列島及びその周辺域の地温勾配データベース, 数値地質図 DGM P-5, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.
- Umino, N., H. Ujikawa, S. Hori, and A. Hasegawa, 2002, Distinct S-wave reflectors ( bright spots) detected beneath the Nagamachi-Rifu fault, NE Japan, Earth Planets Space, 54, 1021-1026.