

## 御嶽山南東麓での MT 法による地熱探査

Geothermal survey by MT method at southeastern foot of Mt. Ontake

金廣純奈<sup>1</sup>、茂木透<sup>1</sup>、市原寛<sup>2</sup>、山岡耕春<sup>2</sup>、足立守<sup>2</sup>、田中良<sup>1</sup>

1. 北海道大学、2. 名古屋大学

Junna Kanehiro<sup>1</sup>, Toru Mogi<sup>1</sup>, Hiroshi Ichihara<sup>2</sup>, Koshun Yamaoka<sup>2</sup>, Mamoru Adachi<sup>2</sup> and Ryo Tanaka<sup>1</sup>

1. Hokkaido University, 2. Nagoya University

Mt. Ontake is located at southern Nagano Prefecture, central Japan and consists of older (0.78-0.39Ma) and younger (0.09-0.02Ma) volcano. After long dormancy, the volcano erupted at the south side of summit area at 1979, and the activity has continued to the present. A geothermal investigation was carried out at the south foot of Mt. Ontake by NEDO in 1985 and 1986. Five bore-halls were drilled, but the high temperature area has not found in the area. A magnetotelluric survey was conducted at the southeastern area of the volcano where the source region of the Western Nagano Prefecture earthquake that occurred at 1984 (Kasaya et al, 2002, Kasaya and Oshiman, 2004). They showed two and three dimensional resistivity structure using data recorded at 11 stations and indicated a low resistivity area just above the center part of source region where bottom of the source region (indicating isotherm of 300 degree) uplifted to shallower. Moreover, older volcanic activity occurred in this area and a heat diffused from older hot region was expected.

We carried out a magnetotelluric survey at 35 stations in the southeastern foot of Mt. Ontake to clarify three-dimensional resistivity structure. We detected conductors in the center, NE and SE area. A resistive zone showing NW-SE direction was revealed. A place of conductor in the center was nearly coincide with the conductor detected at the previous study and an extent of the conductor was confirmed in this study. A possibility of geothermal activity in this area was discussed based on the resistivity structure and geological, geochemical data.

### 1. はじめに

御嶽山は、北アルプス連峰の南側に位置し、日本で2番目に高い活火山（標高3067m）である。御嶽山の火山活動は、古期火山活動と現在も続いている新期火山活動に分けることができる。古期の活動は、78万年前から39万年前まで続き（松本盆地団体研究グループ、2002）、主として非アルカリ性の苦鉄質火山岩類（安山岩、玄武岩）を噴出した。探査対象地域の大部分は、この地層が分布する地域である。新期の活動は、現在の山頂付近に集中していて、9万年前から2万年前まで活発であったが、その後も現在に至るまで活動が続いている。この活動では非アルカリ性の苦鉄質火山岩類（安山岩、玄武岩）と珪長質火山岩類（デーサイト、流紋岩）が噴出している（関口、山岸、2013）。

NEDO（新エネルギー産業技術総合開発機構）により南麓の濁川地区において地上調査や試錐調査が1985年、86年に行われており、構造試錐孔5本（掘削深度502m～1290m）が掘削された。しかし、深さ1000mにおいても地温が50℃程度にしか上がらず、この調査地域には高温の地熱資源が存在する可能性は少ないと考えられている（NEDO、1988）。

一方、御嶽山南東～南麓では、1984年に発生した長野県西部地震に関連する研究が数多く行われており、そのうちのひとつとして、震源域付近の11測点においてMT探査が行われた(Kasaya et al, 2002、Kasaya and Oshiman, 2004)。その結果によると、震源分布の下限が浅くなっているところに低比抵抗域が見られる。その深度以下では、岩石が流動的になり地震が起こりにくくなっていると考えられ、基盤岩である花崗岩類では流動的になる温度は300～350℃程度とされており(Ito, 1990)、この震源分布の下限は、その温度の等温線と考えることができる。従って、この地域では高温域が浅くなっている可能性があり、その直上に低比抵抗域が見られるので、それが高温の熱源岩体の直上に形成された熱水貯留層に関連した領域と考えることもできる。また、一般に、地熱資源を形成する熱水貯留層は、地下に熱が拡散しているやや古い火山(活動時代が10～100万年前位)の周辺の発達していることが多い(玉生, 1994)。御嶽山南東麓に分布する古期御嶽火山活動による火山岩類は0.78Ma～0.39Maに噴出しており、その時期の活動に伴う高温域が残存している可能性もある。そこで、本研究では、高温域が浅い所まで上がってきている地域においてMT探査を実施し、地熱資源存在の可能性について議論した。

## 2. MT 観測

本研究では、2017年9月から12月にMT観測を御嶽山南東麓の35測点で実施した(Fig. 1)。測点配置は、最終的に3次元比抵抗構造を求めることをめざし、歪みのない構造を得られるように、概ね1.5km間隔を標準とし、できるだけ規則的なグリッド状に測点の配置を計画したが、道が無く観測が困難な所はその近傍に配置した。測定機材は、カナダ・フェニックス社製のMTU5とMTU5Aを用いた。電場は、直交する2方向に約30mの長さの電線を張り、両端にPb-PbCl<sub>2</sub>電極を設置して測定した。磁場は、南北、東西方向および鉛直方向の3成分を、広帯域用(320～0.001Hz)とAMT帯域用(10000～1Hz)のインダクションコイルにより測定した。測定は広帯域では原則として2晩以上、AMT帯域は1時間以上測定した。AMT帯域では測定時間が短かったことや1kHz付近でノイズが大きかったので、多くの測点で良いデータが得られなかった。また、1Hz以下では電気鉄道からの漏洩電流の影響と思われるニアフィールドがみられるデータがあった。

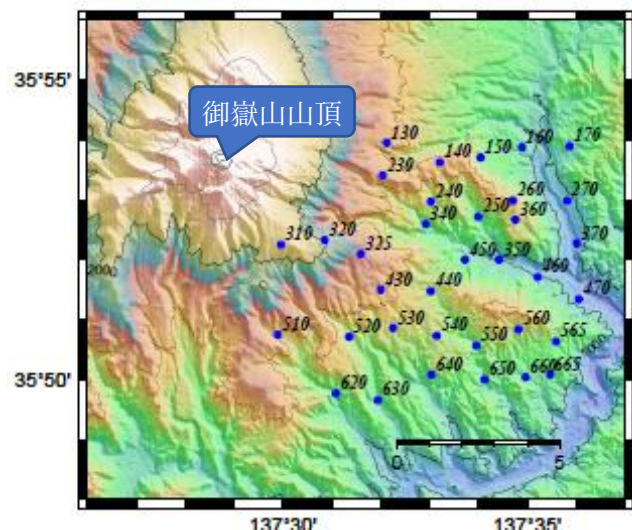


Fig.1 MT survey sites.

## 3. データ解析

観測点で収録された時系列データからMTU5用標準データ解析ソフトであるSSMT2000を用いてMT impedanceを求めた。リモートリフェレンス処理(Gamble et al, 1979)は、日鉄鉱コンサルタント株が運営している岩手県西和賀町沢内地区と防災科研が運営している愛媛県西予市窪野地区にあるMT連続観測点でのデータをリフェレンスデータとして用いた。次に、同標準ソフトのMTEDITORを用い、分割したtime windowそれぞれに対して見掛け比抵抗、位相から良いデータ(エラーが小さい、他の結果か

ら逸脱していないもの等)を選択して最終結果とした。

#### 4. 3次元インバージョン

本研究では、見掛け比抵抗および位相から比抵抗構造を求めるために3次元インバージョンを行った。3次元インバージョンプログラムは、Oregon 大学で開発された ModEM (Egbert and Kerbert, 2012)を用いた。ModEM では、フォワード計算はスタaggerドグリッド有限差分法 (Yee, 1966)を用い、インバージョンは勾配法による最小二乗法を用い下記のペナルティー関数  $\Phi$  を最小にするモデルを求める。

$$\Phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})) + \nu (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{C}_m^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)$$

ここで、 $\mathbf{m}$ : モデルパラメータ、 $\mathbf{d}$ : データベクトル、 $\mathbf{f}(\mathbf{m})$ : モデル計算値、 $\mathbf{C}_d$ : 観測誤差行列、 $\mathbf{C}_m$ : 共分散行列である。この  $\Phi$  を最小にするように、右辺第1項の適合度と第2項の滑らかさを選択する。 $\nu$  は両者のバランスをとるトレードオフパラメータであり、通常大きな値から始めて、適合度が小さくなるにしたがって小さな値に順次変える。

探査地域は、火山の中腹であり大きな起伏があるので、地形を含めたグリッドモデルを作成した。地形のモデル化には国土地理院による 10mDEM データを用い、鉛直方向(z)のグリッド間隔は、山頂から最高標高測点までは 50m、最高標高測点から最低標高測点までは 25m、最低標高測点以下は 4 グリッドを 25m とし、それ以下は 1.4 倍ずつ増加させた。水平方向 (x:北向き、y:東向き)のグリッド間隔は、測点配置範囲を含む原点 (測定対象地域の中央にあたる北緯 35 度 52 分、東経 137 度 33 分) から 5 km の範囲では 500m とし、それより外側は 1.4 倍ずつ拡大した。モデル全体の大きさは、水平方向に約 150km、鉛直方向に約 75km とした。そのときの総グリッド数は、46(x)×49(y)×93(z)である。データは、各測点で所得されたデータから求めた MT impedance tensor ( $\mathbf{Z}$ ) の 4 成分を使用し、入力周波数は、0.1-1000Hz を対数間隔で等分になるように 15 周波数を使用した。観測点がグリッドの端にあると計算誤差が大きくなることがあるので、その場合は観測点の位置を同じグリッド内の中央に移動させた。

#### 5. 地形を含めたモデルに対するインバージョンの精度の検証

探査地域は、御嶽山の山腹にあり、比抵抗構造を求める際に地形による影響が大きいことが予想される。そこで、前節で述べた地形を含むグリッドにより構成されるモデルに対するインバージョンの精度を検証するために、シンセティックモデルに対するインバージョンを行った。モデル化した御嶽山の地形を含めた 100  $\Omega$ m 均質構造の中に大きさ 5km 立方(x 方向-2.5~2.5km、y 方向-2.5~2.5km、z 方向は山頂を 0 とし、2~7km の範囲)の導体(2  $\Omega$ m)を置き、フォワード計算を行った。その計算結果の  $\mathbf{Z}$  の 4 成分を御嶽山での観測点と同じ 35 地点に与え、周波数は 1000~0.33Hz 間を対数で等間隔の 9 周波数も用い、比抵抗構造の初期値として、100  $\Omega$ m、200  $\Omega$ m、50  $\Omega$ m の 3 条件でインバージョンを行った。その結果を Fig. 2 に示す。その結果、どの初期条件を用いた場合でも、導体の位置を概ね推定できている。Fig. 3 は、モデル計算値とインバージョン結果との比較を示す。どの測点においても、見掛け比抵抗、位相共によく一致している。この結果から、ここで用いたグリッドにより適切な比抵抗構造を推定することができると思われる。

#### 6. 御嶽山南東麓の 3次元比抵抗構造

Fig. 4 に ModEM による 3次元インバージョン結果の例を示す。この結果は、初期値を 1000  $\Omega$ m 均質と

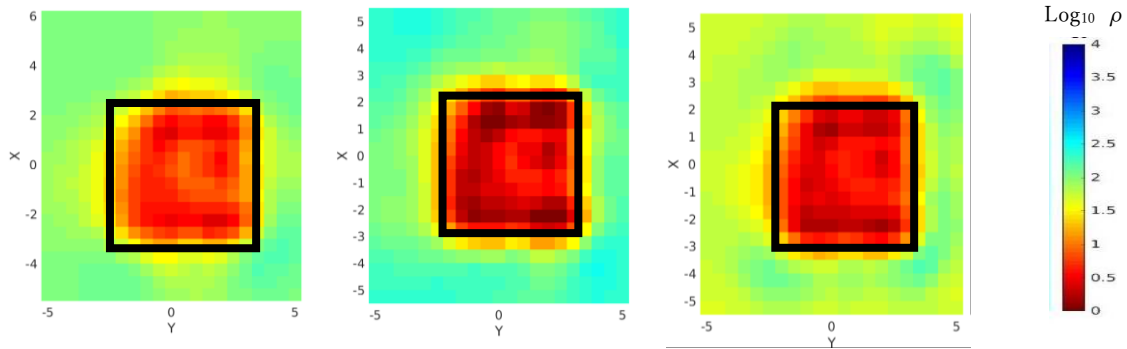


Fig.2 Resistivity structure at 250m in elevation. The panels show inversion results when starting from uniform structure at initial value of 100Ωm, 200Ωm and 50Ωm from left.

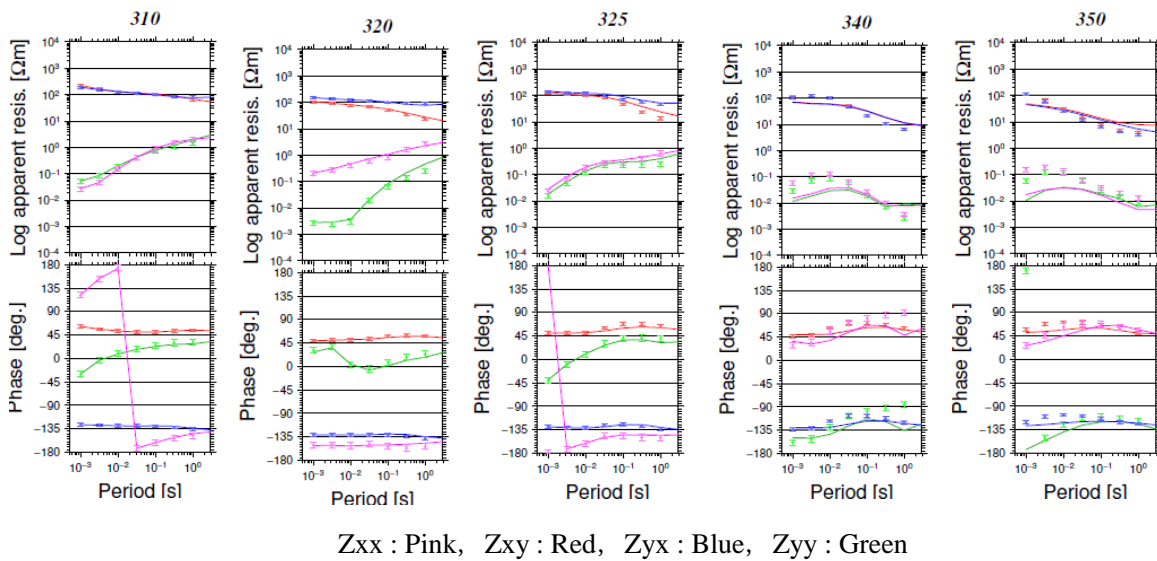


Fig.3 Comparisons of apparent resistivity and phase values between the model computing value and inversion results.

して、イタレーションを64回行ったところ、エラーフロアに対するRMS (Egbert and Kelbert, 2012) が9.3となった時の3次元比抵抗構造である。エラーフロアは、 $Z$ の非対角成分5%、対角成分10%とした。Fig. 5にはその時の観測値と計算値との比較を示した。多くの観測点で概ね観測値と計算値が一致しているが、測点230、310、320、510等ではそれらの差が大きい。これらの測点での大きな差によりRMSが大きい値となっている。初期値、初期トレードオフパラメータ、スムージングファクター等の条件をいろいろ変えてみたが、結果には大きな変化は見られなかった。ここで見られた計算値と測定値との不一致の原因についてはさらに検討が必要である。

探査地域の中央部C1(測点440付近)、北東部C2(測点140~170付近)、南東部C3(測点565付近)に低比抵抗構造が見られ、また、H1(測点550~560付近)地域では北西に延びる高比抵抗域が見られる。C1周辺は古期御嶽火山岩類の分布地域であり、その基盤には美濃帯の堆積岩類が分布する。C1については、Kasaya and Oshiman (2004)による3次元フォワードモデリングの結果で推定された低比抵抗域と概ね同じ位置であるが、そこでは地形を考慮していないし、測点間隔も粗い。北東側にC2、南東側にC3の低比抵抗域が見られるが、これらの地域は主として美濃帯の堆積岩類が分布する。また、H1地

域には主として花崗岩類が露出している。探査範囲には、NEDOによるボーリング抗が3本が含まれていて、それぞれ最高温度は、OT3(測点520と530との間): 54.9°C(坑底1203m)、OT4(測点510付近): 51.1°C(坑底1002m)、OT5(測点630南東側): 21.2°C(孔底500m)であった(NEDO, 1988)。また、これらは古期火山岩類分布地域にあり、その厚さは、OT3では約100m、OT4では約200mであった。電気検層によると、古期火山岩類は40~50 Ωm、その下にある堆積

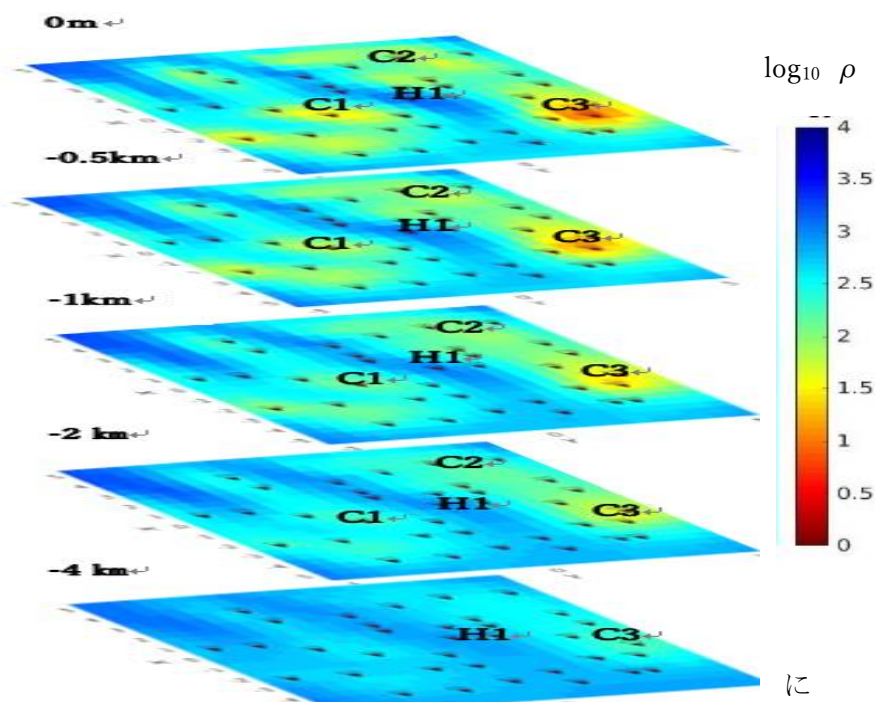


Fig.4 Three-dimensional resistivity structure of the southeast foot of Mt. Ontake.

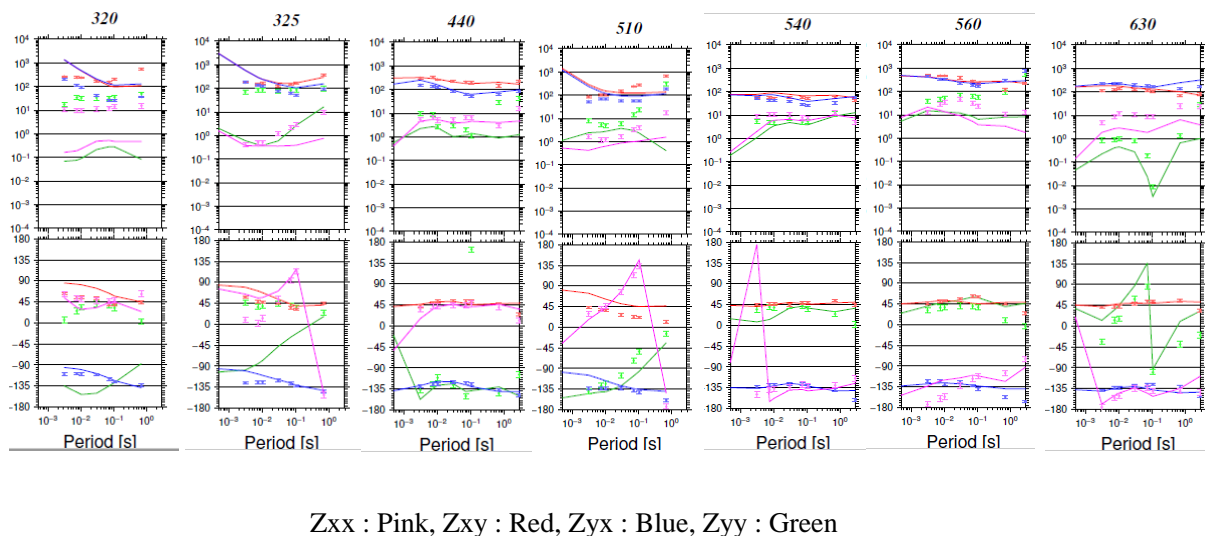


Fig.5 Comparisons of apparent resistivity and phase values between observed value and model computing value at some sites

岩類は400~500 Ωmであり、この値は本インバージョンで得られた値とほぼ一致する。

NEDOによる温泉水調査は御岳山麓全域で行われており、探査地域内には、湯川温泉(測点130付近)、鹿の瀬温泉(測点160の北)、おんたけ温泉(測点520付近)、樽沢温泉(測点540と550の間)、たかの湯温泉(測点630と640の間)がある。いずれの温泉も泉温25°C以下である。おんたけ温泉、たかの湯、鹿の瀬温泉の化学成分は、HCO<sub>3</sub>型のうちNa+Kに分類される。また、低比抵抗域C1の南側に位置する樽沢温泉、おんたけの湯、たかの湯の温泉水は、地化学温度計によると200°C程度の環境を経験していると



いうデータもある (NEDO, 1988)。さらに、樽沢温泉付近の水は、同位体の分析により地殻深部、または、マグマから脱水した流体の混合が想定されている (Nishio et al. 2010)。これらの地熱兆候は C1 の近傍に分布しており、低比抵抗域と関連している可能性も考えられる。

## 7. まとめ

探査地域は、標高 3067m の火山の山麓にあり、3 次元比抵抗構造を求める上で地形が影響することが予想されたので、シンセティックモデルによる地形を含めたインバージョン結果への影響を調べ、インバージョン結果に大きな影響がないことを検証した。御嶽山南東麓での比抵抗構造を求めるために、さまざまな計算条件を試みた。その結果、一部の測点では測定値と計算値が一致していないところもあるが、大半の測点でそれらが一致する比抵抗構造が得られた。また、探査地域内にある掘削孔での地質、温度、比抵抗データと比抵抗構造との比較を行い、地質や電気検層による比抵抗構造の検証を行い整合的な結果が得られた。

本研究により、先行研究で予想されていた御嶽山南東麓での低比抵抗域の範囲が確認された。この低比抵抗域が地熱資源に関係しているかどうかはまだよくわからないが、近傍の温泉水の分析結果によると温泉水の中には高温環境に置かれていたことを示すデータもあるし、地殻深部やマグマからの脱水成分が混合している可能性も指摘されているので、今後さらに検討を進める必要がある。

## 参考文献

- Egbert, G. D. and A. Kelbert (2012) Computational recipes for electromagnetic inverse problems, *Geophys. J. Int.*, 189, 251–267.
- Gamble, T., W. Goubau and J. Clarke (1979) Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, 44, 53-68.
- Ito, K. (1990) Regional variation of the cutoff depth of seismicity in the crust and their relation to heat flow and large inland earthquakes, *J. phys. Earth*, 38, 223-250.
- Kasaya, T., N. Oshiman, N. Sumitomo, M. Uyeshima Y. Iio and D. Uehara (2002) Resistivity structure around the hypocentral area of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake in central Japan, *EPS*, 54, 107-118.
- Kasaya, T. and N. Oshiman (2004) Lateral inhomogeneity deduced from 3-D magnetotelluric modeling around the hypocentral area of the 1984 Western Nagano Prefecture earthquake, central Japan, *EPS*, 56, 547–552.
- 松本盆地団体研究グループ (2002) 古期御嶽火山の地質、*地球科学*、56, 65-85.
- NEDO (新エネルギー総合開発機構) (1988) 地熱開発促進調査報告書、No. 17 王滝地域.
- Nishio, Y., K. Okamura, M. Tanimizu, T. Ishikawa and Y. Sano (2010) Lithium and strontium isotopic systematics of waters around Ontake volcano, Japan, Implications for deep-seated fluids and earthquake swarms, *Earth and Planetary Science Letters*, 297, 567–576.
- 関口辰夫, 山岸登 (2013) 火山土地条件図「御嶽山」について、*国土地理院時報*、No. 123, p. 61-80.
- 玉生志郎 (1994) 地熱系モデリングから見たマグマ溜り—豊肥, 仙岩, 栗駒地域を例にして—、*地質学論集*、43 号, 141-155.
- Yee, K. (1966) Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 14, 302–307