

草津白根火山の AMT 観測による比抵抗構造探査

ヌルハッサン¹・小川康雄²・氏原直人¹・

S.B.タンク¹・若林亨¹・鬼澤真也²

1：東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻

2：東京工業大学火山流体研究センター

Resistivity structure of Kusatsu-Shirane Volcano imaged by audio-magnetotelluric observations

Nurhasan¹, Yasuo Ogawa², Naoto Ujihara¹,

S.B. Tank¹, Toru Wakabayashi¹ and Shinya Onizawa²

1: Earth and Planetary Sciences, Tokyo Institute of Technology

2: Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

草津白根火山は、北部フォッサマグナ東方の中央隆起帯の東端に位置し、新第三紀の地質基盤の肩に存在する成層火山である。このことは浅間山や榛名山が基盤の沈降域に存在することと対照的である。山体はほぼ南北性の走向を持つが、東西には非対称な形をしている。本白根から草津白根にいたる火砕丘のピークが南北方向に連なり、その西側には第三紀の火山岩が露出するのに対して、東側は安山岩溶岩流の斜面となっている。さらに下方にはデイサイトの火砕流台地が広がる。

草津白根火山は活動的な火山で、水蒸気爆発を伴う活動に特徴がある。水蒸気爆発による爆裂火口が本白根から水釜にいたる南北方向に分布している。近年の顕著な火山活動としては、1982年から1983年の湯釜および涸釜の水蒸気爆発がある。その後噴火はないが、地震活動が活発化する時期が1986年から1989年であった。1990年から1991年にかけては水釜周辺で地震活動が高まり、これと対応して水釜周辺の地磁気全磁力の減少が観測され、水釜周辺が地下からの熱供給によって消磁したと解釈されている(山崎ほか、1992)。また、この時期に顕著なN型地震が観測されており、火山流体が湯釜・水釜直下数100mの水平クラックに流入するモデル(Kumagai et al., 2002; Nakano et al., 2003)が考えられている。現在の地震活動は特に活発ではないが、ルーチン観測によると、震源は本白根山と逢ノ峰付近および、湯釜・水釜周辺に集中し、震源の深度は地表下0.5km~2kmに限られる。

草津白根火山の火山災害を軽減するには、まず地下の火山流体の貯留構造を明らかにすることが重要である。これまで、草津白根においては、地球化学的な観測が多くなされてきており、火山ガスや温泉水の分析から、火山流体システムのモデルが構築されている(Ohba et al., 1994, 2000)。しかしながら、その流体の深度や空間的な広がりについては、情報が十分でなく、地球物理学的な研究を組み合わせる必要がある。そのなかでも、流体の存在に敏感な比抵抗構造を探

査することは、非常に有益な情報を提供しうる。直流法電気探査（橋本ほか、2004）は、100m程度より浅い詳細な構造を決定するためには有利であるが、より深部の構造を求めるには電磁誘導を用いた方法が有利である。すでに、桂ほか(1996)が草津白根山頂域で人工電流源をもちいた深部探査を実行し、顕著な低比抵抗が火山体浅部に存在していることがわかっている。また、予想外の低比抵抗の存在によって、時間領域の過渡応答の終了時間が特定できない問題点も指摘された。本稿では、自然電磁場を使った AMT 法探査データとその 2 次元構造解析結果を示し、草津白根火山の広域的な熱水系について考察を加えた。

2 . AMT 観測

われわれは、草津白根山体を西北西 東南東に横切る測線でオーディオ帯域の自然電磁場を観測した（第 1 図）。この方法は audio-magnetotelluric 法（AMT 法）と呼ばれる。これまでに有珠火山(Ogawa et al.,1998; Matsushima et al., 2001)などでも用いられており、深度 2-3km までの比抵抗構造を探查するのに適している。使用した機材は Phoenix 社 MTU5A であり、周波数 10,000Hz から 0.3Hz までの広帯域にわたって、水平磁場 2 成分と水平電場 2 成分のデータを取得した。観測には機材 2 式を用いることによって、相互にリーモートレファレンスを可能とし、ノイズの低減に役立てた。測定に要した時間は 3 時間から 12 時間である。観測点は第 1 図のように 10 点あり、およそ 0.5km おきに配置されている。

3 . データ処理

モデル解析に先立って、データの持つ dimensionality について考察することは重要である。すなわち、2次元解析をする前にデータが2次元構造を支持するかどうか調べる必要がある(Ogawa, 2002)。まず、取得したテンソルインピーダンスに対して、測点ごと周波数ごとにテンソル分解(Groom and Bailey, 1989)を行い、2次元走向の頻度を検討した。全周波数を通じて南北性の走向が卓越する。特に低周波数側では、走向が N5 度 E に集中する傾向があるので、これを参考にして、データセットに共通した 2 次元走向を N5 度 E と求めた。

この後、さらにこの座標系に関して、テンソル分解(Groom and Bailey, 1989)を行い、各観測点について地表付近の局所的 3 次元構造による電場のよじれを除去した。このようにして得られたインピーダンスからもとめた見掛比抵抗および位相の擬似断面を第 2・3 図に示す。各観測点での探査曲線については、まとめて付録に示す。

4 . モデル解析

テンソル分解後のインピーダンスを用いて、2次元比抵抗モデル解析を行なった。解析には、Ogawa and Uchida(1996)のプログラムを使用した。概略的な地形についても考慮されている。計算には、TE および TM モードの見掛比抵抗と位相を使用し、スタティックシフトはモデル計算でパラメータとして求めた。計算では見掛比抵抗の誤差フロアを 10%、これと等価な位相の誤差フロアを 2.8 度とし、100Ωm 一様大地を初期モデルとして反復計算を行った。反復 9 回で rms が 1.24 まで収束し、第 4 図のモデルを最終的なモデルとした。

このモデルによる応答を第 2・3 図に擬似断面で示す。観測値の主な特徴は説明されている。

各観測点におけるフィットは、付録に示す。

5 . 考察

草津白根では前回の集中観測の電磁探査（桂ほか、1993）においても、 $1\Omega\text{m}$ ないしそれ以下になる低比抵抗層が草津白根山頂部周辺に存在することが1次元解析から推定されている。今回のAMT観測からも、広い範囲にわたって、 $10\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗層が検出されている。結果として得られる低比抵抗異常は、熱水貯留部そのものである可能性もあるが、粘土鉱物や硫化物である可能性もある。

(1) 湯釜より西側（万座側）の構造

湯釜よりも西側では、地表下1km程度から $1\Omega\text{m}$ 以下の顕著な低比抵抗層が存在していることがわかる。データの最も低い周波数は1Hz程度で、見掛け比抵抗が $10\Omega\text{m}$ 程度とすると探査深度は高々1500mとなる。このことからわかるように、湯釜より西の低比抵抗層については、その上面が検知されているに過ぎない。解析プログラムでは、モデルの粗さが小さくなるようになるので、この低比抵抗層が深度方向へ延長されている。

さて、これは一見、地質学的な広域構造と矛盾するよう見える。すなわち、地質学的には、白根山よりも西側では新第三系の緑色凝灰岩（ここでは基盤と呼ぶことにする）が露出しており、それが白根山から東に向けて深くなると考えられているからである。これら地質学的な構造は重力異常の分布からも支持される。白根山の西側の緑色凝灰岩は、地質や岩石密度からは基盤と考えられるものの、変質していることもあって比抵抗は低くなる。さらに、深度1km以下に存在する低比抵抗層は、基盤の中にある粘土鉱物や硫化物である可能性もある。

(2) 湯釜より東側（草津側）の構造

これに対して、湯釜よりも東側では、表層100-500mに $1000\Omega\text{m}$ を超えるような高比抵抗層が存在し、その下に $10\Omega\text{m}$ 以下を示す低比抵抗があり、さらに深度1-2km以下に高比抵抗基盤が存在している。このうち、地表付近の高比抵抗層は、青葉山溶岩分布に対応している。その下の低比抵抗層は、変質によってできた粘土鉱物を多く含む地層と考えられる。この低比抵抗層は、横軸距離0km付近で厚くなる傾向があり、水平座標の-1kmから+1kmの範囲で向斜構造を示している。この向斜の翼部の地表への延長には、それぞれ湯釜、殺生河原の地熱兆候地が存在しており、翼部の鉛直に近い断裂が火山ガスや火山流体の通路を供給していると考えられる。また、地球化学的な同位対比の研究から、湯釜と殺生河原の流体・噴気は同じ起源を持つ(Ohba et al.,2000)と考えられており、この向斜構造の低比抵抗自体が共通の貯留部と関係する可能性もある。

また、この低比抵抗層は、湯釜を西端として途切れており、さらに西にある万座温泉側につながっていない。これらは、草津側と万座側の熱水系が異なることを意味している可能性がある。地球化学的なガス組成で見ると、万座温泉のガス成分が $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ 比が高いのに対して、草津側（湯釜・常布温泉・殺生河原）では、それが低いことが知られている（片淵、私信）。また、Ohba et al.(2002)によれば、同位体比でみると、万座温泉では直接マグマ性流体と天水が混合しているのに対して、草津側では、マグマ性流体が天水と混ざり気液混合層を形成した後に、ガスと流体が分離して放出されていると考えられている。湯釜における低比抵抗層の水平方向への不連続は、2つのシステムの不連続に関連した構造である可能性がある。

また、湯釜・常布温泉・殺生河原システムの低比抵抗層は、さらに東に続き、草津温泉に近づくとその厚さが急激に厚くなる傾向がある。

(3)地震の震源と比抵抗構造との関連

比抵抗構造と地震の震源分布とを比較した(第5図)。草津白根山山頂付近の震源について、湯釜を参照点とし、測線方向に幅1kmに渡って投影したものを重ねて図化した。これによると、地震は湯釜から東側の比抵抗の不連続帯となる高比抵抗部に集中している。万座と草津の貯留層を分断する高比抵抗は、変質が進んでいない比較的新しい貫入岩で、周囲に比べて変形しにくいために地震を発生させている可能性がある。

6. 結論

草津白根山を横断する6kmの東西測線で、10kHzから0.3Hzに渡るAMT(audio-frequency MT)観測を行い、深度3km程度までの比抵抗構造を解明した。草津白根湯釜以西では、標高1km以深に低比抵抗体があるのに対して、湯釜以东では低比抵抗層が青葉山(湯釜から東方に1kmの地点)を中心とした向斜構造を示している。向斜構造の翼部延長には、湯釜や殺生河原が存在しており、翼部に沿ったほぼ鉛直な断裂が火山ガスや火山流体の通路となっている可能性がある。これらは2つの低比抵抗異常はそれぞれ、万座システムと湯釜・殺生河原システムの火山性流体の貯留部あるいは、それに関連する粘土鉱物や硫化物の分布を表している可能性がある。二つのシステムが分離して存在することは、地球化学的にも支持される。この2つの低比抵抗層のギャップは高比抵抗を示すが、そこはまた地震活動が高い場所に対応している。この高比抵抗部は、新しく貫入した未変質の岩体を見ている可能性がある。

謝辞

東京工業大学火山流体研究センターの平林順一教授、大場武助教授、野上健治助教授には、有意義な議論をしていただいた。

引用文献

Groom, R.W. and Bailey, R.C. (1989): Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.*, 94, 1913-1925.

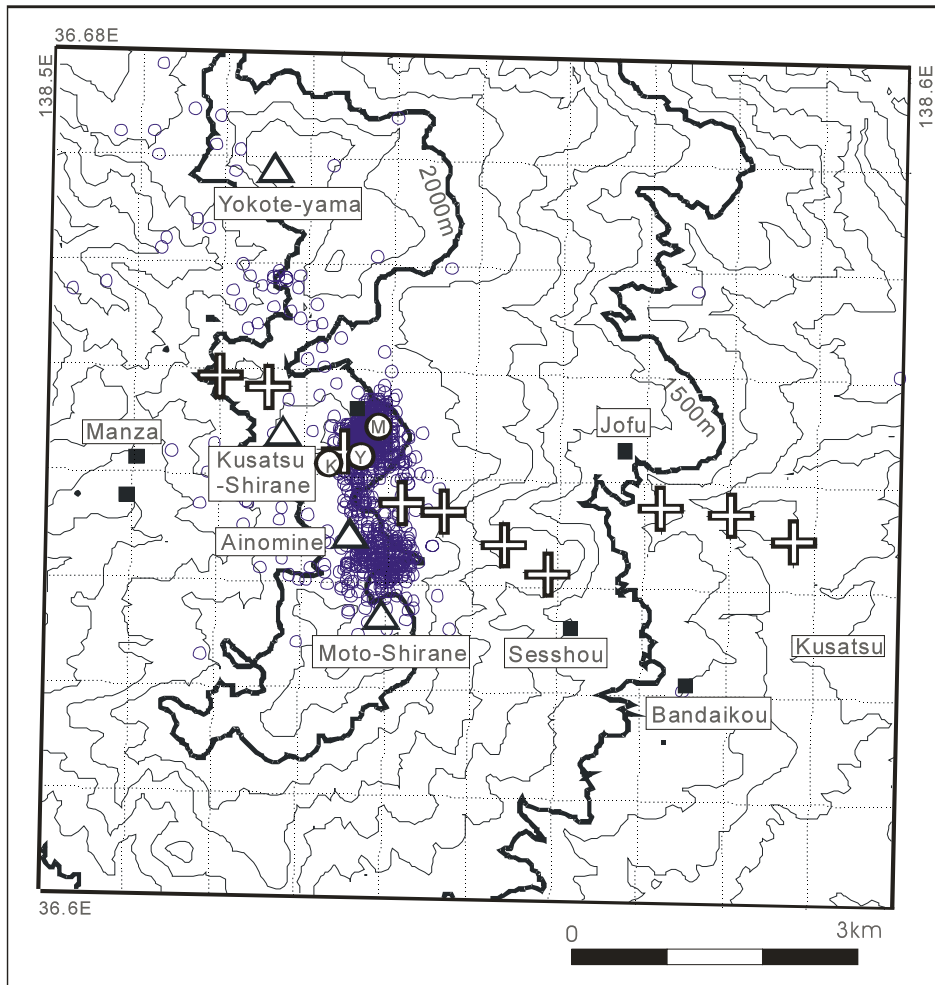
橋本武志・茂木 透・西田泰典・小川康雄・平林順一・及川光弘・斎藤政城・水橋正英・氏原直人・ヌルハッサン・若林 亨(2004): 草津白根火山における高密度電気探査・自然電位調査 - 2003年度集中総合観測 -, 2003年CA研究会論文集(印刷中)。

McNeice, G.W. and Jones, A.G.(2001): Multi-site, multi-frequency tensor decomposition of magnetotelluric data, *Geophysics* 66, 158-163.

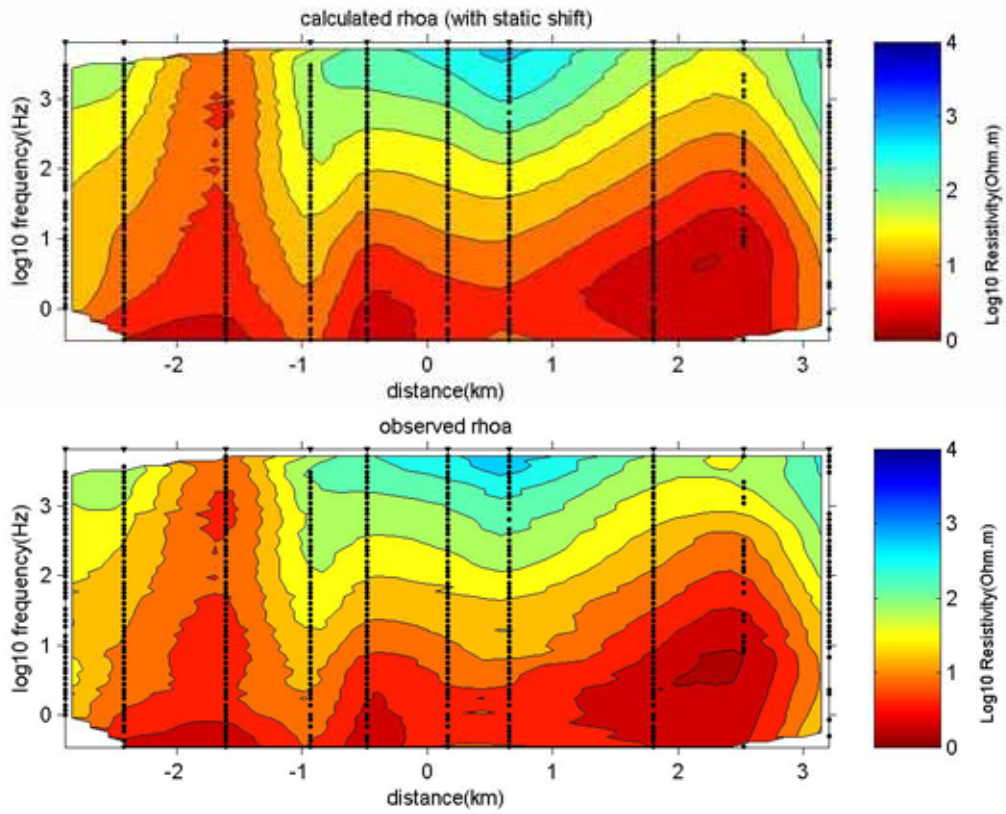
桂 郁雄・川東 慶子・Widarto Djedi S.・西村 進・茂木 透・下泉 政志・西田 潤一・楠建一郎・鈴木 浩一・藤光 康宏・城森 明・山本 哲也・山崎 明・田口 陽介(1993): 草津白根火山でのCSMT-TDEM探査(その1), 物理探査学会学術講演会講演論文集, 88,

463-468.

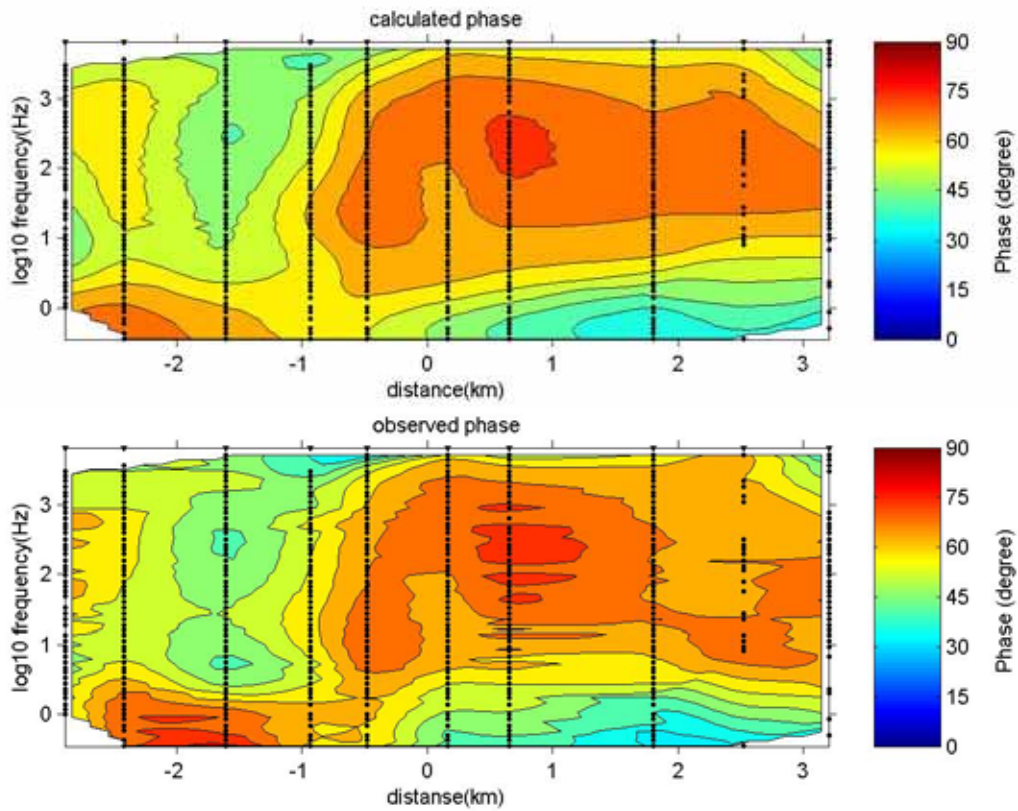
- Kumagai, H., Chouet, B. A. and Nakano, M. (2002) Temporal evolution of a hydrothermal system in Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from the complex frequencies of long-period events, *J. Geophys. Res.*, 107: 2236, doi:10.1029/2001JB000653.
- Matsushima, N., Oshima, H., Ogawa, Y., Takakura, S., Satoh, H., Utsugi, M., and Nishida, Y. (2001) Magma prospecting in Usu volcano, Hokkaido, Japan, using magnetotelluric soundings, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 109 (4), 263-277.
- Nakano, M., Kumagai, H., and Chouet, B. A. (2003): Source mechanism of long-period events at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, inferred from waveform inversion of the effective excitation functions, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 122/3-4, pp. 149 - 164, 2003.
- Ogawa, Y. (2002) On two-dimensional modeling of magnetotelluric field data, *Surveys in Geophysics*, 23 (2-3), 251-273.
- Ogawa, Y. and Uchida, T. (1996): A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 126, 69-76.
- Ogawa, Y., Matsushima, N., Oshima, H., Takakura, S., Utsugi, M., Hirano, K., Igarashi, M., and Doi, T. (1998) A resistivity cross-section of Usu volcano, Hokkaido, Japan, by audiomagnetotellurics soundings, *Earth Planets and Space*, 50, 339-346.
- Ohba, T., Hirabayashi, J., and Nogami, K. (1994) Water, heat and chloride budget of the crater lake, Yugama at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Geochem. J.*, 28, 217-231.
- Ohba, T., Hirabayashi, J., and Nogami, K. (2000) D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of water in the crater lake at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 97, 329-346.
- 大場武(2003): 草津白根山の火山熱水系, 京都大学防災研究所研究集会報告書(一般: 12K-03), 161 - 168
- 山崎明・中禮正明・角村悟・中島新三郎(1992) 草津白根山における全磁力変化の解析: 1990年の顕著な全磁力変化と熱消磁モデル、*Memoirs of Kakioka Magnetic Observatory*, 24, 53-66.



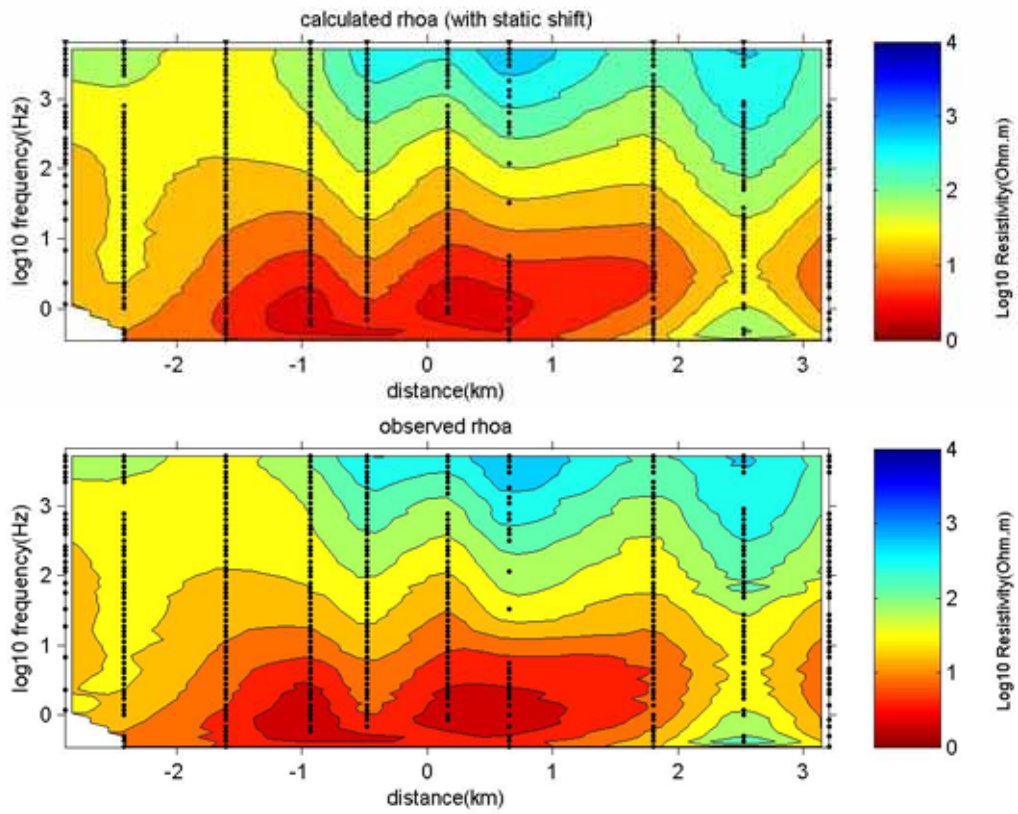
第1図 草津白根山周辺の地図とAMT観測点(+)。火山性熱水や火山ガスの地熱兆候地を四角で示した。草津白根山頂付近のK、Y、Mはそれぞれ涸釜、湯釜、水釜の位置を表す。図中の白丸は震源位置を表す。



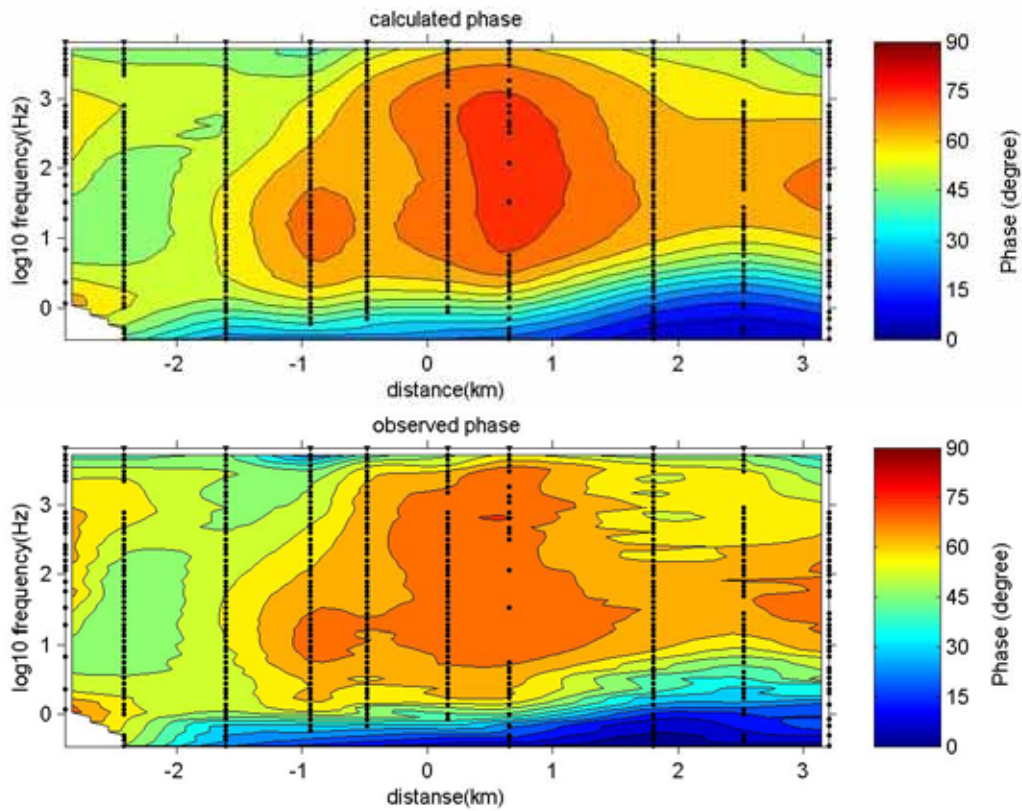
第 2 (a) 図 TE mode の見掛比抵抗擬似断面の計算値(上図)と観測値(下図)の比較



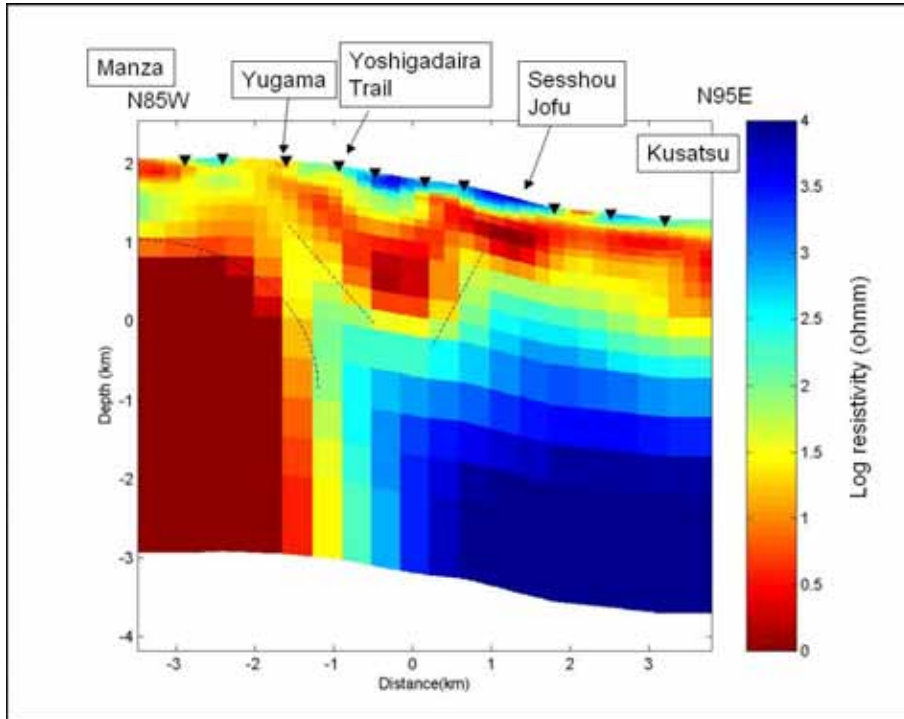
第 2 (b) 図 TE mode の位相擬似断面の計算値(上図)と観測値(下図)の比較



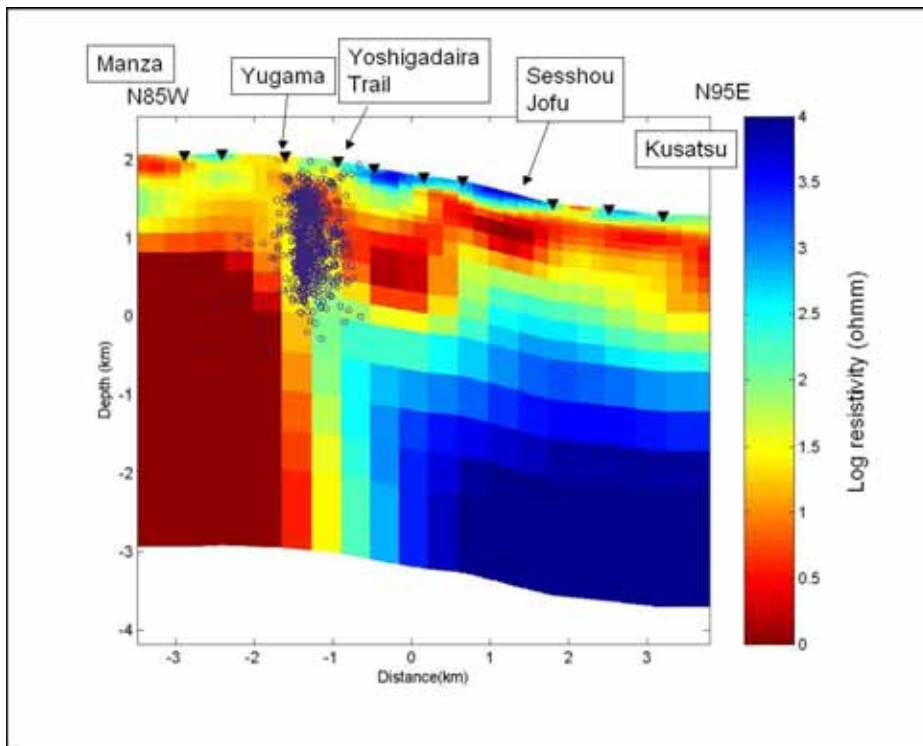
第 3(a)図 TM mode の見掛比抵抗擬似断面の計算値(上図)と観測値(下図)の比較



第 3(b)図 TM mode の位相擬似断面の計算値(上図)と観測値(下図)の比較



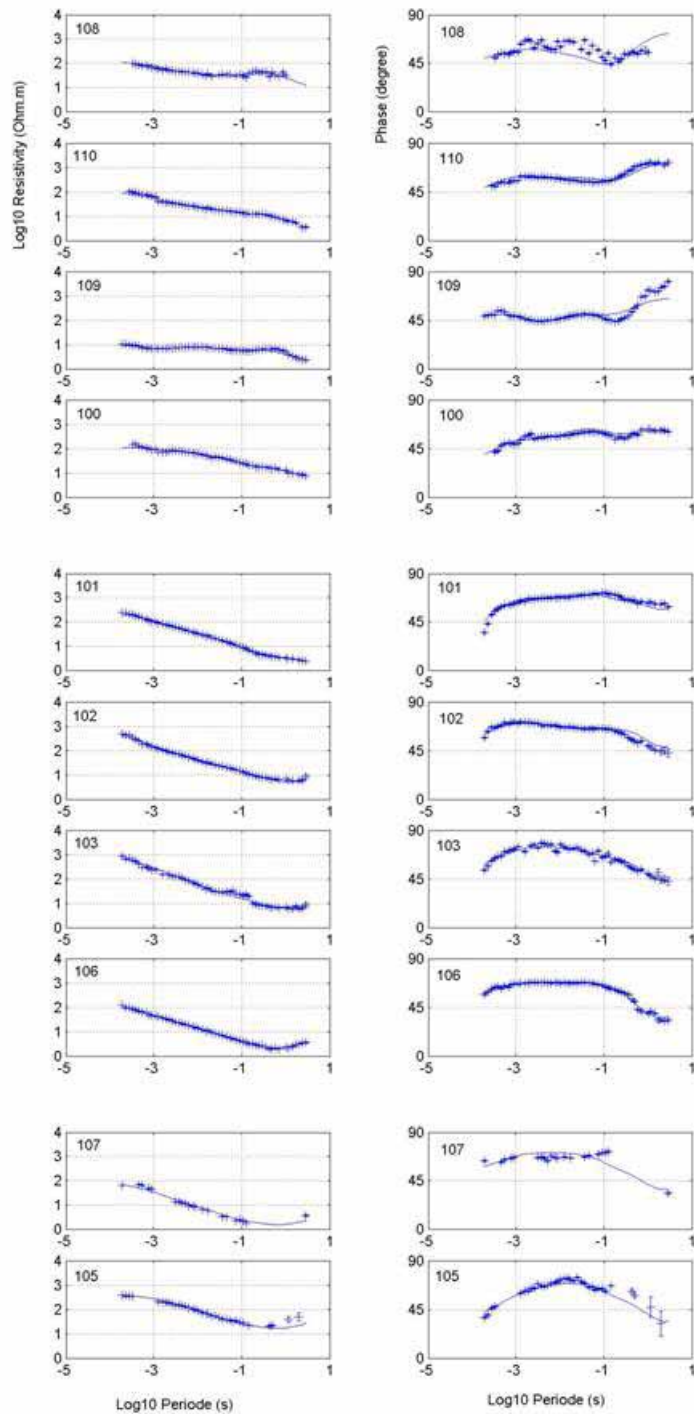
第 4 図 走向をN5°Eとした 2 次元比抵抗断面モデル。図中の点線は不連続線を表す。



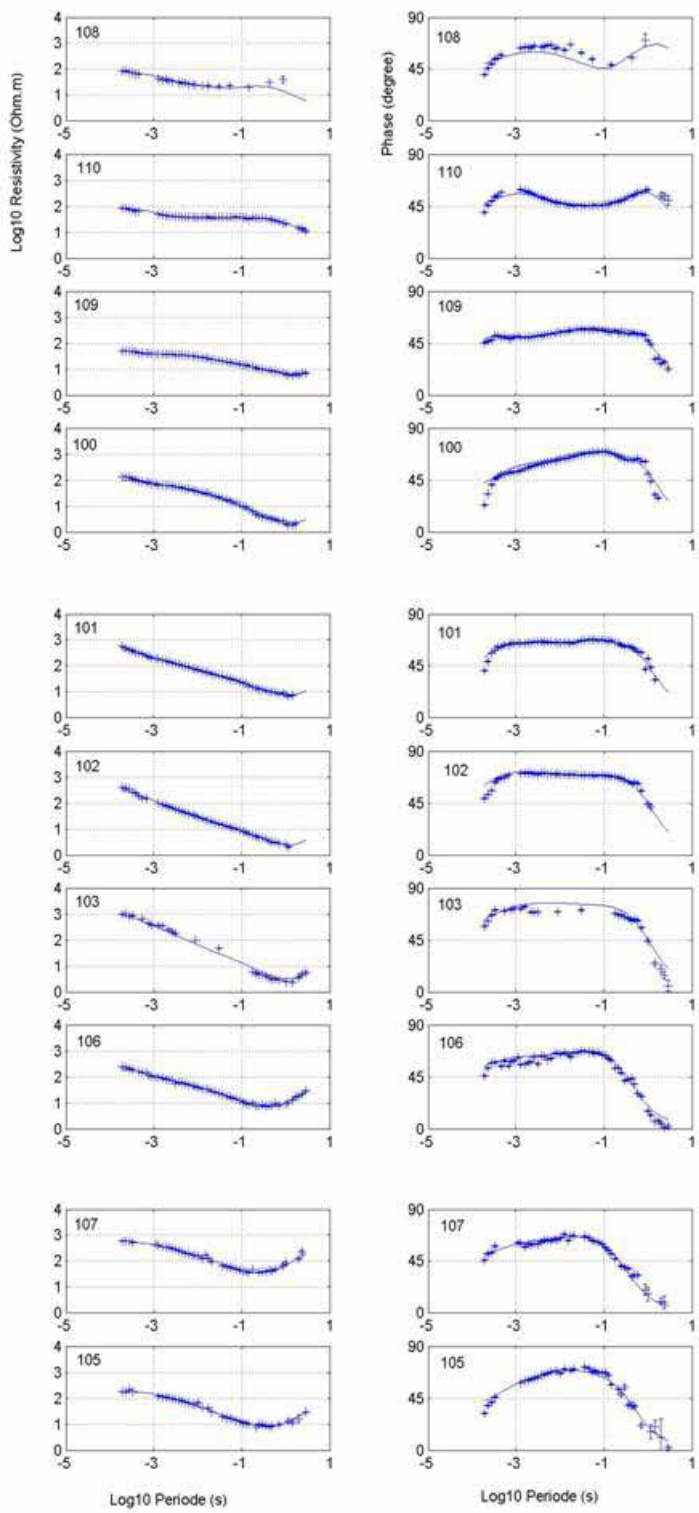
第 5 図 比抵抗断面と震源分布。湯釜東方の地表下の 2km までに地震が集中するが、低比抵抗層が不連続を示すところに対応している。

付録

各観測点、各モードごとに、第4図の比抵抗モデルと観測値とのフィットを示す。



第6図 TE Modeの見掛比抵抗と位相の探查曲線(+)とモデル応答(実線)を西側の観測点から並べたもの。左のコラムは見掛比抵抗の対数を周期の対数についてプロットしたもの。右のコラムは位相を周期の対数についてプロットしたもの。



第7図 TM Mode の見掛比抵抗と位相の探查曲線 (+) とモデル応答 (実線) を西側の観測点から並べたもの。左のコラムは見掛比抵抗の対数を周期の対数についてプロットしたもの。右のコラムは位相を周期の対数についてプロットしたもの。