



|                  |                                                                                       |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 屈斜路カルデラ周辺におけるMT 法による比抵抗探索                                                             |
| Author(s)        | 本多, 亮; 山谷, 祐介; 市原, 寛 他                                                                |
| Citation         | 北海道大学地球物理学研究報告, 74, 45-55                                                             |
| Issue Date       | 2011-03-19                                                                            |
| DOI              | <a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.74.45">https://doi.org/10.14943/gbhu.74.45</a> |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/45151">https://hdl.handle.net/2115/45151</a>     |
| Type             | departmental bulletin paper                                                           |
| File Information | P45-55honda.pdf                                                                       |



## 屈斜路カルデラ周辺における MT 法による比抵抗探査

本多 亮

北海道大学大学院理学研究院

山谷 祐介

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

市原 寛

海洋研究開発機構

長谷 英彰

東京大学地震研究所

茂木 透・山下 晴之・大山 倫敦

北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

上嶋 誠

東京大学地震研究所

中川 光弘

北海道大学大学院理学研究院

(2011 年 1 月 20 日受理)

## Magnetotelluric Investigation around the Kutcharo Caldera Region

Ryo HONDA

Graduate School of Science, Hokkaido University

Yusuke YAMAYA

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

Hiroshi ICHIHARA

Japan Agency of Marine-Earth Science and Technology

Hideaki HASE

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

Toru MOGI, Haruyuki YAMASHITA, Tomoatsu OHYAMA

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University

Makoto UYESHIMA

Earthquake Research Institute, University of Tokyo

and

Mitsuhiro NAKAGAWA

Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 20, 2011)

Two noticeable caldera lakes exist around Teshikaga region, Eastern Hokkaido, Northern Japan. One is the Lake Masyu, and the other is the Lake Kutcharo, upon the largest caldera in Japan. The calderas locate on the Akan-Shiretoko volcanic line, and the region is still active. We can see many geothermal and fumarolic phenomena around. Recently, the chronology of the volcanic activity in this region is well surveyed by geologists, and the clarification of the eruption mechanism is now discussed from the disaster prevention point of view. Also, there is an interesting fact that the Teshikaga region seems to locate just at the offset of the volcanic line. Geophysical approaches can propose the effective information for these unsolved problems. In this paper, we report about the magnetotelluric observation that we have been performing these couple of years.

## I. は じ め に

屈斜路カルデラは日本最大のカルデラであり、この地域は後カルデラ火山活動を含めて大規模な噴火活動を繰り返してきた。第四紀の火山活動史において数万年から数十万年の間隔で認められるような巨大噴火がひとたび起きれば、それは広範囲に渡って壊滅的な打撃を与える。したがって巨大噴火を引き起こすポテンシャルを持つ屈斜路火山についてその噴火メカニズムを解明することは、防災の見地からも非常に重要であるといえる。この地域の噴火史は Katsui et al. (1975), 長谷川ほか (2008), 岸本ほか (2009) などによるテフラ層序の調査によりその噴火様式とともに詳細に明らかになってきている。一方屈斜路カルデラの位置する千島火山帯西端部は択捉島、国後島、知床火山列（知床半島）と雁行状にならび、阿寒カルデラから知床に至る阿寒知床火山列についても屈斜路カルデラ付近でオフセットが見える。この観点からすると、屈斜路カルデラは阿寒側の、摩周カルデラは知床側の火山列に属するといえる。噴火史でいえば、2つのカルデラがそれぞれ組成の異なる独立したマグマ供給系をもつと考えられる一方で、噴火様式を交互に入れ替えていることが長谷川ほか (2008) によって指摘されており、中長期的な噴火準備過程の理解の上でこれら2つのカルデラの関係にも興味をもたれる。

屈斜路カルデラとその周辺地域の地下構造については Yokoyama (1958), 横山 (1969, 1970) など、カルデラ構造に対するいくつかの重力異常によるアプローチがあるものの、詳細な構造は明らかにされていない。Sato et al. (2001) は北海道東部地域をオホーツク海沿岸から太平洋沿岸へ縦断する3本のMT観測測線を展開し、Nakanishi et al. (2009) はオホーツク海から太平洋のトラフまで陸海をつなぐ人工地震による探査を行っている。しかし残念ながら、いずれもマグマ供給系に言及できるほどの詳細な構造は明らかになってはいない。Ichihara et al. (2009) は弟子屈地域で面的なMT観測網を展開している。これは同地域が北海道における数少ない内陸地震発生地域であるためであり、そのターゲットは屈斜路カルデラではなく、その南西を切ると見られる活断層であった。しかしながら Ichihara et al. (2009) によって得られたデータはカルデラの構造に迫る上で非常に有用であり、したがって我々は Ichihara et al. (2009) のデータを補うように2009～2010年に屈斜路湖北岸地域を中心にMT法比抵抗探査を行い、屈斜路カルデラ周

辺地域をカバーするデータを得た。

## II. 観 測 概 要

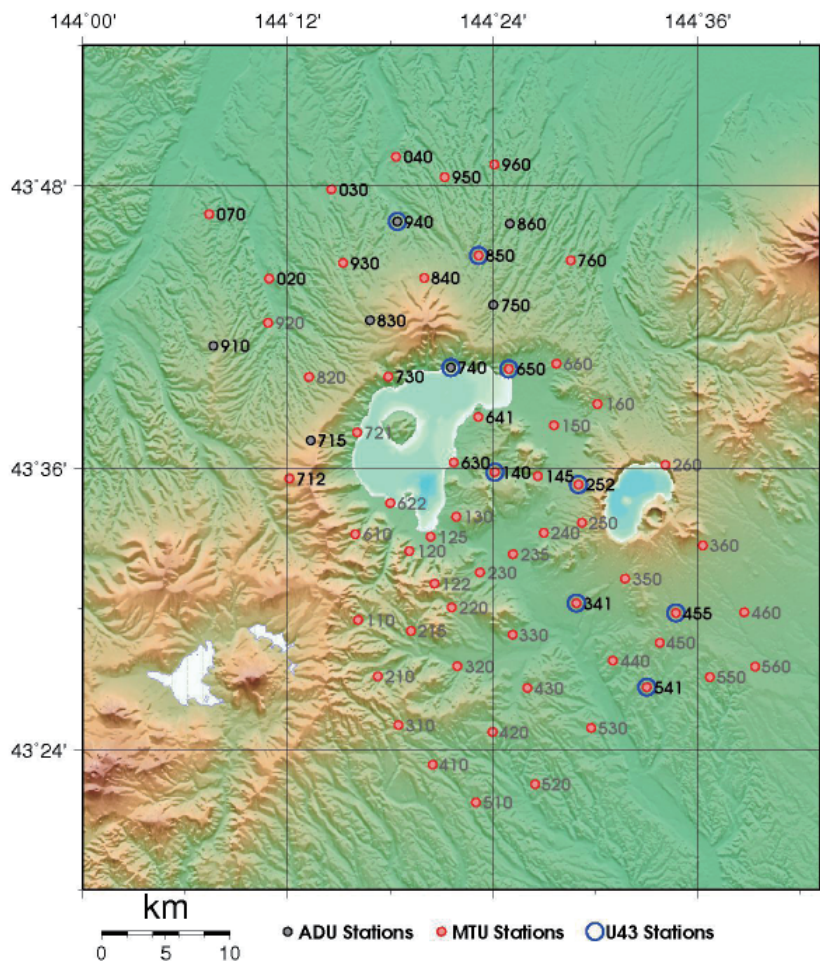
広帯域 MT 法比抵抗探査は 2009 年の 9 月と 2010 年の 7 月中旬～8 月始めにかけてそれぞれ行った。2009 年の観測は北海道大学地震火山センターが所有する Phoenix Geophysics 社製の MTU-5 および MTU-5A, 東京大学地震研究所が所有する MTU-5A を 1 台と Metronix 社の ADU-07 を 4 台, の計 7 台を用いて行った。2010 年の観測は北海道大学の MTU-5 を 1 台と MTU-5A を 1 台, 東北大学の MTU-5 を 2 台, 計 4 台を用いて行った。いずれの観測も電場センサーとして Pb-PbCl<sub>2</sub> 電極, 磁場センサーとしてインダクションコイルを用いて, 電場 2 成分・磁場 3 成分について 3～7 日間の観測を行った。2009 年の観測は良好なシグナルが得られず, 雷等によるノイズが目立つデータもあったものの, 解析に耐え得るデータが得られた。2010 年の観測では前年に比べて良好なシグナルが得られ, またノイズも少なく, 良質なデータが得られた。観測された磁場・電場の時系列データは FFT によってそれぞれ 40 の周波数テーブルごとのデータに変換された。この際, MTU のデータについては国土地理院水沢測地観測所・江刺観測場の磁場データを用いてリモートリファレンス処理 (Gamble et al., 1978) を, ADU のデータについてはシングルサイト処理を行った。また, 2010 年の 6 月から 9 月にかけて, U-43 を 3 台用いた長周期 MT 観測も 9 観測点にて行った。Fig.1 に Ichihara et al. (2009) による点も含めた全観測点を示す。本稿では広帯域 MT 比抵抗探査の結果について紹介する。

## III. 見かけ比抵抗及び位相

Fig.1 に示した観測点のうち新規に得た見かけ比抵抗と位相の応答曲線を Fig.2 に示す。図中では黒色で XY 成分 (電場の南北成分, 磁場の東西成分から得られた応答曲線), 灰色で YX 成分を示している。すべての点において特に長周期側で XY 成分と YX 成分は異なる応答曲線を示し, このことからこの地域の大局的な構造は異方的であるといえる。また, 既に述べたように概ね良質なデータが得られたことがわかる。ほとんどの観測点において見かけ比抵抗は短周期側で一度僅かに上昇した後低下し, その後長周期側で高くなる傾向を示しており, 表層に高抵抗帯, 浅部に低抵抗帯が, 深部に高抵抗帯が存在することが伺える。この傾向は堆積層上よりも, 750, 830 のような外輪山上の観測データにおいて強く現れる。これは重力異常図において外輪山が高重力異常域と対応し, おそらく密な岩質であることと調和的である。

## IV. 解析地域の走向

解析範囲の構造の支配的な走向は火山列の方向である南西－北東方向であると予測された。



**Fig. 1.** MT observation points over the topography. Gray and red solid circles indicate ADU and MTU stations, respectively. Blue open circles indicate U-43 stations, which are not discussed in this paper. Black and gray appended numbers indicate station name of this work and Ichihara et al.(2009), respectively.

また、Ichihara et al. (2009) は Groom-Bailey decomposition 解析 (Groom and Bailey, 1989) によって弟子屈周辺の走向方向は火山列の方向と調和的である  $N45 \sim 55^\circ E$  (もしくはその直交方向) であるとしている. よって本研究でもこの傾向を仮定して、Ichihara et al. (2009) の観測点配置を北々西方向に延長する観測を行った. Fig.3 に各観測点における 0.01 Hz および 0.001 Hz 帯のインダクションベクトル (Rikitake and Yokoyama, 1955) 及びフェイズテンソル (Caldwell et al., 2004) を示す. フェイズテンソルの長軸方向は一見して屈斜路湖を境に大きく変化している. 南側では火山列と直交する方向に長軸方向が良く揃っているのに対し、北側では東に  $45$  度

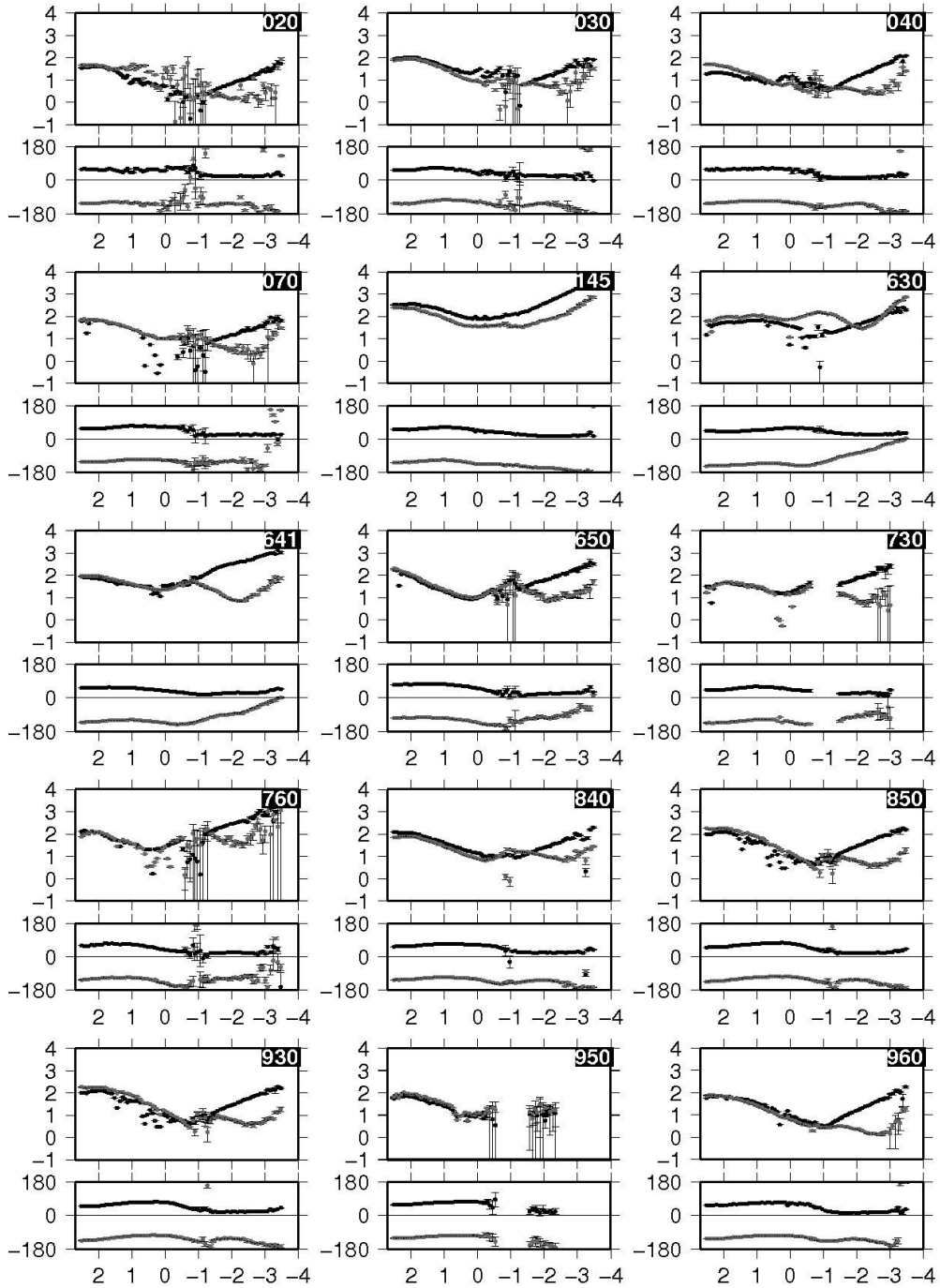


Fig.2. Sounding curves obtained for each station. Upper sections indicate apparent resistivities ( $\log \Omega m$ ), while bottom sections indicate impedance phases (deg). X-axes indicate frequency ( $\log Hz$ ). Black and gray symbols indicate XY and YX components, respectively. These 15 stations are all MTU stations.

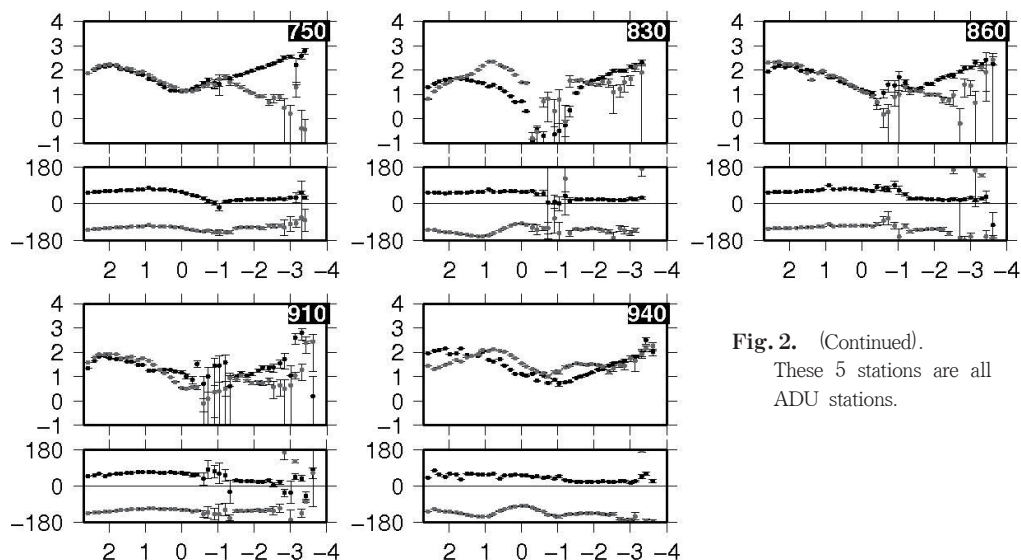


Fig. 2. (Continued).  
These 5 stations are all  
ADU stations.

ほどその方向を変えている。また、0.01 Hz 帯のインダクションベクトルは南部で根釧原野方面、北部では美幌からオホーツク海に抜ける堆積層を指しているのに対し、より長周期の 0.001 Hz 帯のインダクションベクトルは全点で海域を指し示す傾向が強い。2次元の解析のためには仮定する走向方向を決める必要が有る。Fig.4 に全観測点で得られたフェイズテンソルの長軸方向のローズダイアグラムを示す。それぞれ周波数帯域ごとのヒストグラムを見ると、0.1 ~ 1 Hz 帯および 0.01 ~ 0.1 Hz 帯において明確な方向性が示されているがそのほかの帯域では卓越する方向性が無いことがわかる。南部で観測点数が多いこともあり、全周波数帯域でのヒストグラムでは N60 度 E の走向方向を示すという傾向が示されている。南北で大きく走向方向が変わることは気がかりではあるが、この走向方向が解析地域で支配的なものであると仮定し、解析を進めることにした。

## V. 2次元比抵抗構造と考察

解析範囲の南北で走向の違いはあるものの、火山列の方向と調和的な南部の走向を採用して、屈斜路カルデラを切る断面について TM モードを使用した 2次元のインバージョン解析 (Ogawa and Uchida, 1996) による比抵抗構造の推定を試みた。走向方向は N60°E と仮定して解析を行った。解析断面の位置と使用した観測点図を Fig.5 に、得られた比抵抗構造を Fig.6 に示す。この測線上においてカルデラは観測点 130 から観測点 730 に、屈斜路湖は観測点 630 から 730 までの領域に対応する。測線のほぼ全域にわたってテフラに覆われる表層は数 100  $\Omega\text{m}$  の高抵抗帯となっている一方、カルデラ湖に対応する深さ 5 km 程度までの 10  $\Omega\text{m}$  程度の低抵抗構造 (C1)

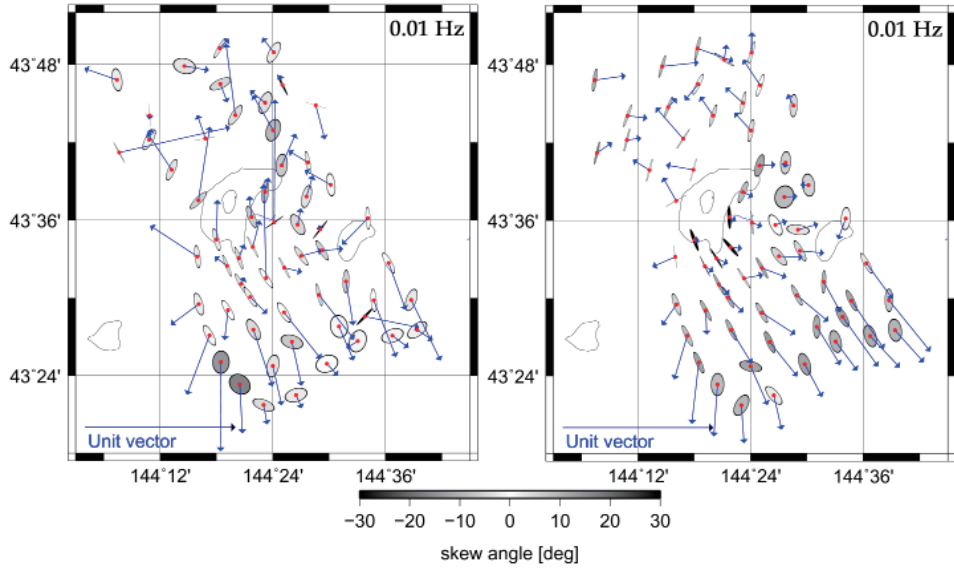


Fig. 3. Distribution of the induction arrows and the phase tensor ellipses.

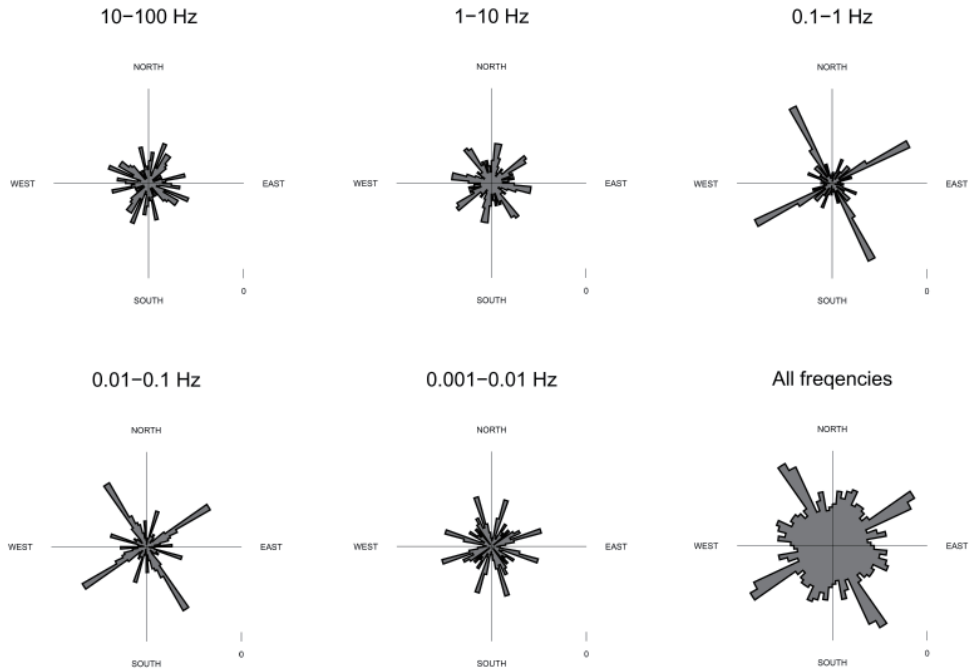


Fig. 4. Rose histograms of the principal direction of phase tensor ellipses in each and all frequency range.

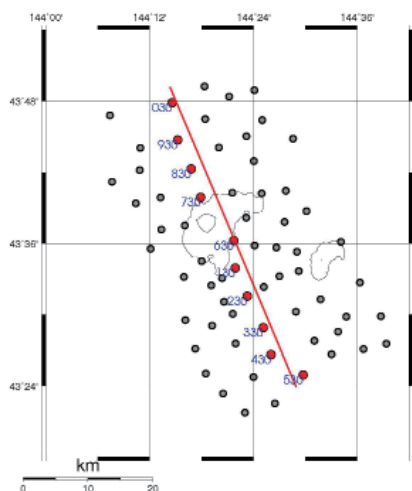


Fig. 5. Location of the MT stations and the profile line of 2-D inversion analyses. Employed stations are indicated by red solid circle.

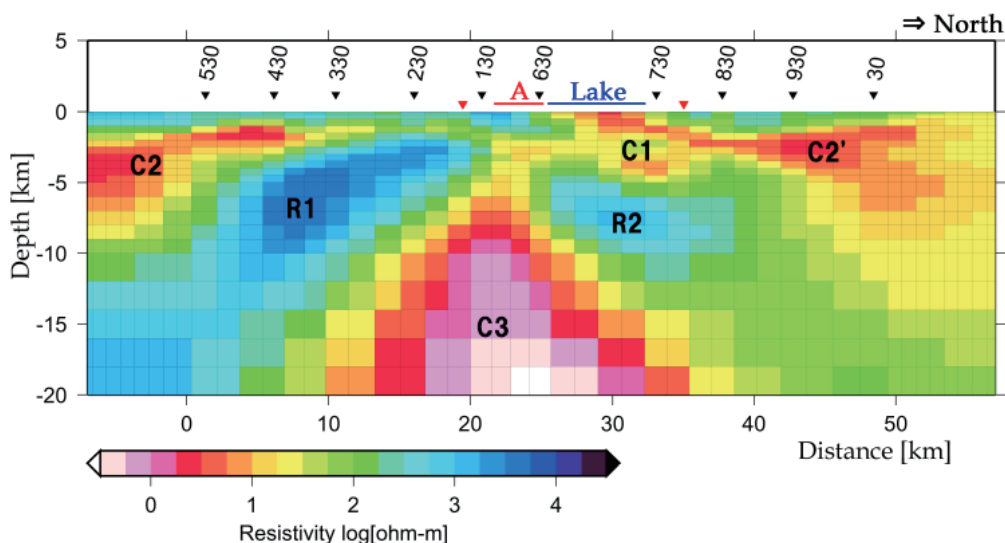


Fig. 6. Resistivity structure along the profile line (Fig.5). Black inverted triangles on the surface indicate the location of the MT stations, with station name. Red inverted triangles indicate caldera rim. Red bar with label “A” and blue bar with label “Lake” on surface indicate the location of Atosanupuri volcano and the Lake Kutcharo, respectively. The labels on resistivity structure indicate resistive (R1, R2) and conductive (C1, C2, C2', C3) area.

が顕著である。ただ、アトサヌプリ直下はテフラ域と同等の高い抵抗値を示す。テフラよりも下層 (C2, C2') は低抵抗を示し、第三紀層に相当すると考えられる。さらに下層は再び高抵抗を示すが、背弧側 (R2 およびそれ以深) の抵抗値は前弧側 (R1 およびそれ以深) に比べて低い。こうして述べてきた比抵抗構造の特徴は局所的なカルデラ構造を除けば Satoh et al. (2001) と良く一致する。しかし、今回の稠密な観測によって得られた比抵抗構造のなかで最も特徴的なのは地殻深部の高抵抗域の中を貫く低抵抗領域 (C3) の存在である。火山フロント直下に位

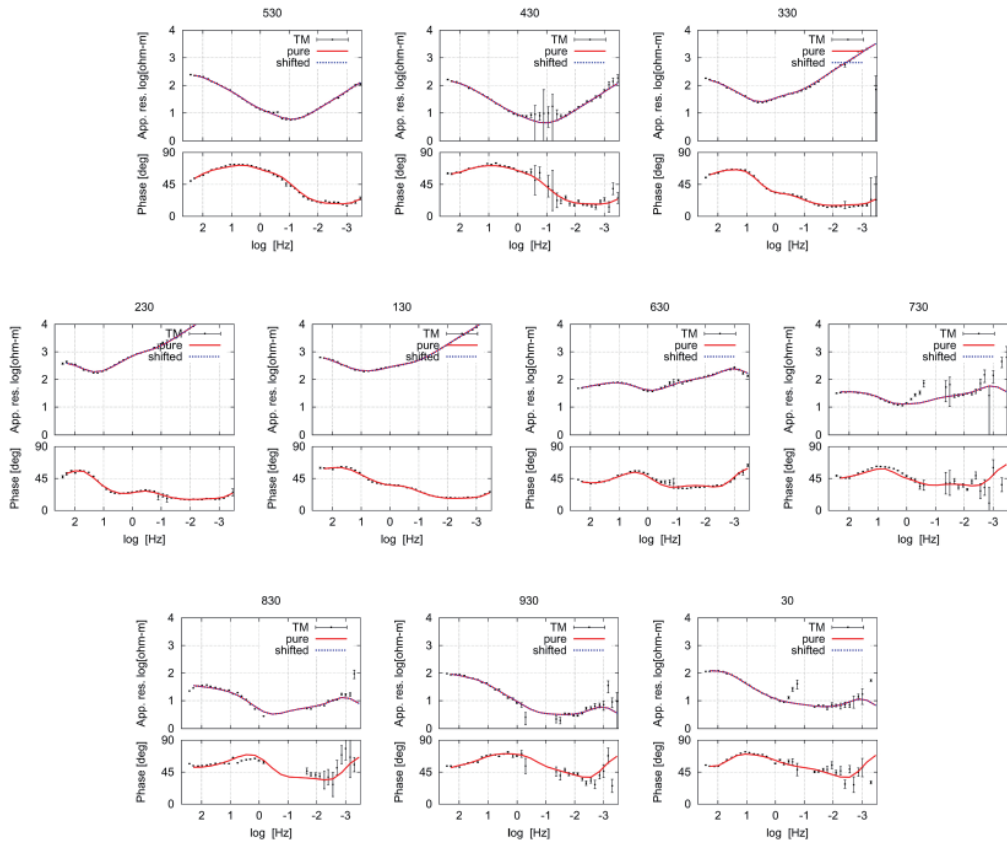


Fig. 7. Responses of apparent resistivity and impedance phase from inverted model (colored) are compared with observed values (dots with error bars).

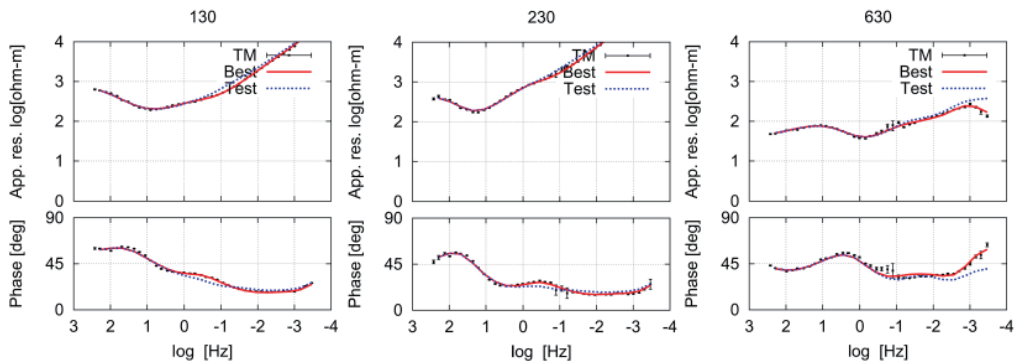


Fig. 8. Responses of apparent resistivity and impedance phase from sensitivity test model (blue dashed lines) are compared with the responses of inverted model (red lines) and the observed values (dots with error bars).

置するこの低抵抗帯はアトサヌプリ直下へ繋がっており、この地域の地熱活動の熱源になっていることが考えられる。Satoh et al. (2001) は前述したように背弧側の中部～下部地殻が低抵抗 ( $10 \sim 40 \Omega\text{m}$ ) であることを示し、その要因について連結した部分溶融体を挙げているが、C3 この領域が示す比抵抗値は  $1 \Omega\text{m}$  以下でありそれよりもひと桁低い。Fig.7 に示したように全観測点での観測値とインバージョンによるモデルからの計算値とのフィッティングは非常に良いが、C3 が必要な構造かを確認するために感度チェックを行った。C3 を C3 外周域と同等の  $100 \Omega\text{m}$  ほどの低抵抗値に設定したモデルを作り、そのモデルから得られる応答曲線を観測値、ベストモデルから得られる応答曲線と比較した。低抵抗領域直上の観測点 (130, 230, 630) における結果を Fig.8 に示す。これらの観測点の 1 Hz 以下においてインバージョンで得られたベストモデル、観測値との乖離が顕著であり、このことからカルデラ下の非常に低い比抵抗値の領域 (C3) は確かに存在することが確認できた。Satoh et al. (2001) が指摘したように下部地殻の連結した部分溶融体を含む層が  $10 \sim 40 \Omega\text{m}$  程度を示すとすれば、C3 はそれよりもひと桁低いので別の原因を考える必要がある。例えば Schilling et al. (1997) が示すように岩石中のメルトが増加すればするほど比抵抗値は低くなる傾向にある。橋本ほか (2009) は Schilling et al. (1997) の計算式を用い、メルトの割合に対する電気伝導率の変化を示した。それによればメルトの体積%が 5 %程度までは急激な電気伝導率の上昇を示し、その後 100% に向かってメルト自体の電気伝導率に収束していく。橋本ほか (2009) はまた、メルトの比抵抗値に関して、Gaillard (2004) が室内実験から与えた式に基づいて流紋岩質メルトの比抵抗値と温度の関係を示している。 $\text{H}_2\text{O}$  の含有重量%によっても若干値は変化するものの (より水を含むほうが低抵抗)、温度による変動のほうがそれよりも大きい。これによれば  $1 \Omega\text{m}$  を下回る比抵抗値を得るには  $800^\circ\text{C}$  以上必要であることがわかる。アトサヌプリ周辺の地温勾配は  $6 \sim 8^\circ\text{C}/100\text{m}$  (若松ほか, 1995) であるので、メルト率が 100% とすると地下 14 km 以深で  $1 \Omega\text{m}$  以下となり、得られた比抵抗構造を説明できる。ただし、メルトフラクションが低い場合は若干その深さは深くなる。屈斜路カルデラ直下であることから珪長質マグマの存在を連想するが、マグマの種類と比抵抗値の関係については良くわかっていない。Schilling et al. (1997) によれば玄武岩質メルトに比べて流紋岩質メルトのほうが比較的比抵抗値を示すとしているが、現時点で我々にはそれを限定する物証は無い。いずれにしても屈斜路カルデラのなかでもアトサヌプリ下に高温のマグマが上昇していることが示唆され、このことは 1994 年 6 月にアトサヌプリ周辺で地震活動が活発化した (本谷・一柳, 1996) こととも調和的であろう。

**謝辞** MT観測にあたり地権者の方々、根釧西部森林管理署、網走南部森林管理署および北海道地方環境事務所に便宜を図っていただいた。国土地理院水沢観測所からは磁場データの提供を受けた。北海道大学地震火山研究観測センターの橋本武志准教授には貴重な御助言の数々を頂いた。本研究は経済産業省原子力安全・保安院からの受託研究の一環として行われている。図の作成には Generic Mapping Tools 4.0 (Wessel and Smith, 1998) を用いた。記して感謝いたします。

## 文 献

- Caldwell, T. G., H. M. Bibby and C. Brown, 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, **158**, 457-469.
- Gaillard, F., 2004. Laboratory measurements of electrical conductivity of hydrous and dry silicic melts under pressure, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **218**, 215-228.
- Gamble, T. D., W. M. Goubau and J. Clarke, 1978. Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, **44**, 53-68.
- Groome, R. T. and R. C. Bailey, 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensor in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *J. Geophys. Res.*, **94**, 1913-1925.
- 長谷川健・岸本博志・中川光弘・伊藤順一・山元孝広, 2008. 北海道東部のテフラ層序から見た後屈斜路カルデラ火山活動, 月刊地球, 号外, **60**, 141-153.
- 橋本武志・小川康雄・高倉伸一・山谷祐介・市原寛・宇津木充・井上寛之・小池哲司・長谷川浩・茂木透, 2009. 有珠 2000 年新山域の比抵抗構造, 北海道大学地球物理学教室研究報告, **72**, 79-105.
- Ichihara H., T. Mogi, H. Hase, T. Watanabe and Y. Yamaya, 2009. Resistivity and density modelling in the 1938 Kutcharo earthquake source area along a large caldera boundary, *Eearth, Planets and Space*, **61**, 345-356.
- Katsui, Y., S. Ando and K. Inaba 1975. Formation and magmatic evolution of Masyu volcano, East Hokkaido, Japan, *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, **16**, 533-552.
- 岸本博志・長谷川健・中川光弘・和田恵治, 2009. 最近約 1 万 4 千年間の摩周火山のテフラ層序と噴火様式, 火山, **54**, 15-36.
- 本谷義信・一柳昌義, 1996. 北海道東部弟子屈地域, アトサスプリ周辺の地震活動 (1926-1995), 北海道大学地球物理学教室研究報告, **59**, 211-220.
- Nakanishi, A., E. Kurashimo, Y. Tatsumi, H. Yamaguchi, S. Miura, S. Kodaira, K. Obana, N., Takahashi, T. Tsuru, Y. Kaneda, T. Iwasaki and N. Hirata, 2009. Crustal evolution of the southwestern Kuril Arc, Hokkaido Japan, deduced from seismic velocity and geochemical structure, *Tectonophysics*, **472**, 105-123.
- 日本地熱資源開発促進センター, 1980. 地熱開発基礎調査報告書 No.18 アトサスプリ その 2 (昭和 54 年度).
- Ogawa, Y. and T. Uchida, 1996. A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, **126**, 69-76.
- Rikitake, T. and I. Yokoyama, 1955. Volcanic activity and changes in geomagnetism, *J. Geophys. Res.*, **60**, 165-172.
- Satoh, H., Y. Nishida, Y. Ogawa, M. Takada and M. Uyeshima, 2001. Crust and upper mantle resistivity structure in the southwestern end of the Kuril Arc as revealed by the joint analysis of conventional MT and network MT data, *Earth Planets Space*, **53**, 829-842.
- Schilling, F. R., G. M. Parzsch, H. Brasse and G. Schwarz, 1997. Partial melting below the magmatic arc in the central Andes deduced from geoelectromagnetic field experiments and laboratory data, *Phys. Earth Planet. Int.*, **103**, 17-31.
- 若浜洋・秋田藤夫・松波武雄, 1995. 北海道地温勾配図説明書, 北海道立地下資源調査所, 44 pp.
- Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998. New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, **79** (47), 579 pp.
- Yokoyama, I., 1958. Gravity Survey on Kuttyaro Caldera Lake, *J. Phys. Earth*, **6**, 75-79.
- 横山泉, 1969. カルデラの構造に関する考察, 火山, **14**, 77-83.
- 横山泉, 1970. 摩周湖における重力測定, 北海道大学地球物理学教室研究報告, **24**, 63-71.