

北海道での比抵抗構造調査 (レビュー)  
Resistivity survey in Hokkaido (Review)

茂木 透 (北海道大学大学院理学研究院)  
Toru Mogi (Faculty of Science, Hokkaido University)

### Abstract

Hokkaido Island is located at the north-west margin of Pacific Ocean, where the Pacific Plate is being subducted westward from the Kuril Trench. West of the island, there exists a plate boundary between the North American and Eurasian Plate. Hokkaido is a highly deformed region under a compressional stress. This tectonic framework was controlled by the dextral oblique collision between the Eurasian and North American Plates and the oblique subduction of the Pacific Plate beneath the Kuril Trench, the latter being responsible for the south-westward migration of the Kuril Arc sliver and its collision into the North Japan Arc. Such tectonic setting is sometimes associated with large inland earthquakes have been concentrated in the Hidaka Mountains, Teshikaga-Kuttyaro Area and Northern Hokkaido.

Resistivity studies have been conducted to discuss crustal structures in the tectonic active areas since 1950'. Resistivity imaging helps us to elucidate the mechanism behind the inland earthquakes, because it reflects the geology, aqueous fluid, and melt distribution. These studies revealed structural heterogeneity in the tectonic area and suggested that the heterogeneity could cause local concentration of strain and result in inland earthquakes.

### 1. はじめに

北海道地域は、南東側から太平洋プレートが沈みこみ、西側はユーラシアプレートに拘束されており、基本的に圧縮場の応力状態にある。太平洋側では、千島～日本海溝沿いに M8 クラスの海底巨大地震が発生しており、一方、日本海側でも北海道南西沖地震等の海底大地震が起こっている。また、太平洋プレートの沈み込みに引きずられて西進している千島弧が東北日本弧と日高山脈地域で衝突しており、そこでは大きな内陸地震が起こっている。その他に、東部の弟子屈・屈斜路地域や道北地域でも M5～6 の内陸地震が数多く発生している。また、千島列島から連なる知床～阿寒火山列が東部にあり、中央部の大雪～十勝火山帯および南部の樽前山、有珠山、駒ヶ岳と連なる火山列もある。その中には、雌阿寒岳、十勝岳、樽前山、有珠山、駒ヶ岳など現在でも活発な火山活動を続けている火山がある。このように、北海道では多くの大地震が発生し、活動的な火山も多いので、以前からそれらの地域を対象に比抵抗構造調査が行われてきた。

比抵抗構造調査は、初期の頃は、磁場 3 成分観測によるいわゆる GDS 観測が行われていたが、1980 年代以降高周波数まで測定可能な MT 観測装置が導入され、各地で MT 法による構造調査が行われるようになった。90 年代からは 2D インバージョンの実用化がすすみ、比抵抗構造が測線沿いの断面として表現され、地震波速度構造との比較が容易にできるようになった。しかし、2D 構造を仮定した時には、その走向を決めることやスタテ

ティックシフトの問題の重要性も指摘されるようになった。2000年代になって3Dモデリング法がコンピュータの性能向上により実用化し、2005年頃からは3Dインバージョンも試みられるようになってきている。今後も、比抵抗構造の3Dイメージングが盛んになっていくと思われ、その中で地形の影響や周囲の海の影響、スタティックシフトや異常位相の問題なども提起されてきているが、さらに精密な3次元モデリングが行われるようになれば解決されていくであろう。本報告では、まず、時代を追って北海道での比抵抗構造の研究例をレビューする。

## 2. CA観測時代

北海道での地磁気観測は、1952年から女満別地磁気観測所（現在は地磁気観測所女満別観測施設）で始められ、1964年からは太陽活動極小国際観測年の一環として、稚内、浦河などで地磁気観測が開始され、さらに、北海道大学により中標津、東幌向でも地磁気、地電流の観測が行われ電気伝導度の不均質性が議論された（森，1968，Mori，1987）。この図に示されているインダクションベクトルは、網走から厚岸にかけてベクトルが東から南に向かう傾向が見られており、これは南に行くほど太平洋の影響が強くなっていることを示している。地磁気変動観測による電気伝導度異常の観測は、道東（Mori，1975）、津軽海峡～渡島半島（山下，横山，1975，1977）、道南（Nishida，1976）、石狩低地帯（西田，1977）により行われ、得られたインダクションベクトルはNishida(1976)にまとめて示されている（Fig.1）。東北北部でのベクトルが北向きで渡島半島のベクトルが南向きであることから、津軽海峡に東西方向の電流が流れていると考えられる（Yamashita and Yokoyama，1976）。また、石狩中部のベクトルは低地帯の方を向く傾向が見られ、そこには高電気伝導度を示す厚い堆積層があって強い電流が流れていると考えられている（西田，1977）。これらの観測が行われた1960～1970年代は、短周期の電磁場変動を記録することが難しかったので、これらの観測ではほとんどが5分以上の周期の電磁場変動を解析して地下構造を議論している。このような長い周期では、周囲の海の影響が大きいことが指摘されているが、道東や石狩低地帯等の地殻やマントル上部の電気伝導度構造が示され、その後の議論の礎となった(Nishida，1982，Mori，1987)。また、CAグループの共同観測が1983年に北海道東部で行われ、GDS観測やVLF、ELF-MT等が実施された（行武，1984）。

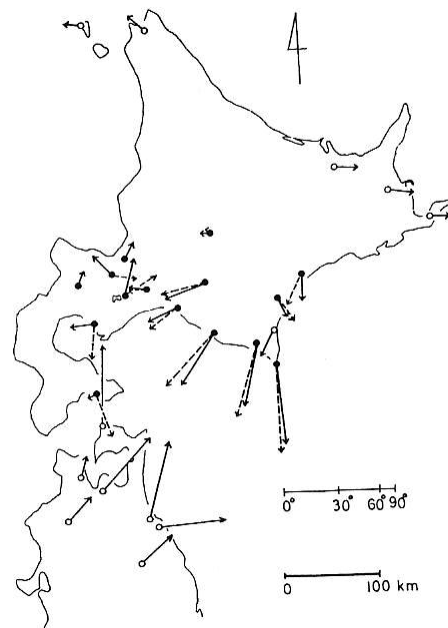


Fig.1. Parkinson Vectors in the Hokkaido area. Dashed and solid line correspond to period at 5 and 60 min. respectively. (Nishida, 1976).

### 3. MT 法による観測

1980年代には、高周波数までの電磁場変動の観測、解析が可能になり、また、ノイズの多い地電位差の観測も大きなダイナミックレンジを有する測定器により可能となって、高周波から低周波までカバーできる広帯域 MT 法が実用化された。それを用いた地殻～上部マントルに達する電気伝導度構造の観測が日本各地で行われ、北海道においても Fig.2 に示す地域で行われている。そこで得られた比抵抗構造（士別地域、留辺蘂～北見地域は、小川, 他(1992)にあり、日高北部地域は Ogawa et al. (1994) に示されている (Fig.3)。この一連の研究では、白亜紀末から中新世に北海道地域で起こったユーラシア大陸とオホーツク古陸との衝突により地下深部に封じ込められた古い海洋堆積物の分布や、中新世以降現在まで続いている東北日本弧と千島弧との衝突により日高地域で起こっている地殻の変形を明らかにした。この結果によると、日高変成岩は高比抵抗であり、それが地殻浅部まで上昇しているようすが見られる。また、空知・エゾ帯の地殻中にトラップされた過去の海洋堆積物が分布する可能性も示されている。その後、日高地域はその周辺地域も含めて比抵抗構造が示され、下部地殻が東から日高山脈中央部に向かって衝上しているようすが示され、衝突帯での地震発生地域と比抵抗構造との関係が議論された (茂木, 他, 2002)。さらに、最近、えりも岬～日高山脈南部地域の 3D 比抵抗構造が求められ、東北日本弧と千島弧との衝突に伴う千島弧地殻のデラミネーション (伊藤, 2000) により深部に向う下部地殻がプレートと接する付近では 1970 年および 2012 年に M6 クラスの地震が発生していて、その直上には柱状の低比抵抗構造

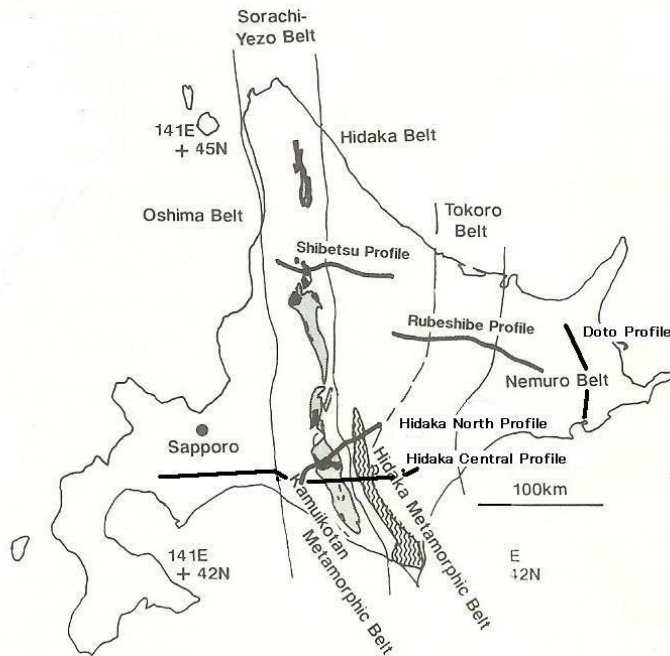


Fig.2 Geology and MT survey lines in Hokkaido. Modified from Ogawa et al.(1992)

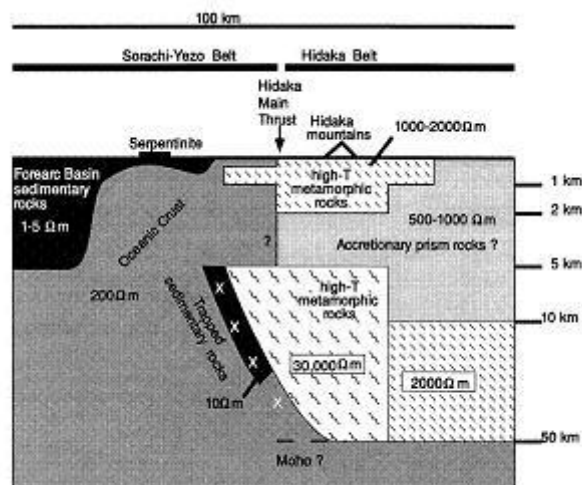


Fig.3 Resistivity structure in Hidaka North Profile profile. (Ogawa et al. 1994)

があることが示されている(Ichihara et al.2013a). 一方, 道東地域では, 太平洋プレート沈み込み方向の比抵抗構造が推定されており (Satoh et al, 2001, Fig.4), 千島弧の浅部は低比抵抗の堆積層が分布するが下部地殻は高比抵抗であり, その下に沈み込む太平洋プレートも高比抵抗である. それに対して火山フロントより北側の背弧側は, 下部地殻まで低比抵抗層が分布している. このようなMT法による深部探査では, 表層にある局所的な低比抵抗構造によるステティックシフトが起こる (Jones, 1988) ので, それを避けるためのひとつの方法として, 地電位観測を広い面的な測定で行うネットワークMT法が提案され, 道東地域で実施された (上嶋, 他, 1992, Uyeshima et al., 2001). この方法により長周期の変動を利用して地殻深部~マントルの構造を調べる場合, 周囲の海の影響や表層の高電気伝導度構造によるチャンネルング影響についても議論をする必要がある.

最近の内陸地震の活発化もあり, 北海道でも内陸地震の震源付近での比抵抗構造の研究が行われてきた. 2004年留萌支庁南部地震(Mj=6.0)は, 北海道では1967年の弟子屈地域での地震以来の内陸浅所に震源があるM>6の地震であった. Ichihara et al (2008)は, MT法および重力異常により震源付近の構造を調べ, そこでは背斜状の変形に伴う構造不均質が見られることを示した(Fig.5). また, 弟子屈・屈斜路地域では1926年以降, 38年, 59年, 67年にM>6の地震が発生している. この地域は北海道東部の火山フロントに位置しており, カルデラ等の火山活動に関連して不均質な比抵抗構造が分布していることが示された (Fig. 6, Ichihara et al.,2009a, 本多, 他, 2011, Ichihara et al, 2013b). 一方, 北海道中央部にある石狩低地帯は, 堆積物が厚く堆積し, その東縁には活断層帯が分布している. この地域は歪集中域と考えられ, 東縁活断層帯に関連する内陸大地震発生の可能性が指摘されている (産業技術総合研究所, 2007). この地域でMT法による比抵抗構造探査が行われ, 低地帯の堆積層下の基盤岩中には高比抵抗域と低比抵抗域が複雑に分布し, 東縁活断層帯の下部には低比抵抗層が見られるところもあることが指摘されている (山谷, 他, 2010, Yamaya et al

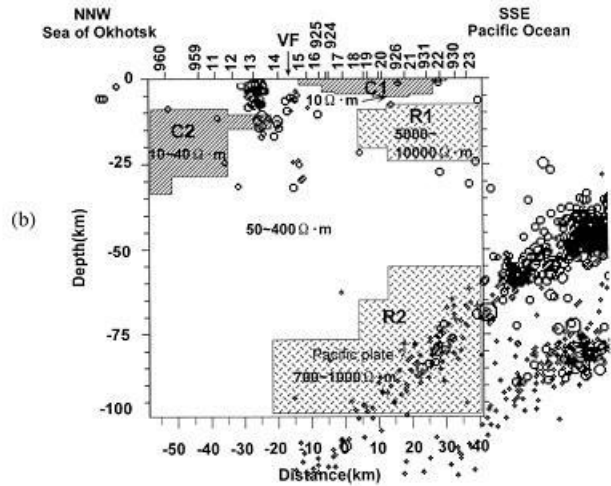


Fig.4 Resistivity structure in East Hokkaido Profile. (Satoh et al. 2001)

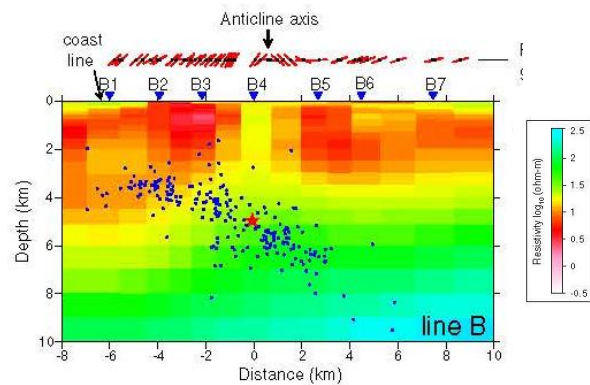


Fig.5 Resistivity structure in source region of the Rumoi EQ. (Ichihara et al, 2008)



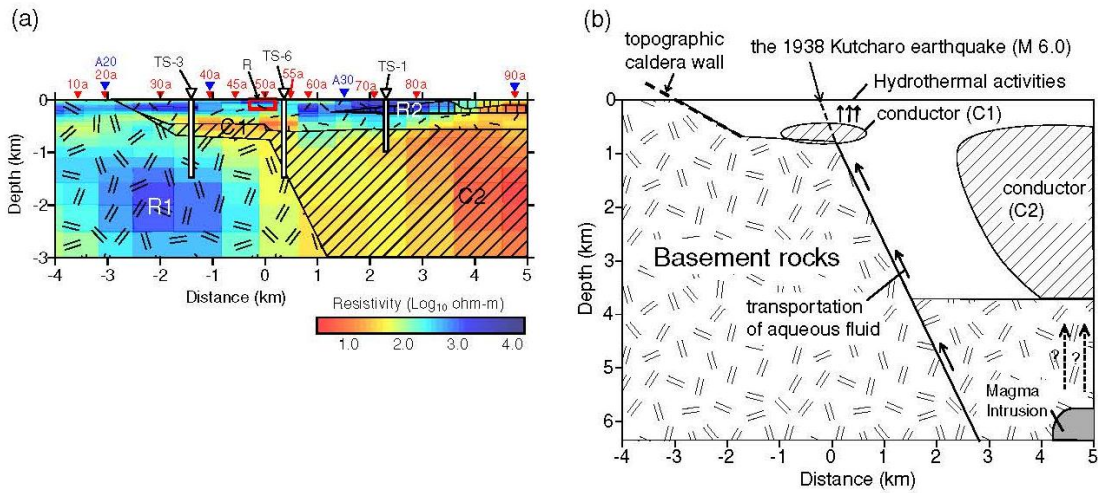


Fig. 6. (a) Comparison of the density and resistivity structure. The image created by the black mesh marks denotes the density model. (b) A simultaneous image of the Kutcharo caldera and the estimated fault of the 1938 Kutcharo earthquake ( $M 6.0$ ) along the same profile as shown in (a). (Ichihara et al. 2009a)

, 2012). 内陸大地震の震源は、高比抵抗域と低比抵抗域との境界付近にあり、また、その下部には、深部流体層と考えられる低比抵抗域が存在している例が多いことが指摘されている (飯尾, 2010). この観点から歪集中帯での比抵抗構造についてはさらに研究を進める必要がある。

#### 4. 火山での観測

ここで、簡単に道内火山の比抵抗構造に関する研究をレビューする。MT法による北海道内の火山体の構造探査は火山活動が活発な火山で行われている (有珠山: Ogawa et al., 1999, 高倉, 他, 2009, 橋本, 他, 2009, 駒ヶ岳: 山谷, 他, 2003, 2004, 樽前山: 山谷, 他, 2005, Yamaya et al, 2009, 十勝岳: 中田, 他, 1989, 山谷, 他, 2010). これらの探査により、有珠山では山頂直下には顕著な低比抵抗構造があり、1977年噴火を起こしたマグマ溜まりがある可能性が指摘されている。また、樽前山でも溶岩ドームの直下にも明瞭な低比抵抗構造が見られ、高温の火山ガスや熱水の上昇経路と考えられている。微小地震発生地域は、このような低比抵抗構造の近傍に分布し、地殻変動の圧力源はその上端付近に推定されることが指摘されている。

#### 5. 3Dワールド

比抵抗構造を3Dで求めることは究極の目標であろう。すでに、MT探査に対しては、3Dモデリングやインバージョンについて多く提案され (Miensopust et al, 2013), 実用域に達しているものもある (Siripunvaraporn, 2012). 3D構造を求めるためには、多くの測点で測点での観測が必要であるが、機材の大量投入により可能となり、この点は改善が見られるようになってきた。将来的には、特に浅部に関しては密な測点が必要なことから、空中電磁法により一定の間隔で隙間なくデータを取得できるようになることが望ましい。また、

3Dモデリングにより、周囲の海や低比抵抗堆積層に生じるカレントチャンネリングの影響の評価も可能となるし、位相が90度を超えるようなデータもモデリングの条件として考慮できるようになってきた(Ichihara and Mogi, 2009b) . 一方、従来から検討されてきた2D構造と3D構造の違いも議論されるようになり、モデリングに使うパラメータの選択やモデルのグリッドによる違いがあることも指摘されている (Tietze and Ritter, 2013) . 以上のように、3D構造に対しては、1D, 2Dでは見られなかったような電磁場の挙動が見られることがあり、これまでとは異なる電磁場3Dワールドがあるかもしれない。

## 6. まとめ

以上、本報告は、北海道地域で行われてきた比抵抗構造に関する主な研究をレビューし、今後の JEMINI 計画を考える際の基礎データになることを考慮してまとめてみたものである。北海道で行われたすべての研究を網羅することができたわけではなく、この他にも、地熱調査や地下資源調査により行われた比抵抗構造調査も少なくない。それらは、NEDOの報告書や石油技術、資源地質関係雑誌の掲載されているものもある。これまでの研究の多くは、地震発生地域や火山地域などで実施され、そういう特殊な地域の特徴は理解されてきた。しかし、それ以外の場所では、そのような特徴はみられず、“普通”の構造があるのか知りたいところである。将来 JEMINI 計画により日本列島の全体の構造が分かってくることにより、その特殊な地域の特徴もさらに理解が進むことを期待したい。

### (参考文献)

- 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, 有珠2000年新山域の比抵抗構造, 北大地物研報, 72, 79-105.
- 本多亮, 山谷裕介, 市原寛, 長谷英彰, 茂木透, 山下晴之, 上嶋誠, 中川光弘, 2011, 屈斜路カルデラ周辺におけるMT法による比抵抗探査, 北大地物研報, 74, 45-56,
- Ichihara H., R. Honda, T. Mogi, H. Hase, H. Kamiyama, Y. Yamaya, and Y. Ogawa, 2008, Resistivity structure around the focal area of the 2004 Rumoi-Nanbu earthquake ( $M$  6.1), northern Hokkaido, Japan, *Earth Planets and Space*, 60, 883-888.
- Ichihara H., T. Mogi, H. Hase, T. Watanabe and Y. Yamaya, 2009a, Resistivity and density modelling in the 1938 Kutcharo earthquake source area along a large caldera boundary. *Earth Planets and Space*. 61, 345-356.
- Ichihara, H. and T. Mogi, 2009b, A realistic 3-D resistivity model explaining anomalous large magnetotelluric phases: the L-shaped conductor model, *Geophysical J. Int.*, 179, 14-17.
- Ichihara, H, T. Mogi, K. Tanimoto, Y. Yamaya, T. Hashimoto, M. Uyeshima and Y. Ogawa, 2013a, 3-D electrical resistivity models in the Erimo area, southern central Hokkaido, 5th International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics, Sapporo, Japan, May 7-9.
- Ichihara, H., T. Mogi and Y. Yamaya, 2013b, Three-dimensional resistivity modelling of a seismogenic area in an oblique subduction zone in the western Kurile arc: constraints from anomalous magnetotelluric phases, *Tectonophysics*, 603, 114 – 122.
- 飯尾能久, 2010, 内陸地震の発生過程の解明, *自然災害科学*, 28, 284-298

- 伊藤谷生, 2000, 日高衝突帯-前縁褶曲・衝上断層帯の地殻構造, 石油技術協会誌, 65, 103-109.
- Jones, A., 1988, Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment., *Geophysics*, 53, 967-978.
- Mienseopust M.P., P. Queralt, A. G. Jones and the 3D MT modellers, 2013, Magnetotelluric 3-D inversion—a review of two successful, workshops on forward and inversion code testing and comparison. *Geophys. J. Int.*, 193, 1216-1238.
- 茂木透, 日高 2000MT 探査グループ, 2002 日高地域での広帯域 MT 探査. 月間地球, 277, 485-487.
- 森俊雄, 1968, 北海道における地磁気・地電位差の短周期変化について. 北大地物研報, 20, 37-49.
- Mori, T., 1975, Conductivity anomalies in the eastern part of Hokkaido, Japan., *Mem. Kakioka Obs.*, 16, 79-93.
- Mori, T., 1987, Variations in the geoelectric field with relation to crustal conditions of the Earth., *Geophys. Magazine*, 42, 41-104.
- 中田春弥, 三浦康夫, 高杉真司, 夏見芳雄, 秤信雄, 野田徹郎, 山田泰生, 1989, MT 法と AMT 法による十勝地域の比抵抗構造と AMT 法の効果, 物理探査学会第 80 回学術講演論文集, 185-190
- 西田泰典, 1976, 北海道における地磁気変化異常. シンポジウム「北海道およびその周辺の地下構造とその地学的意味」論文集, 52-61.
- Nishida, Y., 1976, Conductivity anomalies in the southern-half of Hokkaido, Japan., *Jour. Geomag. Geoelect.*, 28, 375-394.
- 西田泰典, 1977, 北海道石狩低地帯周辺の地下電気伝導度異常. 北大地物研報, 36, 17-28.
- 西田泰典, 1977, 北海道を南北に横切る測線上での地磁気地電位差変化観測. 北大地球物研報, 36, 29-40.
- Nishida, Y., 1982, Conductivity structure in and around Hokkaido, Japan as revealed by the period dependence of CA transfer functions., *Jour. Geomag. Geoelect.*, 34, 453-465.
- 小川康雄, 西田泰典, 上嶋誠, 光畑祐司, 牧野雅彦, 仲山洋, 1992, 広帯域 MT 法から見た北海道の深部構造, 月刊地球, 14, 545-558.
- Ogawa Y., Y. Nishida and M. Makino, 1994, A collision boundary imaged by magnetotellurics, Hidaka Mountains central Hokkaido, Japan, *J. Geophys. Res.*, 99, 22373-22388.
- Ogawa, Y., N. Matsushima, H. Ohshima, S. Takakura, M. Utsugi, K. Hirano, M. Igarashi and T. Doi, 1999, A resistivity cross-section of Usu volcano, Hokkaido, Japan, by audiomagnetotellurics soundings., *Earth Planets and Space*, 50, 339-346.
- 産業技術総合研究所, 2007, 石狩低地東縁断層帯の活動性および活動履歴調査, 「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書 No.H18-8, 35pp.
- 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 MT and network MT data. *Earth Planets & Space*, 53, 829-842.

- Siripunvaraporn, W., 2012, Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion : An Introductory Guide for Developers and Users, *Surv Geophys*, 33, 5–27.
- 高倉伸一, 橋本武志, 小川康雄, 井上寛之, 山谷祐介, 市原寛, 茂木透, 宇津木充, 松島喜雄, 佐藤秀幸, 2009, 有珠火山東麓におけるMT法電磁気探査, *北大地物研報*, 72, 107–116.
- Tietze, K. and Oliver Ritter, 2013, Three-dimensional magnetotelluric inversion in practice—the electrical conductivity structure of the San Andreas Fault in Central California *Geophys. J. Int.*, 195, 130–147
- 上嶋誠, 仲山洋, 西田泰典, 歌田久司, 1992, ネットワーク MT 法による地下電気伝導度構造探査, *月刊地球*, 14, 551–558.
- Uyeshima, M., H. Utada and Y. Nishida, 2001, Network-MT method and its first results in central and eastern Hokkaido, NE Japan. *Geophys. J. Int.*, 146, 1–19.
- 山下済, 横山泉, 1975, 北海道南西部における地磁気短周期変化 (その1), *北大地物研報*, 34, 15–44.
- Yamashita H. and I. Yokoyama, 1976, Interpretation of “Northeastern Japan Anomaly” in electrical conductivity of the upper mantle. *J. Geomag. Geoelectr.*, 28, 329–332, 1976
- 山下済, 横山泉, 1977, 北海道南西部における地磁気短周期変化 (その2), *北大地物研報*, 36, 41–58.
- 山谷祐介, 谷元健剛, 西田泰典, 茂木透, 宮原昌一, 吉田邦一, 佐波瑞恵, N. P. Singh, 高橋幸祐, 新屋雅之, 菊池晃太郎, 大前幹夫, 渡辺友浩, 2003, 北海道駒ヶ岳におけるMT探査, *CA研究会2003年論文集*, 32–39
- 山谷祐介, 谷元健剛, 西田泰典, 佐波瑞恵, 宮原昌一, 吉田邦一, 茂木透, 橋本武志, 2004, 広帯域 MT 探査による北海道駒ヶ岳の比抵抗構造—1次元構造解析結果と海の影響の評価—. *北大地物研報*, 67, 39–52.
- 山谷祐介, 橋本武志, 茂木透, 鈴木敦生, 西田泰典, 谷元健剛, 森 済, 寺田暁彦, 三品正明, 長谷英彰, 2005, 樽前山における広帯域 MT 法探査—2次元比抵抗解析—, *北大地物研報*, 68, 127–140.
- 山谷祐介, 茂木 透, 長谷英彰, 山下晴之, 鈴木敦生, 橋本武志, 2009, 石狩低地東縁断層帯周辺の比抵抗構造探査, *2009年CA研究会論文集*, 28–30, 2009
- Yamaya, Y., T. Mogi, T. Hashimoto and H. Ichihara, 2009, Hydrothermal system beneath the crater of Tarumai volcano, Japan: 3-D resistivity structure revealed using audio-magnetotellurics and induction vector, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 193–202.
- 山谷祐介・橋本武志・茂木 透・村上 亮・岡崎紀俊・吉本充宏・伏谷祐二・橋本政樹・山本輝明・西村三治・有田 真・的場敦史・土屋遼平, 十勝岳62-II火口周辺の3次元比抵抗構造, *北大地物研報*, **73**, 273–286, 2010.
- Yamaya, Y., T. Mogi, R. Honda, H. Hase, A. Suzuki, T. Hashimoto and M. Uyeshima, 2012, 3-D Resistivity Imaging Beneath The Ishikari-Teichi-Toen Fault Zone, HOKKAIDO, NE JAPAN, *21st EM Induction Workshop*, Darwin, Australia, July 25–31.
- 行武毅, 1994, 北海道東部地域における電磁気総合観測, *CA研究会論文集*, 1984年, 45–48.