

石狩低地東縁断層帯周辺の比抵抗構造探査

Resistivity structure around the Ishikari-teichi-toen fault zone, Hokkaido, Japan

山谷祐介・茂木 透・長谷英彰・山下晴之・鈴木敦生・橋本武志

(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)

Yusuke Yamaya, Toru Mogi, Hideaki Hase, Haruyuki Yamashita, Atsuo Suzuki and Takeshi Hashimoto

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

Abstract

The Ishikari-teichi-toen active fault zone is located on the eastern edge of Ishikari lowland. This region corresponds to the geological and tectonic boundary between the central and southwestern Hokkaido. The fluids and heterogeneous structure in the lower crust can take part in occurrence of inland earthquakes in such tectonic boundary region. In order to image a resistivity structure including the lower crust, a magnetotelluric survey was carried out in this region. Observed induction vectors and phase tensors at a lower frequency band suggested the effect due to the sea and conductive sediments beneath the lowland. They also implied two-dimensional structure striking to the direction of NNW-SSE in this region. The obtained MT data was inverted to two resistivity sections in a direction perpendicular to the supposed strike. These sections resembled each other and their features were consistent with the geological structure. For details, however, these sections were inconsistent and this fact suggested the presence of three-dimensional inhomogeneous structures. The positional relation of the resistivity structure and hypocenters can relate to fluid flows in the crust. For further discussion, it will be required to analyze the lower frequency data, and to estimate the effect of the three dimensional structure.

1. はじめに

石狩低地東縁断層帯は、北海道の石狩平野および勇払平野などからなる、いわゆる石狩低地帯の東側と馬追丘陵などの丘陵地域との境界に位置する活断層帯である (Fig. 1)。本地域は、日高衝突帯から西進する褶曲・衝上断層帯の前縁部にあたり (伊藤, 2000), 東西圧縮の場となっている (橋本・多田, 1988; 石川・橋本 1999)。地殻水平歪分布は本地域を境に大きく異なり, 石狩低地帯が, 北海道中央部と南西部の地質学的な物質境界であるとともに, 力学的境界となっていることが指摘されている (橋本・多田, 1988)。近年, 内陸地震の発生メカニズムにおいて, 地殻内流体の関与と, 歪集中を生む地殻の不均質性が注目されている。本地域のような, テクトニックな境界の地殻中深部に流体が存在するか, また, 地殻の3次元的不均質が存在するかを明らかにすることは, 地震発生との関連を議論するために重要な意義がある。本断層帯地域の地殻内流体の分布および地殻中深部の構造を明らかにするため, MT法による比抵抗構造探査を計画した。将来的には, 3次元比抵抗モデルの構築を目指している。

本地域は石狩低地帯下の主に新第三系からなる厚い低比抵抗層への電流集中（地峡効果）が指摘されている地域でもある（西田，1977）．このような地域でのMTデータの扱いについても，地球電磁気学的見地から興味深く，多くの観測点を配置することによって電流の集中を空間的に把握できることが期待される．3次元モデリングを行うことによって，そのMTデータへの影響を検討することができるので，より正確な比抵抗構造の推定に寄与することができると考えられる．

なお，これまでの研究（西田，1977；茂木・他，2002；Yamaya，2008）から，浅部の低比抵抗層が厚く，MT法の探査深度が限定されてしまうことが予想された．このため，一般に広く行われている広帯域MT法（解析周波数 10^2 - 10^3 Hz）に加え，長周期観測（同 10^4 Hz）も行ったが，ここでは広帯域MT法のみについて報告する．

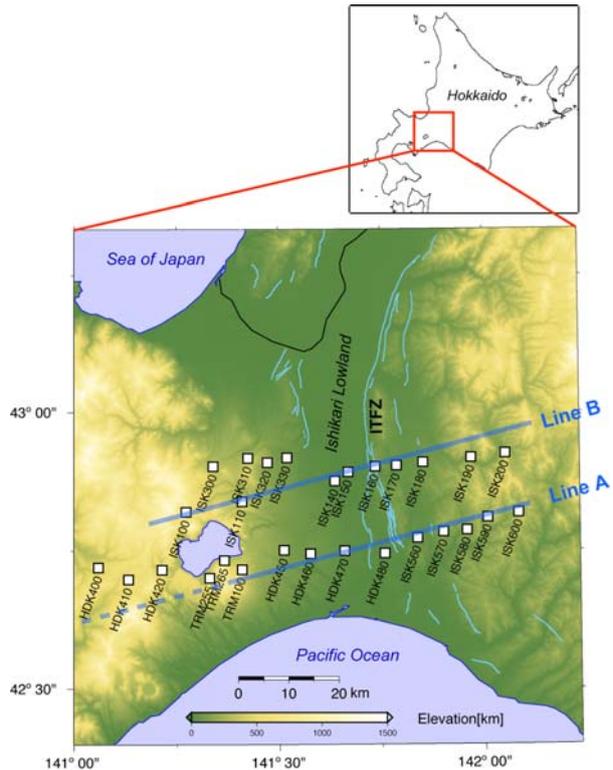


Fig. 1: Location of the Ishikari-teichi-toen fault zone (ITFZ) and distribution of the wideband MT sites.

2. 観測およびデータ処理

断層帯にほぼ直交する二本の測線（Line A および Line B; Fig. 1）において，広帯域MT観測を2008年6月～8月に行った．南側のLine Aについては，日高衝突帯の地下構造の解明を目的とした広帯域MT探査（茂木・他，2002）の測線を利用し，東側の5観測点のみ新設した．測定器は，Phoenix Geophysics社製MTU-5およびMTU-5Aを使用し，Pb-PbCl₂電極，インダクションコイルMTC-30を用いて電場2成分，磁場3成分の測定を行った．測線中央部は恵庭市-千歳市-苫小牧市の市街地を横切っているため，この付近では，人工ノイズの影響で十分なクオリティのデータが得られなかった観測点もあったが，その他の観測点では良好なデータが得られた．時系列データは，国土地理院江刺観測場のMT連続観測データとのリモートリファレンス処理（Gamble et al., 1979）を行い，さらに手動によるエディット処理を経てMTインピーダンスを算出した．

Fig. 2に見かけ比抵抗および位相の疑似断面を示す．見かけ比抵抗は，100 Hz以上で10 Ωm以下の低比抵抗であり，厚く堆積した新第三紀層に対応すると考えられる．Line A西側の観測点（TRM255, HDK420）では，XY成分（電場が南北方向）の低周波数帯の位相が70-90°に達する．このような「異常な位相」は，通常2次元構造では説明できず，特定の条件を持った3次元構造を反映していると考えられる．この付近で異常な位相を引き起こす3次元的構造としては，支笏カルデラ，樽前火山に関連した構造が考えられる．本報では二つの測線に沿った2次元構造を求めるため，Line AについてはTRM255以西のデータを使わずに解析を行うこととする．

Fig. 3 に代表的な周期におけるインダクションベクトル (IV) およびフェイズテンソル (PT; Caldwell et al., 2004) を示す. 日高地域で行われた広帯域MT観測のデータも一部含めて表示した. 100-0.1 Hz のIVは比較的小さく, 方向の系統性も認められない. また, PTが真円に近く, skew angleも小さいことから, 表層の構造が比較的均質であると考えられる. 一方で, 0.01-0.001 Hz のIVは大きく, 測線中央部を向き, PTはNNW-SSE方向に主軸を持つ楕円となる. 一般に, IVは比抵抗境界の低比抵抗側を向き, PTの主軸は電流の流れる向きに対応するので, IV, PTの分布から, NNW-SSE方向に延長する低比抵抗体が低地帯に相当する位置に存在していると考えられる. また, IVは0.01 Hzで太平洋側, 0.001 Hzで日本海側を向く傾向も見られ, 海水の低比抵抗の影響を受けていることも示唆している.

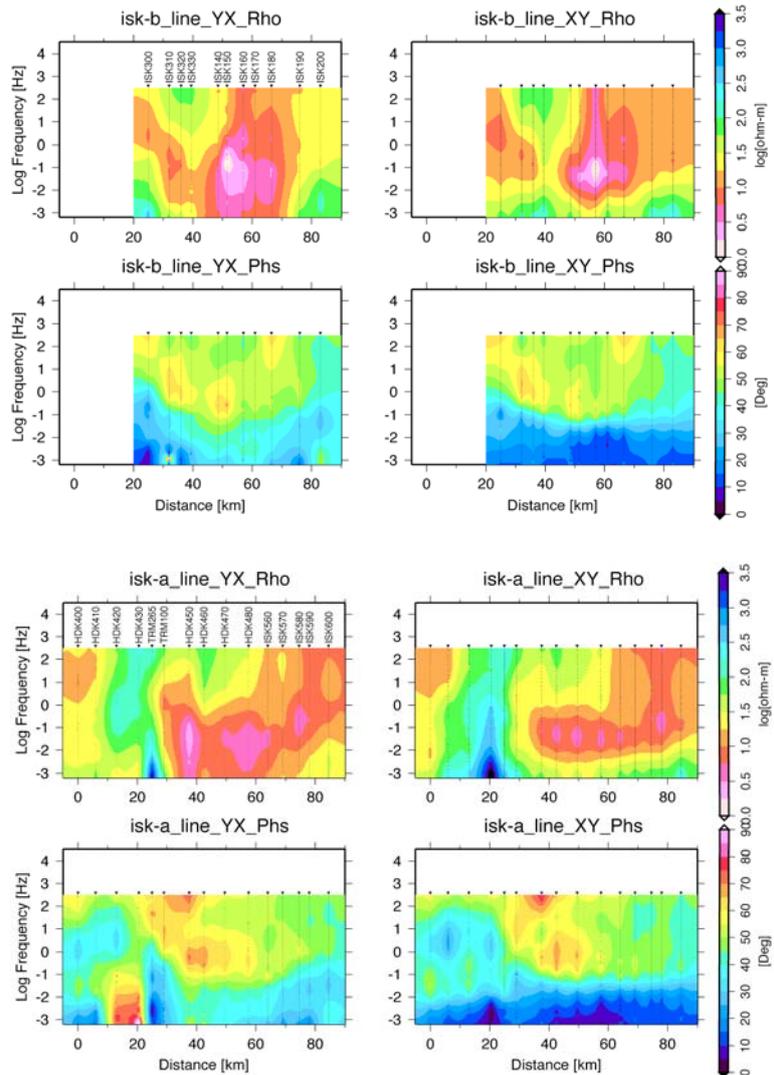


Fig. 2: Pseudosections of MT responses along LineB (Upper) and Line A (lower). “Rho” and “Phs” show apparent resistivity and impedance phase, respectively.

3. 2次元構造解析

観測を行った二本の測線について比抵抗断面を求めるため, 二次元構造を仮定した解析を行った. まず, MTインピーダンスから計算されるPTから二次元構造の走向を推定した. Fig. 4にPTの主軸を周期帯ごとに集計したローズ・ダイアグラムを示す. 頻度分布は, 高周波数側の100~1 HzではN40°Wに集中し, 低周波数の0.01~0.001 HzではN15°Wに集中する傾向が見られる. その中間の周波数帯である0.1~0.01 Hzでは, 一定の方向が見られない. この傾向から, 浅部と深部で電磁気的な走向が異なる可能性が考えられる. しかし, PT楕円 (Fig. 3) に注目すると, 0.1 Hz以上では長軸と短軸の差が小さく, 真円に近い一方で, 0.01 Hz以下ではほとんどの観測点で長軸と短軸の差が大きく, N15°W方向に向いている. また, skew angleは低周波数になるにつれて, 大きくなっている. このことから, 走向の違いというよりも, 浅部は1次元構造に近く, 深部ではより2次元的な構造になっていることが考えられる.

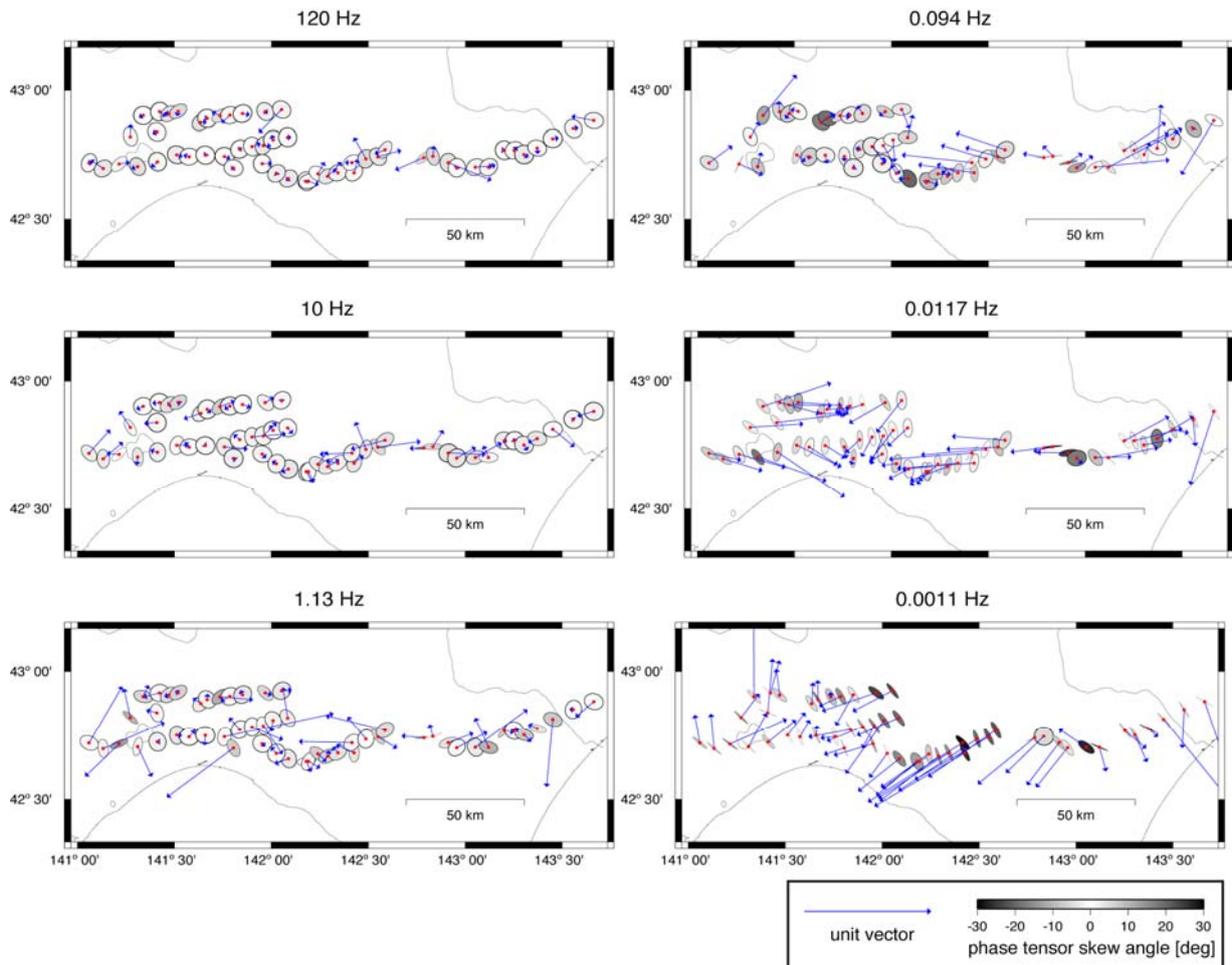


Fig. 3: Induction vectors (arrow) and phase tensors (ellipse) at each frequency. Shade in ellipse indicates skew angle of the phase tensor.

低周波数帯の PT から推定される $N15^{\circ}W$ という方向は、断層帯（南部）の走向とほぼ同じであり、また重力異常分布（山本, 2003）から推察される構造の走向とも矛盾しない。したがって、走向を $N15^{\circ}W$ と仮定し、MT インピーダンスの主軸をその方向に回転した時の見かけ比抵抗と位相を構造解析に使用した。ここで、回転したインピーダンステンソルの非対角成分のうち、磁場が走向と一致する成分を TM モード、また電場が走向と一致する成分を TE モードとする。

構造解析には Ogawa and Uchida (1996)による 2次元インバージョンコードを使用した。このインバージョンでは、極浅部の不均質構造によるスタティックシフトをモデルパラメータとして解析できる。初期モデルを $100 \Omega m$ の均質大地とし、TM モードと

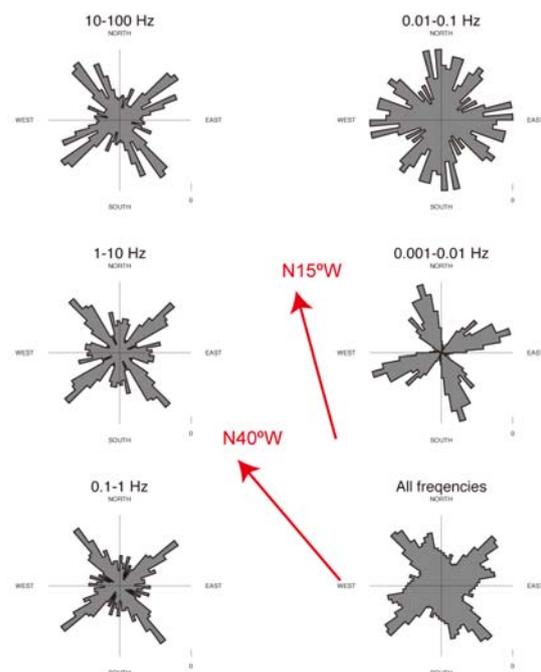


Fig. 4: Rose diagrams counting the principle angle of the phase tensor for each frequency band.

TE モードの見かけ比抵抗, 位相を入力としてインバージョンを行った.

Fig. 5に, 見かけ比抵抗および位相の観測値と計算値との比較を疑似断面によって示す. 観測値のデータの特徴はモデルでよく説明されているが, Line A の TM モードは低周波数帯でフィットが良くないように見える. これは, 観測値のエラーが大きく, モデルの自由度が大きいためと考えられる.

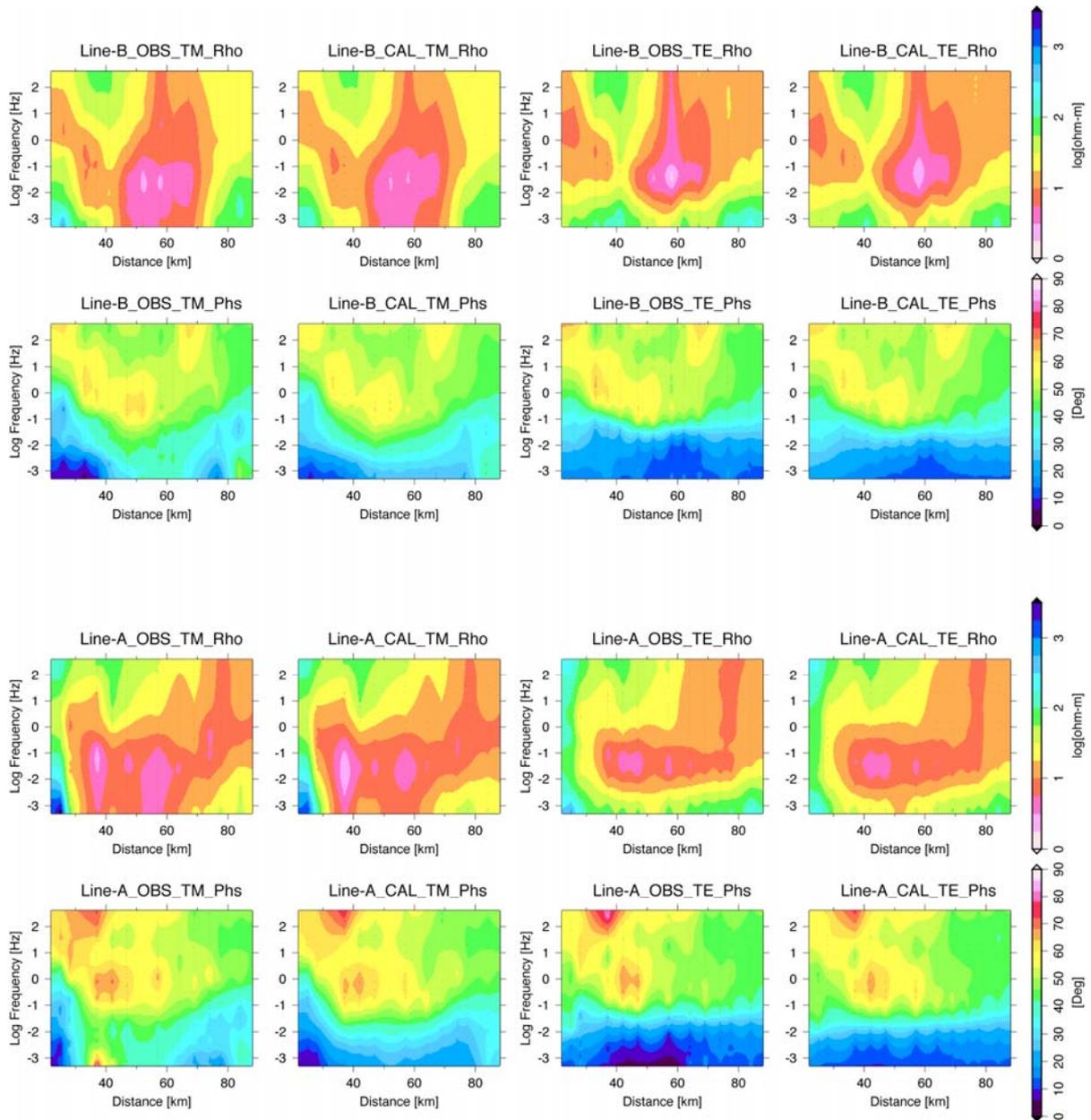


Fig. 5: Pseudosections of MT responses along LineB (Upper) and Line A (lower) to compare between observed (OBS) and calculated (CAL) MT responses. “Rho” and “Phs” show apparent resistivity and impedance phase, respectively.

4. 比抵抗構造の特徴と今後の課題

インバージョンによって得られた両測線の比抵抗断面を Fig. 6 に示す. 二つの測線の比抵抗モデルは大局的には同様の特徴を示している. 表層 1 km 深程度までは, 数百 Ωm の高比抵抗層, 2-6 km は数

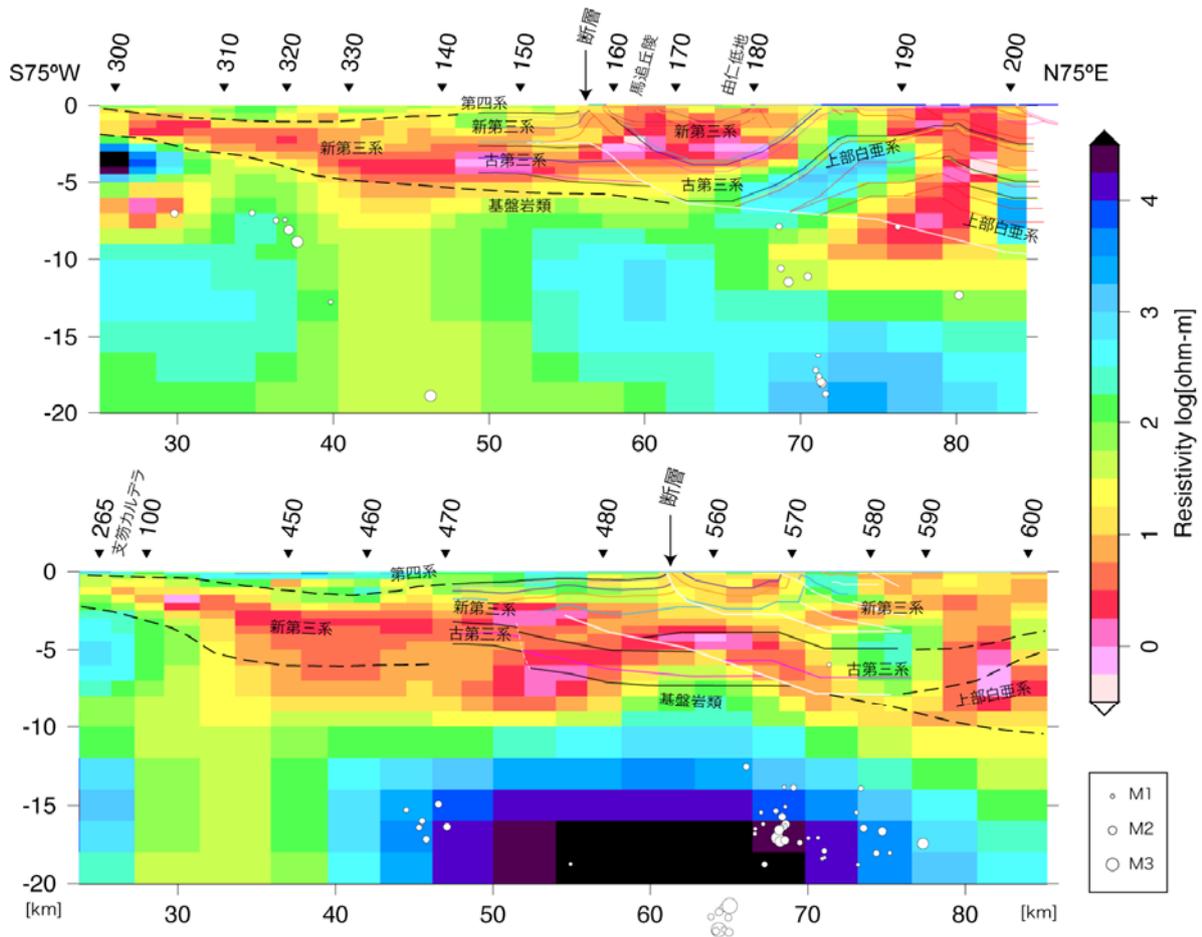


Fig. 6: Resistivity sections along Line B (upper) and Line A (lower) supposed by 2-D inversion.

一数十 Ωm の低比抵抗層，それ以深は数百 Ωm 以上の高比抵抗層に大別される．これらの境界の深さは，周辺で行われた反射法探査（産業技術総合研究所，2007）や孔井地質との対応が良く，上部から第四系，新第三系―上部白亜系，基盤岩類に相当する．低比抵抗層は低地帯中央部で特に深く，Line B より Line A でより深くまで達している．つまり，南部で新第三系がより厚く堆積していることを示している．この新第三系を主とする低比抵抗層が南北に延長し，低比抵抗である海水と接触することによって，地峡効果と呼ばれる電流の集中を引き起こしていると考えられる．また，高比抵抗の基盤岩類は断層帯以東で東落ちとなっており，これらの特徴は，藤原・他（2005）や吉田・他（2007）が作成した地盤構造モデルの基盤岩類上面の深さ分布とも一致している．

15 km 以浅の構造は，石狩低地東縁断層帯や付近の衝上断層帯の地下で不連続になっており，衝上運動による構造境界が深部に延長している様子がわかる．こうした断層帯付近の構造は Line A と Line B で異なっており，例えば Line B において ISK180 から ISK190 に盛り上がる高比抵抗構造が見られるが，Line A には同様の構造は見られない．また，Line B で馬追丘陵から由仁低地にかけて表層～5 km 深程度までが $10 \Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗になっているのに対して，Line A ではそれに対応する低比抵抗体は無く，より深部に低比抵抗な部分が見られる．このように二つの断面が類似していながら，所々一致しない場所があるのは，この地域が大局的には2次元的な構造をしているが，断層帯付近には3次元的な不均質構造が存在することを示唆している．3次元性の傾向は $1\sim 0.1 \text{ Hz}$ の IV が断層帯付近で大きくなり，Line A の南側を向くこと，また PT の skew angle が大きくなることから窺える．3次元的な

不均質構造の存在は、歪集中の形成に重要な役割を果たしている可能性があるため、今後、3次元解析を指向した面的な観測点分布を展開し、3次元比抵抗構造を推定することが求められる。

比抵抗モデルに重ねて示した震源分布 (Fig. 6) に注目すると、地震は Line A の高比抵抗構造の両端に起こり、低地帯中央部の深部に延びる低比抵抗構造内では起こっていない。内陸地震地域の地殻中深部では、高比抵抗-低比抵抗境界の高比抵抗側に震源が分布する例がしばしば見られる。このような関係は、低比抵抗部が流体の存在を示し、流体が高比抵抗側の比較的「硬い」部分に移動して地震を誘発していると解釈されることがあるが、Line A の構造は本地域においても同様の現象が起きていることを示唆している。ただし、浅部が低比抵抗であることにより、深部の解像度が乏しい可能性や、仮定した走向の延長部にある海の低比抵抗の影響を受けている可能性がある。また、捉えられている震源の数も多くなく、構造と震源の関係を述べるのは早計かもしれない。現在、北海道大学地震火山研究観測センターで展開されている精密地震観測によって、将来的にこの地域の微小地震の震源が明らかにされていくだろう。比抵抗構造探査の面からは、さらに長周期帯のデータを使い、深部の解像度を上げること、周辺の構造が与える影響を評価することが必要である。

参考文献

- Caldwell, T., H. M. Bibby and C. Brown, The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, **158**, 457-469, 2004.
- 藤原広行・河合伸一・青井真・刃刀卓・石井透・早川譲・森川信之・小林京子・大井昌弘・先名重樹・奥村直子, 石狩低地東縁断層帯の地震を想定した地震動予測地図作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, **283**, 197pp, 2005.
- Gamble, T. D., W. M., Goubau and J. Clarke, Magnetotellurics with a remote magnetic reference, *Geophysics*, **44**, 53-68, 1979.
- 橋本学・多田堯, 北海道地方の水平変動とテクトニクス, *地震*, **41**, 29-38, 1988.
- 石川典彦・橋本学, 測地測量により求めた日本の地震間の平均的な地殻水平ひずみ速度 (II), *地震*, **52**, 299-315, 1999.
- 伊藤谷生, 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, 2000.
- 茂木透・日高 2000MT 探査グループ, 日高地域での広帯域 MT 探査, *月刊地球*, **24**, 485-487, 2002.
- 西田泰典, 北海道石狩低地帯周辺の地下電気伝導度異常, *北海道大学地球物理研究報告*, **36**, 17-28, 1977.
- Ogawa, Y. and T. Uchida, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, **126**, 69-76, 1996.
- 産業技術総合研究所, 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., 2007.
- 山本明彦, 石狩平野とその周辺の重力異常アトラス, *北海道大学地球物理研究報告*, **66**, 33-62, 2003.
- Yamaya, Y., Three dimensional resistivity structure of Tarumai Volcano by the magnetotelluric method including the effect of regional structure, Ph. D. thesis, Hokkaido University, 110pp., 2008.
- 吉田邦一・吉見雅行・鈴木晴彦・森野道夫・滝沢文教・関口春子・堀川晴央, 長周期地震動計算のための石狩平野および勇払平野の3次元堆積盆地構造モデル, *活断層・古地震研究報告*, **7**, 1-29, 2007.