

500kV 電力線中性点電流の測定による地下比抵抗構造変化のモニタの試み

原田 誠（東海大学）・井筒 潤（中部大学）・植竹富一・寺山武志（東京電力）
富永紘次・長尾年恭（東海大学）

Monitoring of the underground electrical resistivity changes by using the 500 kV electric power line

Makoto Harada (Tokai University), Jun Izutsu (Chubu University),
Tomiichi Uetake, Takeshi Terayama (Tokyo Electric Power Co.),
Koji Tominaga, and Toshiyasu Nagao (Tokai University)

Abstract

The observed neutral point current data at an electrical substation generally contain the induced current of external source geomagnetic variations. In this paper, we attempt to develop the observation method to monitor the changes of underground electrical resistivity structure from the neutral point current data. The most awkward problem is that the observed neutral current data at a substation is considered as the sum of the electric currents from the neighboring two substations. Therefore, we formulate a new analyzing process to obtain the electromagnetic response functions which are calculated from the neutral point current and horizontal magnetic field. These response functions are expected to contain information of the one-dimensional resistivity structure under three substations. Furthermore, we expand this approach to calculate of the apparent resistivity and phase components, which are frequently utilized in the conventional magnetotelluric (MT) method. We introduce a frequency-independent factor parameter. To obtain the factor parameter, temporary MT observation is required near the substations. The proposed method was applied to the neutral point current data acquired at substations in the western part of Kanto District in central Japan. The results indicate that this approach seem to promise to monitor the variations of underground resistivity structure associated with crustal activities.

1. はじめに

長距離送電線の両端の変電所では超高圧変圧器の中性点において電力系統の保護及び人身保安のために直接大地へ接地されている。この変電所の接地点を地電流観測手法における接地電極として変電所間の送電線を電極間をつなぐケーブルとして利用することで、地電流観測を行える可能性がある。両変電所間に電位差がある場合、地電流が地中だけでなく中性接地点を通して電力設備に流れる。このとき中性接地線にクランプ型電流計を設置し、中性点を流れる電流を測定することで地電流が観測される。

中性点電流の変動の主要因は地磁気変動であるため、以前より、地磁気高緯度地方では GIC (Geomagnetic Induced Current) 観測を目的として測定されてきた (Albertson *et al.*, 1974; Pirjola, 1985; Lundby *et al.*, 1985)。地磁気高緯度地方では、大規模な磁気嵐によって地中に誘導された電流に

より電気設備が破壊されることがたびたび発生しており、変電所の保護を目的とした観測が行われている (Allen *et al.*, 1989).

中性点電流の変化の主要因は地磁気変動 (地磁気嵐や地磁気脈動) であることから、それらの間に成り立つ応答関数を求めることにより、地下の比抵抗構造を推定することが可能になることが期待される。地磁気変動を信号源として大地の比抵抗構造を推定する方法として Magnetotelluric (MT) 法があるが、この方法では、地上において磁場および地電流 (実際には 2 地点間の電位差) を測定して、それらの間に成り立つ応答関数を推定する。

中性点電流データに MT 法の解析方法を適用するためには注意を要

する。中性点電流は、ある変電所とその前後 2 変電所間に流れる地電流の和であると考えられており、変電所の配置によって複雑な誘導電流系を考慮する必要があるため、それぞれどの割合で含まれるのか明らかにするのは困難である。また、測定されているのは「電流値」であり、MT 法における「電位差」ではない。

そこで、本研究では、中性点電流の変化の要因として素性の分かっている地磁気嵐の期間を利用して、各変電所を流れる地磁気誘導電流成分と中性点電流の関係を明らかにし、さらに中性点電流と地磁気変動の間に成り立つ応答関数を求め、MT 法による観測から求められた応答関数を比較することにより、中性点電流を利用した地下構造変化のモニタ法としての応用について検討する。

2. 観測方法および観測データ例

第 1 図に東京電力 (株) の 500kV 送電線および変電所の分布を示す。中性点電流の測定は、複数ある変圧器のうち 1 台を選び、既設の中性接地線にクランプ式電流計 (日置クランプオンハイテスタ 3109-01) を取り付け、電流の変動値を 2Hz サンプリングで収録する。データロガーは白山工業製 LS-7000 を使用しており、メモリーカードにデータを記録している。このシステムでは、GPS により 1 時間ごとに収録装置の時計を校正している (Izutsu *et al.*, 2006)。

第 2 図に本観測で取得した中性点電流、厚木観測点の地電位差、および柿岡 (気象庁地磁気観測所) の磁場 3 成分を示す。基本的に、中性点電流は地磁気変動による誘導電流を記録しており、地磁気と同様に日変化や地磁気嵐急始による中性点電流の急変が記録されている。また、すべての観測点で日中は人工ノイズの影響を受けており、夜間はノイズレベルが低い。とりわけ東山梨変電所は JR 中央本線から近いので、電車からの漏洩電流の影響を大きく受けている。

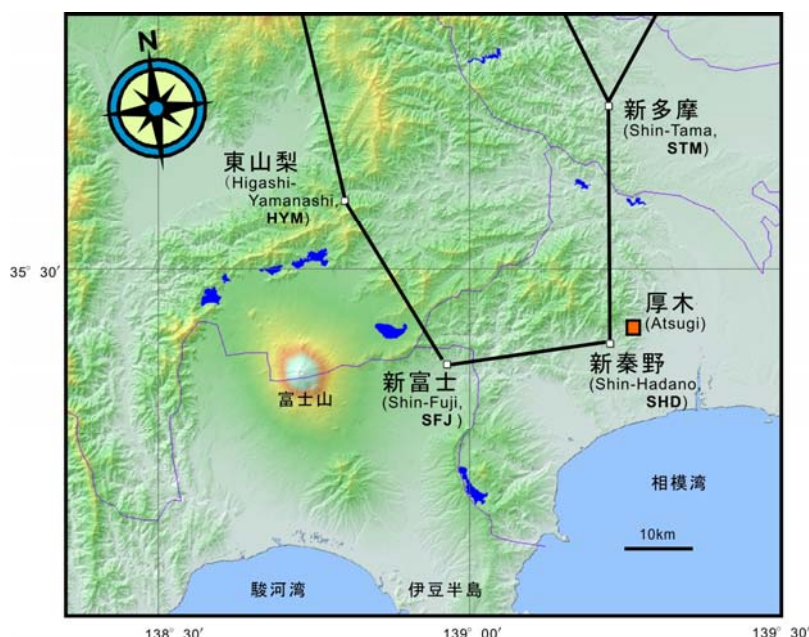


Fig.1 Configuration of 500kV electric power lines and substations of Tokyo Electric Power Company. The measurement systems of neutral current have been installed at Higashi-Yamanashi (HYM), Shin-Fuji (SFJ), and Shin-Hadano (SHD) stations. Atsugi station is the observation point of MT measurement.

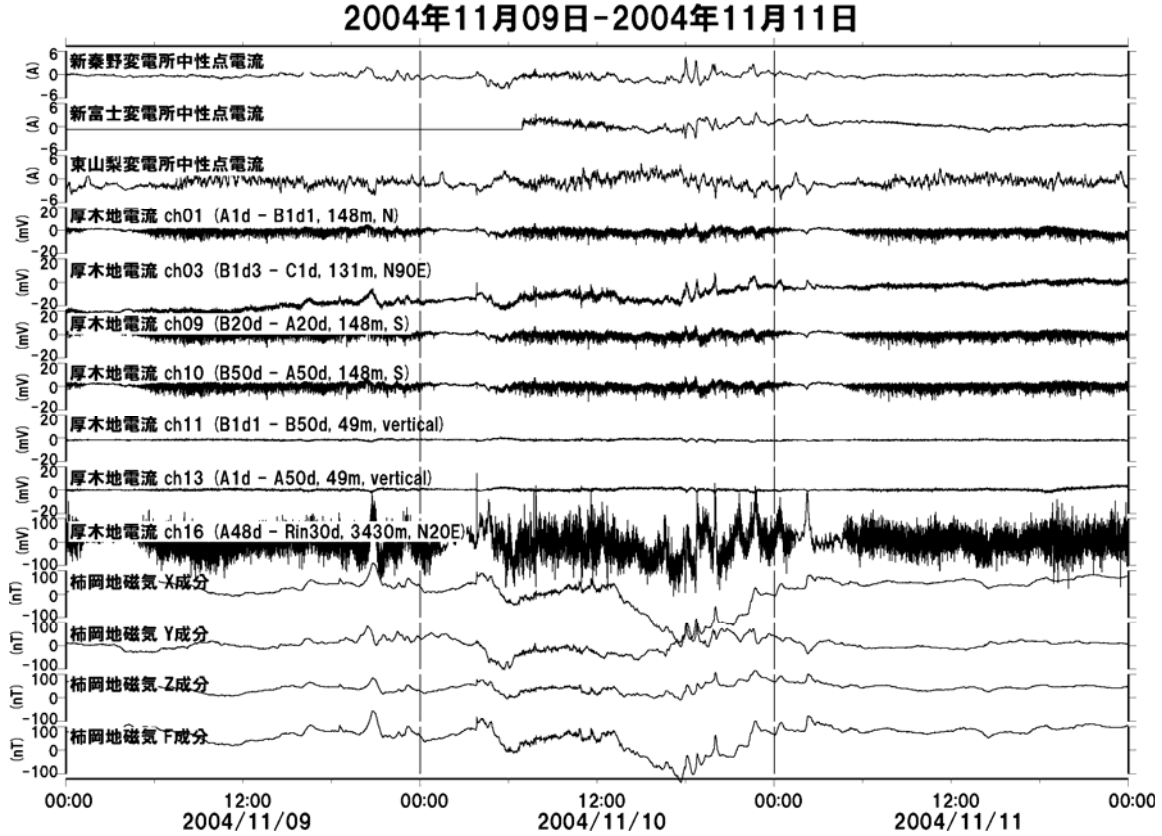


Fig.2 The neutral point current data during the period of 09-11 November, 2004. A severe magnetic storm occurred in this period. The electric field data at Atsugi and the magnetic field data at Kakioka Magnetic Observatory (JMA) are also illustrated.

3. データ処理

3.1 地磁気データの座標回転

第3図に示すように、ある変電所 (ST0) で測定される中性点電流は、その前後の2変電所 (ST1, ST2) との間に流れる電流の和であると考える。

$$I_{ST0}(\omega) = I_{ST1_ST0}(\omega) + I_{ST0_ST2}(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $I_{ST0}(\omega)$ は ST0 における中性点電流 (単位は A), $I_{ST1_ST0}(\omega)$ および $I_{ST0_ST2}(\omega)$ は ST1-ST0 間, ST0-ST2 間に流れる電流とする。いずれも周波数に依存する。ここで、既知量は $I_{ST0}(\omega)$ のみであり、 $I_{ST1_ST0}(\omega)$ および $I_{ST0_ST2}(\omega)$ は観測値から直接求めることはできない。

2組の変電所間 (ST1-ST0, ST0-ST2) に

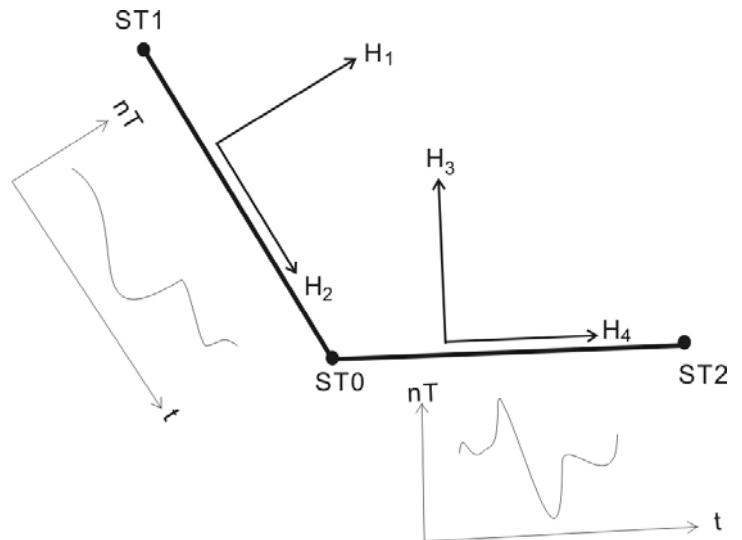


Fig.3 Schematic of the rotation of magnetic field components to the direction of two sets of substations. H_1 and H_3 , and H_2 and H_4 are perpendicular and parallel to each baseline, respectively.

誘導される電流と地磁気変動の関連を調べるためには、第3図に示す通り、磁場変動の座標を各2変電所間の方位に回転させる必要がある。通常、地磁気座標系 (H_x, H_y) に対し、2つの変電所 (ST1 および ST2) 間の方位に回転させた座標系を (H_1, H_2) とする。回転角 θ は、基線に直交する座標軸までの時計回りの回転角とする。

$$H_1(\omega) = H_x(\omega) \cos \theta + H_y(\omega) \sin \theta \quad (2)$$

$$H_2(\omega) = H_y(\omega) \cos \theta - H_x(\omega) \sin \theta \quad (3)$$

ここで、 θ は座標回転(deg)、 $H_1(\omega)$ 、 $H_2(\omega)$ はそれぞれ変電所間の方位に直交する磁場変動成分、平行な磁場変動成分である。

3.2 中性点電流と地磁気変動間の応答関数

変電所 (ST0) における中性点電流は、式(5)のように前後2つの変電所間の誘導電流が重畳しているので、それぞれの磁場変動に対応する応答関数の関係は下式で表される。

$$I_{ST0}(\omega) = TF_1(\omega) \cdot H_1(\omega) + TF_2(\omega) \cdot H_3(\omega) + \delta(\omega). \quad (4)$$

ここで $I_{ST0}(\omega)$ は変電所 (ST0) における中性点電流、 H_1 と H_3 はそれぞれ、変電所 ST1-ST0, ST0-ST2 (第3図参照) に直交する磁場変動である。 TF_1 、 TF_2 はそれぞれ H_1 と H_3 に関連する応答関数であり、いずれも周波数に依存する複素数である。 $\delta(\omega)$ は地磁気変動と無相関な信号であり、機器ノイズや電車ノイズ等が含まれる。

3.3 見かけ比抵抗・位相への変換

通常の MT 法では、求められる電磁場応答関数 (MT インピーダンス) から、比抵抗の次元をもつ見かけ比抵抗・位相に変換して地下構造に関する解釈がなされる。中性点電流は、変電所間の「電流」であり、両者を直接的に対応づけるのは不可能である。そこで、本研究では、“疑似”見かけ比抵抗と位相という概念を導入する。“疑似”見かけ比抵抗 (Rs)、位相 (ϕ) は下式のように与えられる。

$$Rs(\omega) = \frac{1}{\mu_0 \omega} \left| \frac{I_{ST0}(\omega)}{\mathbf{H}(\omega)} \right|^2 \cdot factor \quad (5)$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{I_{ST0}(\omega)}{\mathbf{H}(\omega)} \right) \quad (6)$$

ここで、 I_{ST0} は変電所 ST0 における中性点電流 (A)、 $\mathbf{H}$ は2変電所間の方位にそれぞれ直交する磁場変動 (nT) である。 μ_0 は真空中の透磁率 ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m)、 $factor$ は従来の MT 法の見かけ比抵抗曲線に近づけるために応答関数にかける倍率 (周波数に依存しない実数) である。 $factor$ は無次元であるが、中には2変電所間の抵抗値や変電所間の距離、測っている電流の全電流に占める割合等の情報が含まれると考えられる。“疑似”見かけ比抵抗 (Rs) についても同様に無次元である。位相は磁場変動と誘導電流間の位相差にあたるので、そのまま位相として解釈してよい。

なお、本研究では応答関数の推定法として RRRMT アルゴリズム (Chave *et al.*, 1987) を利用した。

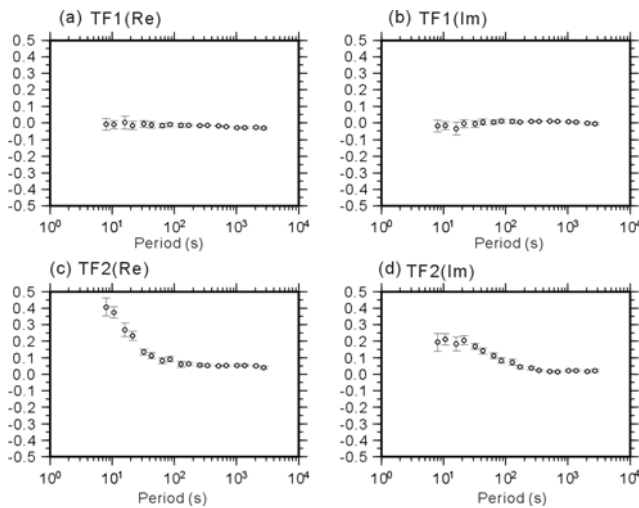


Fig.4 Estimated transfer functions between the neutral current data at SHD substation and rotated magnetic components at Kakioka. TF_1 and TF_2 indicate the response functions obtained between SHD and SFJ, and between SHD and STM substations, respectively. The upper and lower boundaries mean the 95 % confidence limit.

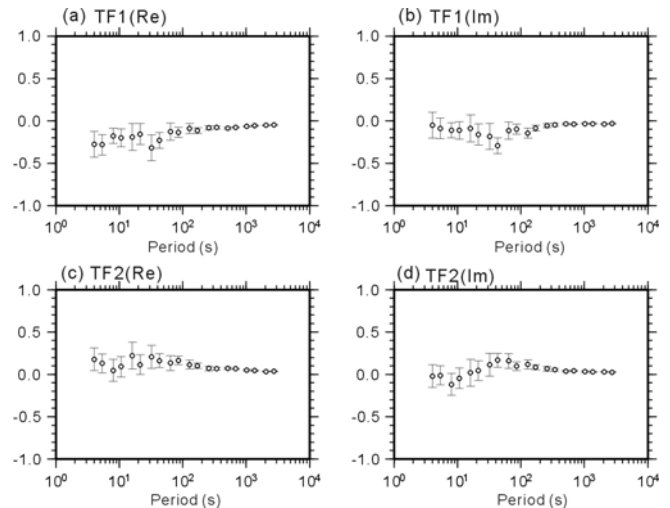


Fig.5 Estimated transfer functions between the neutral current data at SFJ and rotated magnetic components at Kakioka. TF_1 and TF_2 indicate the response functions obtained between SFJ and HYM, and between SFJ and SHD substations, respectively.

4. 観測データへの適用

4.1 新秦野・新富士の中性点電流と磁場間の応答関数

第 4 図に、新秦野における中性点電流と新秦野・新富士間、新秦野・新多摩間の磁場変動（直交成分）との応答関数を示す。 TF_1 は実部・虚部ともに近似的にゼロであるのに対し、 TF_2 は全周期帯でゼロではなく、短周期ほど絶対値が大きくなる。 TF_2 は新秦野・新多摩間の地磁気誘導電流との関連があることを意味し、 TF_1 は新秦野・新富士間の誘導成分を反映しないか、あるいは極めて小さい可能性がある。

第 5 図に、新富士における中性点電流と新富士・東山梨間、新富士・新秦野間の磁場変動（直交成分）との応答関数を示す。基本的に、短周期ほど実部の絶対値が大きくなるが、周期 40 秒以下では周期の減少とともに応答関数が小さくなる。また、周期 100 秒以下では誤差範囲が大きいことから、人工ノイズの影響を受けている可能性が高い。

4.2 疑似見かけ比抵抗・位相への変換

第 6 図は、第 4 図に示す新秦野の応答関数から、“疑似”見かけ比抵抗と位相に変換したものである。ここでは、 *factor* として 100 を与えている。 TF_1 、 TF_2 については、地磁気誘導成分との関連がない可能性が高いので、地下構造を反映しているとはいえない。 TF_2 と $PHS2$ については精度良く推定されている。

第 7 図は、第 5 図に示す新富士における応答関数から“疑似”見かけ比抵抗と位相に変換したものである。 *factor* として 100 を与えている。周期 100 秒以下においては人工ノイズの影響を受けているため、地下構造を正しく反映しない可能性がある。それ以上の周期では、 TF_1 と $PHS1$ は新富士・東山梨間、 TF_2 と $PHS2$ は新富士・新秦野間の平均的な地下構造の影響を反映しているものとみられる。

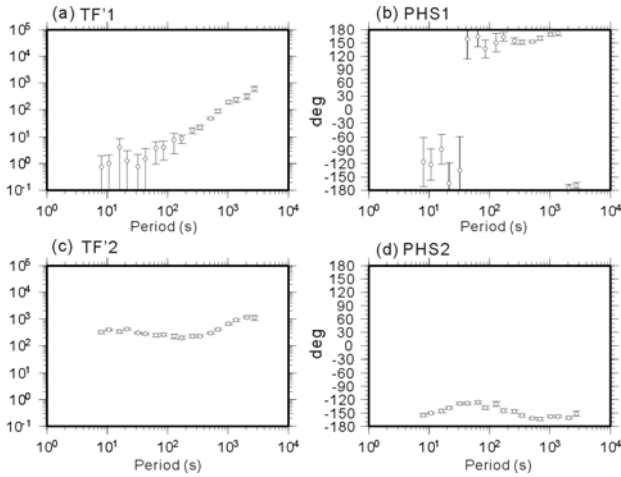


Fig.6 Estimated “pseudo” apparent resistivity (TF) and phase (PHS) that are calculated from the transfer functions at SHD (Fig. 4). The factor parameter is set as 100.

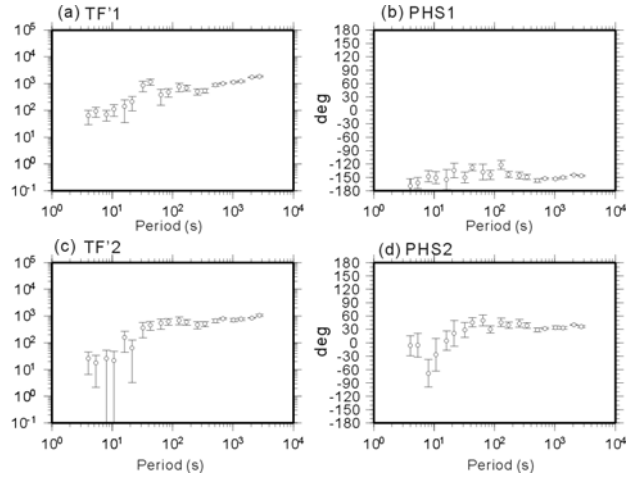


Fig.7 Estimated “pseudo” apparent resistivity (TF) and phase (PHS) that are calculated at SFJ substation (Fig. 5). The factor parameter is set as 100.

4.3 厚木観測点の MT 解析結果との比較

新秦野における“疑似”見かけ比抵抗・位相と比較するため、厚木観測点（新秦野変電所から東北東に約 10km）の MT 観測データを利用する．第 8 図に見かけ比抵抗 (ρ_{xy}, ρ_{yx}) と位相 (ϕ_{xy}, ϕ_{yx}) を示す． ρ_{xy} , ρ_{yx} ともに $100 \Omega m \sim 1,000 \Omega m$ の間に分布しており、周期 500 秒以下ではよく似るが、500 秒以上では ρ_{xy} は ρ_{yx} の約 2 倍の見かけ比抵抗値を示す．これは、周期 500 秒以上において構造の不均質性が高いことを示唆する．

ここでは、新秦野・新多摩間の方位がほぼ南北であることを考慮して、厚木の ρ_{xy} , ϕ_{xy} に注目する．新秦野における“疑似”見かけ比抵抗への変換のための factor を、桁単位で合わせるため 100 とした．新秦野の TF'2 と厚木の ρ_{xy} は極めてよく似ている．また、位相差 PHS2 と厚木の ϕ_{xy} については、 ϕ_{xy} の誤差範囲が大きいので厳密な議論はできないが、傾向は同じであるといつてよい．

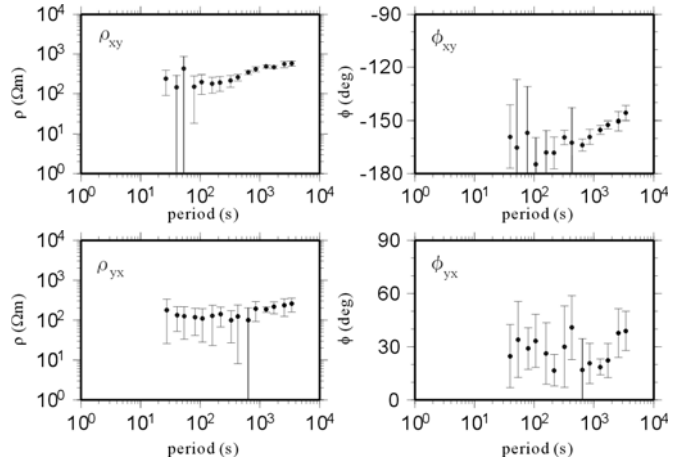


Fig.8 Non-diagonal elements of the apparent resistivity (ρ_{xy}, ρ_{yx}) and phase (ϕ_{xy}, ϕ_{yx}), that are obtained by the magnetotelluric observation at Atsugi.

4.4 応答関数の時間変化

第 9 図は、新秦野における中性点電流と柿岡の磁場変動間の応答関数である．応答関数の時間変化を探るため、約 1 年間を隔てた期間（①2003 年 5/29, 8/18:白丸，②2004 年 11/10～11/11:黒丸）でそれぞれの応答関数を推定した．第 10 図は“疑似”見かけ比抵抗・位相に変換したものである．ここでは、

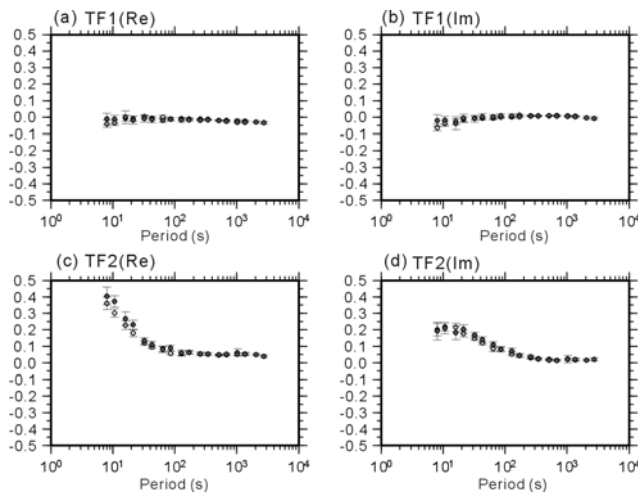


Fig.9 Comparative plot of the transfer functions at SHD substation. Two periods are illustrated as open circles (May and August, 2003) and solid circles (November, 2004).

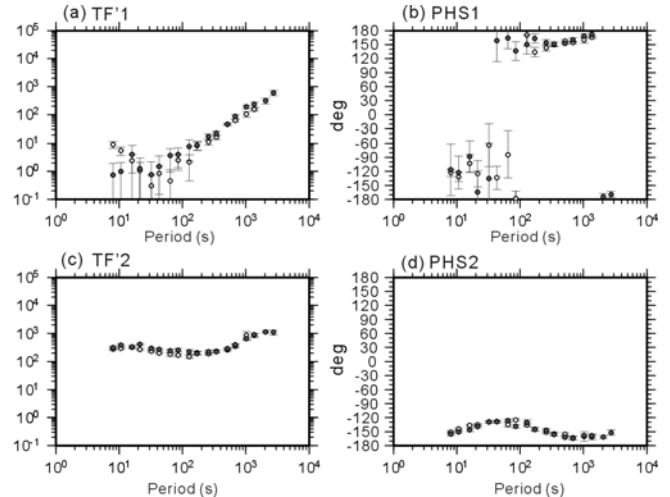


Fig.10 Comparative plot of the “pseudo-” apparent resistivity and phase at SHD substation. Two periods are illustrated as open circles (May and August, 2003) and solid circles (November, 2004).

factor を 100 としている．応答関数 TF2 の実部・虚部と疑似見かけ比抵抗 TF'2 を見ると，周期 150 秒以上と周期 20 秒以下では変化が見られないが，中間の周期帯（20～150 秒）では 2003 年に比べて 2004 年は応答関数の実部と疑似見かけ比抵抗が若干大きくなっている．中性点電流測定システムの変化，あるいは上記の周期帯の表皮深度（30～70km）に相当する地下構造の変化が示唆される．

5. まとめ

高圧送電線の中性点電流には地磁気変動による誘導電流が流れている．したがって，同じく地磁気変動を信号源として利用する MT 法のように，地磁気と中性点電流を同時に測定することによって，地下比抵抗構造の推定やその時間変化をモニタすることが可能になることが期待される．しかし，中性点電流は，ある変電所と前後の 2 変電所間を流れる地電流の和であるので，その割合は一意には求まらない．そこで，本研究では信号源として素性の明らかな地磁気嵐の期間のデータを利用して，それぞれの変電所間の方位に直交する磁場変動と中性点電流との関連を調べた．観測データとして，本研究では東京電力（株）との共同研究で測定している 3 つの変電所（東山梨，新富士，新秦野）の中性点電流，および気象庁柿岡地磁気観測所の地磁気データを利用した．結果，磁場変動と中性点電流の間に周波数応答関数が成り立つことが分かった．この応答関数は，2 組の 2 変電所間の地下構造の情報を含み，MT 法における 1 次元構造のインピーダンスに対応する．

推定された応答関数と地下比抵抗構造を対応づけるためには，MT 法における見かけ比抵抗と位相に変換することが望まれる．そこで，大地を 1 次元構造であると仮定した上で，“疑似”見かけ比抵抗・位相という概念を導入した．ここでは，電流値 (A) と電場 (mV/km) を対応づけるために倍率 (*factor*) というパラメータを設けた．この *factor* には変電所間の距離と大地の比抵抗値に関する情報が含まれており，求めるためには変電所近傍での MT 法による構造探査を要する．本研究では，新秦野観測点の近傍にある厚木観測点（（株）フジタ技術センター敷地内）の電場データから見かけ比抵抗・位相を算出

して、新秦野観測点における疑似見かけ比抵抗値と比較した。結果、*factor* を 100 としたとき、両者はよく一致することがわかった。すなわち、中性点電流データから、間接的ではあるが MT 法と同様の処理方法で地下比抵抗構造の情報を得られるといえる。

本研究では、さらに疑似見かけ比抵抗・位相の時間変化の検出を試みた。新秦野観測点における 2003 年中期と 2004 年後期の疑似見かけ比抵抗・位相を比較したところ、周期 20 秒～150 秒において微小な変化が見られた。現状ではこの変化の原因は明らかではないが、地下比抵抗構造の何らかの変化を反映している可能性がある。

地殻変動に関連する地下の比抵抗構造の変化は微小であるとされており、その変動を検出するためには精度良く応答関数を推定する必要がある。その点においては従来の MT 法と同じである。電力会社の送電設備は社会基盤を構成する最重要のインフラの一つとされ、24 時間体制の保守・管理が行き届いているので、地下構造の変化を長期的にモニタするにあたり測定装置を含む観測システムの長期的な安定性が期待できるという点は意義深い。日本国内の中性点が接地されている変電所において同様の測定システムを導入することで、地下比抵抗構造変化の効率的なマッピングが可能になるだろう。

謝 辞

本研究は、東京電力（株）による委託研究「中性点電流観測データの分析手法の高度化に関する研究」により実施された。同社の各変電所の方々には中性点電流の測定において多大なるご協力をいただいた。厚木観測点に関しては、（株）フジタ技術センターを中心とする（株）地盤調査事務所、（株）東建ジオテックの共同研究グループと東海大学により設置・運用されている。柿岡における地磁気データは、気象庁地磁気観測所にご提供いただいた。関係者各位に感謝の意を表します。

参考文献

- Albertson, V. D., J. M. Thorson Jr., and S. A. Miske Jr. (1974) The effects of geomagnetic storms on electrical power systems. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, **PAS-93**, No.4, 1031-1044.
- Allen S. L. Frank, H. Saver, and P. Reif (1989) Effects of the March 1989 solar activity. EOS, **70**, No.46, 1479-1488.
- Chave, A. D., D. J. Thomson, and M.E. Ander (1987) On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer function. J. Geophys. Res., **92**, No. B1, 633-648.
- Izutsu, J., T. Ochi, T. Uetake, T. Mutakamihigashi (2006) The relationship between the current through the transformer neutral point and natural phenomena. IEEJ Trans. Fundamentals and Materials, **126-A**, No.4, 233-237.
- Lundby, S., B. E. Chapel, D. H. Boteler, T. Watanabe, and R. R Horita (1985) Occurrence frequency of geomagnetically induced currents: A case study on a B.C. hydro 500 kV power line. J. Geomag. Geoelectr., **37**, No.10, 1097-1114.
- Pirjola, R. (1985) On current induced in power transmission systems during geomagnetic variations. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, **PAS-104**, No.10, 2825-2831.