

新島・神津島領域にて平成 23 年東北地方太平洋沖地震に誘導された地震活動の活発化とそれに関連すると考えられる地電場スペクトルの変化

竹内 昭洋 (東海大)・長尾 年恭 (東海大)

Seismicity activation induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and changes of geoelectric field spectra probably related to the activation in Niijima-Kozushima islands area

Akihiro Takeuchi (Tokai University) and Toshiyasu Nagao (Tokai University)

Abstract

Just after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Tohoku EQ) on 11th Mar 2011, the seismicity in Niijima-Kozushima islands area, which was located about 500 km southwest from the epicenter of Tohoku EQ, was suddenly activated and calmed down in a few days. On the other hands, the time series variations of the geoelectric field spectra (512 sec period) at Niijima and Kozushima observation sites were compared with those that were expected from multivariate linear regression models using the time series variations of the geomagnetic field spectra at Memambetsu and Chichijima observation sites, about 1000 km far from Niijima and Kozushima islands. The real parts for both islands were well fitted during the leaning period (from 1st Jan 2011 to 28th Feb 2011) while the imaginary parts not so. The real part residuals between the observed and expected spectra were disturbed for about 1 day since the occurrence of Tohoku EQ. One of the possible reasons for these disturbances is the temporal change of the underground resistivity structure induced by large quaking due to Tohoku EQ and following local earthquakes.

1. はじめに

日本時間で 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に平成 23 年東北地方太平洋沖地震（以下、東北地震）が発生した後、その震央から南東約 500km に位置する新島・神津島周辺の海峡下約 3-11km において幾つかの有感地震を含む多くの地震が発生した（図 1）。この地震活動の活発化は一時的なものであり、3 月 15 日頃には一旦落ち着いた。この地震活動の活発化が東北地震により誘発されたものとするれば、東北沖からの地震波の到達により伊豆諸島海峡下震源域の物理的・化学的・電磁気的特性が一時的に変化したことが期待できる。

東海大学海洋研究所地震予知研究センターでは、

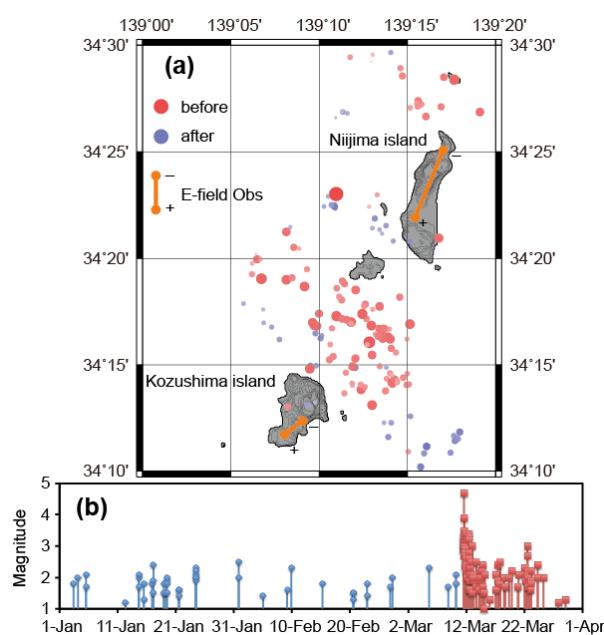


Fig.1: (a) The epicenters in Niijima-Kozushima islands area. (b) The seismicity in this area before and after Tohoku EQ.

新島と神津島で地電位差の観測（1 秒サンプリング）を行なっている。長短ある基線の中から、普段から比較的ノイズの少ない基線の配置を図 1 に示す。これらの基線では、東北地震由来の地震動により擾乱された地電位差も検出している。そこで本研究では、両島における地電位差観測データをスペクトル解析し、その特徴に東北地震前後でどのような変化があるか調査した。

2. 解析方法と結果

離島における地電場は、主に地磁気と潮位・海流の変化に誘導されていると考えられるが、特に 10 分よりも短い周期に関しては、緩やかな変化をする潮位・海流の影響は弱く、地磁気のみによって誘導されていると期待できる。しかし、新島・神津島における東北地震前後の地磁気観測データがないため、インピーダンステンソルや地磁気シングル伝達関数の時系列変化を解析することができない。また、付近の地磁気観測点データを用いたインターステーション伝達関数を計算しようとしても、東北地震やその余震の影響を同時に受けているために、参照点として良好とは言えない。そこで、東北地震の震源域から十分に遠く余震の影響がほとんどない女満別・鹿屋・父島観測点（気象庁）の 1 秒サンプリング地磁気データから合成した疑似地磁気の水平 2 成分を間接的に用いることを試みた。

$$\mathbf{H}_s(T) = \mathbf{A}_{r1}(T) \cdot \mathbf{H}_{r1}(T) + \mathbf{A}_{r2}(T) \cdot \mathbf{H}_{r2}(T) + \mathbf{A}_{r3}(T) \cdot \mathbf{H}_{r3}(T) \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{H}_s(T)$ は新島または神津島における疑似地磁気の水平 2 成分の周期 T 秒におけるフーリエ級数係数であり、 $\mathbf{H}_{r1}(T)$ と $\mathbf{H}_{r2}(T)$ と $\mathbf{H}_{r3}(T)$ は、それぞれ女満別と鹿屋と父島におけるものである。 $\mathbf{A}_{r1}(T)$ と $\mathbf{A}_{r2}(T)$ と $\mathbf{A}_{r3}(T)$ は参照点地磁気を結合するためのテンソルで、地磁気インターステーション伝達関数に性質が似ているものと予想される。ちなみに、新島・神津島における地電位差観測基線に平行な方向を x 成分、垂直な方向を y 成分となるように座標をとり、参照する地磁気データもそれらに合わせて座標回転させておく。

あるインピーダンステンソル $\mathbf{Z}(T)$ と疑似地磁気ベクトル $\mathbf{H}_s(T)$ の積から、地電場ベクトル $\mathbf{E}_s(T)$ が得られる。

$$\mathbf{E}_s(T) = \mathbf{Z}(T) \cdot \mathbf{H}_s(T) \quad (2)$$

式 1 と式 2 から、例えば $\mathbf{E}_s(T)$ の x 成分の実部 $\text{Re}E_{sx}(T)$ は参照地磁気各成分の線形和で示されることになる。

$$\begin{aligned} \text{Re}E_{sx}(T) = & a \cdot \text{Re}H_{r1x}(T) + b \cdot \text{Im}H_{r1x}(T) + c \cdot \text{Re}H_{r1y}(T) + d \cdot \text{Im}H_{r1y}(T) \\ & + e \cdot \text{Re}H_{r2x}(T) + f \cdot \text{Im}H_{r2x}(T) + g \cdot \text{Re}H_{r2y}(T) + h \cdot \text{Im}H_{r2y}(T) \\ & + i \cdot \text{Re}H_{r3x}(T) + j \cdot \text{Im}H_{r3x}(T) + k \cdot \text{Re}H_{r3y}(T) + l \cdot \text{Im}H_{r3y}(T) \end{aligned} \quad (3)$$

実際に地電位差観測データから得られる $\text{Re}E_{sx}(T)$ に対して線形重回帰解析を行うことにより、各線形結合係数を決定することができる。

新島・神津島の地電位差データおよび女満別・鹿屋・父島の参照地磁気データ（全て 1 秒サンプリング）それぞれにおいて、600 秒ごとに切り出し、最初の 512 秒間だけを使い、平均値を取り除いた後に FFT 計算を経て、周期 512 秒 ($T=512\text{s}$) におけるフーリエ級数係数を求めた。2011 年 1 月 1 日から 2 月 28 日を学習期間とし、線形重回帰解析により、各成分の線形結合係数（式 3）を求めた。生データのプロットを確認し、落雷や欠測などによる不良データの期間は回帰に使用しなかった。また、鹿屋のデータには人工的なノイズが頻発するので、結局は回帰に使用しなかった ($e=f=g=h=0$)。求めた係数を用いて、3 月 1 日以降（予

測期間)の地磁気データから、両島における地電場スペクトルを計算した。新島における実数部 ($\text{Re}E_s(T=512s)$)の例を図 2 に示す。学習期間における線形重回帰の決定係数は約 0.9 となり、フィッティングは良好と言えよう。

実際の地電位差観測データから得られる地電場スペクトルと遠隔参照点の地磁気観測データから計算される地電場スペクトルとの差(線形重回帰の残差)は、ある範囲でばらつきながら推移し、そのばらつきの程度は 3 月 2-10 日の予測期間でも大きく変化しない。このことから、十分に良好な予測値の計算が出来ていると考えられる。しかし、東北地震の発生後から 3 月 12 日午前中にかけて、この残差が比較的大きく擾乱している(図 3)。同様な傾向が神津島の実数部の場合にも確認できる(図 4)。

3. 議論

東北地震の発生直後から一時的に残差が擾乱した原因を列举し、簡単な考察を試みる。

計測系の振動：周期が 512 秒と長い為、電極や計測・記録装置の振動というシステムに起因する要因は考え難い。

磁気嵐：磁気嵐が発生している期間は、残差が若干擾乱する傾向のあることが、学習期間(2011 年 1 月 1 日から 2011 年 2 月 28 日)に確認できる。これは、スペクトルの大きな変化に計算値が十分回帰しないためである。東北地震発生時も磁気嵐が発生しており、この影響が含まれていることは否めない。

流動電位など：最初の地震波が到達してから数時間は、両島において有感地震が発生している。この期間は両島の地殻が大きく揺さぶられているはずであり、流動電位・圧電効果・正孔電荷キャリアの発現などによる特異な電場が地表付近に形成[参考文献参照]されたことが主な要因であると考えられることができる。

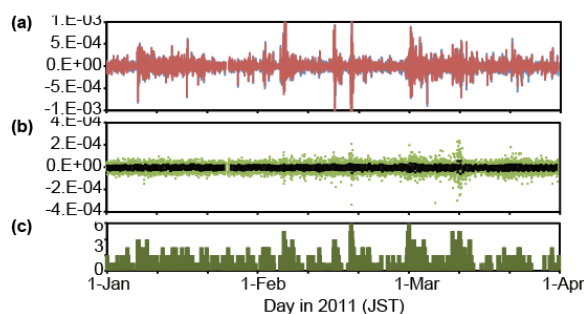


Fig.2: (a) Spectra variations of the geoelectric field ($\text{Re}E_s(T=512s)$) at Niijima island. The blue line is obtained from the observation (Obs) and the red is from the calculation (Cal). (b) The residuals of the geomagnetic field spectra between the “Obs” and “Cal” with their 1st, 2nd, and 3rd quartiles. (c) K-index at Kakioka.

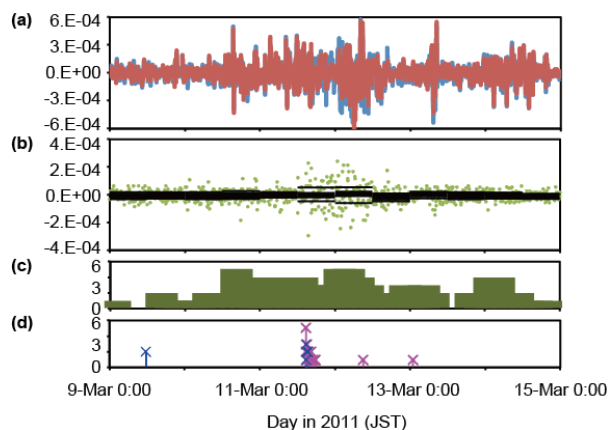


Fig.3: (a) Spectra variations of the geoelectric field ($\text{Re}E_s(T=512s)$) at Niijima island. (b) The residuals of the geomagnetic field spectra. (c) K-index at Kakioka. (d) JAM seismic intensity of felt earthquakes at Niijima island. Pink Xs are at Niijima island and blue ones are at Memanbetsu or Chichijima.

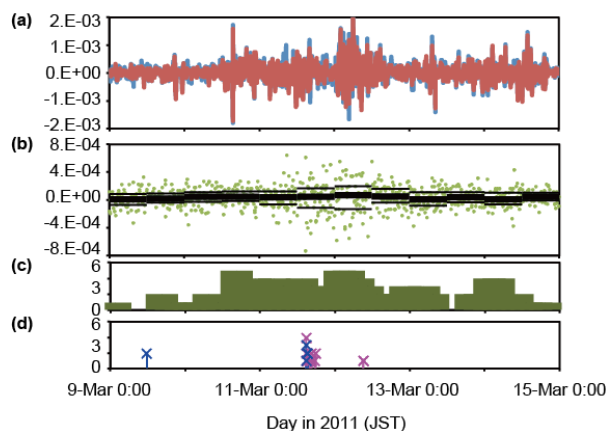


Fig.4: (a) Spectra variations of the geoelectric field ($\text{Re}E_s(T=512s)$) at Kozushima island. (b) The residuals of the geomagnetic field spectra. (c) K-index at Kakioka. (d) JMA seismic intensity of felt earthquakes at Kozushima island.

比抵抗構造変化:無感地震しか発生していない期間も残差が擾乱している。無数の断層運動により地下水・間隙水の存在状態（結合度やイオン濃度など）が変化し、両島周辺地下の見掛け比抵抗が一時的に変化したことが要因であると考えられる。

津波:東北地震発生から約1時間後に、両島に津波の第一波が到達し、その後しばらくは複雑な潮位が発生していたと考えられる。これにより通常とは異なる地電場が両島に形成されていた可能性も考えられる。

4. 今後の課題

本研究で試みた線形重回帰解析をベースとした地電場スペクトルの推定方法には、物理モデルに基づいた理論的なバックアップがまだ存在しない。また現段階では、残差に擾乱が生じた際に、その原因が結合テンソル ($\mathbf{A}_{1r}(T)$ など) の変化に起因するものなのかインピーダンステンソル ($\mathbf{Z}(T)$) の変化に起因するものなのかといった切り分けが困難であるという弱点がある。

実数部の場合には両島で比較的巧くフィッティングすることができたが、虚数部の場合にはそれほど良いフィッティングにはならなかった（決定係数は0.8程度）。地磁気参照点の数を増減させた場合にフィッティングがどの程度変化するか試してみたい。また、上記のFFT計算から同時に得られた短い周期（例えば256秒、128秒、64秒）のフーリエ級数係数を用いて同様の線形重回帰解析を行なってみたが、決定係数は小さくなった（0.5-0.7程度）。データの切り出し期間などを変えて、線形重回帰解析に用いるデータセットの準備を試行錯誤してみる余地がある。

謝辞

本研究の一部は、「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」電磁気学的広帯域先行現象の観測的検証とその発現メカニズムに関する研究（課題番号2501）の支援を受けて実施されている。また、気象庁より地磁気データおよびK指数データを提供していただいた。

参考文献

- A. Takeuchi, Y. Futada, K. Okubo, N. Takeuchi, “Positive electrification on the floor of an underground mine gallery at the arrival of seismic waves and similar electrification on the surface of partially stressed rocks in laboratory”, *Terra Nova*, **22**, 203-207, 2010.
- A. Takeuchi, Ö. Aydan, K. Sayanagi, T. Nagao, “Generation of electromotive force in igneous rocks subjected to non-uniform loading”, *Earthquake Science*, **24**, 593-600, 2011.
- A. Takeuchi, K. Okubo, N. Takeuchi, “Chapter 3: Electric and electromagnetic signals under, on, and above the ground surface at the arrival of seismic waves”, In: *Seismic Waves, Research and Analysis*, pp. 47-70, InTech, Rijika, 2012.
- A. Takeuchi, K. Okubo, N. Takeuchi, “Electric signals on and under the ground surface induced by seismic waves”, *International Journal of Geophysics*, **2012**, 270809, 2012.
- A. Takeuchi, T. Nagao, “Activation of hole charge carriers and generation of electromotive force in gabbro blocks subjected to nonuniform loading”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**, 915-925, 2013.