

2011年東北沖地震の直前に起こったTECの正異常について

日置 幸介 [1]
[1] 北大・院理・自然史

Precursory TEC enhancement immediately before the 2011 Tohoku-Oki earthquake

Kosuke Heki[1]
[1] Hokkaido Univ.

<http://www.ep.sci.hokudadi.ac.jp/~heki>

Earthquakes are often preceded by electromagnetic precursors, and we have been searching for them in, e.g. electric currents in the ground and propagation anomalies of radio waves. Here I report that a positive anomaly of ionospheric Total Electron Content (TEC) appeared immediately before the 2011 March 11 Tohoku-Oki earthquake (Mw9.0). Microwave signals from Global Positioning System (GPS) satellites experience delays inversely proportional to the square of the frequency as they propagate through the ionosphere. By monitoring the differences of the L1 and L2 carrier phases with the dense GPS array composed of ~1200 receivers, we can infer two-dimensional distribution of TEC above Japan.

Coseismic vertical crustal movements excite acoustic waves, and they arrive at the ionosphere in ~10 minutes. There they make electron density irregularities, and fluctuation of TEC called coseismic ionospheric disturbances (CID). Raw TEC time series on March 11 show such CID in addition to slow background variations due to the changes of the penetration angle of the line-of-sight vectors and diurnal variation of vertical TEC (VTEC). We modeled the VTEC over the studied time window of ~5 hours with a cubic polynomial of time, and defined the departure from the model as TEC anomalies. Positive TEC anomaly was found to start ~40 minutes before the earthquake in data of four GPS satellites 9, 15, 26, 27. The anomaly was larger for ionospheric penetration points closer to the epicenter, and reached ~10 percent of the background TEC immediately before the earthquake. The anomaly disappeared after the passage of CID. In this paper, I discuss if this non-traveling TEC enhancement is related to the 2011 Tohoku-Oki earthquake.

TEC increases often occur irrespective of earthquakes. For example, enhanced UV flux due to solar flares causes sudden increase of TEC. This, however, occurs on the whole sun-lit hemisphere, and never localizes above the focal region. Large-scale traveling ionospheric disturbances (LSTID) excited in the auroral oval often propagate southward and reach Japan. This can be distinguished by carefully observing their movements (they travel with a speed of a few hundreds of meters per second). I analyzed the TEC time series of satellite 15 observed at 93009 (Kashima) over 120 days from January to April, 2011. The precursory anomaly on March 11 showed the largest departure from the model. The second (day 094) and the third (day 061) largest positive TEC anomalies both showed southward propagation, and are considered to be LSTID.

If this was the precursor of the Tohoku-Oki earthquake, similar phenomena should have preceded other large earthquakes. I analyzed TEC before and after the 2010 Chile earthquake (Mw8.8) using over ten GPS stations in Chile and Argentine. I found that similar positive anomalies with amplitudes ~1/2 of the Tohoku-Oki case started ~50 minutes before the earthquake and lasted until CID arrivals. Preseismic TEC anomalies also possibly accompanied the 2004 Sumatra-Andaman (Mw9.2) and the 1994 Hokkaido-Toho-Oki (Mw8.3) earthquakes. However, they were not seen before smaller earthquakes, such as the 2006 Kuril (Mw8.2) and the 2003 Tokachi-Oki (Mw8.0) earthquakes although clear CID occurred in these earthquakes.

Here I present an objectively testable scientific hypothesis that M9 class earthquakes are immediately preceded by positive TEC anomalies of magnitude-dependent amplitude lasting for an hour or so. Because the raw data files are available on the web, one can easily reproduce the results reported here and apply the method to other earthquakes. The physical process responsible for the preseismic TEC anomalies is not clear, but concentration of positively charged aerosols above the ground might have something to do.

地震にしばしば電磁気的な前兆が伴うことは昔から知られている。古くは安政江戸地震の直前に磁石が効かなくなった話が有名だが、昨今は大気中の正帯電エアロゾルでこの現象が説明できるという主張もある。今日の電磁気的な地震前兆の探求は地電流や電波伝搬異常が中心であるが、ここでは2011年東北地方太平洋沖地震の直前に全地球測位システム (GPS) によって見出された高層大気 (電離圏) の異常について紹介する。

電離圏には太陽からの放射によって大気分子から飛び出した電子が数多く含まれ、高度300km付近で最も濃い。高度2万kmのGPS衛星から送信されたマイクロ波は電離圏通過時に電子による遅延を受ける。遅延の量を測れば衛星と受信機を結ぶ視線にある電子の総数 (Total Electron Content, TEC) がわかる。公開されている全国約千二百点の国土地理院GPS連続観測網のデータを用いて、地震前後のTEC変化を調べてみた。TECは一般に下に凸のゆっくりとした時間変化を示すが、それは衛星の動きに由来する見かけの変化である。衛星が地平線に近いと電波が電離圏を斜めに貫くため、遅延が大きくなるのだ。

地震による地面や海面の上下運動によって生じた音波は、地震の約十分後に電離圏に達して電子の粗密をつくる。それをGPSで見るとTECが乱れて見える。これは地震時電離圏変動と呼ばれる既知の現象で、2011年東北沖地震でも顕著であった。それとは別に地震の約40分前に始まったTECのプラスの異常が、音波が到来する地震約10分後まで続い

ていた。異常は東北の局で大きく（元々の TEC の一割弱程度）、震源域から離れるに従って小さくなる。各々の衛星による TEC データから地震に伴う異常部分 (UT5.2-6.0) を除き、天頂方向の TEC を時間の三次の多項式で近似したモデルを求め、そこからの差を「異常」と定義する。地震の直前に TEC が正の異常を見せる地域はほぼ震源域に重なる。地震前 TEC 異常は衛星 9,15,26,27 で顕著に観測され、いずれも地震時電離圏変動（電離圏の揺れ）が治まった頃には消えている。これは前兆なのだろうか。

TEC が上昇することは珍しくない。たとえば太陽フレアに伴って紫外線が増えれば電子が増える。でもその影響は昼半球全体に及び、震源上空の TEC だけが増えることはない。またオーロラ帯から巨大な波が南下してくることもある（大規模移動性電離圏擾乱）。これは紛らわしいが、秒速数百メートルで伝搬してゆく波なので注意深く見れば識別できる。試しに今年一月から四月まで 120 日間の 15 番衛星の 5 時間の TEC データ (93009 局) を解析してみたが、最大の正異常 (VTEC で 2TECU 以上) は本報告にある東北沖地震直前のものであった。他に VTEC で 1.5TECU を超えた正異常が二回生じたが、両者とも移動性のものだった。

TEC の正異常が東北沖地震の前兆なら、他の巨大地震の前にも同じ事が起こっていても良い。そこで、2010 年二月に発生したチリ地震 (Mw8.8) 前後の TEC 変化を、公開されている南米の GPS データを使って同様に解析してみた。その結果、東北地方太平洋沖地震の半分程度の大きさの正の TEC 異常が地震の約 50 分前に始まり、電離圏が揺れ始めるまで継続していたことがわかった。同様の TEC 異常は 2004 年 12 月のスマトラ・アンダマン地震 (Mw9.2) と 1994 年北海道東方沖地震 (Mw8.3) でも見つかった。一方 2006 年千島地震 (Mw8.2) や 2003 年十勝沖地震 (Mw8.0) では、地震十分後の電子数の振動は綺麗に見えるものの地震前の TEC 異常は確認できなかった。本現象は M9 に近い巨大地震でようやく見える前兆と言えそうだ。

地震直前になぜ上空で TEC の正異常が生じるかはわからない。しかし地表近傍に正帯電エアロゾルが溜まることで説明できる可能性はあると思う。正電荷を供給するメカニズムには、圧縮された火成岩から出てきた正孔や、地殻から放出されたラドンのアルファ崩壊等いくつかの候補がある。これまでの前兆報告は特定の観測点における特殊な観測によるものが多く、普遍性や追試容易性に欠けていた。今回の現象は、データの入手や解析は比較的簡単で追試が容易である。直ちに直前予知の実用化につながるものではないが、兵庫県南部地震以来久しく沈滞していた地震予知研究がこれを機会に再び動き出すことを期待したい。