

2011年東北地方太平洋沖地震に先行した電離圏全電子数の正の異常について

北海道大学 理学研究院 自然史科学部門 地球惑星ダイナミクス分野

日置 幸介 (heki@mail.sci.hokudai.ac.jp)

要旨

直前予知は地震学者の夢であるが、従来報告されていた事例はいずれも特定の観測点における特殊な観測法によるものであり、普遍性や追試の容易性に欠けていた。2011年東北地方太平洋沖地震の約40分前から震源域上空の電離圏で最大5 TECU に達する全電子数(TEC)のゆっくりとした正の異常が観測された。これは我が国に多数展開された全地球測位システム(GPS)のキャリア位相差の時系列から得られたもので、データ入手と解析手法はともに簡単で追試が容易である。同様の前兆変化は2010年2月のチリ地震、2004年12月のスマトラ地震、および1994年北海道東方沖地震においても見出されており、海溝で発生する巨大地震に普遍的なものである可能性が高い。将来の地震直前予知の実用化に向けた新手法として有望と思われる。

2011年東北地方太平洋沖地震前のTEC変動

地震が発生した3/11(通算日70日)のGPS連続観測網GEONETの生データを terras.gsi.go.jp より anonymous ftp で地震二日後に入手し、日置他(2010)の3.3章の手法でTECの時系列を解析した。これはGEONETのデータから、排気中の水蒸気による電子の枯渇を利用して北朝鮮のミサイルの航跡を解析した事例(Ozeki and Heki, 2010)と同じ手法である。図1に中部から四国にかけてGPS局で15番衛星を通して見たTECの地震前後約四時間の時間変化を示す。どれも下に凸な緩やかな曲線を描いている。そこには電離圏電子の日変化も含まれるが、大部分は衛星仰角の変化による電離圏を視線が貫く厚さの変化を反映している。地震の約十分後に、地震による地面および海面の上下運動が励起した大気中の音波が電離圏高度に到達する。それと同時に大気基本モードである周期約4.5分の振動が始まり一時間程度継続する。これは地震時電離圏変動(CID)と呼ばれる既知現象である(Heki and Ping, 2005)。

今回発見された新しい現象は、地震の約40分前に始まってじわじわと継続するTECの正の異常である。異常分は地上局と衛星を結ぶ視線ベクトルが電離圏の最大電子密度高度(約300 km)を貫く点(その点を地上に投影した点をSIPと呼ぶ)が震源直上にあるGPS点で最も大きく5 TECU (1TECUは底面積一平方メートルの円柱に含まれる電子の数が 10^{16} 個)に達し、離れるに従って小さくなる。また震源から十分に離れた電離圏では逆にTECのゆっくりとした減少が見られる。増加したTECはCIDによる振動が治まった時には元にもどっている。

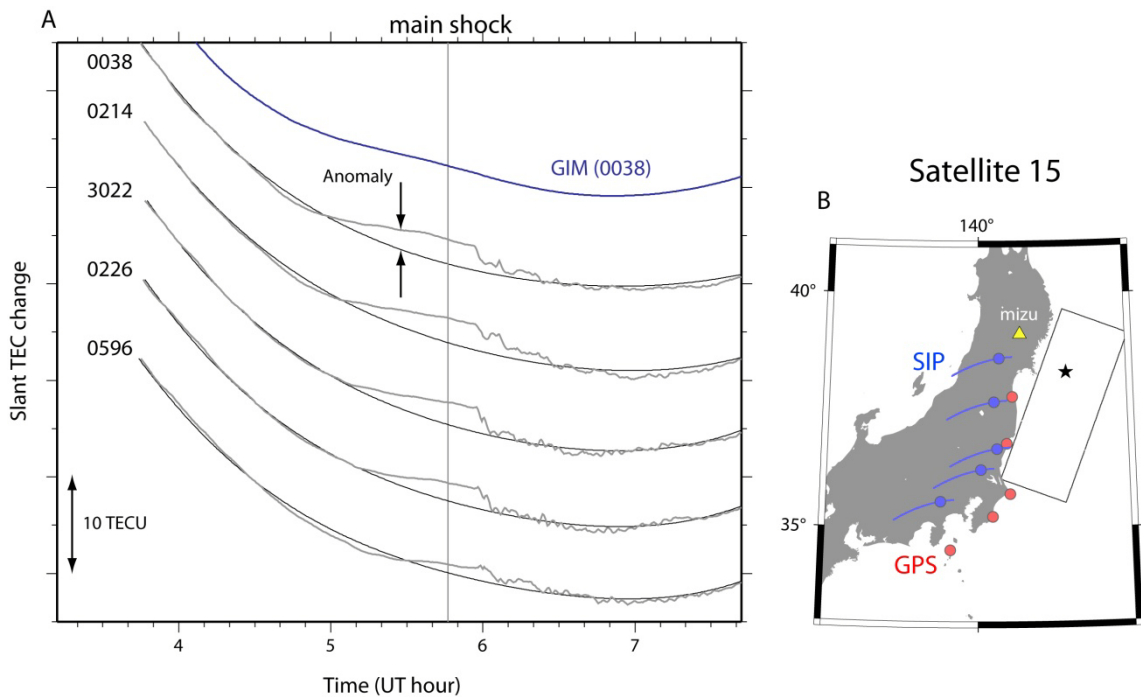


図1 右の図の赤丸で示す GPS 点から 15 番衛星（高度 300 km の SIP を青丸で示す）を見たときの、TEC の地震前後の時系列。なめらかな曲線は鉛直 TEC を時間の二次関数で近似したモデル。地震の約 40 分前から TEC が正の異常を示し、その大きさは SIP が震源に近いほど大きい。青い曲線は全球電離圏モデル(CODG0700.11I)から計算した、0038 局からこの衛星を見た時に期待される TEC 変化。モデルの作成には水沢局が含まれているため地震前兆に相当する TEC の増加が見えるが、空間分解能が乏しいため短周期成分の情報が欠落している。(b)の青い線は SIP の 5:00-6:00UT の軌跡で、青い丸が地震発生時の SIP を示す。

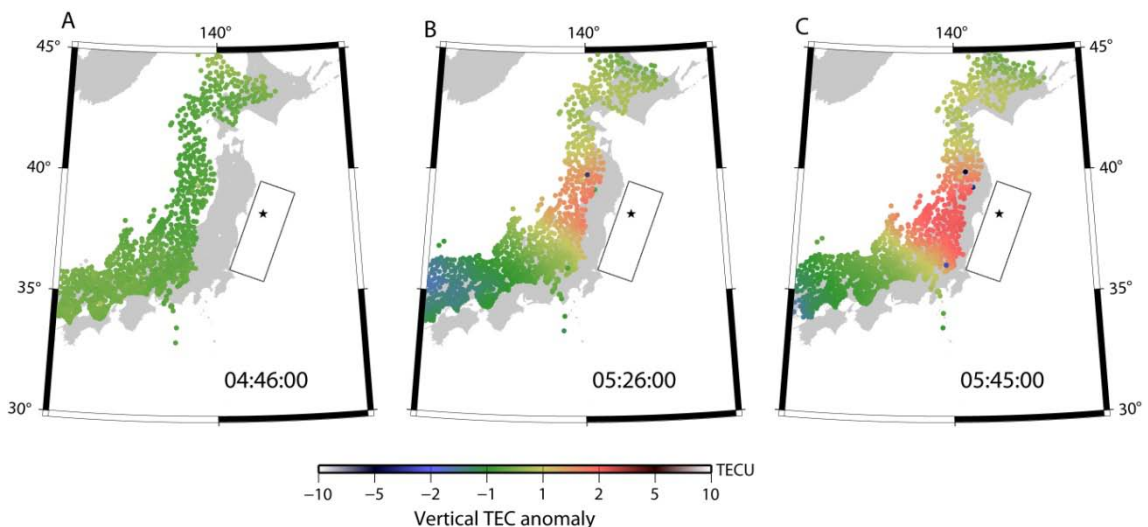


図2 図1に示す TEC 実測値のモデル曲線からのずれを、鉛直方向の TEC (VTEC) に換算して色で示し、SIP の位置にプロットしたものを。左から地震(a)1 時間前、(b)20 分前、(c)1 分前である。震源断層から 300-400 km 以内の地域で TEC の正の異常が成長している。

このような地震直前の TEC 変化を、地震に伴う異常部分（具体的には UT5.2 から 6.0）を除いた部分を用いて作成したモデル変化（図 1 でなめらかな曲線で示したもの）からの差として地図上にプロットしたものが図 2 である。地震の一時間前（左）には見られない異常が、地震の 20 分前には震源上空の正の TEC 異常として見えだし、地震直前にはさらに明瞭な異常となって見えている。逆に西日本の上空では TEC の減少が見られ、あたかも電離圏電子が周辺域から震源域に集まってゆくようである。なおここには示さないが、同様の図は同じく震源上空を視線が貫く 26/27 番衛星でも描くことができる。この現象が海溝型巨大地震に普遍的なものであり、かつ紛らわしい電離圏の擾乱現象が少なければ地震の直前予知の手法として有望であると思われる。

2010 年チリ地震前の TEC 変動

本前兆現象の普遍性を調べるため、同規模の海溝型地震として 2010 年二月に発生したチリ地震前後の TEC 変化を見てみる。南米チリおよびアルゼンチンには、ある程度の数の GPS 網が存在するが、日本と同じレベルの TEC 解析は困難である。アルゼンチンの GPS 連続観測局の生データはウェブで公開されているが、その中から五つの GPS 局で 17 番衛星を見た時の GPSTEC 時系列を解析した（図 3）。震源付近の電離圏で、モデル曲線から正にずれた TEC 異常が今回と同じく地震の約 40 分前に始まっていることがわかる。TEC 異常は CID と共に元に戻る。異常の大きさは東北地方太平洋沖地震よりやや小さく 3 TECU 程度であるが、震源直上ではより大きいのかも知れない。類似の現象は 2004 年 12 月のスマトラ・アンダマン地震でも確認した(SAMP, PHKT から衛星 20/23 を見た)。これまで日本で起こってきた M8 クラスの地震(1994 年北海道東方沖地震、2003 年十勝沖地震)についても GEONET のデータを解析した。その結果前者(M8.2)については同様の現象を見出したが、後者(M8.0)については TEC の増加は確認できなかった。図 4 にこれまで見出した地震直前の TEC 増加を、横軸に地震発生時刻をゼロとしてプロットしたものを示す。

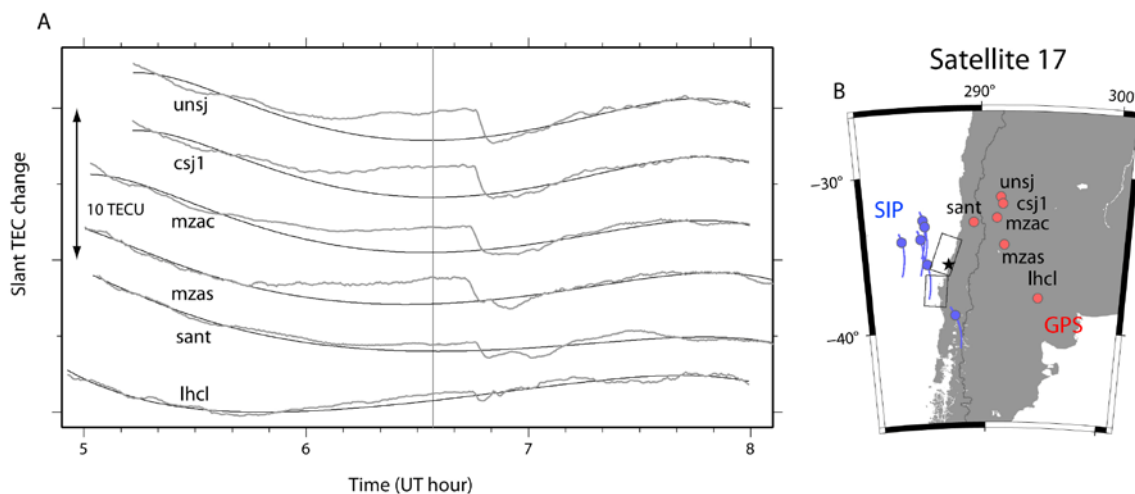


図3 2010年二月のチリ地震前後にアルゼンチンとチリの五つのGPS点から17番衛星を通じてみたTECの時系列に図1と同様の解析を行った。右の地図にGPS点(赤丸)とSIP(青丸)、および震源断層(Heki and Matsuo, 2010)を示す。

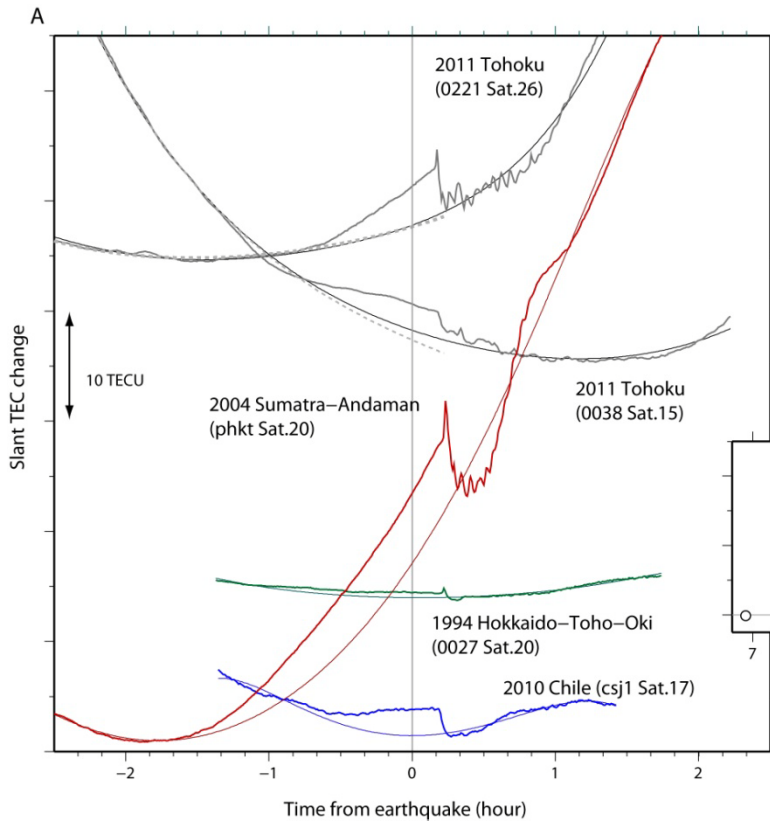


図4 (A)これまで前兆を見出した海溝型巨大地震発生時刻前後のTECの変化。横軸は地震発生時刻をゼロとしている。いずれの事例でも地震の40-90分前にTECの上昇がみられ、その大きさは地震の大きさと相関を持つようである(B)。

東北の時系列に併せて示した灰色の破線は、前兆開始前のデータのみを用いてフィットしたモデルを示す。

AとBの色は対応しているが、白丸は前兆が出なかったM8クラス以下の地震。

物理モデルとソフトウェア

本現象がどのような物理メカニズムで発生しているのかは現時点で明確ではない。昨今では地震に伴う電磁気現象を統一的に説明する現象として、圧縮された火成岩から発生した正孔 (Positive hole) の拡散が注目されている。火成岩を部分的に圧縮すると、圧縮された部分で発生した正孔が圧縮されていない部分に移動して岩石表面に電場を作ることが室内実験で明らかにされている(Takeuchi et al., 2006)。今回の地震でも、震源核の形成に伴って断層帯で発生して地表に集まった正孔が作った電場が、震源上空の電離圏に電子を集めた可能性がある。電場を作ったのは地殻から放出されたラドンがアルファ崩壊して生じた電荷によって大気中に大量に生じた正帯電エアロゾルかも知れない(Tributsch, 1978)。熱圏で実際にどの部分の電子がどのような経路で震源上空に集まるかは、電場だけでなく地球磁場を考慮する必要があるため単純ではないだろう。

なお本研究で用いたGPS生データファイルから衛星毎のTEC時系列を抽出するプログラムのソースコードは筆者のページ (<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/software.htm>) で公開している。またGEONETのGPSデータは国土地理院からanonymous ftpで入手可能であ

る。地震直前の TEC 増加は、直前予知という地震学者の夢につながる重要な現象である。多くの研究者がこれらのソフトウェアと、様々な機関から公開されている GPS 生データを用いてこの現象に関して追試していただければと考えている。

参考文献

- Heki, K. and K. Matsuo, Coseismic gravity changes of the 2010 earthquake in Central Chile from satellite gravimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L24306, doi:10.1029/2010GL045335, 2010.
- Heki, K. and J.-S. Ping, Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 845-855, 2005.
- 日置幸介、菅原守、大関優、岡崎郁也、GPS-TEC 法による地球物理学、測地学会誌 (解説・入門講座)、56, 125-134, 2010. 本文献は下記 URL で閲覧可能
http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~heki/pdf/Heki_etal_JGSJ2010.pdf
- Ozeki, M. and K. Heki, Ionospheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array, *J. Geophys. Res.*, 115, A09314, doi:10.1029/2010JA015531, 2010.
- Takeuchi, A., B.W.S. Lau, and F. Freund, Current and surface potential induced by stress-activated positive holes in igneous rocks, *Phys. Chem. Earth*, 31, 240-247, 2006.
- Tributsch, H., Do aerosol anomalies precede earthquakes?, *Nature*, 276, 606-608, 1978.