

## 解説：特集

計測・通信技術を生かしたポスト 3.11 の災害対策

## GNSS データに地震前兆を探す

日置 幸介\*

\*北海道大学大学院理学研究院自然史科学部門 北海道札幌市北区北十  
条西 8  
\* Graduate school of Science, Hokkaido University, N10 W6, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, Japan  
\* E-mail: heki@mail.sci.hokudai.ac.jp

キーワード：衛星測システム (GNSS), GPS, 電離圏 (ionosphere), 地震前兆 (earthquake precursor), 東北沖地震 (Tohoku-oki earthquake).  
JL 0006/14/5306-0001 ©2014 SICE

## 1. はじめに

長野市松代の象山記念館に、「地震予知器」が収蔵されている。1855 年の安政江戸地震の直前に永久磁石が磁力を失った（磁石に付いていた釘がぼろぼろと落ちた）話を聞いた佐久間象山が考案したものとのことだ<sup>1)</sup>。トリブッチ<sup>2)</sup>は、大気中の帯電エアロゾルによって磁石と釘が同じ極性に帯電した結果、それらの間の静電的な反発で見かけ上磁石が磁力を失ったように見えたのだらうと解釈している。さらに彼は電荷の極性は正であったらうと推察している。1989 年にサンフランシスコの近くで発生したロマ・プリータ地震の直前に ULF 帯で異常な電磁波放射があったらしい<sup>3)</sup>。現在の米国の地球物理学者の多くが地震前兆としてまっさきに思い浮かべるのがこの事例である。地震が電磁気的な前兆を伴った事例は、洋の東西を問わず多く存在する。昨今の日本では、地震に先立って VLF 帯<sup>4)</sup>や VHF 帯<sup>5)</sup>で電波伝搬異常が生じるかもしれないことが、比較的良く知られている。

2011 年 3 月 11 日の 05:46 UT（日本標準時では 14:46）に発生した東北地方太平洋沖地震（以後東北沖地震と呼ぶ）は、モーメントマグニチュード ( $M_w$ ) 9.0 の巨大地震である。太平洋プレートは日本海溝から東北日本の下に沈み込んでいる。そのプレート境界が、長さ約 450 km、幅約 200 km にわたって数十メートル滑ったのが東北沖地震である。つくばに本部を置く国土地理院が運用する GEONET (GNSS Earth Observation Network) は、日本列島に敷き詰められた約 1200 点の全地球衛星測位システム (Global Navigation Satellite System, GNSS) の連続観測点から成る。GEONET は、1990 年代半ば以降日本列島の地殻変動を観測しており、東北沖地震に伴う地殻変動も顕著に捉えられた<sup>6)</sup>。米国の GPS (Global Positioning System) は、最も古くから使われ良く知られている GNSS である。昨今では、GPS に加えてロシア、欧州連合、中国が独自の GNSS を運用し始めており、わが国でも準天頂衛星（みちびき）が打ち上げられた。まさに世はマルチ GNSS 時代を迎えているが、本研究で利用した GNSS は主に GPS であるので、以後簡単のため GPS の語を用いる。

地球大気のとっぺんにあたる電離圏（電離層とも呼ばれる）には太陽放射によって中性大気から弾き出された電子

が漂っており、日本上空では高度 300 km 付近（F 領域と呼ばれる）で最もその密度が高くなっている。高度約 2 万 km の GPS 衛星から送信されたマイクロ波は、地面に到着する前に電離圏を通過するが、その際にわずかに時間遅れ（電離圏遅延）が生じる。この遅延はマイクロ波の周波数の自乗に反比例するので、異なる周波数のマイクロ波（GPS 衛星の場合、1.5 GHz と 1.2 GHz）の遅延の差から、衛星と受信機を結ぶ線上にある電子の総数（Total Electron Content, 以後 TEC と呼ぶ）を知ることができる。本稿では、GPS 網の観測が見出した、巨大地震直前に震源上空で発生する TEC 異常<sup>7), 8)</sup> について解説する。

## 2. 2011 年東北沖地震前後の TEC 変動

ネットで公開されている GEONET のデータから、2011 年東北沖地震前後の TEC 変化を調べてみた。図 1 は、地震

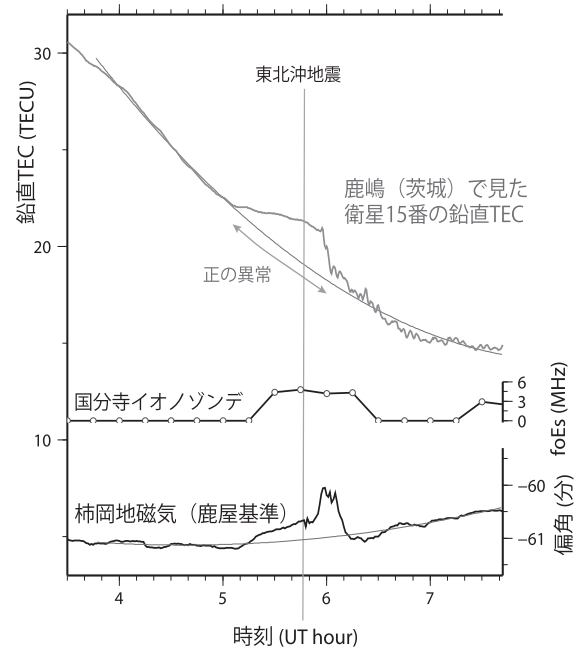


図 1 茨城県の鹿嶋局から 15 番の GPS 衛星を見て得られた TEC 時系列（鉛直方向に換算）を、国分寺のイオノゾンデによる Es 層臨界周波数 (foEs), および柿岡地磁気観測所の偏角（九州の鹿屋での値からの差）の変化と比較したもの。これらは同時に変化しており、共通の原因の存在を示唆する。

を含む約4時間の間の、茨城県鹿嶋局からGPS15番衛星を見た時のTECの変動を描いたものである。なお、GPSで直接測れるのは視線に沿ったTECであり、地平線に近い衛星では電波が電離圏を斜めに貫くため、TECが見かけ上大きくなる。図1は、そのような見かけの変化を補正して、鉛直方向のTECに換算してある。

図1に示す時間帯は日本標準時で午後0:30から午後4:40に相当する(地震発生は午後2:46)、この時刻の太陽は高度を徐々に下げつつあり、それによってTECもゆっくり減少する。そういった全体のトレンドに加えて、地震の約40分前に顕著な正の異常が始まっている。また地震の約10分後に短周期の乱れが見えるが、それらは地表から上空に伝搬した音波(大気中を上方に伝わった地震波)によって電離圏が揺さぶられたために生じたものである。その揺れが治まった頃にTECの正異常も消えている。揺さぶられた電離圏のTECが減少する(この場合はもとに戻る)仕組みはある程度解明されているが<sup>9)</sup>、ここで注目するのは地震40分前に始まった正の異常である。これは地震の前兆なのだろうか。

図1には東京都国分寺市にある情報通信研究機構(NICT)のイオノゾンデで測られた、高度約100km(電離圏E領域)の臨界周波数( $f_oE_s$ )と、茨城県にある気象庁柿岡地磁気観測所における地磁気偏角の時系列も示している。 $f_oE_s$ の上昇は下部電離圏での電子密度の上昇を示しており、地磁気の変化は電流(電荷の移動)の発生を示している。これらの変化は同期しており、何らかの共通の原因によることが示唆される。

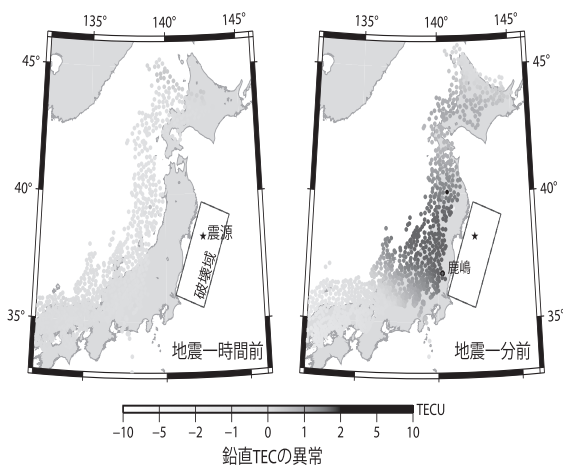


図2 GEONET観測局からGPS15番衛星を見て観測されたTECの異常を、局と衛星を結ぶ視線が高度300kmの層を貫く位置に、濃淡でプロットしたもの。2011年東北沖地震の1時間前(04:46 UT)と1分前(05:45 UT)の様子をそれぞれ左と右で比較する。四角は東北沖地震の断層を示す。図1で示した鹿嶋局からこの衛星を見て得られたTECは、実際には福島県上空の電離圏の状態を反映していることがわかる。1時間前には存在しなかった正の異常が1分前には顕著に現れている。

図1で示した地震前のTEC異常は、東北沖地震の震源域から離れるに従って小さくなる。地震の1時間前と1分前における、さまざまな観測点におけるTEC異常の分布を、濃淡で図2に示す。正の異常は最大で約2.3TECU(1TECUは底面積 $1\text{m}^2$ の円柱に電子が $10^{16}$ 個あることを示す)で、この時刻の全電子数の1割弱に相当する。地震の1時間前には表われていなかったTEC正異常が、地震直前には顕著に現れている。またその地理的分布は、2011年東北沖地震の断層に重なる。図2は白黒なので良くわからないが、震源域から遠く離れた西南日本では負のTEC異常が現れており、異常が電子の「純増」ではなく「移動」によることを示唆する。ほかの衛星を用いて描いた図や詳しい説明は、Heki<sup>7)</sup>やHeki & Enomoto<sup>8)</sup>などの専門雑誌に掲載された論文を参照されたい。

### 3. ほかの大地震との比較

TECは地震がなくても太陽活動の影響でしばしば上昇する。たとえば太陽表面でのフレア発生に伴って紫外線の放射が増えれば、電離が促進されて電離圏の電子数が急激に増える。ただしこの場合昼半球全体で電子が増え、震源上空のTECだけが上がることはない。電離圏E領域の電子が突然増える現象(スポラディックE)もあるが、その場合電子密度が増える領域は図2右の異常よりずっと小さく、不規則なパッチ状を示す<sup>10)</sup>。

太陽から磁場を伴った風が吹き付けることによって磁気嵐が生じる。その時極域ではオーロラが輝き、そこで生まれた巨大な波(内部重力波)がしばしば日本のような中緯度地域まで移動してきて、電子数の濃淡をつくる(大規模移動性電離圏擾乱)。2011年東北沖地震はたまたま磁気嵐の最中に発生しており、このような「宇宙天気」によって地震と関係ない擾乱が発生していた可能性は否定できない。

東北沖地震の直前に生じたTEC異常は、宇宙天気による偶然的産物なのだろうか。この疑問に答えるには、ほかの巨大地震の前にも同様の現象がみられたかどうかを調べるのが早い。そこでまず、2010年2月に発生したチリ地震(マウレ地震)前後のGPSデータを入手し、東北沖地震の時と同様な解析を行ってみた。この地震は $M_w$ 8.8の巨大地震であり、またチリにはある程度GPS受信機が密に展開されている。その結果、東北沖地震よりやや小さい正のTEC異常が地震の約40分前に始まり、音波によって電離圏が揺れ始めるまで継続していたことが確認された(図3)。なおこの地震の前後には磁気嵐等は発生していない。

インドネシアのスマトラ島の西側では、今世紀に入ってから $M_w$ 8.5を超える大地震が4回発生している。最大のもは津波で多大な犠牲者を出した2004年12月のスマトラ・アンダマン地震( $M_w$ 9.2)である。その翌2005年3月にやや南でニアス地震( $M_w$ 8.6)が、2007年9月にスマトラ島南部でブンクル地震( $M_w$ 8.5)が、また2012年4月

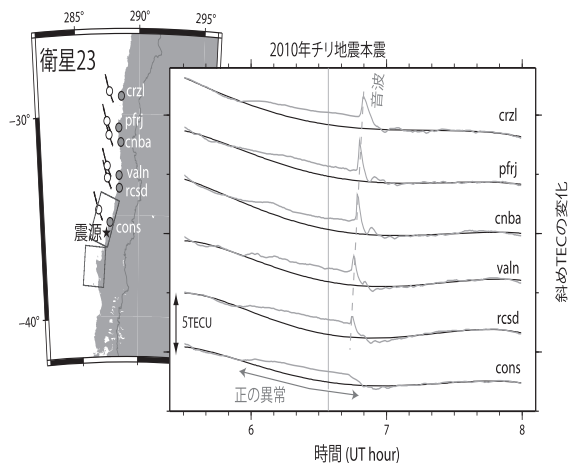


図3 2010年2月のチリ地震前後に23番のGPS衛星を観測して得られたTECの時系列。地震の約40分前から東北沖地震と同様な正の異常が見える。黒丸で示すGPS局からこの衛星を見ると、黒い線で示す軌跡あたりの電離圏を観測していることになる(白丸は地震時に見ていた電離圏の位置)。地震約10分後の鋭い正のピークは、地殻上下動に励起された音波が、電離圏F領域に達して起こした擾乱である。

にはスマトラ北部沖の海洋プレート内部で観測史上最大の横ずれ断層の地震 ( $M_w$ 8.6) が発生した。

それらの地震の前後のTEC変化を、東北沖地震と比べてみた。2004年スマトラ地震発生当時はGPS観測局が少なく情報は断片的だが、断層すべりが最も大きかった部分の上空で、どの地震よりも大きなTEC正異常が約1時間半前から見られる。2005年ニアス地震では、地震が発生した時間帯にプラズマバブルの活動(日没後の低緯度電離圏でプラズマの不安定によって生じる泡状の不均一)が激しく、残念ながら意味のあるデータが取得できなかった。一方2007年ブンクル地震と2012年スマトラ北部沖地震 ( $M_w$ 8.2の最大余震を含む)では、典型的な地震直前のTEC正異常が見られた。図4はこれらの巨大地震直前のTEC変化データを、適当な地上局とGPS衛星の組み合わせを選んで、縦軸と横軸を共通にとって比較したものである。この中で最大地震である2004年スマトラ・アンダマン地震の前兆が例外的に大きいのを別にする、ほかはすべて地震約40分前に正の異常が始まる特徴的な変化を示す。これらすべての原因を宇宙天気に求めることは現実的とは思えない。

つぎにM8クラスの地震に目を転じる。1993年にGPS連続観測網が整備され始めてから起こった最大の地震は東北沖地震だが、それまでは1994年北海道東方沖地震 ( $M_w$ 8.2) が最大であった。この地震の前には弱いTEC正異常が見られる。一方2006年千島地震 ( $M_w$ 8.2) や2003年十勝沖地震 ( $M_w$ 8.0)では、地震前のTEC異常は確認できなかった。本現象はM8台でも大き目の地震でようやく見える前兆なのだろう。なお2008年四川地震(中国)や2010年ハ

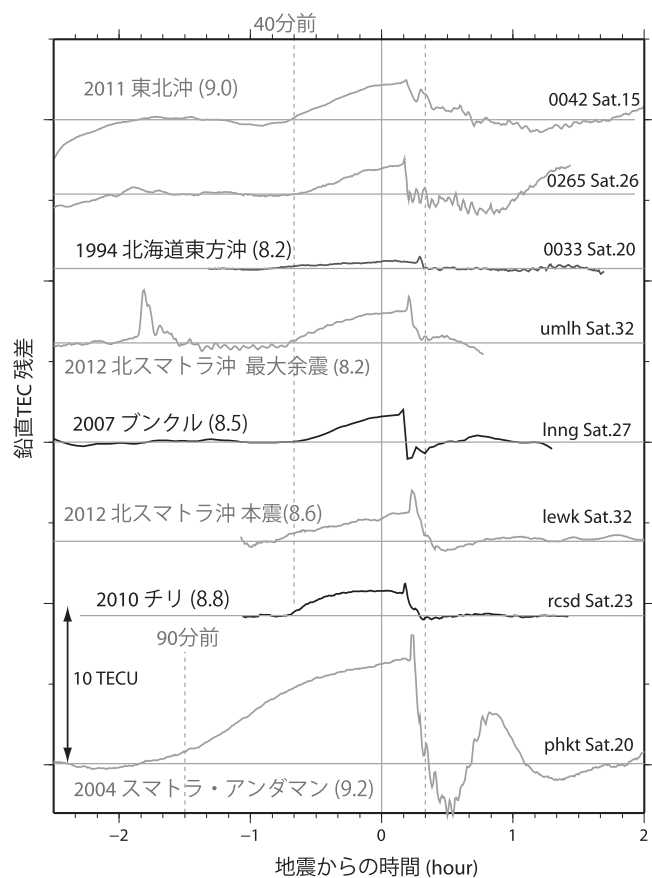


図4 さまざまな地震前後のTEC異常を、モデル曲線からのずれ(鉛直方向に換算)として比較したもの。モデル曲線は、地震前40分から地震後20分までの1時間を除外した部分の鉛直TECの時間変化を、時間の1-3次の多項式で近似して求めた。一番上の二例が東北沖地震で、あとは北海道東方沖地震からスマトラ・アンダマン地震まで、括弧内に示す  $M_w$  が小さいものから順に並べた。GPS局名と衛星番号が右端に与えられている。北スマトラ地震の最大余震のデータで、地震約2時間前に見えている変動は本震で生じた音波による擾乱であり前兆ではない。

イチ地震は、多くの被害者を出した地震だが、いずれもM7台であり本研究の対象ではない。なお、2014年4月1日にチリ北部で発生した  $M_w$ 8.2の地震で、その20-30分前からTEC上昇が見られたことが米国のGPS大学連合のウェブで速報されている<sup>11)</sup>。

#### 4. モデル

図1のfoEsデータは、地震前のTEC異常を担うのは電離圏の比較的低い(高度100km前後)E領域であることを示唆する。DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) 衛星は、地震に先立つ電磁場の異常を検出するためにフランスから打ち上げられた衛星だ。多くの地震の前のデータを統計的に解析した結果、地震直前(地震発生0-4時間前)に電離圏下端の高度が有意に下がることがわかった<sup>12)</sup>。こ



の結果はわれわれが TEC で見出したものとはほぼ調和的である。

地震直前に上空で電子が増える理由はまだわからないが、地表近傍に正電荷が溜まることで説明できるかもしれない。正電荷を供給するメカニズムとしては、圧縮された火成岩から正孔が拡散する現象が室内実験で知られる<sup>13)</sup>が、実際の地震前にそのような現象が生じたことを野外で直接観測した例はない。Kuo, et al.<sup>14)</sup>は、地表の電荷によって電離圏電子が再配置される様子を数値的に示した。また Enomoto<sup>15)</sup>は、地震の準備過程で深部から断層に沿って上昇してきたガスによって生じた電流が、岩石と海水を含む閉回路を流れることによって、地磁気や TEC の異常が生じるモデルを提唱している。いずれ原因を特定するには、磁場や電場のセンサーを備えた観測局を密に展開する必要があるのかもしれない。

## 5. おわりに

これまでの地震前兆報告の多くは普遍性に乏しく、かつ追試が容易でなかった。しかし GPS データの多くはオンラインで入手でき、それを用いた TEC の解析はそれほど難しくなく、筆者のホームページでは RINEX 形式の GPS 生データから衛星ごとの TEC 時系列の情報を抽出する簡単なプログラムを公開している<sup>16)</sup>。

地震直前の TEC 異常の物理的過程が解明され、直前予知に有用であるということになれば、TEC の分布と変化が常時監視される時代が来るかもしれない。データ収集には技術的問題はないが、ゆっくりと始まる地震直前の TEC 異常を、多くの場合移動性を示す宇宙天気の影響による擾乱と識別するソフトウェア的な課題は残るだろう。

兵庫県南部地震以来、地震学者は直前予知に次第に興味を失い<sup>17)</sup>、東日本大震災後は、前兆の研究はタブーとなった観さえある。少し昔を思い起こせば、断片的なデータしかなく、大きな地震も少なかった 1970-1980 年代には地震予知研究は今より盛んだった。1990 年代に入り、以前は夢のようだった高精度、高時空間分解能の観測網が日本列島に整備され、その中で巨大な地震が何度も発生した。その結果、地震前兆の研究が沈滞化したという事実、この分野の研究の難しさがよく表われていると思う。本研究がこ

の沈滞に一石を投じる契機となることを願っている。

(2014 年 1 月 24 日受付)

## 参考文献

- 1) 榎本祐嗣：大地球面の異常帯電：大地震の前兆？—江戸のエレキテルと地震窮理の光芒—, 表面科学, **23**, 56 (2002)
- 2) H. トリブッチ (渡辺正訳)：動物は地震を予知する, 朝日選書, **277**, 朝日新聞社 (1985)
- 3) A.C. Fraser-Smith, A. Bernardi, P.R. McGill, M.E. Ladd, R.A. Helliwell, and O. G. Villard, Jr.: Geophys. Res. Lett., **17**, 1465 (1990)
- 4) O. A. Molchanov and M. Hayakawa: J. Geophys. Res., **103**, 17489 (1998)
- 5) T. Moriya, T. Mogi, and M. Takada: Geophys. J. Int., **180**, 858 (2010)
- 6) S. Ozawa, T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire: Nature, **475**, 373 (2011)
- 7) K. Heki: Geophys. Res. Lett. **38**, L17312 (2011)
- 8) K. Heki and Y. Enomoto: J. Geophys. Res., **118**, 6618 (2013)
- 9) H. Shinagawa, et al.: Geophys. Res. Lett., **19**, 5009 (2013)
- 10) J. Maeda and K. Heki: Radio Sci., **49**, 1 (2014)
- 11) UNAVCO: <http://www.unavco.org/highlights/2014/iquique.html>
- 12) D. Píša, et al.: J. Geophys. Res., **118**, 5286 (2013)
- 13) F. Freund: J. Geophys. Res., **105**, 11001 (2000)
- 14) C.L. Kuo, J.D. Huba, G. Joyce, and L.C. Lee: J. Geophys. Res., **116**, A10317 (2011)
- 15) Y. Enomoto: Geophys. J. Int., **191**, 1210 (2012)
- 16) 日置幸介ほか：GPS-TEC 法による地球物理学, 測地学会誌, **56**, 125 (2011)
- 17) 上田誠也：どうする！日本の地震予知, 中央公論 4 月号, 196 (2011)

## [著者紹介]

日置 幸介 君



1957 年に高知県の四万十川上流で生まれる。東京大学理学部地球物理学科卒業、理学博士。専門は測地学。郵政省電波研究所、英グラム大学、国立天文台を経て 2004 年より北海道大学理学研究院教授。