

巨大地震の発生と電離圏全電子数異常の関係

野沢 福太郎

石川県立金沢泉丘高等学校

要旨

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)は、東日本大震災を引き起こし、西南日本では今後数十年内に南海トラフ巨大地震が発生し、西日本大震災が引き起こされると危惧されている。

こういった巨大地震の発生予測は、現状では困難とされているが、日置⁽¹⁾により、東北地方太平洋沖地震発生40分前に電離層全電子数(TEC)異常が生じたと報告されている。TEC異常は様々な要因で発生するため、地震発生前のTEC異常については地震発生との関連について、依然議論が続いている。

そこで、本研究では、日置⁽¹⁾が指摘したGNSS観測点と衛星の一つのペアについて、地震前後の20日間、および2011年を通して各月の11日のTEC変動を調べた。結果として、地震発生前を除いて、同様なTEC異常は観測されなかった。

しかしながら、観測点・衛星ペア数や観測期間が限られているため、巨大地震発生とTEC異常の関連について、確定的なことは言えず、今後更に検討すべき課題と考えられる。

重要語句：TEC異常、電離層、GNSS、巨大地震

序論

2011年3月11日5時46分(UT)に発生した、東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0)は、強い揺れに加えて巨大津波を発生させ、東北地方から関東地方に及ぶ東日本に甚大な被害の爪痕を残した東日本大震災をもたらした。また、西南日本では、今後数十年内に南海トラフ巨大地震の発生が危惧されており、東日本大震災と同じくらい、もしくはそれ以上の被害をもたらす西日本大震災を引き起こすと懸念されている。

こういった巨大地震の発生予測ができれば、多くの人命や大災害の軽減に役立つと期待されるが、地震発生予測は現在では困難であるといわれている。こういった状況で、日置⁽¹⁾は、東北地方太平洋沖地震発生時に加え、地震発生40分前から、電離層全電子数(TEC: Total Electron Content)が増加する現象(TEC異常)が見られたと報告

し、世界で発生した巨大地震でも同様な現象が見られたと報告している。

実際、電離層TEC異常は様々な要因で生じることが知られており、地震時および地震後の電離層擾乱については、物理シミュレーション等が行われ、地震発生に伴う現象であると物理的に理解されている。しかしながら、地震発生前のTEC異常については、関連するとしてもその物理的メカニズムが未解明で、かつ本当に地震発生と関係があるのかどうかという論争が依然続いている。

そこで、本研究では、TEC異常の物理メカニズムには立ち入らず、様々な要因で生じるとされるTEC異常がどのように観測されているか、日置⁽¹⁾により報告されたGNSS観測点と衛星のひとつのペアについて、より多くのデータ、すなわち東北地震発生前後20日間、および2011年間の毎月11日のTEC変動について調べ、TEC異常が生じているかどうか調査した。

方法

GNSS(Global Navigation Satellite System: 全地球航法衛星システム)衛星からの電波信号を受信して、観測点の位置を高精度に決定することができる。カーナビゲーションでおなじみのシステムであるが、国土地理院による1,200点に及ぶGEONET(GNSS Earth Observation Network System)観測網により、日々変動する日本列島の地殻変動監視が行われている。

図1に示すように、GNSS衛星からの電波は、電離層および対流圏を伝播するとき、屈折率すなわち伝播速度の変化により、遅延が生じる。電離層での伝播速度は、電波の周波数により異なることを利用して、2周波の電波信号を受信することにより、測位における電離層遅延の影響を軽減している。後述するように、逆に2周波電波の位相から電離層を横切る波線に沿っての全電子数(斜めTEC)を推定できる。日置⁽¹⁾はGNSS衛星からの2周波の電波信号の位相を用いることにより、電離層TEC異常を見出している。

電離圏に存在する電子数をGNSS衛星からの搬送波によって求める具体的な方法について、以下に述べる。衛星から送られてくるマイクロ波には以下のL1, L2バンド

内容に関する連絡先：

平原 和朗(京都大学理学研究科)

hirahara.kazuro.6r@kyoto-u.ac.jp

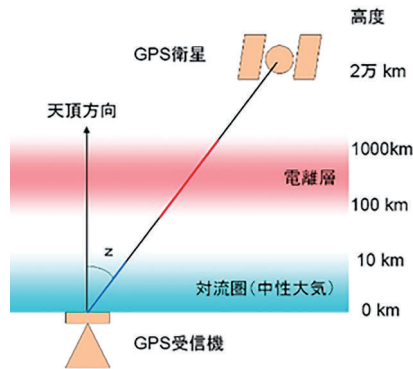


図1. GPS衛星（GNSS衛星のうち、米国が打ち上げた衛星）と電離層・対流圏・観測点受信機の関係（測地学会⁽²⁾）

（周波数： $f_1 = 1575.42$ MHz, $f_2 = 1227.6$ MHz, 光速： $c = 299,792,458$ m/秒, 波長： $\lambda_1 = c/f_1$, $\lambda_2 = c/f_2$ ）を持つ搬送波があり、それぞれに測位用のコードが乗せられている。

本研究では、斎藤准教授から提供されたRINEX（Receiver and software INdependent EXchange Format）データから、コードではなく、2周波の搬送波位相から求められた衛星と観測点間の距離 X_1 , X_2 を用いた。疑似距離には、真の距離に加え、対流圏遅延、電離層遅延、整数値バイアス、衛星および受信機固有のバイアスの影響が含まれている。なお、データは30秒サンプリングで得られている。

このうち、電離層遅延は、周波数に依存して、 $-1/f_1^2$ および $-1/f_2^2$ の形をとり、定数 I は

$$I = 40.3T \quad (1)$$

と表せる。ここで T は、単位面積当たりの伝播経路に沿って積分した電子密度、すなわちSlant（斜め）TECであり、

$$T = \int N_e(l)dl \quad (2)$$

で求めることが出来る（ N_e ：電子数密度、 l ：電離層媒質中における電波の伝搬経路長）。従って T の単位は el/m^3 に距離 m を掛けた el/m^2 となる。異なる周波数を持つ搬送波位相の疑似距離 X_1 と X_2 の差をすることにより、周波数により異なる電離層遅延やバイアスが残り、 T （斜めTEC）は以下の式のように表せる。

$$T = A(X_1 - X_2) - AC \quad (3)$$

ここで、

$$A = (1/40.3)(1/f_2^2 - 1/f_1^2)^{-1} \quad (4)$$

である。また、式(3)の右辺第2項の C は整数値バイアスや、衛星や受信機固有のバイアスを含んだ量で、衛星

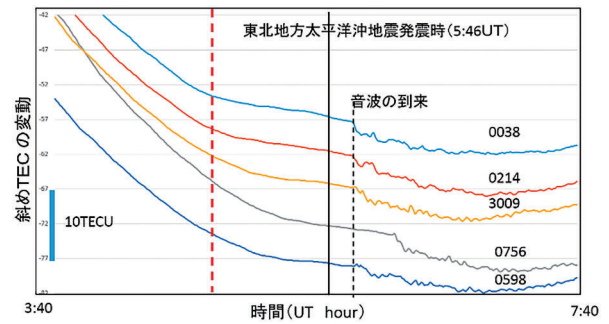


図2. GEONETの5観測点における衛星G15を観測して得られた東北地方太平洋沖地震発生前後のTEC変動

横軸は、時間（3:40～7:40 UT）を示し、縦軸は、TECの時間変動を示す。なお大きさを示すTECU（TEC unit）は、 10^{16} el/m^2 を表す。日置⁽¹⁾により指摘されている地震前のTECの正の異常が始まる時刻に赤点線を、東北地方太平洋沖地震発震時（5:46 UT）を黒線、また地震による音波の到来時刻を黒点線で示している。

（音波の到着は、地震波の発生による地表面又は海面の揺れによって対流圏に音波が発生し、その波が電離層まで到着することによって、電離層攪乱を起こしていることによって観測されている）

と観測点を固定すると観測されている時間中は一定と見なされ、本研究のように T の絶対値ではなく、時間変動を追う場合には影響しない。

TEC異常は、2011年東北地方太平洋沖地震の発生40分前から発生したと日置⁽¹⁾により報告されている。それによると国土地理院GEONETで観測されたRINEXデータを用いて、2011年東北地方太平洋沖地震前後のTEC変化を調べてみると、数点の観測と衛星G15ペアにおいて、TEC異常変化を確認している。

本研究でも、本震発時刻前後で、東北から関東にかけたGEONETの5観測点（0038, 0214, 3009, 0756, 0596）と衛星G15ペアで観測された、斜めTECの時間変動を式(3)を用いて計算しEXCELで解析してみた。

図2にその結果を示す。まず、TEC変動は下に凸のU時曲線の形を取ることが分る。これは図1に示すように、GNSS衛星で、仰角の低い衛星では、電離層を斜めに貫き電波の遅延が発生する。GNSS衛星は地平線上から昇っていき、沈んでいくように動くため斜めTECの変化もU字型に変化する。図1に示す天頂角を z とすると、 $1/\cos(z)$ の依存性を示す。その補正をした研究も見られるが、本研究ではできるだけ生に近い形でデータを見るため、補正はしていない。

図2には、地震の発震時刻（5:46 UT）に線を引いてある。また、地震発生により地表面および海面が変動し、それにより大気中に励起された音波が、電離層に到達した時、TEC変動が生じる。図2には、こういって生じた地震の発生に伴う音波の到来時刻にも線を引いている。また、日置⁽¹⁾が指摘している地震発生前40分程度の時刻に赤点線を入れてある。確かに、赤点線あたりで、TEC変動のトレンドが正方向にずれているのが確認できる。地震に伴う音波の到来後、TEC変動は振動し次第に小さ

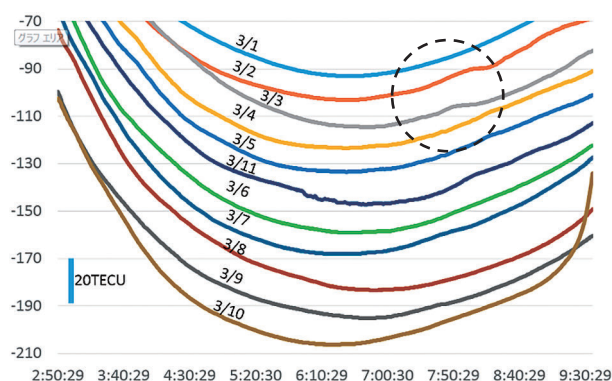


図3. 観測点0038とG15衛星ペアでのTEC変動(3月1日～3月11日)
3月2日と3日における黒点線円の説明は本文参照のこと。

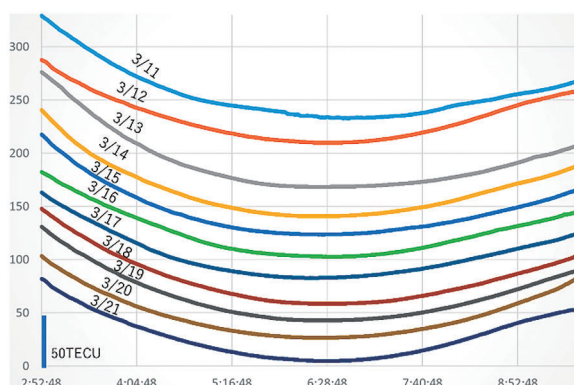


図4. 観測点0038とG15衛星ペアでのTEC変動(3月11日～3月21日)

くなっていき、地震時電離層攪乱による電離圏の揺れが収まった頃には消えていることも見て取れる。

本研究では、こういったTEC異常が他の日で生じているかに焦点を当て、地震直前にTEC異常が観測されたGEONET観測点0038と衛星G15ペアについて、地震発生前後20日間に加えて、2011年の各月の11日について、TEC変動を調べた。

結果

地震前の10日間、後の10日間、および2011年の各月11日における、TEC変動を重ねて図にしたものを、それぞれ図3、図4、図5に示す。

衛星G15はGNSSのうち米国の打ち上げたGPS(Global Positioning System)衛星で、周回周期は12時間58分、1日では23時間56分となり、1日に4分ほど衛星配置が変化する。3月11日には、観測点0038では衛星G15は、2:30から9:36UTまで観測されていた。そこで1日に4分ほどの補正をして3月11日に見られた衛星配置になるように、すなわちほぼ同じTEC変動曲線になるように時間軸を調整して、重ねてプロットしている。

上記の3枚の図は図2に比べて、長時間にわたってTEC変動をプロットしているため、TECの変動量が大きく細かなTEC変動がややわかりにくい、これらの図でもま

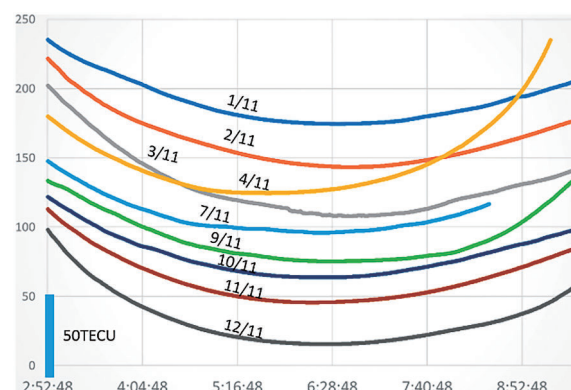


図5. 観測点0038とG15衛星ペアでのTEC変動(2011年の1月11日から12月11日の毎月11日の結果を示している。なお、グラフに挿入されていない5/11、6/11、8/11は、データ量が少なかった為、欠測としている。)

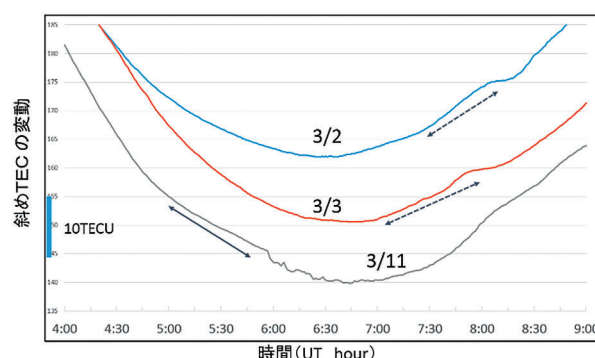


図6. 図4の中で3月2日、3日および11日の4:00～9:00UTの部分を拡大して示したTEC変動図

3月11日の地震前のTEC異常の部分に実線矢印、2日・3日でよく似たTEC変動を示す部分に点線矢印を付けてある。

ず3月11日に、TEC異常が発生していることがわかる。また、3月11日には、地震発生前から、TECの正異常が発生していることがわかる。他の日のTEC変動曲線と比べ、3月11日のみ途中でグラフの傾きが緩やかになっているのが、それを示している。

尚、毎月11日についての結果も記載しているが、これは3月のみでなく年間にわたるTEC変動を検証するためには、3月11日に東北地方太平洋沖地震が発生していることもあり、他の月の11日との変化の差を見るのが適していると考えたためである。一部グラフの無い月があるが、それに関しては、その月のデータ量が余りにも少なく、グラフを作成するのに満たない為、欠測としている。

考察

以上の結果より、3月11日の地震発生日のTEC変動データからは、TEC異常と巨大地震の発生には、関係性があることが見て取れた。そして、ほかの地震時ははさんだ20日間、および2011年の毎月11日のデータから、TEC変動に異常は見られなかったことから、TEC異常が、地震の直前に発生するものである可能性がある、と確認できたと言える。

ただ、例えば、図3の3月2日および3月3日のTEC変動曲線で、黒点線円で囲んだあたりには3月11日に生じている地震前TEC異常と似た緩やかな変動が見られる。この3月2日、3日と地震時の3月11日のTEC変動を拡大して表示したものを図6に示す。3月11日の実線矢印部分が地震前TEC異常で、3月2日および3日で似ていると思われるTEC変動部分に点線の矢印をつけてある。図2で述べたように、3月11日では地震の前40分程度からTECの正異常が緩やかに始まり、音波の到来時あたりから振動しながらやや急激に減少している。3月2日および3日も同様に緩やかにTECの正異常が進行し、やや急に減少しているが、こちらは振動していないので明らかに地震に伴うものではないことがわかる。

上記のように、本研究では、定性的にTEC変動を目で確認しているだけである。変動の開始時刻の精度良い決定や、地震前TEC異常と他の要因で生じるTEC変動の相違を区別するためにも、TEC変動をより定量的に解析する必要がある。また観測点・衛星ペアおよび解析日も限られたものであり、TEC異常が巨大地震前に発生するかについては、さらに多くのデータを系統的に解析する必要があると思える。

結論

結果・考察より、日置⁽¹⁾の提唱している、巨大地震の発生前においてTEC異常が発生していることが確認できた。ただ、限られたサンプルの中でも、地震発生と関係しない、地震前TEC異常と似たTEC変動が生じていることも確かである。従って、観測点・衛星のペアや調べた日数のサンプルが少ないことや定性的な解析であることから、本研究のみでは、地震前のTEC変動と地震発生の関係が確実であると断定できないとも言える。

よって、TEC異常と巨大地震の発生には関係性は見られるが、その関係性はどこまで信頼のおけるものなのかは、未だ結論できず、今後データを増やして更に検討する必要があると思える。

謝辞

今回の研究は多くの方のご協力があったからこそ行えました。担当の理学部地球惑星科学科の平原教授、そして、ご協力いただいた風間助教、宮崎准教授、大学院生の我如古さん、大畑さん、横井さん、皆様本当に有難うございました。

また、TEC変動を求める際に用いるRINEXデータを提供していただいた斎藤准教授に感謝いたします。更に、GNSSデータからTECを求める手法については、地球物

理学教室の津川さんが書かれた解析ノート「GPSによるTECの算出方法」を参考にさせていただきました。有難うございました。

参考文献

1. 日置幸介. 巨大地震前に増える電離圏の電子. 地震ジャーナル, 53. (2012).
2. 測地学会. GPS気象学 GPS測量による大気遅延の処理, 測地学webテキスト (http://www.geod.jpn.org/web-text/part3_2005/tsuji/tsuji-2.html)

Preseismic TEC anomaly and its relation to occurrence of large earthquakes

FUKUTARO NOZAWA

Ishikawa prefectural Izumiga-oka high school

Abstract

The 2011 Tohoku earthquake (M9.0) caused the great East Japan disaster. In southwest Japan, the Nankai earthquake is expected to occur in the next several decades to produce the great West Japan disaster. It is thought that the prediction of such large earthquakes is difficult at present. However, Heki⁽¹⁾ reported the existence of a pre-seismic TEC positive anomaly around 40 minutes prior to the occurrence of the 2011 Tohoku earthquake. Since the TEC anomaly is caused by several factors, a pre-seismic TEC anomaly and its relationship to the occurrence of great earthquakes have been discussed.

In this study, for the pair of GNSS station and the satellite where Heki reported the pre-seismic TEC anomaly, I analyzed TEC variations for 20 days before and after the Tohoku earthquake and on the 11th day of each month throughout 2011. As a result, I did not recognize any TEC anomalies, except on the day when the Tohoku earthquake occurred.

However, the limited number of GNSS stations and satellite pairs and the analyzed days prevented me from concluding the existence of pre-seismic TEC anomalies prior to great earthquakes. For confirmation, it would be necessary to investigate much more data for longer periods.

Key words: TEC anomaly, ionosphere, GNSS, great earthquake

Corresponding Researcher:

Kazuro Hirahara (hirahara.kazuro.6r@kyoto-u.ac.jp)

Graduate School of Science, Kyoto University