

内陸地震に先行する電離圏変動：
GPS による検証

**Ionospheric disturbances preceding inland earthquakes:
An examination with GPS**

北海道大学大学院 理学院 自然史科学専攻
地球惑星ダイナミクス講座 宇宙測地学研究室

菅原 守

Mamoru Sugawara

2010年2月9日

概要

全地球測位システム(GPS)を用いた電離圏全電子数(TEC)の計測は比較的手軽なため、電離圏のさまざまな擾乱現象の観測手法として広く利用されている。我が国では国土地理院のGPS稠密観測網(GEONET)が整備されており、地震時電離圏擾乱(CID)や移動性電離圏擾乱(TID)、火山噴火による擾乱をはじめ、排気ガスによる電子消失を利用した飛翔体の追跡や太陽フレアに対する応答など、GPS-TECは様々な現象の研究に応用されている。本研究では地震に先立って生じるとされるTECの変動について研究を行った。

ある時刻と場所におけるTECは二通りの方法で求められる。一つは全球電離圏モデル(Global Ionospheric Model, GIM)を用いる方法、もう一つが特定の地上GPS局の生データを直接解析する方法である。前者は世界中のGPS局のデータから数カ所の解析センターで作成され、ウェブで公開されている。Liu et al. (2009)は、GIMを解析して2008年5月12日の中国四川大地震(Mw:7.9)の4日前から6日前の3日間の午後、および地震3日前の夜にTECの異常な減少が生じたことを報告している。また1998年からMay.1から2008年April.30までの10年間に中国周辺で発生した35のM6以上の地震のGPS-TECを調べ、17のM6.3以上の地震で3~5日前に震源上空でTEC値が減少していたことを見出した。最近では地上GPS観測だけでなくCOSMIC衛星によるGPS掩蔽観測の結果から、電子密度の高度プロファイルを取得することが可能になっている。Liu et al. (2009)は、四川地震に先行したTEC減少が比較的高高度で発生していたことを報告している。

近年、日本では2008年岩手宮城内陸地震(Mw:7.1)をはじめ、2007年新潟県中越沖地震(Mw:6.6)、2004年新潟県中越地震(Mw:6.5)と、緻密GPS網が存在する日本列島の文字通り内陸部で比較的大きな地震がいくつか発生しており、電磁気的な前兆の有無の議論に好条件が揃っている。本研究ではこれらの地震の震源に近いGPS局の地震前後1か月のGPSデータを解析し、中国四川省の事例のような地震前の異常が存在するかどうかを検討した。同時にGIMを用いたTEC変化時系列も求めてGPSデータから直接求めたTECと比較した。その中で2007年中越沖地震では、過去に中国等で報告されたような地震に先行するTEC減少が比較的明確に見られた。2007年中越沖地震については、さらにCOSMIC衛星によるGPS掩蔽法で得られた地震前後の日本上空の電子密度の高度プロファイルを比較し、四川地震と同様に電子数の減少が高い高度で起こっていたことを確認した。

岩手宮城内陸地震は太陽活動度の低い時期かつ内陸浅部で発生した最大級の地震であり、地震に先行するTECの変動を観測するには絶好の機会であった。しかしTECでの前兆は一目でわかる明瞭なものではなく、GPSによるTECの監視は我が国の地震予知に必ずしも実用的ではないかもしれない。

目次

1	はじめに	3
1.1	地震電磁気現象	3
1.2	地震時電離圏変動	5
1.3	地震前電離圏変動	6
1.4	本研究の目的	10
2	GPS で電離層を見る手法	11
2.1	電離層	11
2.2	GPS	13
2.3	GPS 観測からの TEC の算出 (GPS-TEC)	15
2.4	GEONET	18
2.5	GIM	20
2.6	生データの解析と GIM の比較	22
2.7	GPS 掩蔽法	25
3	近年の内陸地震	27
3.1	岩手宮城内陸地震	27
3.2	新潟県中越地震	33
3.3	新潟県中越沖地震	37
4	考察	43
5	謝辞	45
6	参考文献	46

1 はじめに

1.1 地震電磁気現象

地震に先行する電磁気的な前兆現象は数多く報告されており、その物理学的なメカニズムや実際の地震予知に有効であるかどうか活発な議論がなされている。それらは観測方法によって、大きく以下の3つの方法に分けることができる(図1)。

(1) 地球内部で発生する電磁波(自然放射)を直接観測する方法

この方法は、地震の発生以前の段階で地殻内部から地震の前兆としての自然放射波が発生するとの考えに立脚している。周波数は直流から HF 帯まで幅広い範囲に渡っており、研究の歴史が最も長い。代表的なものにはギリシャのグループによって提唱された VAN 法がある。3人の発見者の名前、Varotsos、Alexopoulos、Nomicos から名づけられた。これは地面に2つの電極を埋め、その電圧の変化から地震の発生を予測するものであり、ギリシャでは実際に政府が認め実用化されている。日本では1995年の兵庫県南部地震のころより注目され試験的な観測が実施されたが、工場や電車などから漏れ出すノイズが多いことから実用は困難とされている(長尾ほか, 2006)。

他の周波数帯で電磁放射を直接観測した例では、1988年12月8日に西アジアのアルメニアで発生したスピタク地震(M6.9)における ULF 帯電磁放射を観測した例(Kopytenko et al., 1993)や、1989年10月18日に発生したカリフォルニア州のロマプリータ地震(M7.1)の前の観測例(Fraser-Smith et al., 1990)等がある。

(2) 電波の伝搬異常を捉える方法

(1)に比べ、この方法はより新しいものである。1980年代後半、地震に関連する大気圏や電離圏の異常を示すような観測結果がいくつか知られるようになった。大気圏や電離圏の異常を検出する手法として既存の電波の伝搬異常が使えるのではないかと考えられるようになった。この場合、具体的な電波の特性やそれらの伝播の特徴等は、発信源が既知であるから十分にわかっている。伝搬に影響を与える太陽フレアや雷の影響をノイズとして除去すれば、地震に関連した伝搬異常が見つかると考えられた。電離圏での異常は1.3で述べ、ここではより低い大気圏での異常を記述する。早稲田大学の藤原と東京学芸大学の鴨川らは FM 局電波の観測を水平偏波成分と鉛直偏波成分を同時に行い、電波異常伝搬が地震の5~2日前に発生していることを見出した。またその電波が散乱、反射する場所が電離圏ではなく、大気圏であることを示した(Fujiwara et al., 2004)。また北海道大学の森谷らは、北海道内に FM 局電波の受信点を設置し異常伝搬の観測を行い、その結果から震源が浅く、規模が大きいほど電波の異常が顕著になることを見出した(Moriya et al., 2010)。

(3) 人工衛星からの観測

この方法は、元々はロシアでの地球超高層のプラズマ波動伝搬研究のために打ち上げられた衛星観測の副産物から始まったものである。1988年にロシアなどの研究者

により地震に関連する電磁放射が衛星によって受信されたことが報告されている (Molchanov et al., 1993)。

最近では測位衛星である GPS (Global Positioning System) 衛星の二つのキャリア (L1, L2) の位相差から得られる全電子数 (TEC, Total Electron Content) に地震前兆を探す試みがある。GPS-TEC 法は日本国内や世界各地に数多く点在する測地目的の GPS 観測局を利用することができるのでコスト面でも有利である。

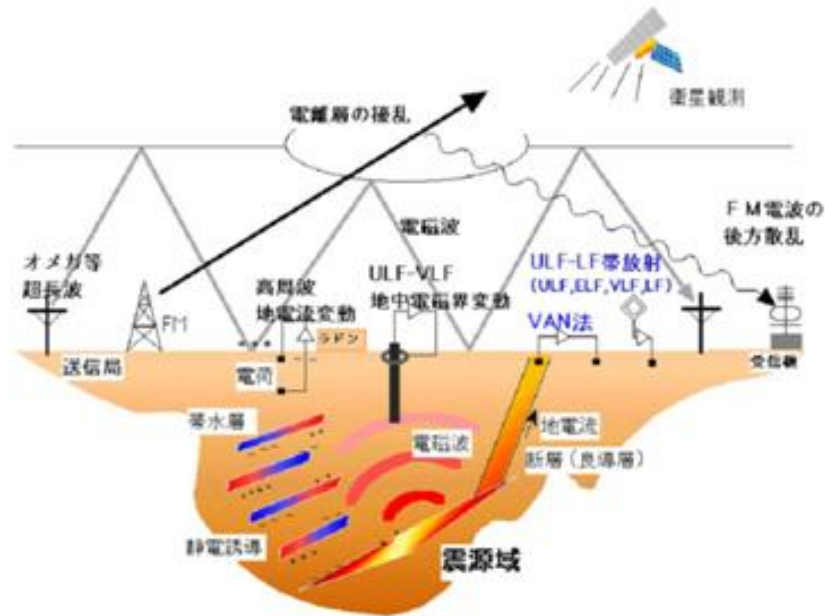


図 1. 様々な周波数帯での地震電磁気現象の観測方法 上田誠也「地震予知研究の歴史と現状」(学会会報 2007-IV No.865)

1.2 地震時電離圏変動

地震に関する電離圏の擾乱としては、地震前兆としての変動だけでなく、地震直後の変動も良く知られている。逆断層地震による地表の隆起で生じた空気の圧縮パルスが音波として屈折しつつ電離圏に達し、そこで電子の濃淡をつくるのが地震時電離圏擾乱(Coseismic Ionospheric Disturbance, CID)である。地震の後、音波が電子数密度の最も高い 300km 程度の高度に達するのに要する十分ほど遅れて生じ、電離圏における音速に相当する約 1 km/sec で水平に伝搬する。(Heki & Ping, 2005)。電離圏擾乱が観測された最も小さな地震は 2006 年 7 月 16 日中越沖地震 (Mw6.7) で、北陸から近畿にかけての地域の GPS 局から衛星を観測し、新潟県中越沖地震の震源(星印)の南の電離圏における擾乱の伝搬を追跡したところ、地震発生約十分後に現れた N 型の波形を持つ擾乱が南に伝搬していくことが確認された(図 2)。Heki et al. (2006)は最近発生した最も大きな地震である 2004 年 12 月 26 日のスマトラ・アンダマン地震 (Mw9.2)における CID を観測し、その結果から震源過程が拘束できることを示した。また Astafyeva and Heki (2009)は、最近発生した千島弧の様々なメカニズムの地震の CID の波形の比較から、CID の最初の変動の極性が地震の種類(地表が主に隆起する逆断層地震や沈降が主な正断層地震等)を反映することを見いだした。さらに Astafyeva et al. (2009)は、1994 年北海道東方沖地震の CID の解析から、音波の速度で伝搬する成分と表面波(レーリー波)の速度で伝搬する成分が分離してゆく様子を報告した。

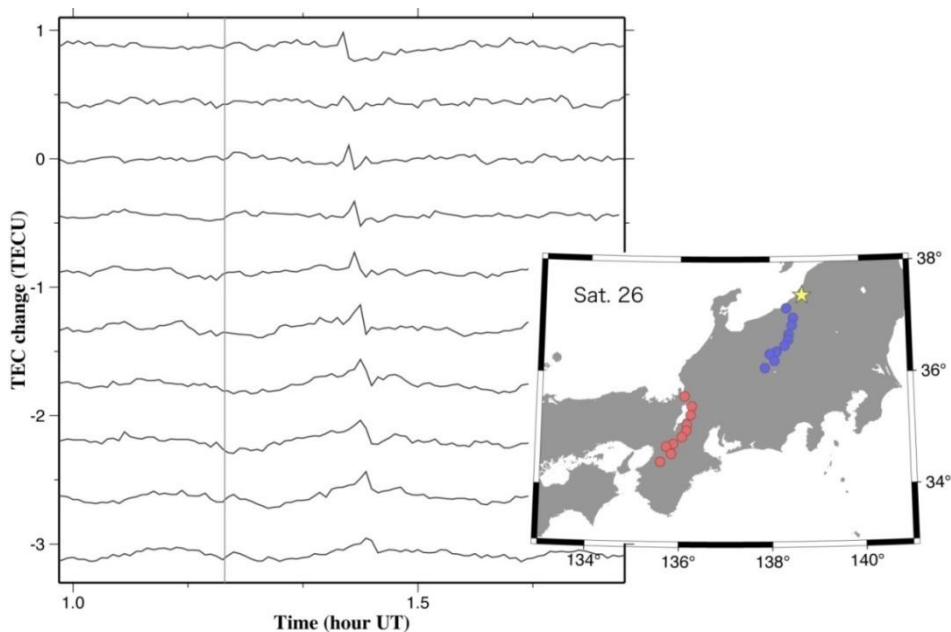


図 2. CID が観測された最も小さな地震

星印は新潟県中越沖地震の震源、赤丸は GPS 観測局、青丸は視線と電離圏の交点を地表に投影した点(Sub-ionospheric Point)を表す。地震発生約十分後に現れた N 型の波形を持つ擾乱が南に伝搬していく様子がわかる。

1.3 地震前電離圏変動

様々な周波数帯において地震に先行する電離圏擾乱が報告されている。

VLF/LF 帯における観測では 1995 年兵庫県南部地震での事例が有名である。電気通信大学の早川らは、VLF 局電波を解析したところ地震の数日前より位相最小を示す日出時間が早くなり、位相最小を示す日入の時間が遅くなることを見出した。この期間の地磁気活動は静穏であることから、電離圏下部に地震に先行した擾乱が発生していたと考えた(Hayakawa et al., 1996)。

VHF 帯における観測では、串田法が有名である。八ヶ岳南麓天文台の串田は VHF 帯放送電波を流星観測していたところ、普段は聞くことのできない FM 放送電波が地震前に受信されるという現象を発見した。1995 年兵庫県南部地震の 2 日前から顕著な異常が表れ、地震発生後に少しずつ通常の値に戻ったことを報告している(Kushida and Kushida, 2002)。

Liu et al. (2001) は台湾の GPS 連続観測局のデータから、1999 年 9 月 20 日に台湾で発生した集集地震 (Mw:7.7) の前日および 3-4 日前に電離圏電子数の日変化の振幅が急減したことを報告している。磁場が水平になる磁気赤道に東向きの電場が生じたときに、上向きのプラズマの流れが起こって赤道の両側に電子数の帯ができるのが電離圏の赤道異常である。集集地震の前兆は、本来台湾にある赤道異常の北側の部分が通常より南にずれることによって生じたとされる。また彼らは地震に先行する TEC の変動に関して東向きの電場が何らかの原因で弱くなったのが原因であると考えている。

Liu et al. (2009) によると、2008 年 5 月 12 日に中国四川大地震(Mw:7.9)の 4 日前から 6 日前の 3 日間の深夜に GIM から計算した震源上空の TEC 値に異常な減少があった(図 3)。その時刻とそれ前 1 ヶ月間の中央値(median)の差をプロットしてみると、震源上空およびその東側に減少域が広がっていたことがわかった(図 4)。さらに GPS 掩蔽観測による電子密度高度分布をみると、減少時の電子数のピークは通常よりも低い高度で現れたことを見出した(図 5)。また、この地震だけでなく 1998 年から 5 月 1 日から 2008 年 4 月 30 日の 10 年間中国で発生した 35 の M6 以上の地震の GPS-TEC を観測したところ、17 の M6.3 以上の地震で 3~5 日前に震源上空で TEC 値が減少していたことを示唆した。

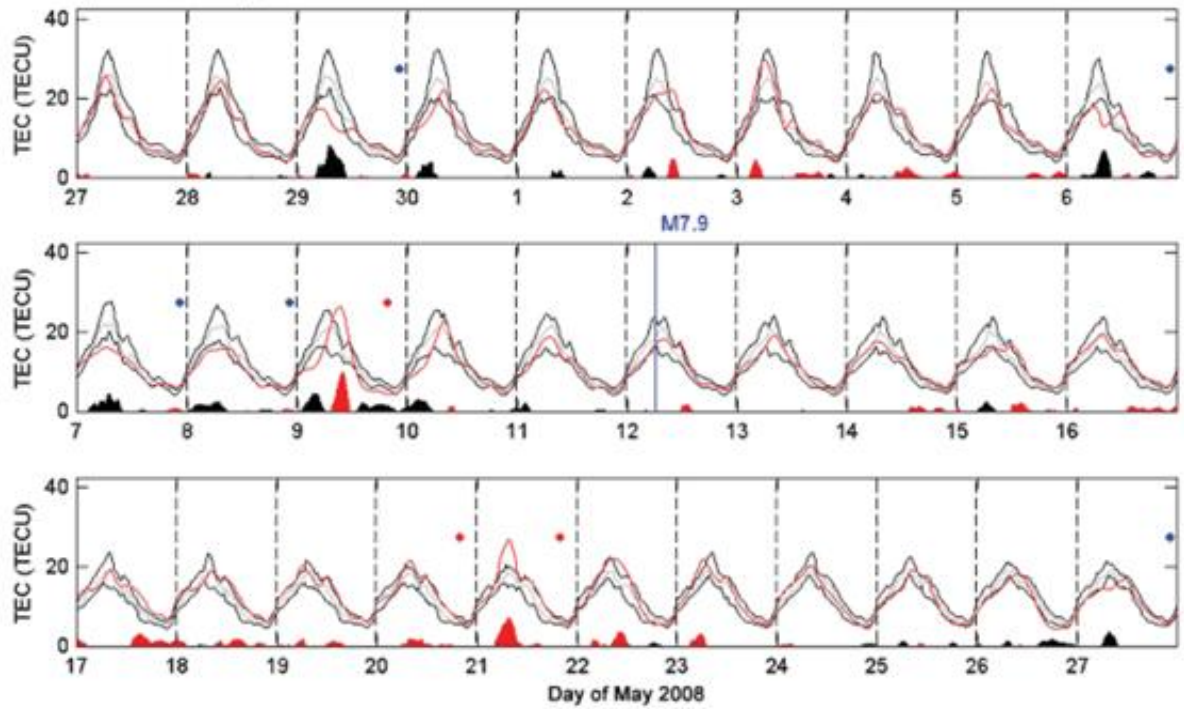


図 3. GIM から求めた四川地震震源上空の TEC の時系列。地震発生は青線で示された 5 月 12 日 6:28(UT)である。赤線がデータ、黒線は異常値検出のための過去 15 日間の median (中央値) と quartile から算出された上限と下限。各段の下の方に示した赤と黒は下限 (上限) を下回る (上回る) 量をプロットしたもの (Liu et al., 2009)。

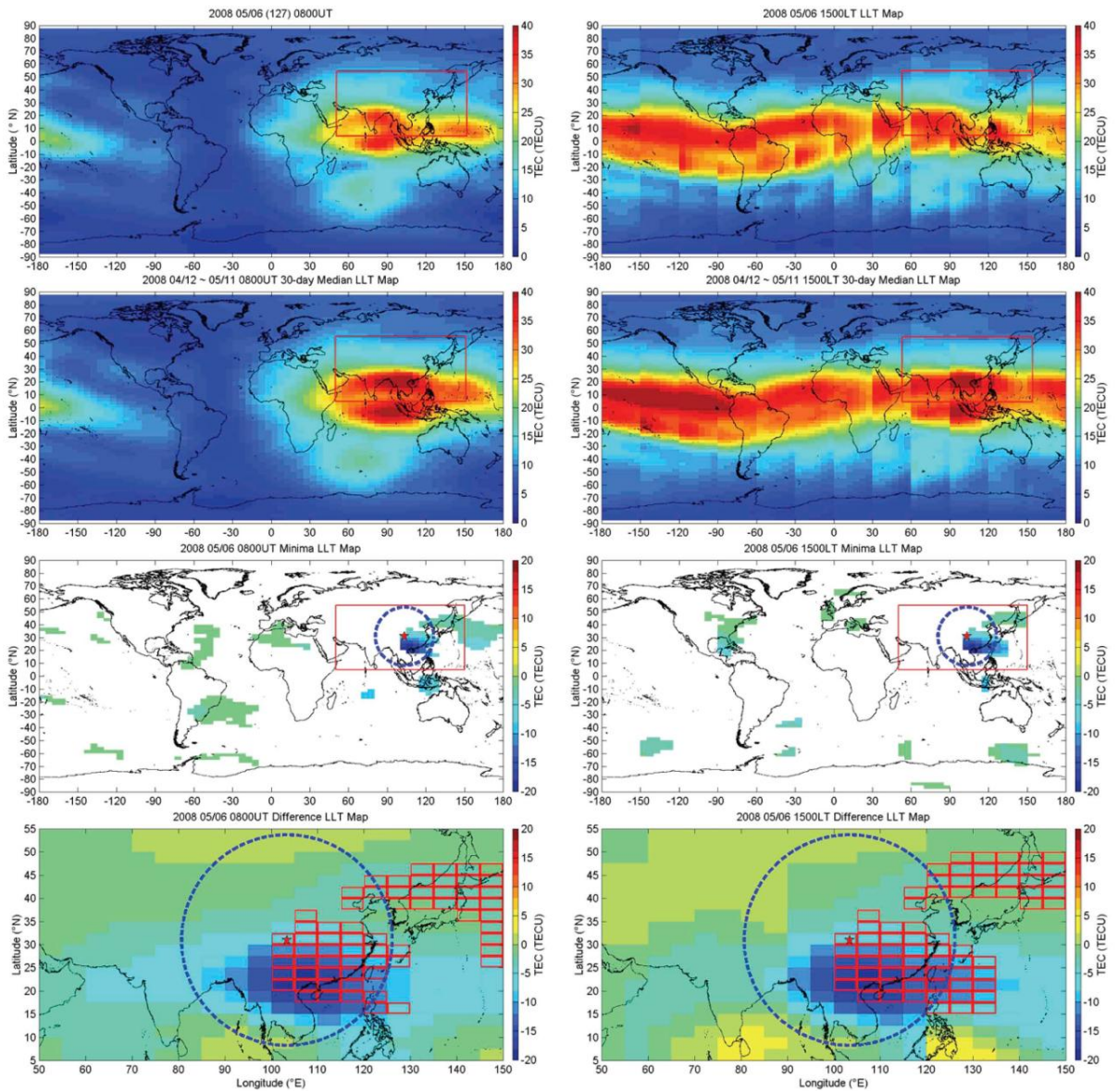


図 4. 左上の図は地震発生 6 日前の 08:00 (UT) の GIM。右上の図は地方時 15:00 の GIM を経度 30 度毎に切ってつなげた図である。上から 2 段目の図は地震発生の 1 日前から 30 日前の median であり上から 3 段目の図はそれらの差をとったものである。最も下の図は震源域を拡大したものであり、震源域およびその東側を中心として負の異常が表れていることがわかる (Liu et al., 2009)。

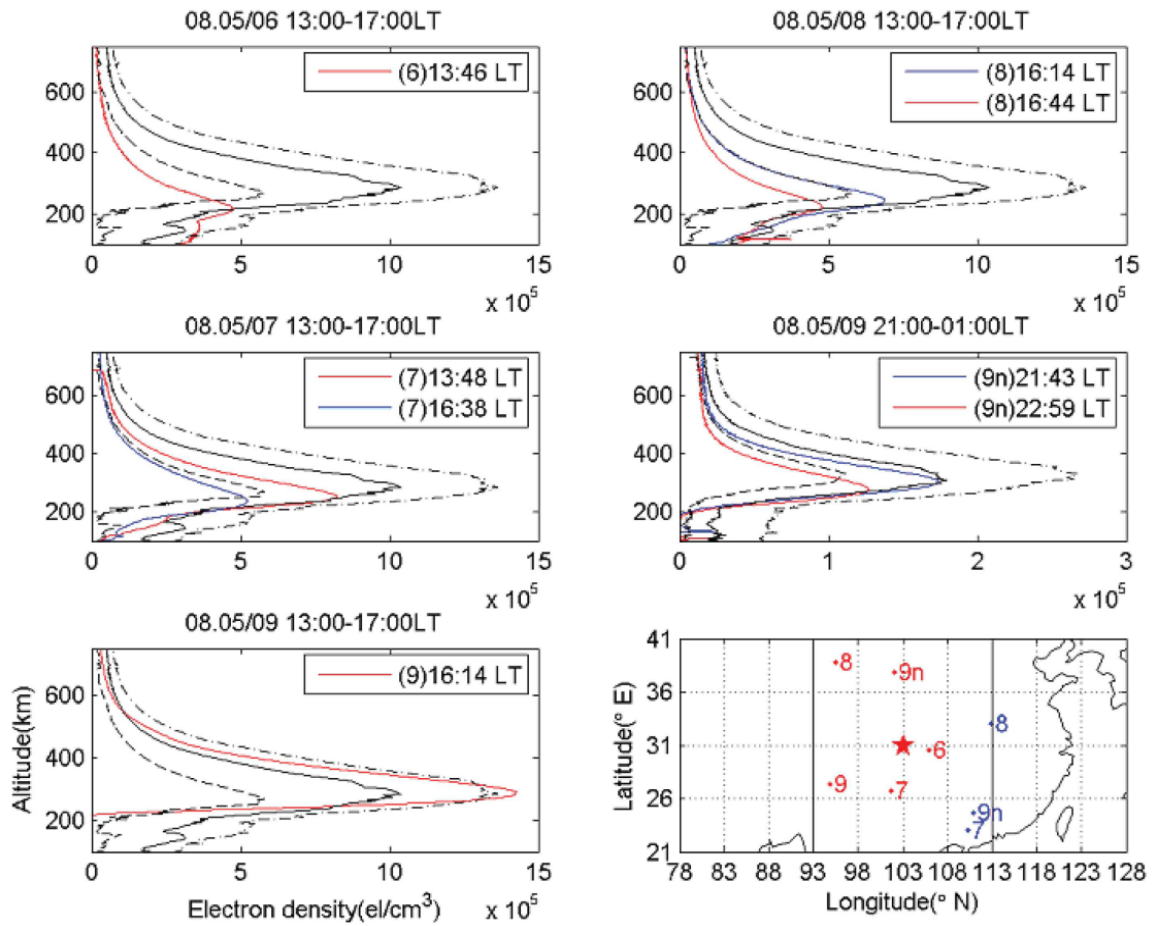


図 5. FORMOSAT-3/COSMIC の GPS 掩蔽観測により得られた四川地震の 6~3 日前における電子密度高度分布。(a)~(e)の赤、青線は観測値、実線、破線は 4 月 21 日~5 月 5 日 (地震 7~22 日) 前の median およびそれをもとにした quartile を表す。(a) : 5 月 6 日 13~17 時 LT、(b) : 5 月 8 日 13~17 時 LT、(c) : 5 月 7 日 13~17 時 LT、(d) : 5 月 9 日 21 時~10 日 01 時 LT、(e) : 5 月 9 日 13~17 時 LT、(f) : (a)~(e)で示されている鉛直プロファイルの位置。震源は星で表されている (Liu et al.,2009)。

1.4 本研究の目的

このように、地震前後の TEC 変化に関する研究は数多く報告されている。特に地震前の TEC 変化を地震の前兆と考えられるかは、地震予知の観点からも注目されている。本研究では、主に Liu et al. (2009) の解析手法に倣って、近年の日本国内で起きた巨大内陸地震である、2008 年岩手・宮城内陸地震、2007 年新潟県中越沖地震、2004 年中越地震について地震前後の GPS-TEC の時系列を解析する。これらの地震は日本の内陸部で発生した比較的大きな地震であり、地震の前兆の議論を行うのに絶好の地震である。国土地理院が全国に展開している GPS 連続観測システム GEONET (GPS Earth Observation Network)、GIM、GPS 掩蔽観測の三つの手法による電離圏の観測結果を目的に応じて使い分けることで、電磁気的な地震前兆の有無の議論を展開していきたい。また、現在考えられている地震前電離圏変動のモデルについて TEC 変化の結果と照らし合わせ検証する。

2 GPS で電離層を見る手法

2.1 電離層

地球上層には、窒素や酸素等の分子や原子が電離することにより生じたイオンと自由電子からなる電離気体（プラズマ）が存在している。高度約 50km～約 2000km の範囲では大気の密度が低いため、ほかの電子やイオンと衝突しにくいのでプラズマのまま長時間存在する。この領域を電離層と呼び、高度があがるほど電子密度は高くなり、下から順に D 層、E 層、F₁ 層、F₂ 層と名付けられている。例えば、高さ約 100 km にある E 層では、1 m³ の容積の中に約 10¹¹ 個の電子がある。しかし、この高さでは空気の原子や分子がまだ約 10¹⁹ 個 m⁻³ も存在し、それらの 1 億個について 1 個程度が電離しているにすぎない。しかし電離の割合は高さとともに急増し、300 km では 1,000 個に 1 個くらいの割合になり、500 km では 100 個について 1 個くらいになる。また、E 層の下にも弱いながら電離状態にある D 層がある。太陽から放射された紫外線は地球大気中に入ってくると次第に吸収され、この層に達するころにはかなり弱くなっている。そのため上層ほど電子数は多いが D 層では少なく、太陽からの紫外線の照射がない夜間には D 層は消滅してしまう。しかし、この層の高さの空気密度は、E 層や F 層に比べると非常に大きいため、同じ強さの紫外線に照射されれば、D 層のほうが電子の数が多いことになる。

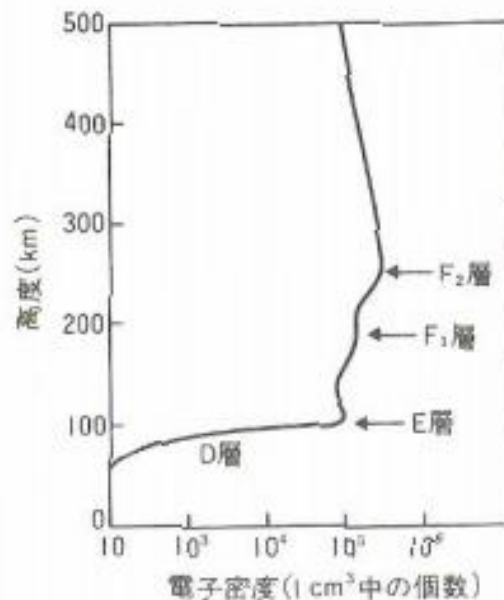


図 6. 電子密度の高度分布 (小倉, 1999)

上記のかねあい、電子数密度はある高さの層で極大になり、その上下で減少することになる。これに加えて、紫外線で生成された電子が、電子を失った分子・原子（すなわちイオン）と衝突して結合し、もとの分子・原子に戻るといふことも起きている。この現象を、再結合（recombination）と呼ぶ。すなわち電子数密度の高さによる違いは、その高さで電子がどのくらいの割合で生成され、かつ消滅するかに依存するのである。

電離圏は、電気伝導度が高い導体であるため電波を反射する能力があり、おおまかに HF 帯（短波：3MHz～30MHz）以下の低周波の電波はこの電離層で反射され、それより高い周波数帯の電波は F 層も突き抜けてしまう。そして、VLF 帯（超長波：3kHz）と LF 帯（長波：30kHz～300kHz）の電波伝搬に関係する層は D 層である。D 層の高度は約 50km～90km で、電波の吸収層として作用する（長尾, 2001）。

電離層は時刻や季節によって変化するが、それ以外にも影響を受ける。1.2 で述べた CID の他に、太陽活動などに関連して、通常の変化以上の変動が現れ、通信状態などが乱れることがある。太陽表面を中心とする活動領域における最も顕著な現象は、太陽フレア（solar flare）である。このフレアが発生すると、コロナから放射される太陽 X 線などの強度が急激に増加し、日照半球の電離圏で電子密度の異常増加を引き起こす（日置, 2006）。

2.2 GPS

GPS (Global Positioning System) は全地球測位システムとも呼ばれるアメリカによって航空機・船舶等の航法支援用として開発された衛星測位システムである。GPS衛星は米国防総省が管理しており高度約2万kmの6つの軌道面にそれぞれ4つ以上、計24個以上が配置され、約12時間周期で地球を周回している。GPSのシステムは、宇宙部分・利用者部分・制御部分の3つから構成され、以下の説明は辻(1998)からの抜粋である。

宇宙部分 (衛星)

GPS衛星は昇交点赤経が 60° ずつ異なる6つの軌道面に4個ずつ、合計24機(予備を含めて30機程)の衛星が配備されている。軌道の離心率は0.01以下なので、その形状はほとんど円軌道である。軌道長半径は約26,600kmで、11時間58分(=0.5恒星日)の周期で地球を公転する。また太陽日の1日は24時間なので、地上からみた衛星の出没パターンは毎日4分ずつ早くなる。このように24機もの衛星が地球の周りに配置されているのは、地上のどこでも常に最低4個の衛星が地平線上にあることを保証するためである。

GPS衛星には周波数標準として高い安定度を持つ原子時計(セシウム及びルビジウム時計)が搭載されている。この原子時計の基本周波数 f_0 (=10.23 MHz)を154及び120倍にして、L1及びL2バンドの搬送波周波数をつくる。ただし、軌道上の重力に対応した相対論的補正のため、実際の f_0 は10.23 MHzより0.00455 Hzだけ低く設定してある。

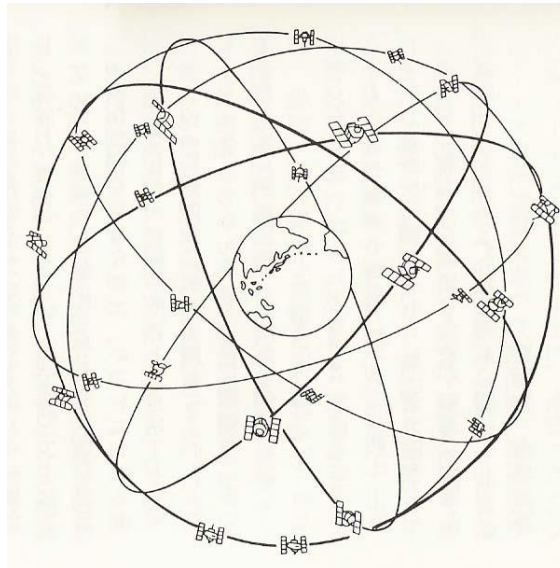


図7. GPS衛星の軌道(小倉, 1999)

また、全ての衛星は L1 及び L2 の同一周波数で送信するが、それでも混信しないのは、信号が各衛星固有の疑似乱数符号 (PRN : Pseudo Random Noise) によって変調されているからである。疑似乱数符号には、公開された C/A (Coarse/Acquisition) コードと、軍用の P (Protected) コードがある。前者は 1023 ビットの 0 と 1 の繰り返しからできていて、繰り返し周期は 1ms、パターンは全部で 36 種類ある。P コードの周期は 37 週間であるが、1 週間毎に分割して各衛星に割り振られている (表 1)。

	搬送波	C/A コード	P コード
L1	1575.42 Mhz (19.0 cm)	1.023 MHz (293 m)	10.23 MHz (29.3 m)
L2	1227.60 Mhz (24.4 cm)	なし	10.23 MHz (29.3 m)

表 1 GPS 衛星の信号 (辻, 1998)

利用者部分 (受信機)

受信機は、衛星からの信号を受信するアンテナと信号を解読・記録する本体からなる。

単独測位用の受信機では、内部で衛星と同じ C/A コードパターンを再生し、受信した C/A コードと最大相関が得られるまで、再生 C/A コードを時間的にずらせる。もし衛星と受信機の時刻が完全に同期していれば、最大相関が得られたときの時間的ずれが、衛星から出たコードが受信機に到着するのに要した時間ということになる。したがって、これに光速を掛ければ、衛星と受信機間の距離が得られる。しかし実際には衛星と受信機の時計を完全に同期させるのは困難なので、得られた距離には時計のずれによる距離測定誤差も含まれている。このため、この距離は、疑似距離 (pseudo range) と呼ばれる。

一方、干渉測位用の受信機では搬送波の位相そのものを測定している。コードによって変調された信号は周波数拡散を受けており、そのままでは測定できないが、コードパターンがわかっているならば位相を再生できる。したがって干渉測位の原理をみるときは、あたかも衛星から正弦波が送り出されていると考えればよい。

2.3 GPS 観測からの TEC の算出 (GPS-TEC)

TEC (Total Electron Content) とは、GPS 衛星と受信機の間 LOS (line-of-site) 上の電子の数の合計で、電離圏の電子密度の総数を表す量である。単位は el / m^2 か TECU ($= 10^{16} \text{el} / \text{m}^2$) としている。TEC は LOS (経路 s) に沿って電子密度 n_e を積分することで表すことができる。特に GPS 衛星による TEC 観測では、電子密度が最も大きい高度 300~500km 付近の電離圏 F 層の寄与が大きい。

$$TEC = \int_{receiver}^{satellite} n_e(s) ds \quad (1)$$

$$n_e : \text{電子密度} \quad (\text{el}/\text{m}^3)$$

GPS から TEC を導出するには、マイクロ波の特性を利用する。GPS 衛星を出発したマイクロ波は、地表付近で電離圏や対流圏に遭遇するが、このときにマイクロ波の伝搬速度や経路が変化して、GPS の距離測定に影響を及ぼし、TEC が大きいほどその影響も大きくなる。通常、電離圏の影響は遅延時間の周波数依存を利用することで補正を行う。

これを逆に利用して、L1 と L2 の 2 つの周波数の遅延差を調べることで電離圏の電子数を計算することができる。

まず電離圏の屈折率 N_I は、電子密度と搬送波の周波数 f を用いて以下の式で近似できる。

$$N_I = 1 - \frac{an_e}{f^2} \quad (2)$$

a : 定数

さらに電離圏によって引き起こされるマイクロ波の遅延 Δt は電離圏の屈折率 N_I を使って以下の式で表すことができる。

$$\Delta t = \int_{receiver}^{satellite} (N_I - 1) ds \quad (3)$$

(3)式に(1)式、(2)式を代入するとマイクロ波の遅延 Δt は結局、

$$\Delta t = -\frac{a}{f^2} TEC \quad (4)$$

$$a = 4.03 \cdot 10^{17} ms^{-2} TECU^{-1}$$

となる。

ここで GPS 衛星から発射された L1 と L2 のマイクロ波が受信機に到達する時間をそれぞれ t_1 と t_2 とすると、それらは GPS 衛星から受信機までの距離と光速から求められる時間 t と電離圏による遅延(4)式を使って表すことができる。

$$t_1 = t - \frac{a}{f_1^2} TEC \quad (5)$$

$$t_2 = t - \frac{a}{f_2^2} TEC \quad (6)$$

(5)式、(6)式より TEC は GPS で得られるデータを使い、以下のように求まる。

$$TEC = \frac{t_1 - t_2}{a} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

$$a = 4.03 \cdot 10^{17} ms^{-2} TECU^{-1}$$

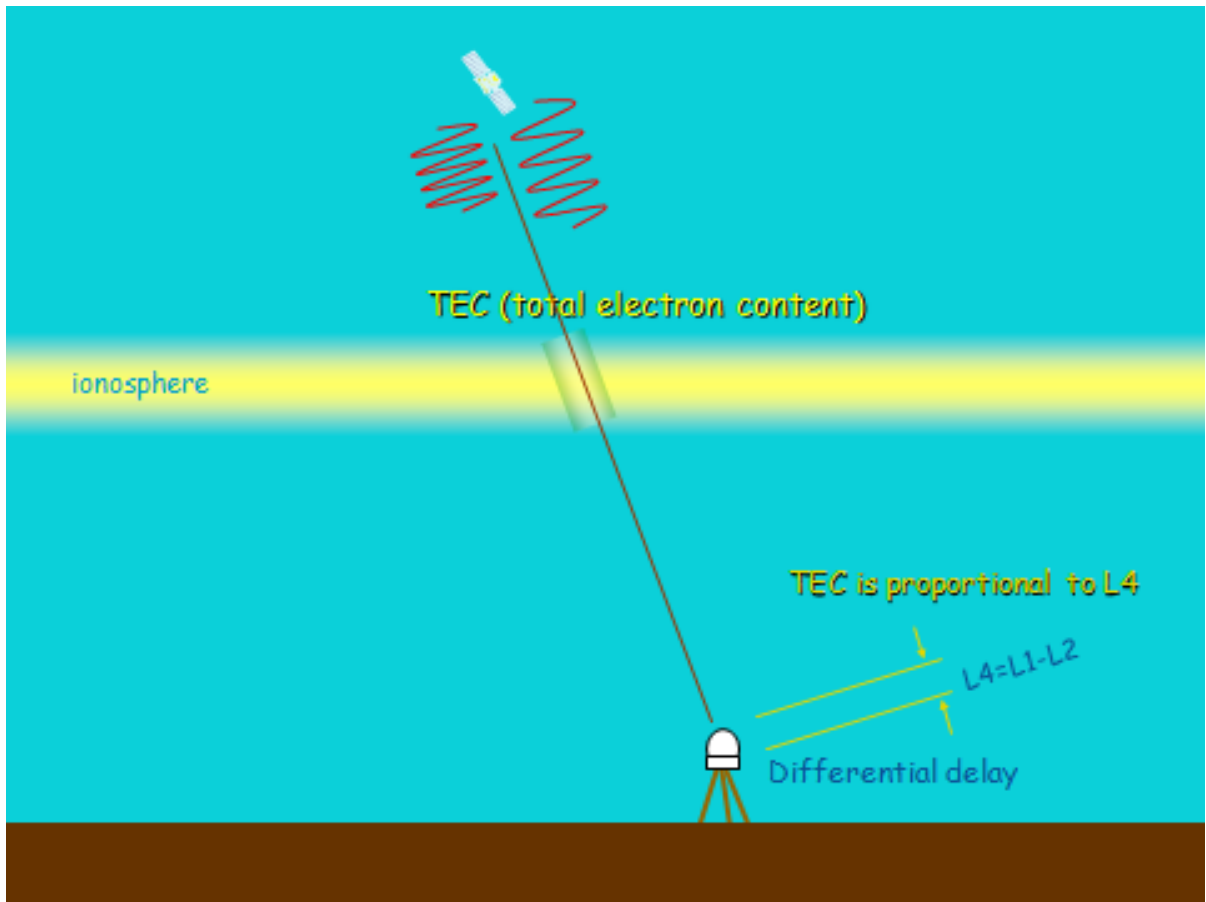


図 8. GPS-TEC の模式図

2.4 GEONET

1994年から国土地理院は地殻変動観測を目的として電子基準点でのGPS連続観測を開始した。開始当初は、約100点だった観測点も2010年現在は1200点を超える数が設置されており、日本全国の地殻変動観測やTEC観測に利用されている。このような地上GPS局を用いたTECの観測の分解能は、時間分解能は30秒、空間分解能は10~20kmである。本研究では地震の震源に程近いGPS局の地震前後1か月のRINEXデータを解析し、中国四川省の事例のような地震前の異常が存在するかどうかを検討した。

生データとなるGPSのL1/L2の位相差(L4)には大きさ不明のバイアスが含まれているため、天頂方向の全電子数(Vertical TEC, or VTEC)とともにそれらを最小二乗法で推定する。 i 番目の衛星で時刻 t に観測した $L4_i(t)$ の観測方程式は以下のようになる。

$$L4_i(t) = VTEC(t)/\sin \theta_i(t) + bias_i$$

ここで θ_i は衛星と受信機を結ぶ視線ベクトルが電子密度最大の層(約300 km)を通過するときの水平面からの角度で、衛星と受信機の位置から計算できる。 $L4_i(t)$ は観測データである。バイアスは衛星ごとに異なるが、時間的には一定の値であると考えられる。ここでは多数の衛星を同時観測して、衛星ごとのバイアス値および衛星によらないVTECの値をパラメータ推定する。実際のVTECは連続的に変化するが、ここではパラメータ数を少なくするため一時間ごとの値を推定した。

実際のGPS観測では最小仰角の取り方にもよるが、一つのGPS点だけからの観測でも半径500 km以上の比較的大きな範囲の電離圏を見ることになる。視線ベクトルが電子密度最大の高さを通る点を地上に射影したものをSIP(sub-ionospheric point)と呼ぶ。つまり一か所のGPS点から電離圏を観測してもSIPは半径数百キロの範囲に広く分布してしまうわけである。本研究ではVTECは南北方向には一定値と考えた。東西方向では、太陽に対してほとんど動かない電離圏の下を固体地球が自転していると考え、SIPの経度の差を時間差に換算してVTEC変化を推定した。また、RINEX fileが日ごとに別になっているため、日の変わり目で不連続が出る傾向があったが、それを防ぐため、同じ衛星で複数の日にまたがるようなデータについて、同じバイアス値を推定できるように工夫した。

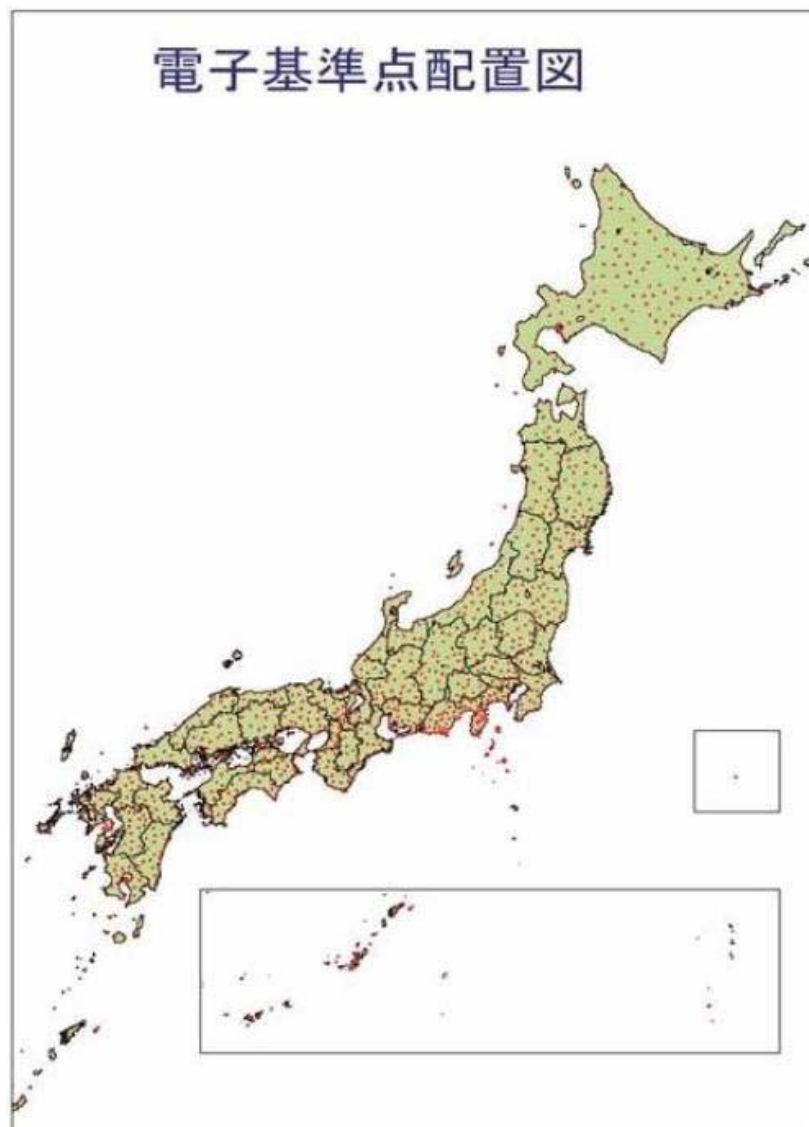


図 9. 国土地理院が設置している日本の電子基準点の位置 (赤の点)
(<http://www.gsi.go.jp/common/000033193.jpg>)

2.5 GIM

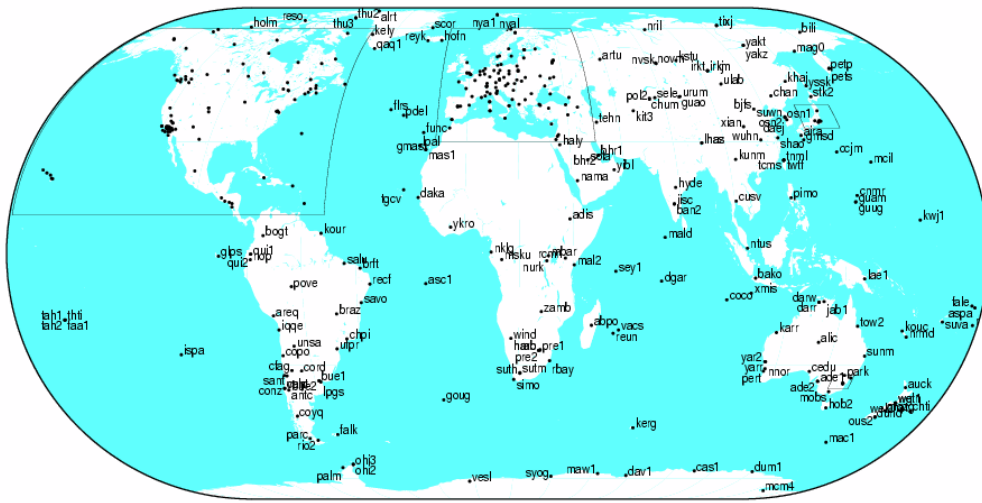
Global Ionosphere Maps (GIM)とは全球の TEC のグリッドデータである。GIM データは IONEX 形式で、スイスの Bern 大学にあるヨーロッパ軌道決定センター (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>)から公開されている。そのデータは世界各地の GPS 観測点ネットワーク (IGS : International GPS Service) から作られている。なお、日本では、TSKB (つくば)、USUD (臼田)、CCJM (父島)、MIZU (水沢)、MTKA (調布) が GIM の算出に使用されている。GIM データファイルには、球面調和関数展開によりモデル化された VTEC がグリッドデータ (緯度方向 : 2.5°、経度方向 : 5°) として記載されている。

使用されている球面調和関数は

$$TEC(\beta, s) = \sum_{n=0}^{nmax} \sum_{m=0}^m \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (\tilde{C}_{nm} \cos(ms) + \tilde{S}_{nm} \sin(ms))$$

β は薄膜球殻電離圏を視線ベクトルが通過する点 (pierce point) の緯度、 $s (= \lambda - \lambda_0)$ は太陽を固定した座標系での pierce point の経度 (λ : pierce point の経度、 λ_0 : 太陽の経度) である。 n と m は球面調和関数の次数と位数、 $nmax$ は球面調和関数の最大次数である。 \tilde{P}_{nm} は規格化されたルジャンドル陪関数、 \tilde{C}_{nm} は未知の球面調和関数、 \tilde{S}_{nm} : GIM パラメータを示している (Schaer, 1999)

この GIM データは全球の TEC マップを作る他に、任意の地点の TEC の変動を内挿で算出することができる。GIM の時間分解能は 2 時間、空間分解能は緯度方向に 2.5°、経度方向 5° と GEONET に比べ劣っているが、1998 年からの連続したデータを取得可能であることや、GPS データが公開されていない地域の電離圏擾乱を解析することができるといった有利な点がある。



ISM7 2009.01.5 16:48:27

図 10. CODE での GIM データの生成に使用されている GPS 観測点のマップ



図 11. IGS による日本の GPS 観測局

2.6 生データの解析と GIM の比較

本研究では、局所的な TEC 変動を見るために GPS-TEC を用いる。GEONET は日本各地に設置されているという利点を持つが、データがオンラインで取得できる期間が1年弱しかないという欠点を持つ。そのため、GEONET データの取得できる 2008 年以前の地震については震源に近い IGS の地上 GPS 局（長野県臼田）の解析と GIM による震源上空の TEC 解析を行った。GIM によるローカルな TEC 変動の解析の有効性を地上 GPS 局で推定された TEC とその観測局の同位置の GIM から内挿して算出した TEC の比較をすることで検証を行った。

以下の図は、2008 年岩手宮城内陸地震、2007 年新潟県中越沖地震、2004 年新潟県中越地震の発生前後 15 日間の期間で、相関をとったものである。

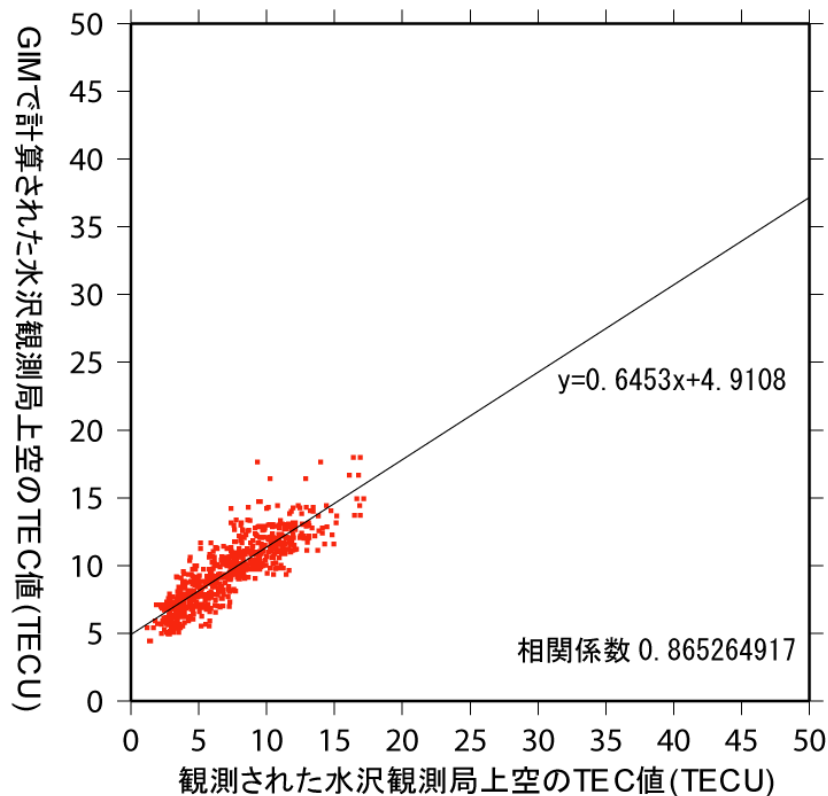


図 12. 岩手宮城内陸地震前後 15 日間、1 時間ごとの水沢観測局の TEC（横軸）と GIM で算出された水沢観測局上空の TEC（縦軸）の相関

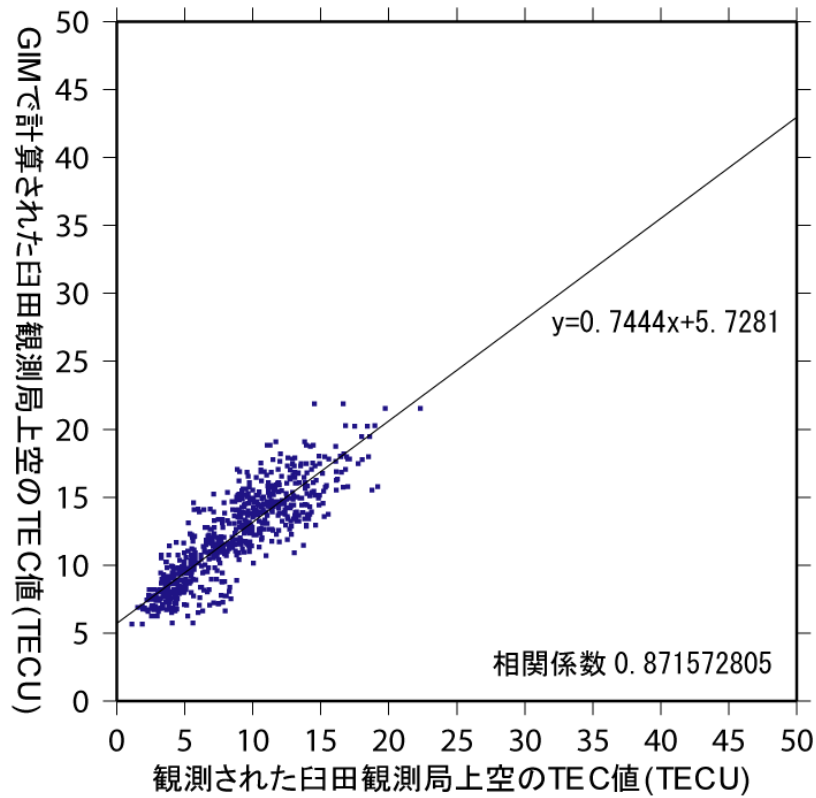


図 13. 新潟県中越沖地震前後 15 日間、1 時間ごとの臼田観測局の TEC と GIM で算出された臼田観測局上空の TEC の相関

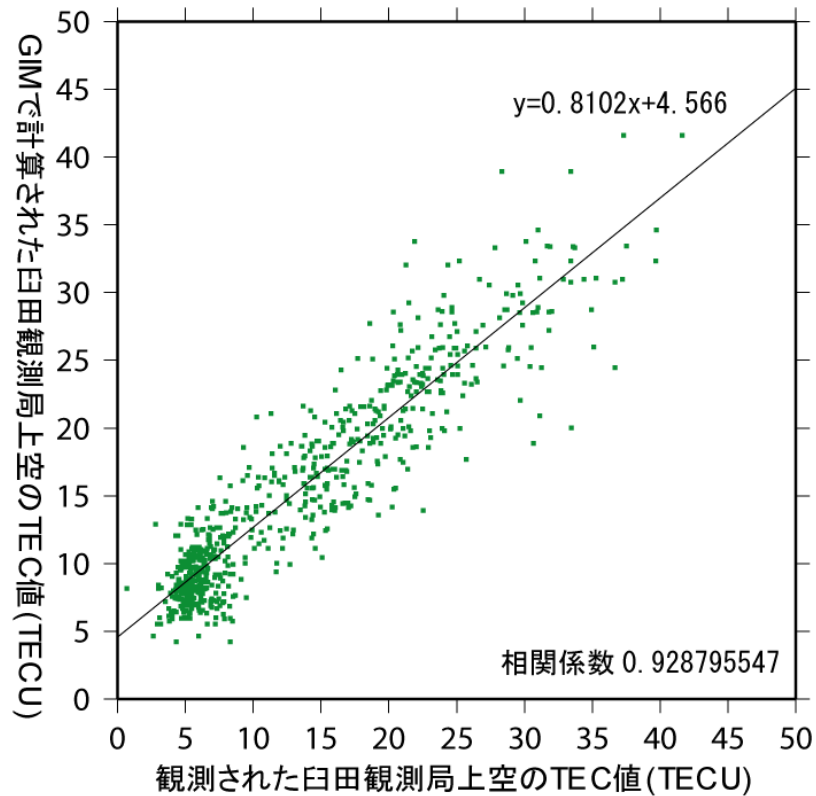


図 14. 新潟県中越地震前後 15 日間、1 時間ごとの臼田観測局の TEC と GIM で算出された臼田観測局上空の TEC の相関

比較した結果、両者にはよい相関が見られ、おおむね一致することがわかった。これより、GIMによるTEC算出は有効であると判断され、GEONETデータが入手不可能な期間についてはこの方法を適用していく。しかし、TECが小さい時にGIMの方が有意に大きく出るといふ差が見られ、それはy切片の存在に見られている。この原因は不明である。

2.7 GPS 掩蔽法

GPS 掩蔽法とは、GPS 受信機を搭載した低高度軌道上を周回する小型衛星 (LEO : Low Earth-orbiting Satellite) で GPS 衛星からの電波を受信し、その伝搬特性を解析することで大気の状態をリモートセンシングする技術である。

この方法では LEO から見て GPS が地球によって隠される場合に (これは掩蔽 : occultation と呼ばれる) 地球大気をかすめて伝搬してくる GPS 電波を LEO で受信する。この時、LEO から見て GPS が地平線に没する (あるいは出現する) 際、時間とともに GPS から LEO へ到達する電波が通過する大気層が厚く (薄く) なるが、これに従って GPS 電波の伝搬遅延量も時々刻々増大 (減少) する。この遅延量の時間変化を解析すれば大気屈折率の高度分布が算出できる。この掩蔽観測は水平方向にはある程度広がった地域の平均しか得られないが、鉛直方向には高い分解能を持つ。さらには陸海、極域を問わず全球を観測できる利点をもつ。

GPS 掩蔽法にはいくつかの解析手順がある。

- (1) GPS 電波の観測 : GPS 掩蔽現象の際に電波の振幅・位相を観測する。
- (2) 衛星軌道情報 : GPS と LEO の位置・速度に関する精密な情報を得る。
- (3) レイトレーシング : GPS と LEO の間での伝搬経路の曲がり角 (偏角) ならびに屈折率の高度プロファイルに関する反復計算をして収束させる必要がある。
- (4) 大気パラメータ : 各高度層 (電離層、乾燥大気、湿潤大気) における物理量の高度プロファイルを得る。
 - (4-a) 電離層 : 屈折はほぼ電子によるものと考えられるので屈折率プロファイルから電子密度プロファイルを推定する。
 - (4-b) 乾燥大気 : 対流圏上部 (5-7km 以上) および成層圏の乾燥大気について、水蒸気や電子の量が無視できるため屈折率から温度プロファイルが推定できる。
- (5) 検証 : 観測結果を地上測定や他の衛星測定ならびにモデルと比較し、温度測定の精度および高度範囲を検討する。

本研究では、2006 年 4 月にアメリカと台湾が共同で打ち上げた FORMOSAT-3/COSMIC の電子密度データを利用した。これは 6 機の LEO 衛星によって 1 日約 2500 のプロファイルデータを全球で取得可能であり、データは CDDAC: COSMIC Data Analysis and Archive で公開されている。

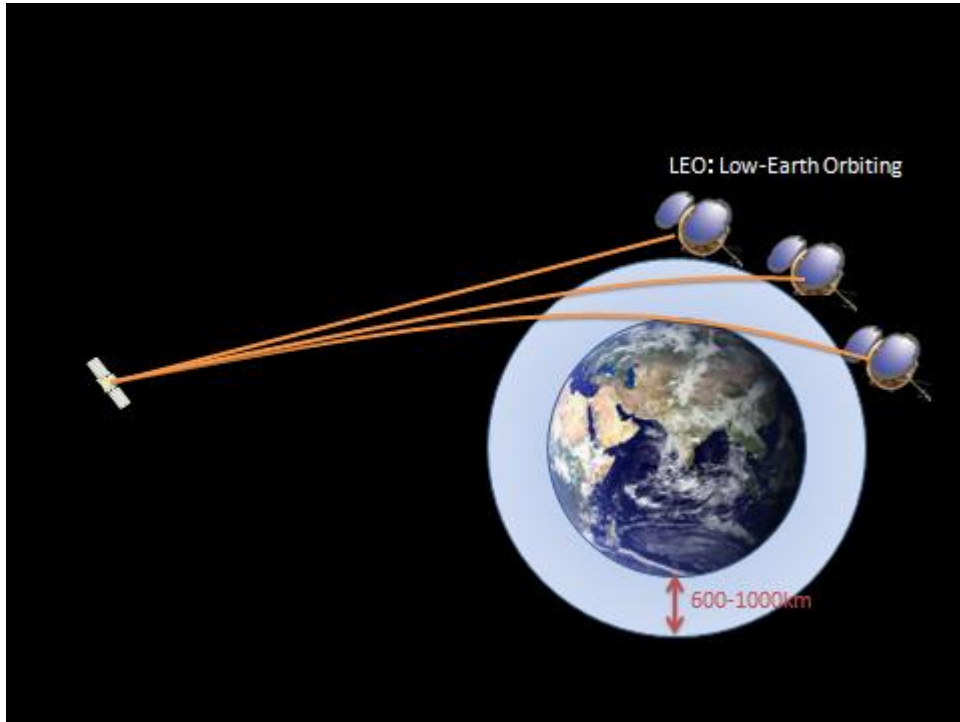


図 15. 掩蔽観測の模式図

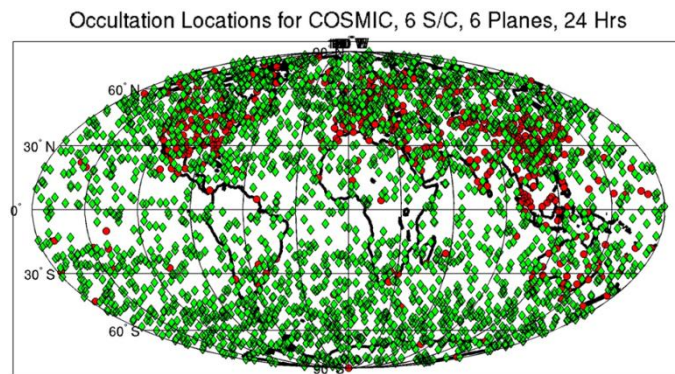


図 16. FORMOSAT-3/COSMIC による 1 日の掩蔽観測点 (緑) 赤はラジオゾンデの観測点

3 近年の内陸地震

本研究では、近年日本で起きた内陸地震について TEC で地震前兆が確認できるかどうか解析する。

3.1 岩手宮城内陸地震

岩手宮城内陸地震は 2008 年 7 月 13 日 (通算日 166 日) 23:43 UT に発生した。地震の規模は Mw6.9 である。震源の位置は 39.0°N、140.5°E、震源の深さは約 8km、逆断層型の地震である。GEONET の胆沢観測局の TEC の解析結果と GIM による震源上空の TEC 変化の結果を以下に示す。

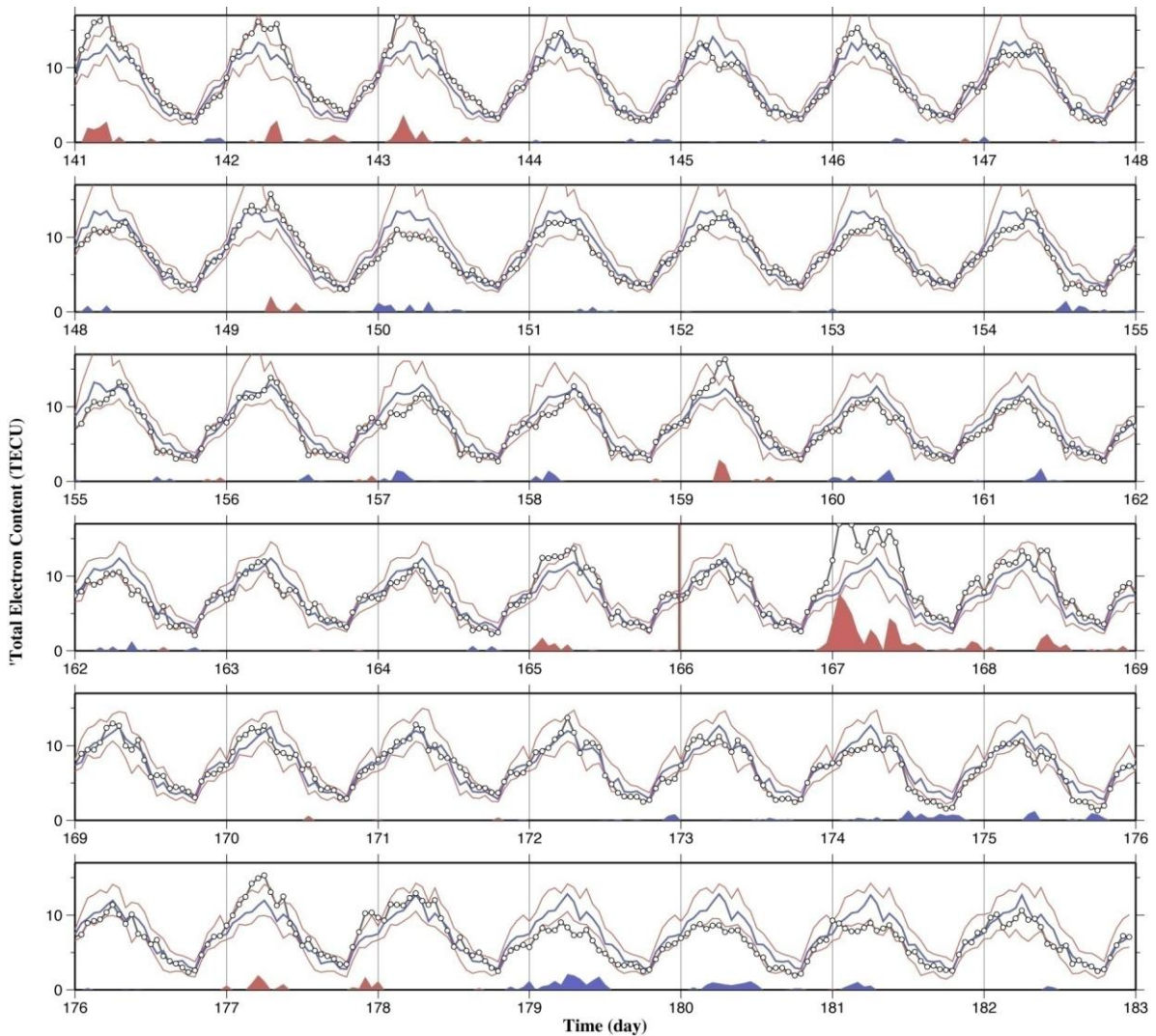


図 17. GEONET の胆沢局の観測データから推定した TEC 時系列。165 日の最後の部分にある縦の赤線は地震発生を示す。鎖状の黒線がデータ、青線は異常値検出のための過去 15 日間の median (中央値)、赤線は quartile から算出された上限と下限。各段下の青と赤は下限 (上限) を下回る (上回る) 量をプロットしたもの。

TEC の異常検出の手法は Liu et al.(2009) に倣って行う。観測または単独 GPS 局から推定、または GIM によって算出された GPS-TEC による TEC を O (黒線) とし、前 15 日間の moving median (\tilde{M} , 青線) をとり、異常検出の上限 (UB , 赤線)、下限 (LB , 赤線) をそれぞれ、

$$LB = \tilde{M} - 1.5(\tilde{M} - LQ)$$

$$UB = \tilde{M} + 1.5(UQ - \tilde{M})$$

と定義し計算する。これより正または負にずれる異常をそれぞれ

$$O - UB$$

$$LB - O$$

と計算し、正の異常の大きさを赤、負の異常の大きさを青で塗りつぶした領域で表す。図 17 に GEONET 胆沢局の GPS データから推定した TEC の時系列を、図 18 に GIM から計算した震源上空の TEC の時系列を示す。

地震発生 1 日後に大きな正の異常が見られる。この期間の磁気活動の様子を表した Dst 指数を見てみると大きな動きがあり、磁気嵐があったことがわかる (図 19)。Dst 指数とは、赤道付近の世界の 4 箇所の観測点の磁場データを平均して求められた地磁気変動指数であり、中低緯度域の地磁気擾乱の度合いを表したものである。

Liu et al.(2009) などの先行研究によると地震発生数日前に負の異常が見られると期待される。図 17,18 のいずれでも地震 4-6 日前に小さな負の TEC 異常は確かに存在する。しかし四川地震の例のような明瞭なものではない。次に異常の空間分布をみるために、図 17,18 で最も大きな負の異常が出ていた通算日 162 日と 163 日の、負の異常が出た時刻の GIM を見てみる (図 20, 21)。負の異常は確かに震源域にかかっているが、異常が見えるのは震源付近に限らないことがわかる。客観的に見て、この負の TEC 異常を時空間的に前兆と判断することは難しいと結論づけられる。

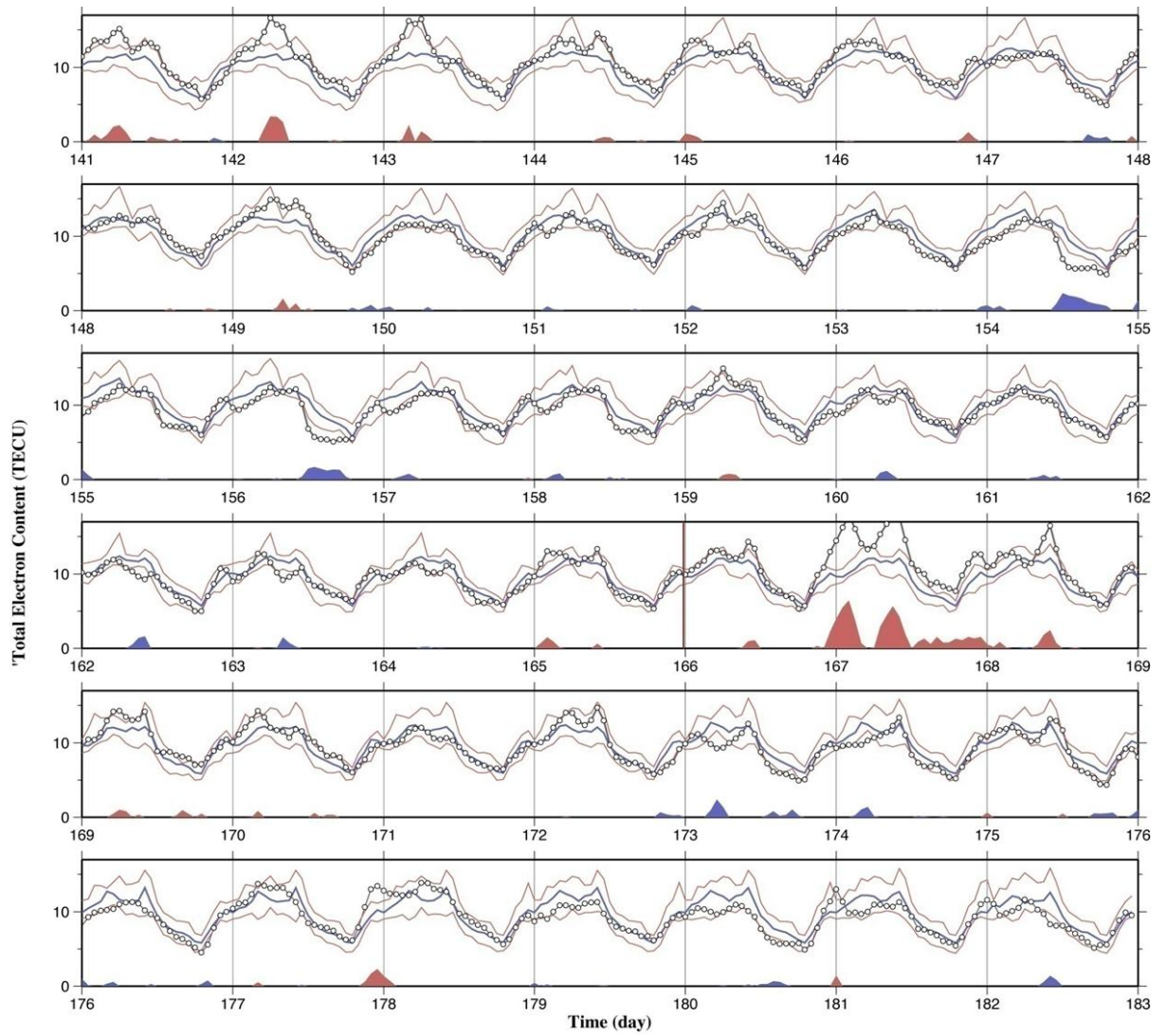


図 18. GIM によって算出された震源上空の TEC 時系列。図中の表現は図 17 と同様。162 日の 9 時 UT および 163 日 8 時 UT の負の異常の地理的分布を図 20 および 21 に示す。

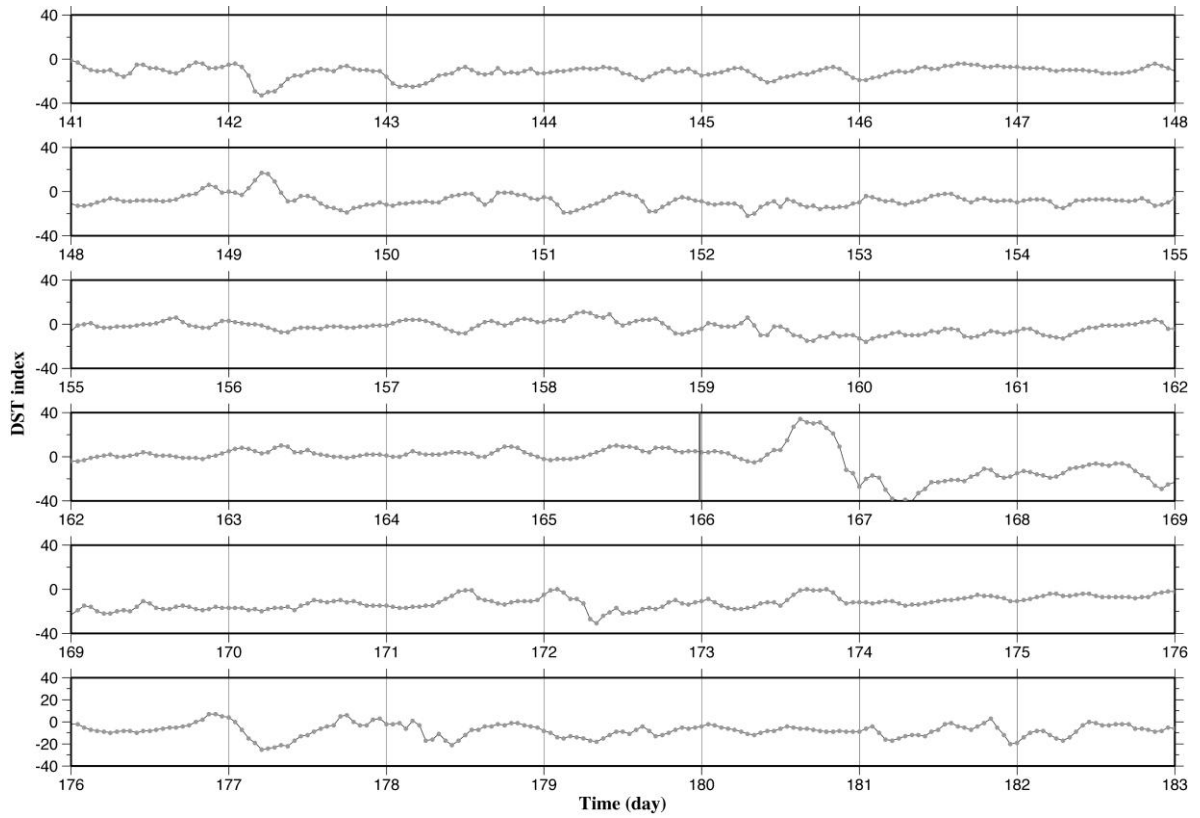


図 19. 岩手宮城内陸地震前後の Dst 指数時系列 (NiCT のウェブページより)。通算日 166 日から 167 日にかけて大きな磁気嵐が起こっている。

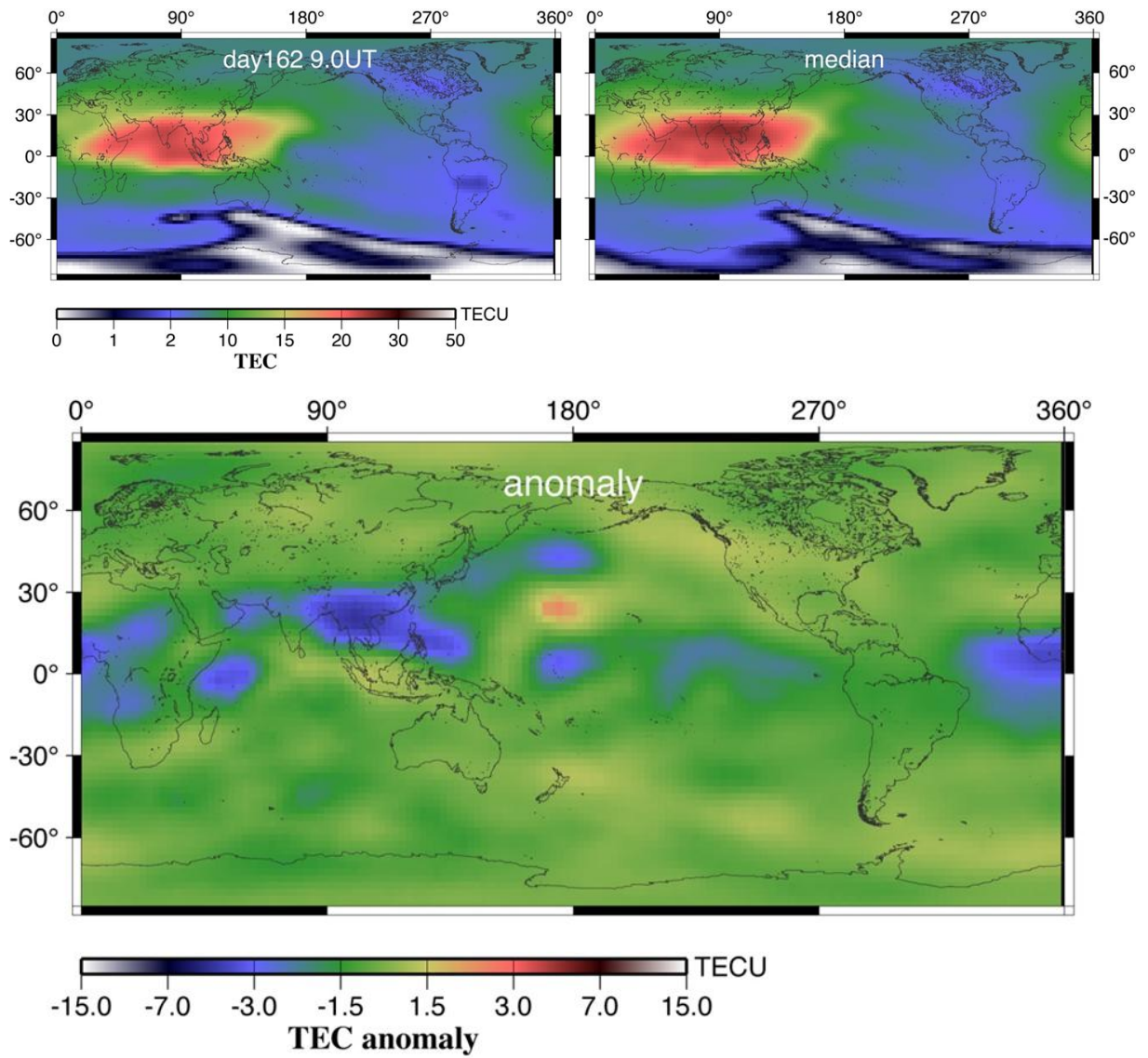


図 20. 左上：通算日 162 日 9.0UT の GIM データ。

右上：162 日 9.0UT の前 15 日間の median。

下：左上と右上との差。負の異常は震源である東北日本に限らず世界各地に存在しており、震源を中心とした明瞭な異常とは言えない。

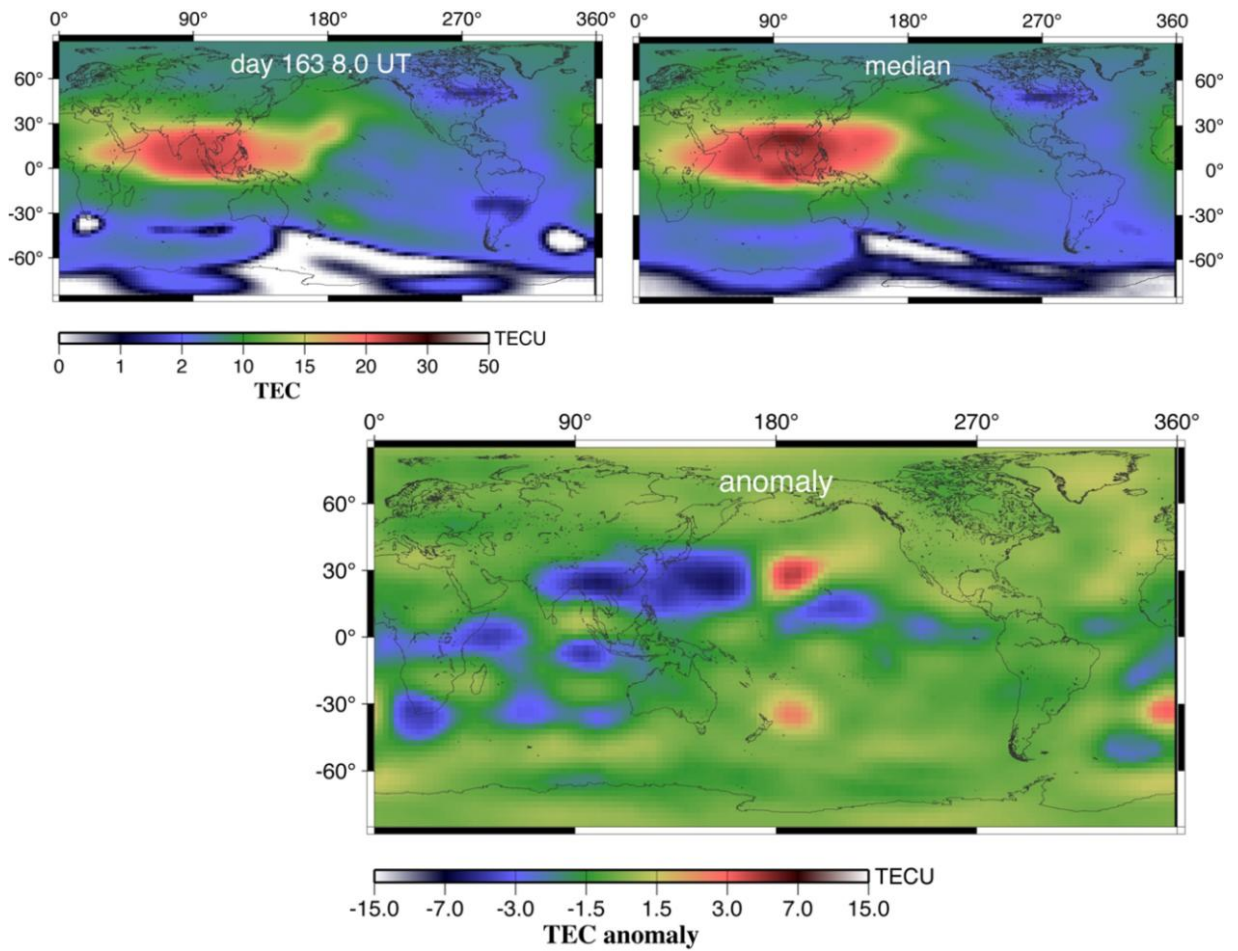


図 21. 左上：通算日 163 日 8.0UT の GIM データ。

右上：163 日 8.0UT の前 15 日間の median

下：左上と右上との差。震源域に大きな負の異常が見られるが、こちらも震源だけのものではない。

3.2 新潟県中越地震

新潟県中越地震は2004年10月23日(通算日297)08:56 UTに発生したMw6.5、震源の位置37.1°N、138.5°E、震源の深さ13kmの逆断層型の地震である。新潟県内では本震発生後、3回の震度6の余震が発生し、11月30日までに約800回の有感地震が計測された。図21はGIMで算出された震源上空のTEC時系列、図22はGEONETによる一般ダウンロード期間が過ぎているため、IGS点の中から震源に近い臼田観測局のデータを選んで利用した。岩手宮城内陸地震の時期に比べすべての期間でTEC値が高くなっている。これは太陽活動の11年周期の活動が活発になる時期にあたるためである。特に通算日313日にある正の異常は太陽活動が最も活発になった時の磁気嵐によるものであり、この期間にオーロラが観測されるなど過去最大級のものであった(図23)。TEC異常の検討を行うと、地震数日前にはほとんど負の異常が見られなかった。全球的な電離圏変動を見るために、GIMによるTEC値と臼田観測局によるTEC値の双方で負の異常が見られた通算日292日UT8.0のGIMマップを見てみると、震源との関連性はなかった。これらのことより、本地震による前兆の存在自体は否定できないものの、GPS-TECによる地震前兆の発見はこのような太陽活動が激しい時は実質的に不可能である事を示唆している。

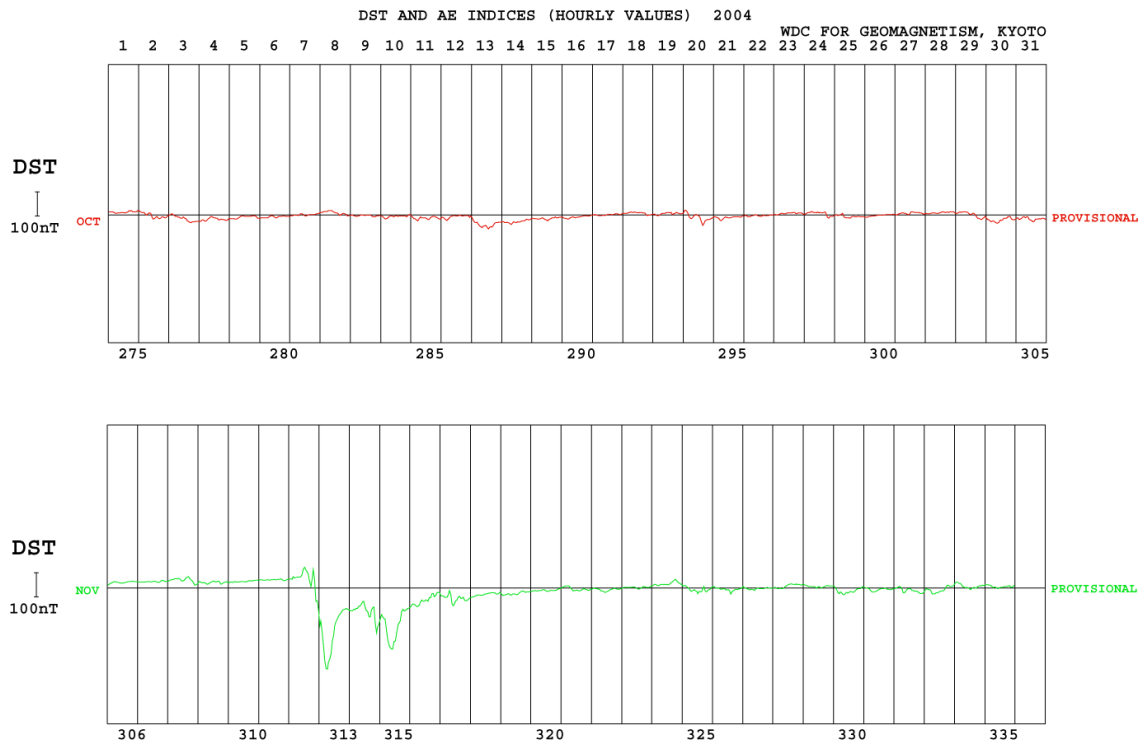


図22. 新潟県中越地震前後のDst指数(京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター)。全体的に太陽活動が活発な時期である。

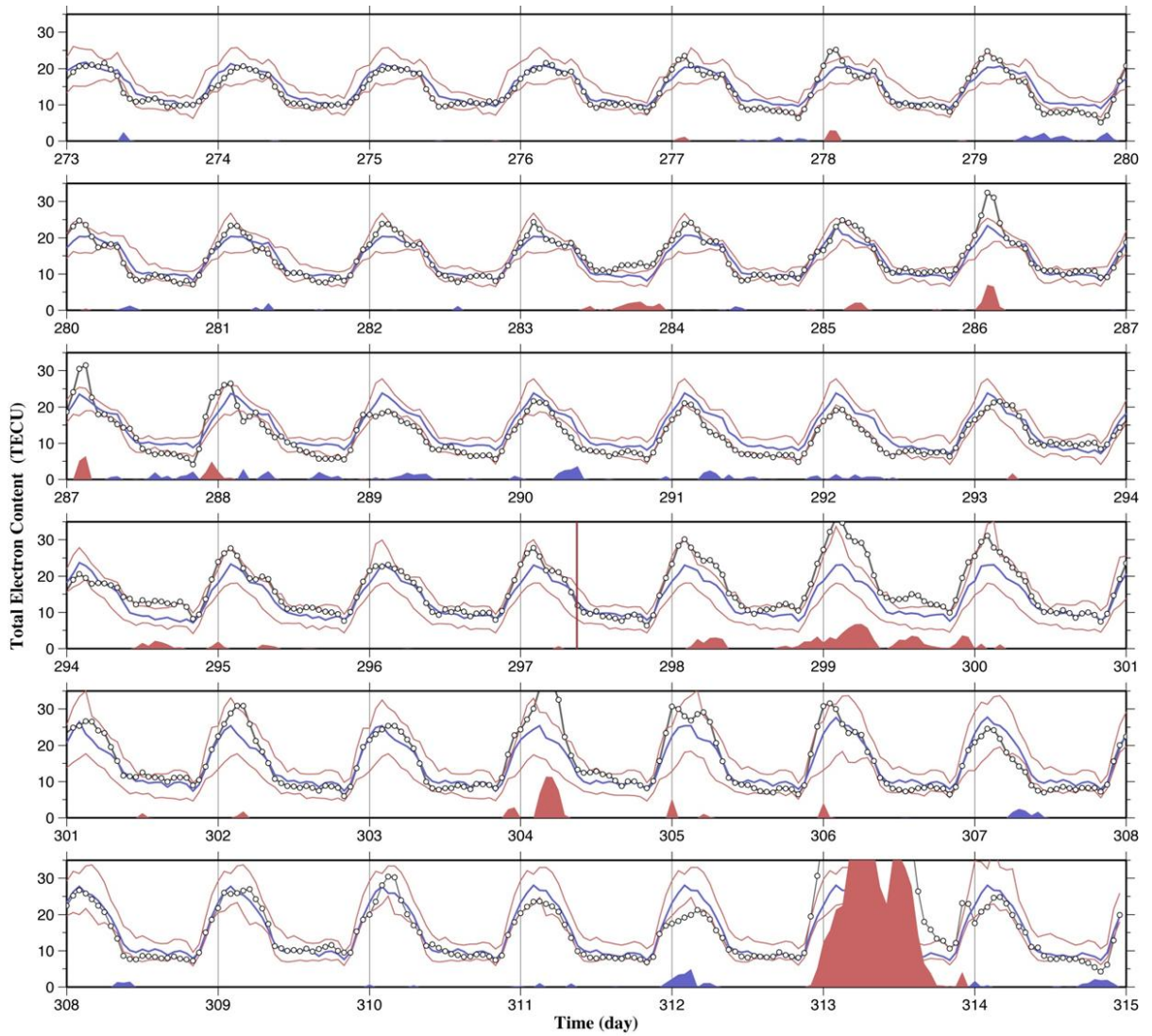


図 23. GIM によって算出された震源上空の TEC 時系列。図中の表現は図 17 と同様。岩手宮城内陸地震の時期に比べ太陽活動が活発なことから TEC の日変動も大きい。292 日の負の異常の地理的分布を図 25 に示す。

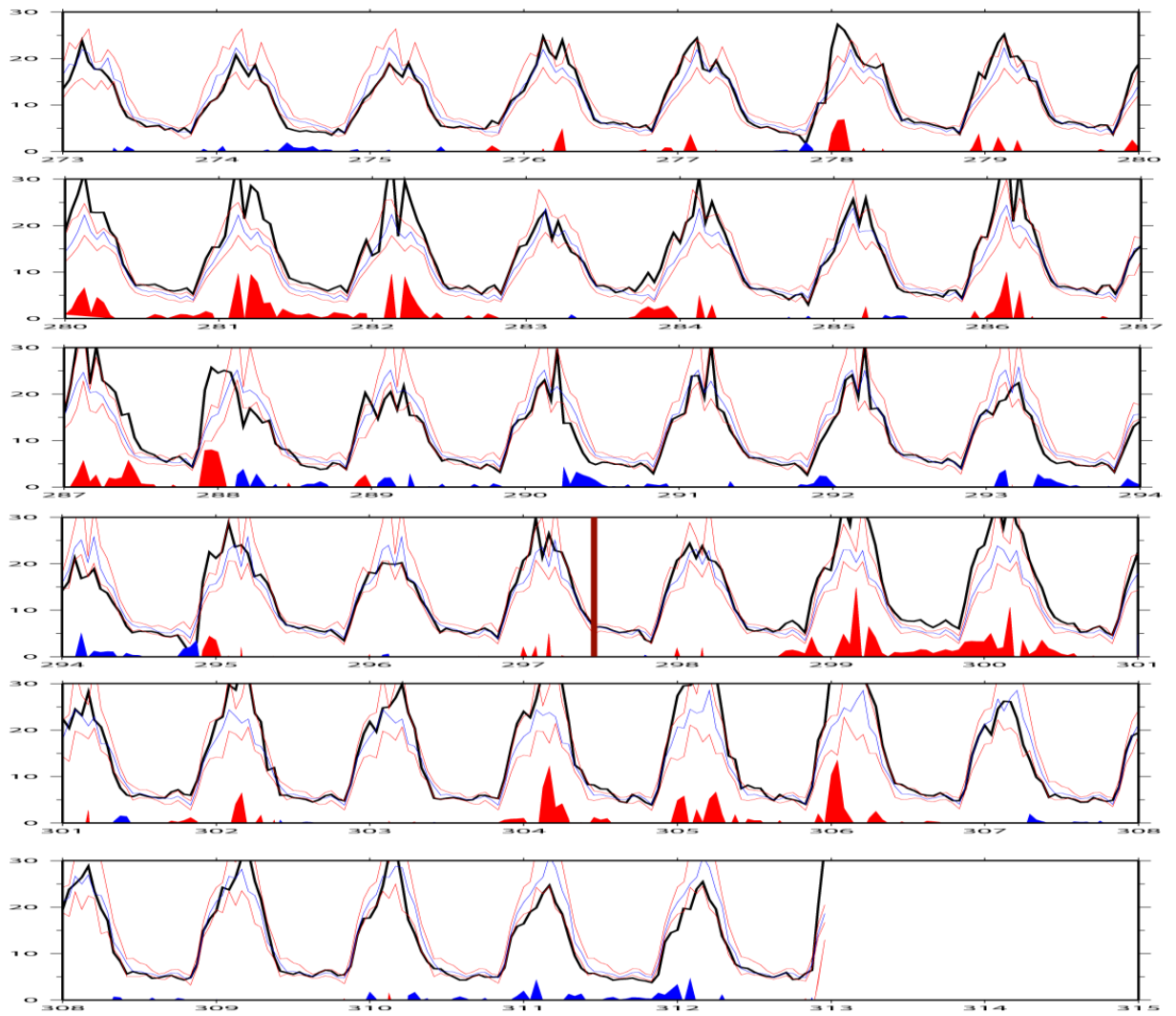


図 24. IGS の白田観測局の TEC 時系列。図中の表現は図 17 と同様。図 23 に比べ、正の異常の出る日数が多い。

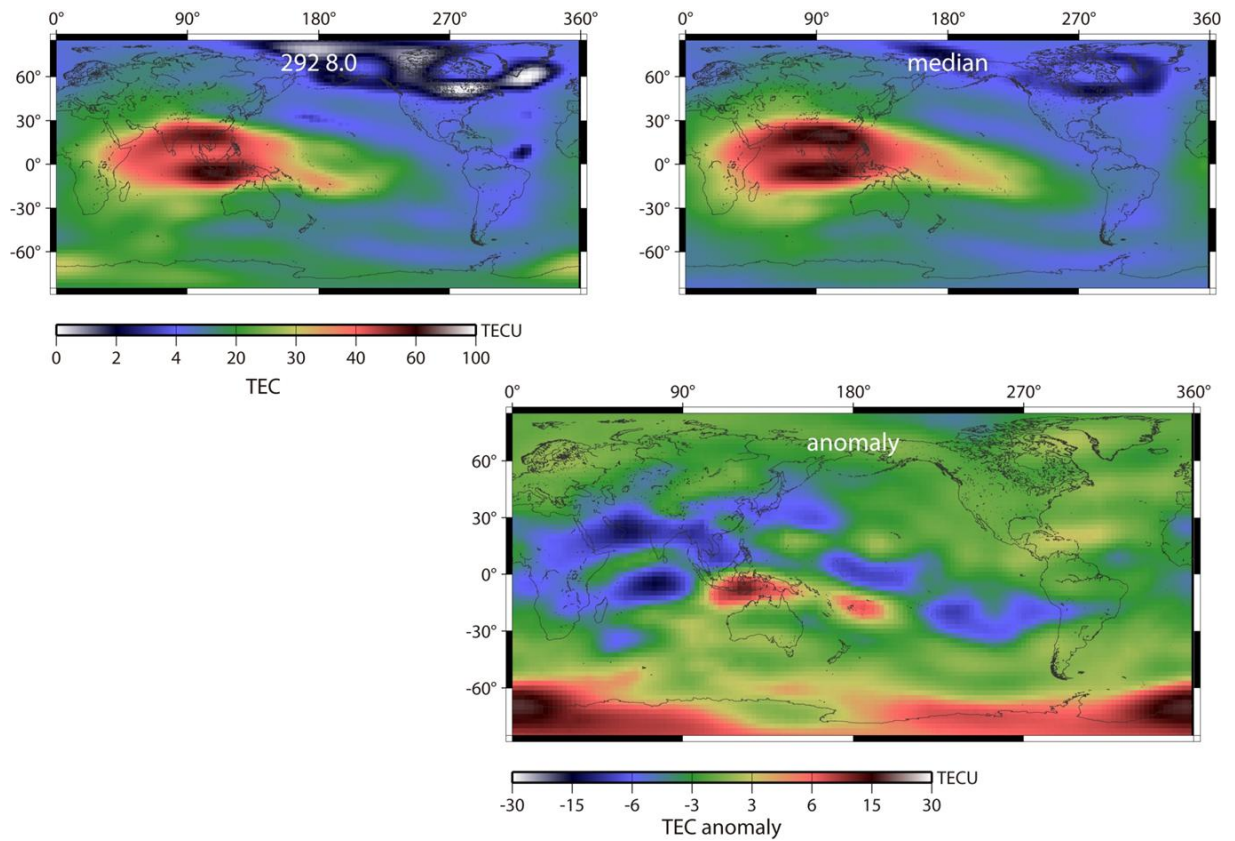


図 25. 左上：通算日 292 日 8.0UT の GIM データ。

右上：292 日 8.0UT の前 15 日間の median

下：左上と右上との差。太陽活動は全球規模に及ぶものなので電子数の絶対値が全体に大きい。したがってここで示されている異常の値も大きくなっている。震源にかかる負の異常は、震源以外にも様々な地域で現れており、地震に関連したものとは言い難い。

3.3 新潟県中越沖地震

新潟県中越沖地震 (Mw6.6) は2007年7月16日 (通算日 197) 01:13UT に発生した。震源の深さは約17km、震央の位置は37.56°N、138.61°E と推定されている。2007年中に発生した日本の地震の中で最大規模の被害地震で、東京電力柏崎刈羽原子力発電所に甚大な被害をもたらした。

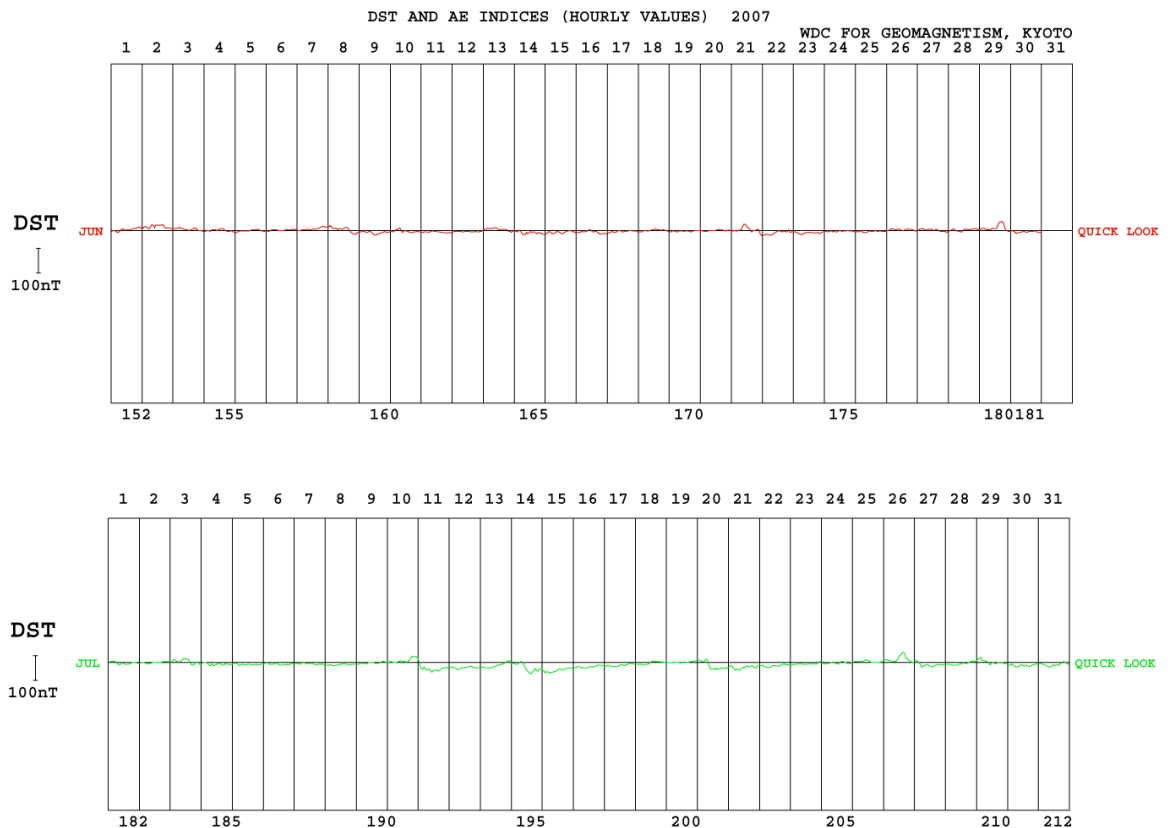


図 26. 新潟県中越沖地震前後の Dst 指数 (京都大学大学院理学研究科附属地磁気世界資料解析センター)。

地震発生 5、6 日前に Dst 指数に動きがあり (図 26)、それに対応すると思われる正の異常が GIM による TEC の時系列に見られる (図 27)。詳しく見てみると、地震の三日前、通算日 194 日にかなり長い間負の異常が続いて現れている (図 27)。なお臼田観測局の GPS データから求めた TEC 時系列においてはその異常はそれほど顕著ではない (図 28)。この期間の全球的な TEC マップを見てみると、ちょうど震源上空で負の異常が見られそれが数時間停滞するという四川地震の例に近い変動であることがわかる (図 29)。また震源域以外では目立った異常は見られないことから、この負の異常が地震に関連したものである可能性がある。

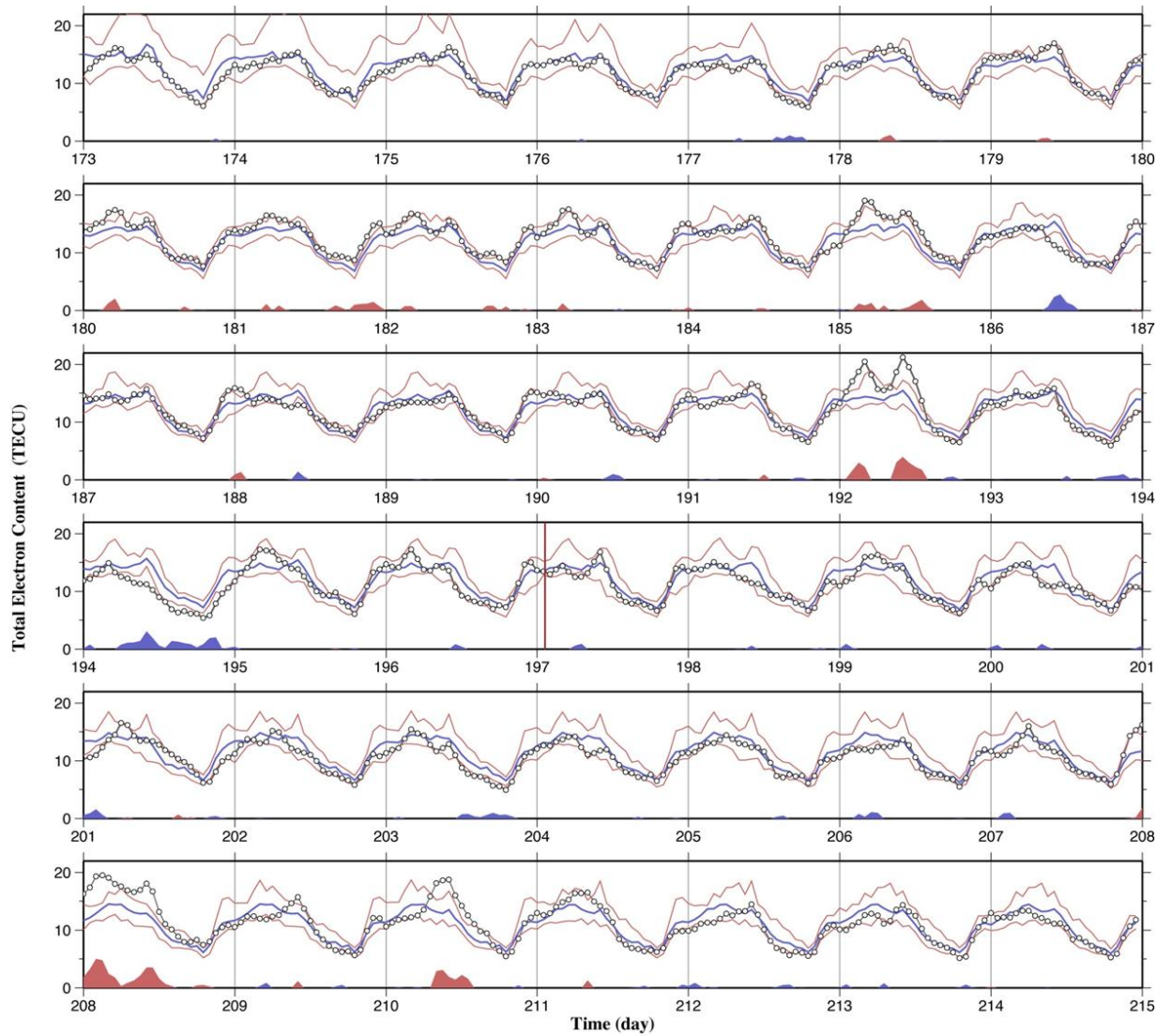


図 27. GIM によって算出された震源上空の TEC 時系列。図中の表現は図 17 と同様。通算日 197 日から 195 日にかけて負の異常が続いている。194 日 11 時 UT における TEC 異常の地理的分布を図 29 に示す。

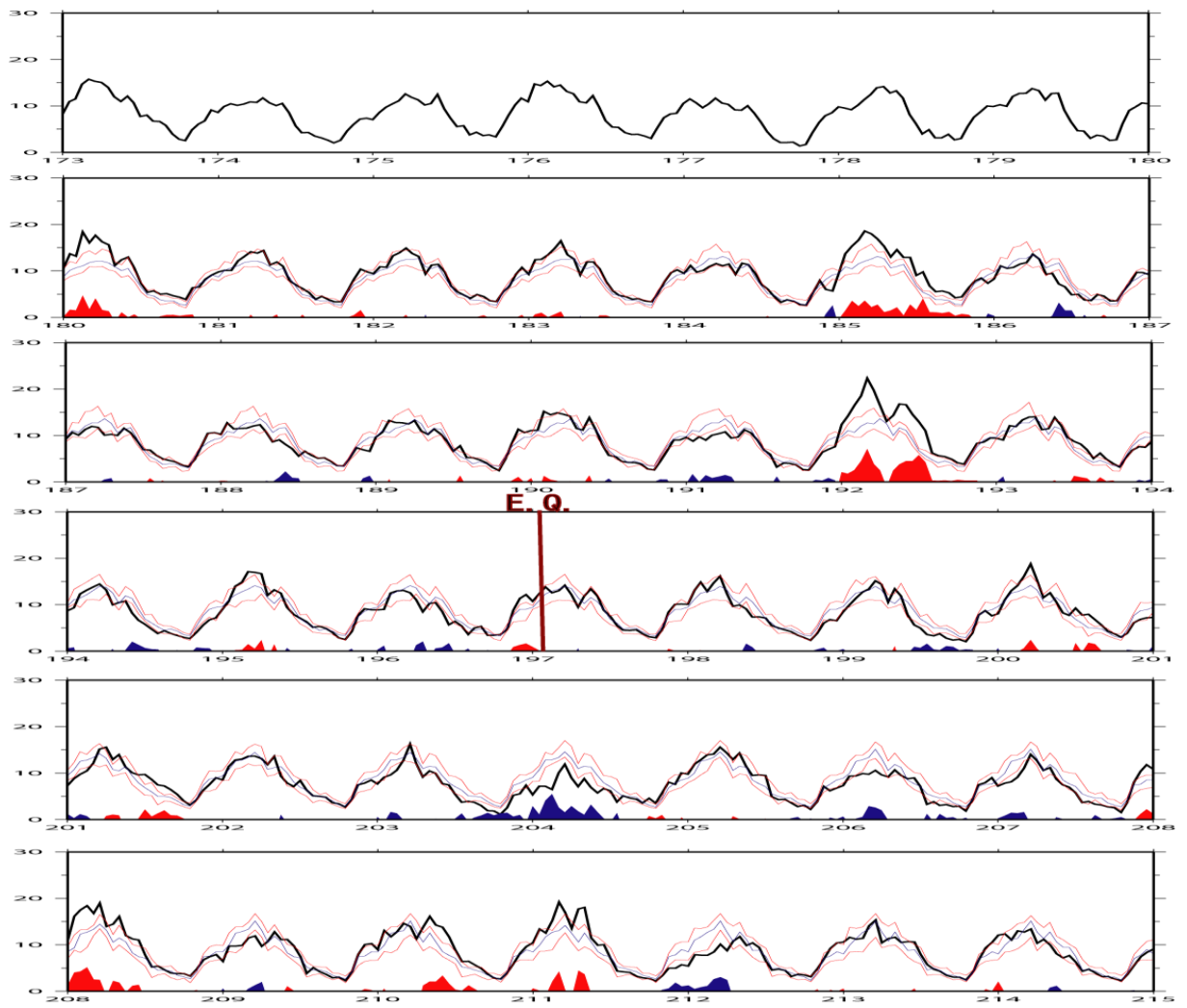


図 28. IGS の白田観測局の TEC 時系列。図中の表現は図 17 と同様。こちらも 197 日から 198 日にかけて負の異常があるが図 27 の GIM に基づく時系列と比べるとやや小さい。

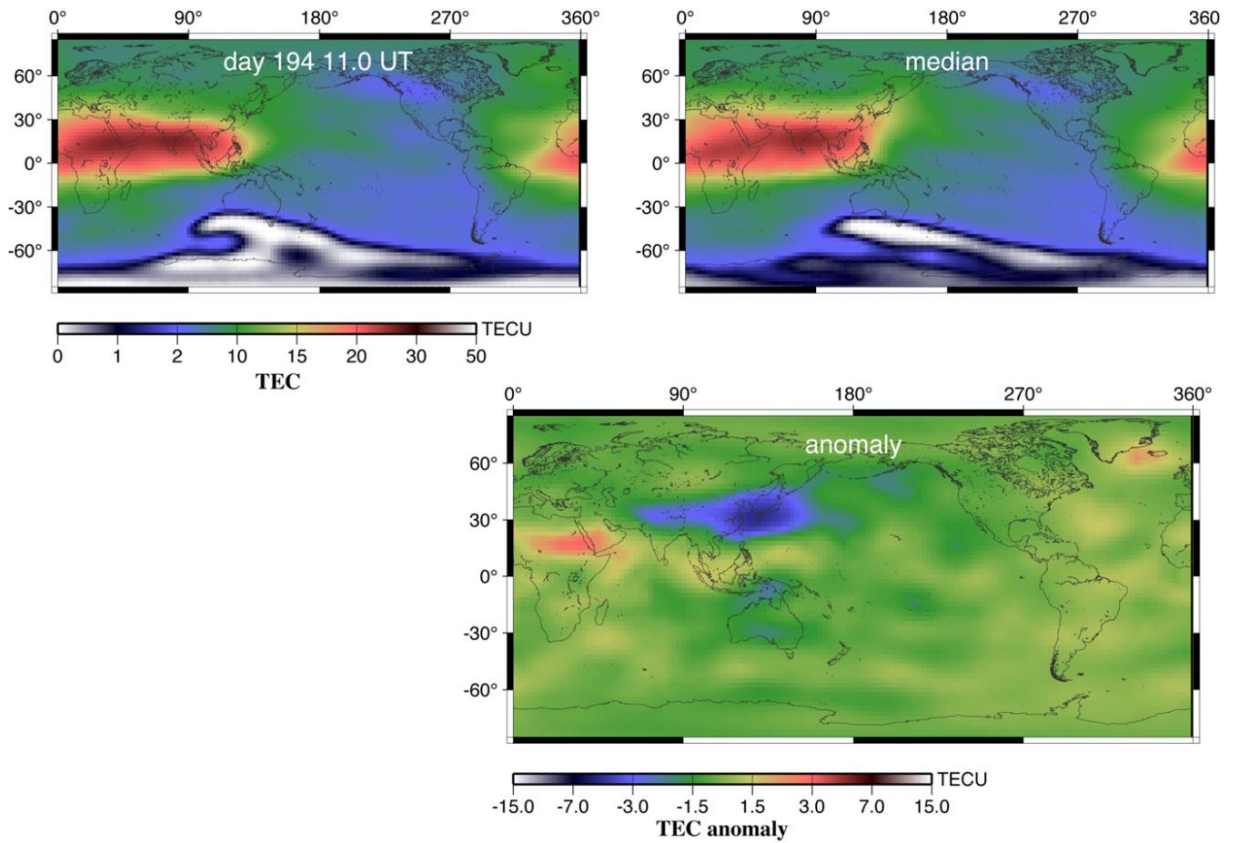


図 29. 左上：通算日 194 日 11.0UT の GIM データ。

右上：194 日 11.0UT の前 15 日間の median

下：左上と右上との差。震源域を中心として負の異常が表れている。また震源以外の地域では目立った異常がみられないことから、地震に関係した異常である可能性がある。

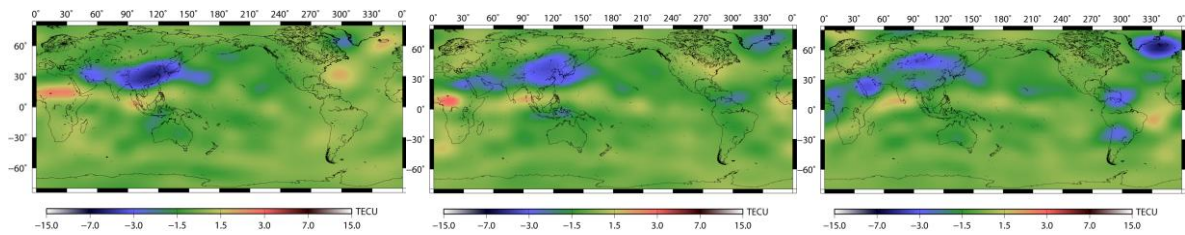


図 30. 左から 194 日 12.0 UT、14.0 UT、16.0 UT の GIM データと median の差。震源域に現れた負の異常がそのまま停滞し時間の経過とともになくなっていく様子がわかる。

次に Liu et al. (2009)と同じように、この負の異常の発生時刻において電子密度の高度分布を調べた。FORMOSAT-3/COSMIC のデータを解析センターから GPS 掩蔽観測で取得された電子密度プロファイルダウンロードし、負の異常の発生期間で震源に最も近くなる軌道を選びプロットした。この時の電子密度の高度分布を見てみると高度約 100km の E 層高度で電子密度が増加している部分がある。これはおそらくスプラティック E 層の小規模なものであろう。スプラティック E 層は F 層でも反射できない VHF 帯の電波を反射する性質を持つ。一般に季節的には 5 月中旬から 8 月上旬、時間的には 11 時から 12 時と 17 時から 18 時に発生頻度が高くなるが、発生原因はよくわかっていない。

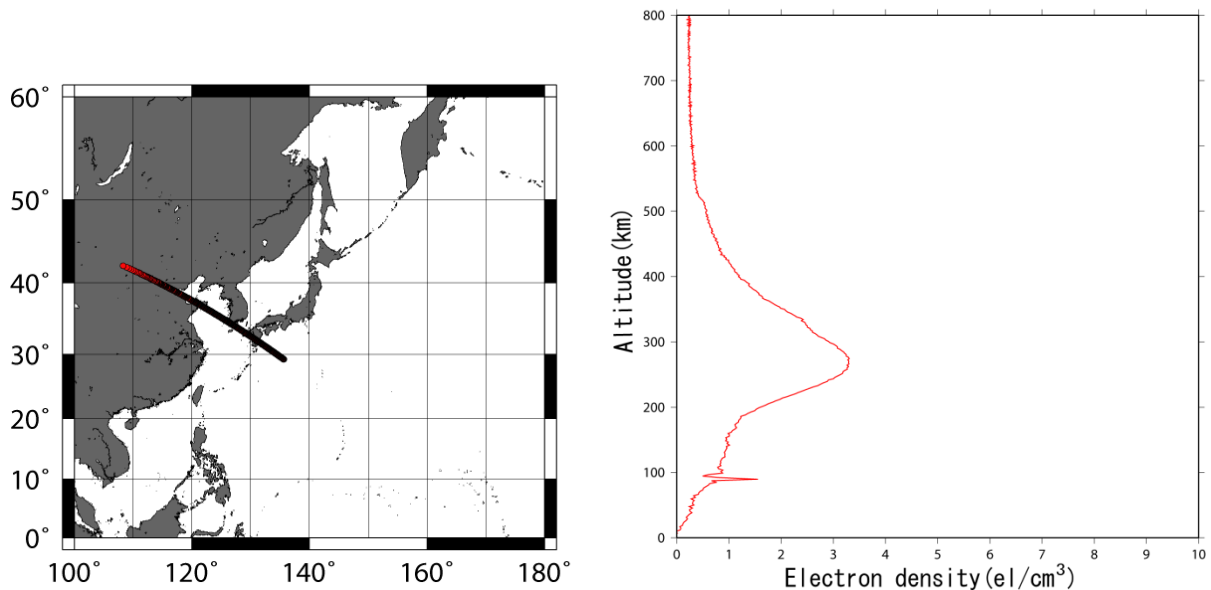


図 31. 左：掩蔽観測を行った FORMOSAT3/COSMIC が電子密度プロファイルを取得した位置の軌跡。時刻は 194 日の 11:34 UT である。

右：観測された電子密度プロファイル。高度 100km に小規模なスプラティック E 層がみられる。

高度分布の比較においても、全球的な異常の検出と同様に median との差をとった。GPS 掩蔽観測は震源付近や、地震発生時刻とちょうど同じになるような軌道をとることは難しい。そのため 20°-50°N、120°-150°E における図 30 に示したの時刻を基準とし、それより前後 90 分の median を作成した。median と観測値の結果を図 32 に示す。四川地震の例では、電子密度のピークが通常よりも低高度で見られ、かつ値が小さくなっていることが報告されているが(Liu et al., 2009)、今回の中越沖地震も四川地震のものほどではないが同様の傾向が見られた。

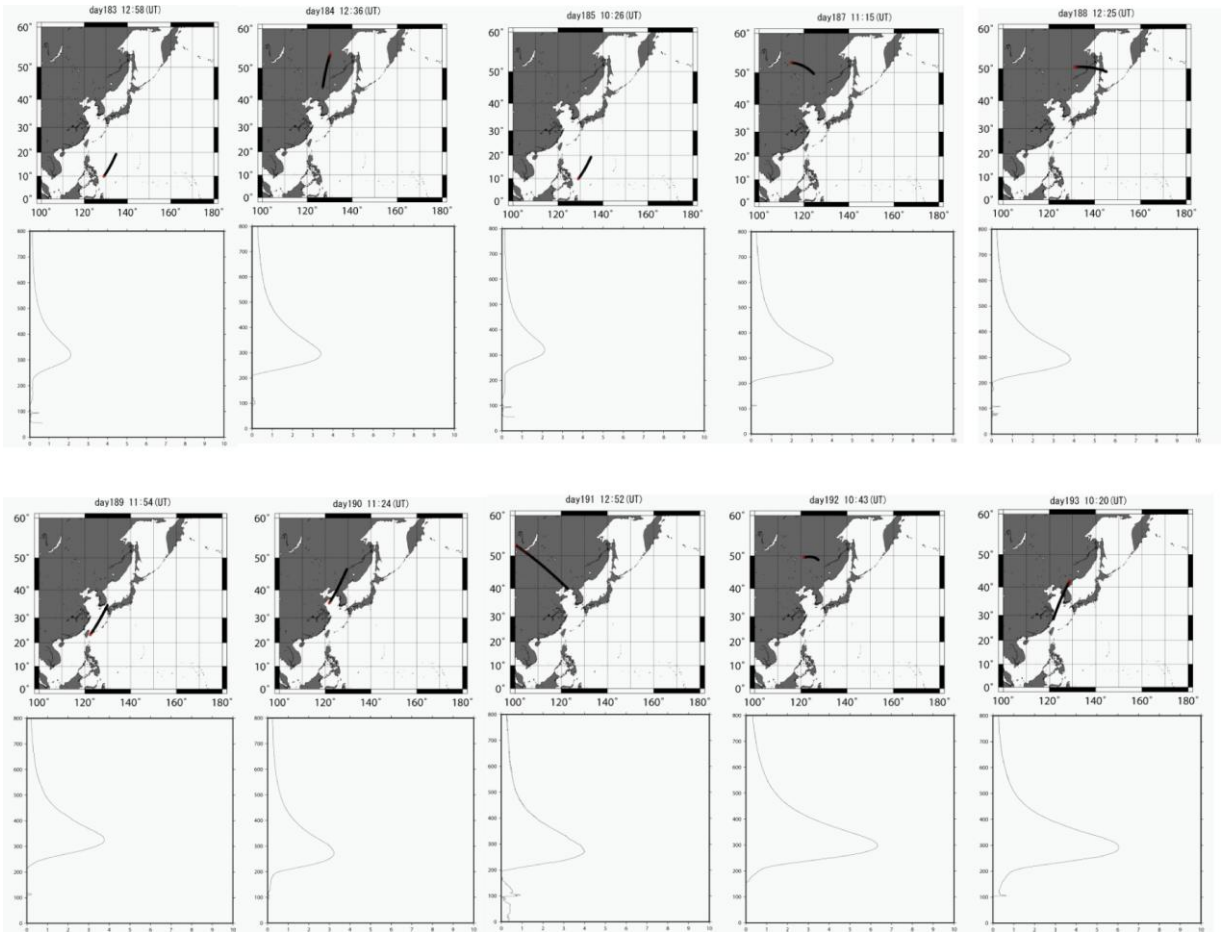


図 32. median の作成に用いた 11:34 UT の前後 90 分、前 10 日間の軌道と電子密度プロファイル

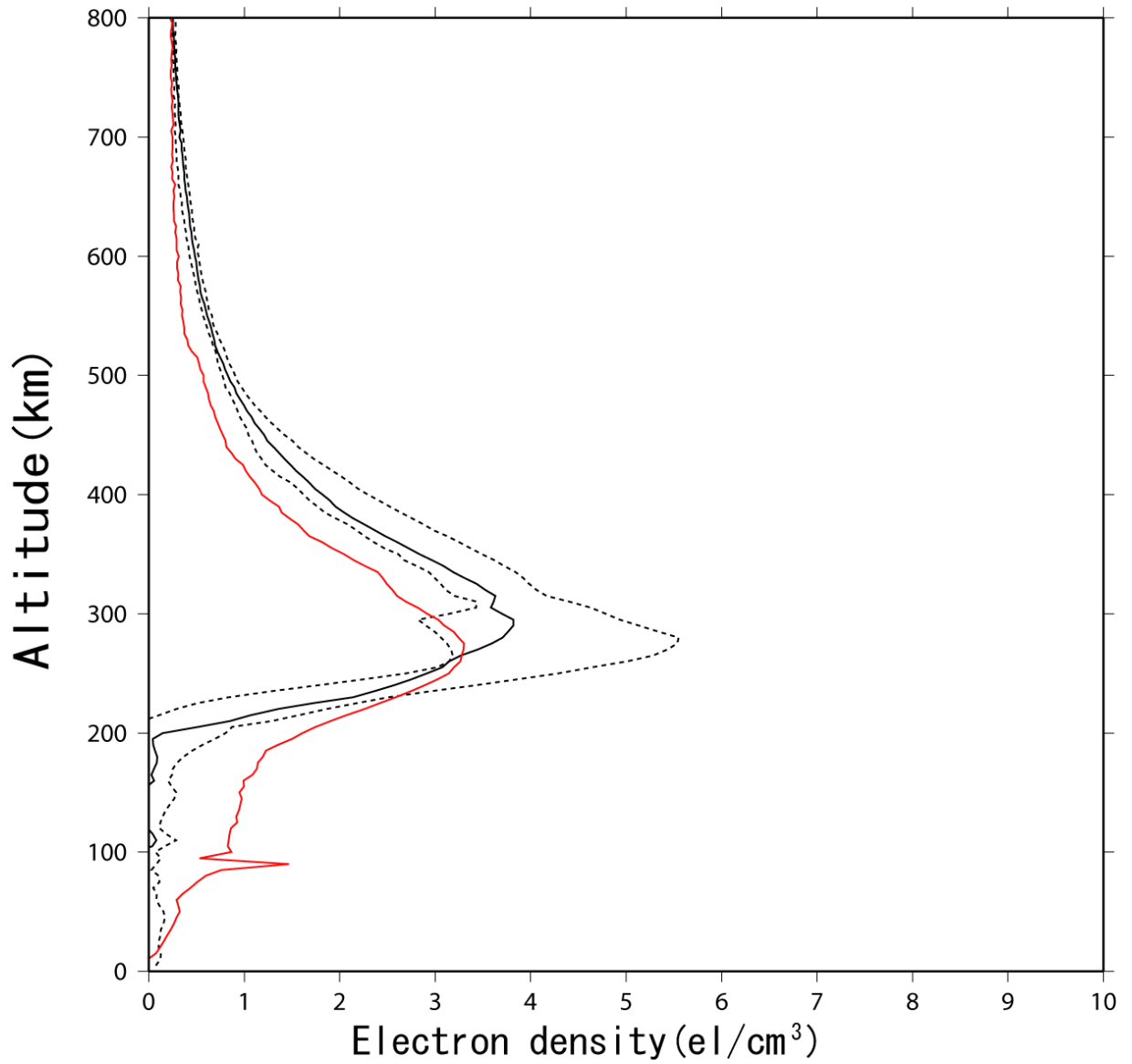


図 33. 実際の観測データ (赤線) と作成された median (黒線) との比較。点線は median と同時に得られた上下二つの quartile を示す。

4 考察

本研究では、TEC 異常と地震の関連性について前兆が見られるかどうかを中心に見てきた。地震に伴う電離圏の変動について、その発生の仕組みに関してはいくつかメカニズムが提唱されているが未だ解明には至っていない。様々な研究者がモデルを提唱しているが、現在までに三つほどの地球物理学的なメカニズムが考えられている。

1つ目は1.3でも述べたが、赤道異常の南方への移動によるものである。赤道異常は、大気潮汐で作られる東向きの電場と北向きの磁場の相互作用で上向きにドリフトした電子が、上空で磁力線に沿って降りてくることによって、磁気赤道の南北に生じる電子密度の大きな領域である。地震前に東向きの弱まることによって、プラズマのドリフトが少なくなり赤道異常をつくる電子の数が少なくなり、TECが減少するという考え方である。GPS 掩蔽観測によって得られた四川地震や中越沖地震の前の電子密度のプロファイルでは、電子密度の最大高度が低くなり、最大密度が小さくなる傾向が見られた。この理論ならば、地震前兆の TEC 減少が地震が発生する地表近くより電離圏上層で起こっているという GPS 掩蔽観測の結果とも整合する。

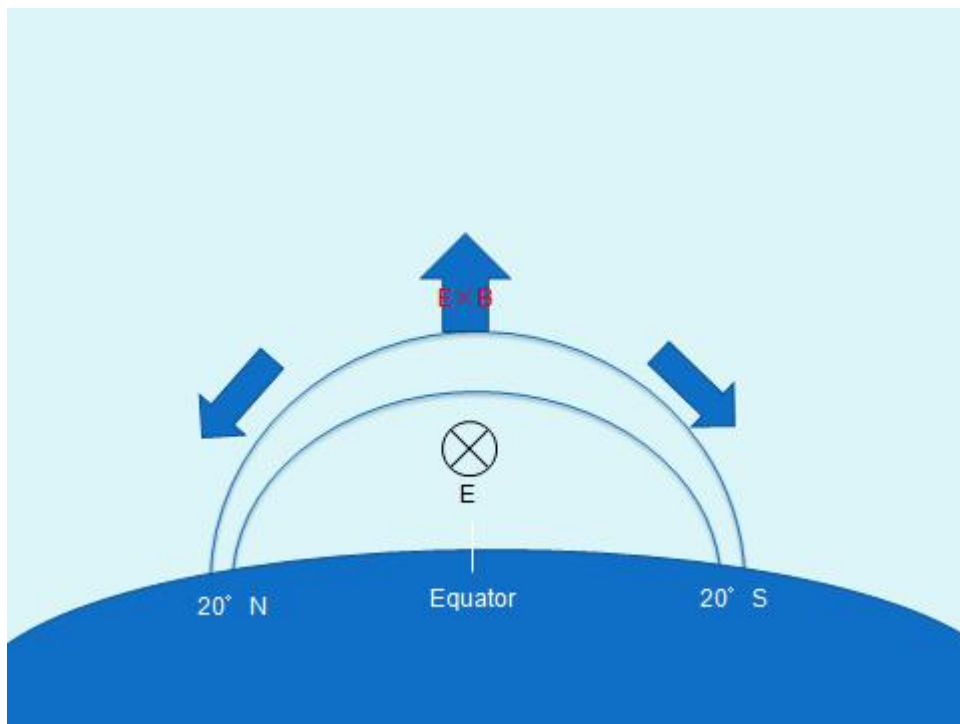


図 34.赤道異常の概念図

二つ目は大気伝導度の乱れである。通常、電離圏と地表の間には、世界中の雷の活動によって生じた 200-600kV の電位差が保たれており、晴天地域で両者の間に流れるわずかな電流と併せて一種の閉回路を形成している。この回路を流れる電流を支配するのが下部大気の大気伝導度である。Pulinets (2007) によると地震準備過程で地中から漏れ出したイオンによって局地的に下部大気の大気伝導度が不均一になると、この回路が乱れて電離圏の電子分布に横方向の乱れが生じるという考え方である。

3つ目は大気重力波の伝搬である。一般に、大気重力波を作るもので代表的なもの

は、前線や積乱雲、ジェット気流、山脈を越える風、オーロラなどによってできる大気の上下方向の乱れなどがある。地震前に生じた地表の温度異常によって、大気重力波が生じ、地震発生前に地表から電離圏へ伝搬し影響を与えるという考え方である。

これら3つの考えられているメカニズムは未だ仮説の段階でどれも確証は得られていない。また、これらの考えはすべて電離圏のみの異常によるものではなく地圏-大気圏-電離圏結合の考え方に基づいているものである。電磁気的な地震前兆の解明には複合的な観測が必要だろう。

本研究ではGPS-TEC法を用いて日本国内の内陸地震に先行する電磁気現象の検出を試みた。新潟県中越沖地震では先行研究のような異常が見られたが、通常の期間と比べ、はっきりと前兆と判断できるほど特異なものではなかった。従来GPS-TEC法で顕著な地震前の異常が報告されているのは、中国南部や台湾のように赤道異常の直下の地域である。日本でGPS-TEC法による電離圏の異常が顕著でないのは、赤道異常地域でない中緯度帯の日本ではこのような異常が現れにくいことを表しているのかもしれない。

2004年新潟県中越地震は太陽活動度の高い期間に発生したが、2008年岩手宮城内陸地震は太陽活動度の低い時期に、内陸浅部で発生した比較的大きな地震という、GPS-TEC法による前兆の検出に好条件がそろっていた。しかし、明瞭な前兆は必ずしも見られなかった。一方で2007年中越沖地震では四川地震と類似の前兆的な異常がGPS-TEC法で見ることができた。これらのことを総合すると、電磁気的な地震前兆の存在は否定出来るものではないが、GPS-TECによる前兆検出による日本国内の地震予知への応用はあまり実用的ではないと考えられる。

5 謝辞

本研究を進めるにあたり、宇宙測地学研究室のメンバーをはじめ、たくさんの方々にお世話になりました。指導教官である日置幸介教授にはテーマの提供やプログラム、学会発表の練習などで様々なアドバイスを頂きました。また、国際学会の発表という貴重な機会を与えて下さり、初めて海外を訪問することができました。この思い出は一生忘れることがないでしょう。心から感謝いたします。

また、古屋正人准教授、蓬田清教授、小山順二教授からはゼミや学会発表前などにご指摘、ご教授をしてくださいました。併せてお礼申し上げます。

本研究室博士3年の小川涼子さん、平成21年3月に卒業していかれた片岡健さんは、とても頼りになる先輩であり、まさに先輩の鑑でした。来年からはともに社会人として頑張っていきたいと思います。また、後輩である修士1年、学部4年の方々には何一つ先輩らしいところを見せられませんでした。逆に、雑談ばかりで研究の邪魔をしたことのほうが多かったかもしれません。これから、何か力になれることがあれば出来る限りのことをしたいと思います。そして、修士2年の松尾功二君は同期として、3年間研究生活を共にしました。自分から率先して仕事を受け、空いた時間や夜遅くまで研究に没頭する姿には敬意を表します。彼の頑張りを横で見ていたものとして、彼が研究者として大成することを切に願っております。

学部4年の頃よりこの研究室に配属され、様々なことがありました。中には大きな挫折を味わうこともあり、それでも落ちぶれずに今の自分でいられるのは、日置教授をはじめ、私の周りのたくさんの方々に励まされたおかげだと思っております。私は2010年4月より社会に出ることになりますが、この研究生活はこれからの人生の糧になっていくと確信しています。みなさん、本当にありがとうございました。

6 参考文献

- Astafyeva, E. and K. Heki, Dependence of waveform of near-field coseismic ionospheric disturbances on focal mechanisms, *Earth Planet. Space*, 61, 939-943, 2009.
- Astafyeva, E., K. Heki, V. Kiryushkin, E. Afraimovich, S. Shalimov, Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances, *J. Geophys. Res.*, 114, A10307, doi:10.1029/2008JA013853, 2009.
- Fraser-Smith, A. C., Bernardi, A., McGill, P. R., Ladd, M. E., Helliwell, R. A., and Villard Jr, O. G, Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the M_s 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1951, doi:10.1029/2003GL017812, 2003.
- Fujiwara, H., Kamogawa, M., Ikeda, M., Liu, J. Y., Sakata, H., Chen, Y. I., Ofuruton, H., Muramatsu, S., Chuo, Y. J., and Ohtsuki, Y. H, Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L17110, doi:10.1029/2004GL019865, 2004
- Hayakawa, M., Molchanov, O. A., Ondoh, T., and Kawai, E, The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals, *J. Comm. Res. Lab., Tokyo*, 43, 169-180, 1996.
- Heki, K., and Ping, J, Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 845-855, 2005.
- Heki, K., Otsuka, Y., Choosakul, N., Hemmakorn, N., Komolmis, T., and Maruyama, T, Detection of ruptures of Andaman fault segments in the 2004 Great Sumatra earthquake with coseismic ionospheric disturbances, *J. Geophys. Res.*, 111, B09313, doi:10.1029/2005JB004202, 2006.
- Kopytenko, Y. A., Matiashvili, T. G., Voronov, P. M., Kopytenko, E. A., and Molchanov, O. A, Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 77, 85-95, 1993.
- Kushida, Y. and Kushida, R, Possibility of earthquake forecast by radio observations in VHF band, *J. Atmos. Electr.*, 22, 239-255, 2002.

- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chen, C. H., Liu, C. Y., Chen, C.Y., Nishihashi, M., Li, J. Z., Xia, Y. Q., Oyama, K. I., Hattori, K., and Lin, C.H, Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, *J. Geophys. Res.*, 114, A04320, doi:10.1029/2008JA013698, 2009.
- Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J., and Tsai, H. F, Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1383-1386, 2001.
- Molchanov, O., Rozhnoi, A., Solovieva, M., Akentieva, O., Berthelier, J. J., Parrot, M., Lefeuvre, F., Biagi, P. F., Castellana, L., and Hayakawa, M, Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the DEMETER satellite, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 745-753, 2006.
- Moriya, T., T. Mogi, and M. Takada, Anomalous pre-seismic transmission of VHF-band radio waves resulting from large earthquakes, and its statistical relationship to magnitude of impending earthquakes, *Geophys. J. Int.*, 180, 858-870, 2010.
- 長尾年恭, 鴨川仁, 服部克巳, 電磁気的学的手法による短期的地震前兆の観測的研究の現状、地震第2輯, 59, 69-85, 2006.
- 長尾年恭, 地震予知研究の新展開, 近未来社, 2001.
- 小倉義光, 一般気象学【第2版】東京大学出版会, 1999.
- Pulinets, S. A, Natural Radioactivity, Earthquakes, and the Ionosphere, *Eos Trans. AGU*, 88(20), doi:10.1029/2007EO200001, 2007.
- Schaer, S, Mapping and predicting the Earth's ionospheric using the Global Positioning System, Ph. D. thesis, Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland, 1999.
- 辻宏道, GPS 気象学 第1章 GPS の原理 気象研究ノート第192号, 日本気象学会, 1998.
- 上田誠也, 地震予知研究の歴史と現状, 学士会会報 2007-IV No.865.
- 宇宙測地学研究室 HP 北海道大学・理・自然史科学専攻、大関優（卒論）
[【http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~geodesy/pdf/furuya_thesis.pdf】](http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~geodesy/pdf/furuya_thesis.pdf)