

巨大地震直前に増える電離圏の電子

日置 幸介 北海道大学理学研究院

1. はじめに

1855年の安政江戸地震の直前に永久磁石が磁力を失った話を聞いて、幕末の賢者佐久間象山は地震予知器を作ったそうだと(榎本, 2002)。トリブッチ(1985)は、大気中の帯電エアロゾルによって同じ極性に帯電した物体間の静電的な反発でこの現象が説明できるとした。米国では1989年のロマプリータ地震直前にULF帯の電磁波放射があったことが報告されている(Fraser-Smith *et al.*, 1990)。このように地震が電磁気的な前兆を伴った事例は多く知られている。

今日の電磁気的な地震前兆の探求は、地電流(Uyeda and Kamogawa, 2008)や、VLF帯(Molchanov and Hayakawa, 1998)やVHF帯(Moriya *et al.*, 2010)の電波伝搬異常が中心となっている。それらは限られた数の特定の観測点で特殊な目的のために設置された観測装置によるものであり、一般的に地震との空間的な相関を立証することは容易でない。フランスのDEMETER衛星(e.g. Němec *et al.*, 2008)は、これを乗り越えるために打ち上げられたものだが、衛星が震源域上空を通過する頻度は限られる。こんどは時間的な相関の立証に問題が生じるのだ。

2011年3月11日の05:46UTに発生した東北地方太平洋沖地震は、太平洋プレートが東北日本の下に沈み込む日本海溝のプレート境界を、長さ約450 km、幅約200 kmにわたって破壊した。国土地理院が運用するGEONET (GPS Earth Observation Network)は、日本列島に敷き詰められた千局を超える全地球測位システム(GPS)の連続観測点から

成り、1990年代半ばの観測開始以来日本列島の地殻変動を観測してきた(e.g. Heki, 2007)。GEONETは日本列島の大地の動きをほぼ二次元的にとらえられるが、東北沖地震に伴う地殻変動もOzawa *et al.* (2011)を始めすでに多く報告されている。

超高層大気である電離圏には太陽からの放射によって中性大気から弾き出された電子が多く漂っており、日本上空では高度300km付近で最も電子が濃い。高度約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わずかな遅延を受ける。遅延はマイクロ波の周波数の自乗に反比例する。それを利用して、異なる周波数のマイクロ波の遅延を比べれば、衛星と受信機を結ぶ線上にある電子の総数(Total Electron Content, TEC)がわかる。ここでは、GPS網によって見出された、巨大地震に先だって生じる電離圏のTEC異常(Heki, 2011)について紹介する。

2. 2011年東北沖地震とTECの変動

TECを用いた研究の対象のひとつに、固体地球における現象に起因する電離圏の擾乱がある。地震時電離圏擾乱(Coseismic Ionospheric Disturbance, CID)はその一つであり、GPSを用いた最初の研究(Calais and Minster, 1995)以来、筆者を始め複数の研究グループが取り組んでいる。その実体は震源域における地面や海面の上下運動や表面波(この場合はレーリー波)によって励起された音波(Heki *et al.*, 2006; Rolland *et al.*, 2011)、あるいは内部重力波(Occhipinti *et al.*, 2008)が電離圏高度まで伝搬して作った電子の濃淡である。

ウェブ(terras.gsi.go.jp)で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、2011年東北沖地震前後のTEC変化を調べてみた。図1Aは地震前後のTECの変動をそのまま描いたものである。なおGPS位相データには整数値バイアスがあり、時間変化のみが意味を持つ(絶対値に意味がない)。仰角が低い(地平線に近い)衛星では電波が電離圏を斜めに貫くため、遅延が見かけ上大くなる。そのため昇っては沈むGPS衛星の動きに応じて、TECはU字型のゆっくりとした変化を示す。地震発生時(5:46UT)には八個のGPS衛星が観測可能であったが、音波によるCIDは5, 15, 26, 27, 28の各衛星で、地震約八分後に始まる不規則な乱れとして見える(Astafyeva *et al.*, 2011)。また衛星18, 22で地震の40-80分後に生じたきれいな振動は内部重力波によるもので、地図上に描くと震源を中心としたきれいな同心円状となる(Tsugawa *et al.*, 2011)。電離圏を高度300 kmの薄い層で近似して、その層を視線が貫く点の地図上への射影をSIP (Sub-ionospheric point)と呼ぶ。その軌跡を図1Bに示す。

次に地震直前の非振動的なTEC変化を取り出して眺めてみよう。図2Aは東北から関東にかけてのGPS局から15番衛星を通して見た東北地方上空のTECの時間変化である。斜め方向のTECなので見かけのU字型変化が見える。地震十分後のCIDに加えて、地震の60分前から40分前あたりから顕著な正の異常が始まっていることがわかる(電子数の絶対値の増加というより周囲に対する相対的な増加)。異常は東北の局で大きく、震源域から離れるに従って小さくなる。TEC異常は、CIDによる電離圏の揺れが治まった頃には消えている。ここではOzeki and Heki (2010)に倣い、鉛直方向のTECが時間の三次多項式に従うと仮定して最小二乗法を用いてモデルを推定した(なめらかな曲線)。推定の際には、地震に伴う異常部分(UT5.2-6.0)を除いている。

モデルからの差に天頂角の余弦をかけて鉛直方向に射影したものを「異常」と定義し、地震の一時分前、二十分前、一分前におけるそれらの分布

を色で図3に示す。一時間前にはなかった正の異常が二十分前には現れており、地震に向けて大きくなっている。異常の大きさは鉛直方向で最大で約2.3 TECU (1 TECUは1 m²あたり10¹⁶個の電子があることを示す)で、この時刻の全電子数の一割弱に相当する。TECが正異常を示す地域は震源域とほぼ重なる。同時に震源域から遠く離れた西南日本では負の異常が現れており、異常が電子の「純増」ではなく「移動」によるものであることを示唆する。

図2や図3と同様の図は15番衛星以外に9, 26, 27番の諸衛星を用いても描くことができるが、それらはHeki (2011)のオンライン付属資料を参照されたい。正の異常が現れる領域は衛星によって微妙に異なるが、それは本来三次元的な分布を持つ電子密度を高度300 kmの面に二次元的に投影したことからくるものである。

全球電離圏地図(Global Ionospheric Map, GIM)は世界中のGPS局を用いて(ただし日本からは数局のみ)日々作成されている。図2左には、スイス・ベルン大学のデータセンター(ftp.unibe.ch)からダウンロードしたGIMを用いて、0038局と15番衛星を仮定して計算したこの時刻の斜めTECの変化も描いてある。GIMの空間分解能の目安は緯度が2.5度、経度が5度程度(Mannucci *et al.*, 1998)と低い。そのため、細部は失われているが、本研究で求めた地震前のTEC正異常と同様の正異常が見られる。これはGIMの導出に岩手県水沢局(図2B)のデータが用いられているためであろう。

3. 他の大地震との比較

TECは地震がなくても宇宙天気の影響でしばしば上昇する。たとえば太陽フレアに伴って紫外線の放射が増えれば電離が促進されて電子が増える。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)。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、地震と関係ない擾乱が多く発生していた可能性がある。

図2や図3で見られたような地震前TEC異常が東北沖地震の前兆であるかどうかを判断するには、他の巨大地震の前にも類似の現象がみられるかどうかを調べるのが早い。そこで、2010年二月に発生したチリ地震(M_w 8.8) (Moreno *et al.*, 2010)、2004年十二月のスマトラ・アンダマン地震(M_w 9.2) (Banerjee *et al.*, 2005)、2007年九月のスマトラ・ブングル地震(M_w 8.6) (Gusman *et al.*, 2010)の前後のTEC変化を、入手可能なGPSデータを使って東北沖地震の時と同様な解析を行ってみた。特に、2010年チリ地震と2007年ブングル地震は、地磁気活動が静穏な時期に発生しており、地震前に同様なTEC異常が生じたかを見ることは重要だ。

その結果、チリ地震では17, 20, 23の三つのGPS衛星で、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40-50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確認された(図4)。同様のTEC異常は2007年ブングル地震でも8, 25, 27の衛星で見いだされた。2004年スマトラ・アンダマン地震の発生時は地磁気活動がやや活発であったが、どの地震よりも大きな5 TECUに達する地震前のTEC正異常が、もっとも地震モーメント解放の大きかった断層セグメントの上空で見られた。図5はこれらのM9クラス地震から代表的なTEC変化データを取り上げて比較したものである。ちなみに2005年ニアス地震(M_w 8.7)についても地震前後のTECを調べたが、その時間帯はプラズマバブルの活動によるTECの乱高下が激しく、意味のあるデータが得られなかった。

次にM8クラスの地震に目を転じる。1994年北海道東方沖地震(M_w 8.3)(Tsuji *et al.*, 1995)は、東北沖地震が発生するまでは、GPS連続観測網が整備されて以来最大の地震であった。この地震の前には弱いTEC正異常が見つかった(図5)。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、地震時のCIDは綺麗にみえるものの、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。

Heki (2011)のオンライン付属資料では、図2に示された曲線の一つについて、同一の局と衛星の組

み合わせでのTEC変化を地震前後四か月にわたって調べたものを掲載している。最大の異常は本研究で示した地震直前のものだったが、それ以外にもある程度大きなTEC上昇が数回みられた。それらはすべて秒速数百メートルで極域から南下してくる大規模移動性電離圏擾乱だった。

4. モデル

地震直前になぜ上空でTECの正異常が生じるかの本当の理由はわからない。しかし地表近傍に正電荷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としては、圧縮された火成岩から正孔が拡散してくる現象が室内実験で知られる (Freund, 2001; Takeuchi *et al.*, 2006)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.* (2011)は、地表の電荷によって大気中に上向きの電流が流れ、電離圏に達して地磁気の磁力線に沿った領域の電位を上げることを数値計算で示した。電位の高い領域から放射状に生じる電場が磁場と相互作用することによって、西側では電離圏電子が下降、東側では上昇する。その結果、本研究で見いだされた程度のTEC変化もつくられるらしい。いずれ原因を特定するには、電磁気的なセンサーを備えた観測局をGPSと同じくらい密に展開する必要があるのかも知れない。

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追試が容易でなかった。しかしGPSデータの入手は簡単で、それを用いたTECの解析も難しくないので、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(日置他, 2011)ので、興味を持った読者各位は自ら試してほしい。

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合意が得られれば、TECの分布と変化がリアルタイムで監視される時代が来るかも知れない。データ収集には技術的問題はないが、ゆっくりと始まるTEC異常を宇宙天

気の影響と区別するソフトウェア的な課題は残るだろう。かつては盛んだった地震直前予知研究は、我が国では兵庫県南部地震以来久しく沈滞している（上田、2011）。本件を機会に実用化に向けた研究の活性化を期待したい。

文献

- Astafyeva, E. I., P. Lognonné, and L. M., Rolland (2011), First ionospheric images of the seismic fault slip on the example of the Tohoku-oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, L22104, doi:10.1029/2011GL049623.
- Banerjee, P., F. F. Pollitz, and R. Bürgmann (2005), The size and duration of the Sumatra - Andaman earthquake from far - field static offsets, *Science*, 308, 1769-1772.
- Calais, E., and J. B. Minster (1995), GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1045-1048.
- 榎本祐嗣 (2002), 大地表面の異常帯電：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, 56-61.
- Fraser-Smith, A. C., A. Bernardi, P. R. McGill, M. E. Ladd, R. A. Helliwell and O. G. Villard, Jr. (1990), Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms 7.1 Loma Prieta earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 17, 1465-68.
- Freund, F. (2000), Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks, *J. Geophys. Res.*, 105, 11001-11019.
- Geller, R. J., D. D. Jackson, Y. Y. Kagan, and F. Mulargia (1997), Earthquakes cannot be predicted, *Science*, 275, 1616-1617.
- Gusman, A. R., Y. Tanioka, T. Kobayashi, H. Latief, and W. Pandoe (2010), Slip distribution of the 2007 Bengkulu earthquake inferred from tsunami waveforms and InSAR data, *J. Geophys. Res.*, 115, B12316, doi:10.1029/2010JB007565.
- Heki, K. (2011), Ionospheric electron enhancement preceding the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.* 38, L17312, doi:10.1029/2011GL047908.
- Heki, K. (2007), Secular, transient and seasonal crustal movements in Japan from a dense GPS array: Implication for plate dynamics in convergent boundaries, in *The Seismogenic Zone of Subduction Thrust Faults*, edited by T. Dixon and C. Moore, pp. 512-539, Columbia Univ. Press, New York.
- Heki, K., and J. - S. Ping (2005), Directivity and apparent velocity of the coseismic ionospheric disturbances observed with a dense GPS array, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236, 845-855.
- Heki, K., Y. Otsuka, N. Choosakul, N. Hemmakorn, T. Komolmis, and T. Maruyama (2006), 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.
- 日置幸介・他 (2011), GPS-TEC 法による地球物理学, *測地学会誌*, 56, 125-134.
- Kuo, C.L., J.D. Huba, G. Joyce, and L.C. Lee (2011), Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges, *J. Geophys. Res.*, 116, A10317, doi:10.1029/2011JA016628.
- Mannucci, A. J., B. D. Wilson, D. N. Yuan, C. H. Ho, U. J. Lindqwister, and T. F. Runge (1998), A global mapping technique for GPS - derived ionospheric total electron content measurements, *Radio Sci.*, 33, 565-582.
- Molchanov, O. A., and M. Hayakawa (1998), VLF signal perturbations possibly related to earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 103, 17,489-17,504.
- Moreno, M., M. Bosenau, and O. Oncken (2010), 2010 Maule earthquake slip correlates with pre - seismic locking of Andean subduction zone, *Nature*, 467, 198-202.
- Moriya, T., T. Mogi, and M. Takada (2010), 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.
- Němec, F., O. Santolík, M. Parrot, and J. J. Berthelier (2008), Spacecraft observations of electromagnetic perturbations connected with seismic activity, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L05109, doi:10.1029/2007GL032517.
- Ochipinti, G., E. A. Kherani, and P. Lognonné (2008), Geomagnetic dependence of ionospheric disturbances induced by tsunamigenic internal gravity waves, *Geophys. J. Int.*, 173, 753-765.
- Ozawa, S., T. Nishimura, H. Suito, T. Kobayashi, M. Tobita, and T. Imakiire (2011), Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude - 9 Tohoku - Oki earthquake, *Nature*, 475, 373-376.

Ozeki, M., and K. Heki (2010), 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.

Pulinets, S., and D. Ouzounov (2011), Lithosphere - atmosphere - ionosphere coupling (LAIC) model—A unified concept for earthquake precursor validation, *J. Asian Earth Sci.*, 41, 371-382.

Rikitake, T. (1976), *Earthquake Prediction*, Elsevier, Amsterdam.

Rolland, L. M., P. Lognonné, and H. Munekane (2011), Detection and modeling of Rayleigh wave induced patterns in ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 116, A05320, doi:10.1029/2010JA016060.

Takeuchi, A., B. W. S. Lau, and F. Freund (2006), Current and surface potential induced by stress - activated positive holes in igneous rocks, *Phys. Chem. Earth*, 31, 240-247.

H. トリブッチ(渡辺正訳) (1985), 動物は地震を予知する, 朝日選書 277, 朝日新聞社.

Tsugawa, T. et al. (2011), Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 875-879.

Tsuji, H., Y. Hatanaka, T. Sagiya, and M. Hashimoto (1995), Coseismic crustal deformation from the 1994 Hokkaido - Toho - Oki earthquake monitored by a nationwide continuous GPS array in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1669-1672.

Uyeda, S., and M. Kamogawa (2008), The prediction on two large earthquakes in Greece, *Eos Trans. AGU*, 89(39).

上田誠也 (2011), どうする! 日本の地震予知, 中央公論四月号, 196.

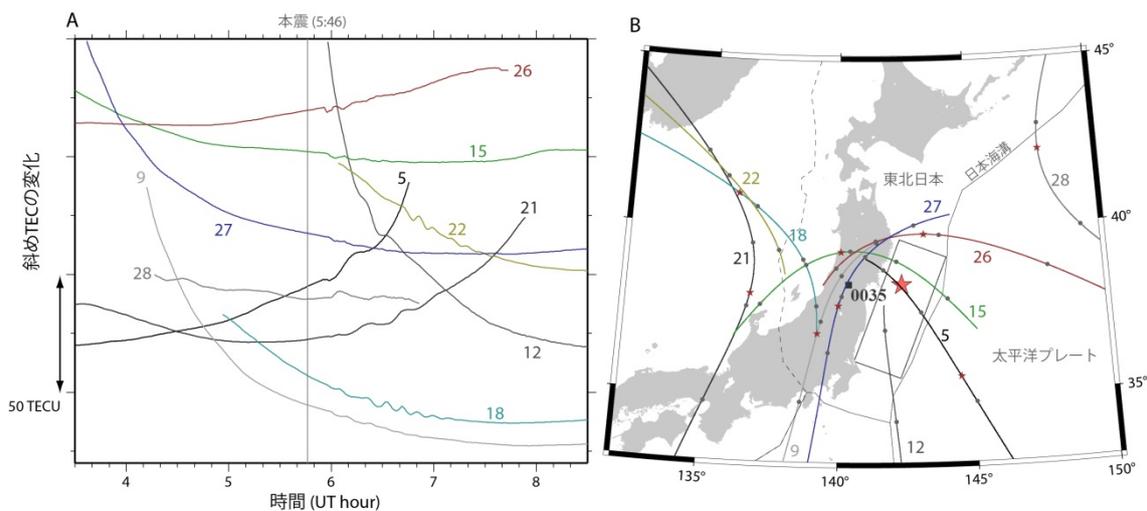


図1 (A) 0035局から十個のGPSを用いて観測された、2011年3月11日、3.5-8.5UTの斜めTEC変化。衛星ごとの下駄ばきがあるので、時間変化にのみ注目してほしい。地震の十分後頃からいくつかの衛星で乱れが見られる。その間のGPS衛星のSIPの軌跡を(B)に示す。軌跡上には一時間ごとの区切りと地震発生時刻を示す小さな星を示す。四角形はおおよその断層の形で、大きな星印は震源を示す。

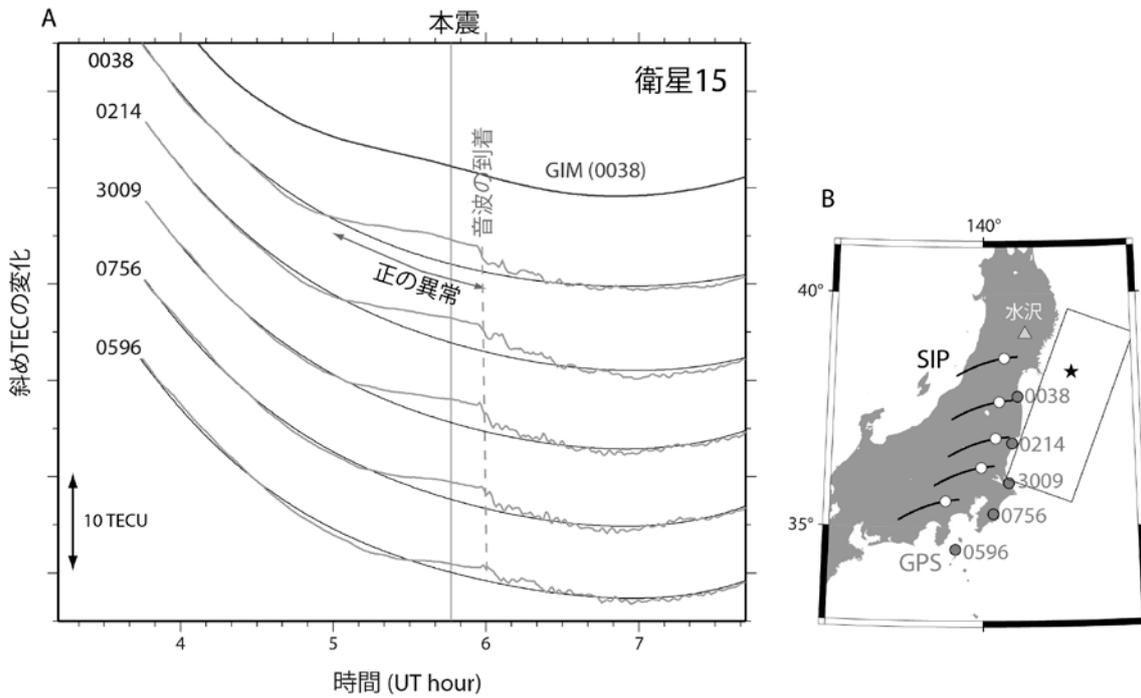


図2 (A) 地震前後に15番のGPS衛星を観測して得られた電離圏全電子数の時系列。地震約の一時間程前から正の異常（黒い滑らかな曲線で示すモデルからのずれ）が見える。正の異常は音波の到来（地震約十分後）とともに消え始める。全球電離圏モデル(GIM)に基づく0038局におけるTEC変化の計算値を一番上の曲線で示す。(B)GPS局（灰色の丸）と5-6UTの間のSIPの軌跡（黒い曲線）。白丸は地震発生時刻のSIP位置。

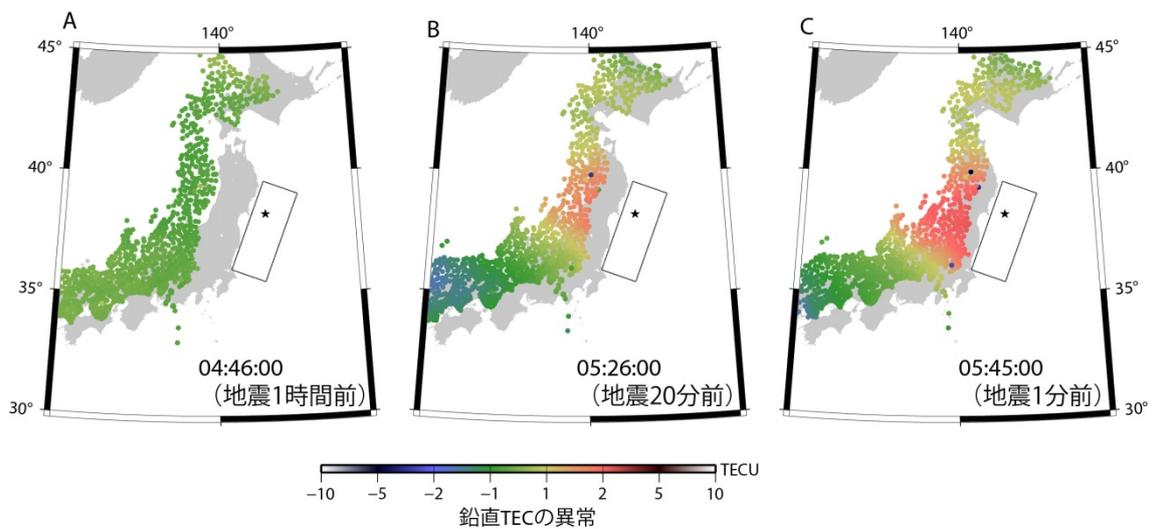


図3 15番のGPS衛星を観測して得られた電離圏全電子数の、地震一時間前(A)、二十分前(B)、一分前(C)の異常を鉛直TECに換算して、色で地図上にその時刻のSIPの位置にプロットしたもの。

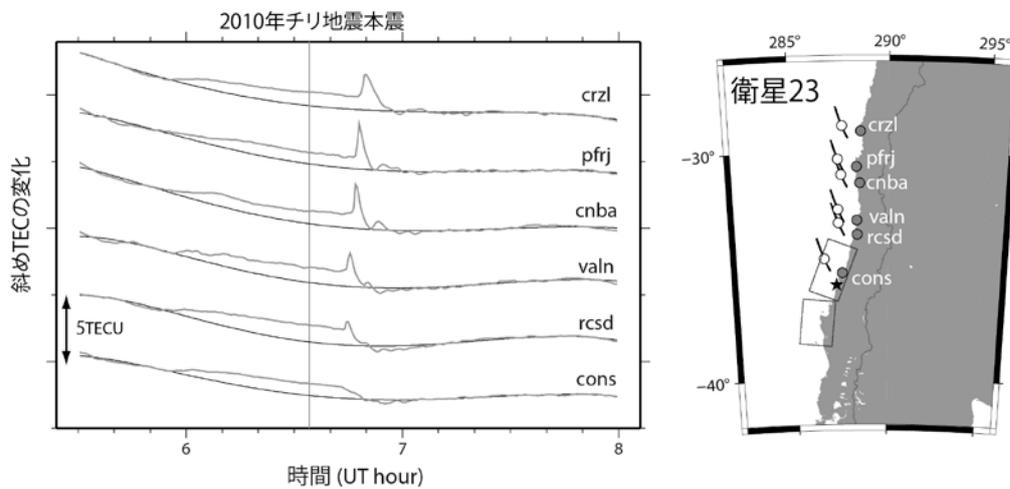


図4 2010年2月のチリ地震前後に23番のGPS衛星を観測して得られた電離圏全電子数の時系列。地震の約40-50分前から東北沖地震と同様な正の異常が見える。局の位置とSIPの軌跡を右の地図に示す。

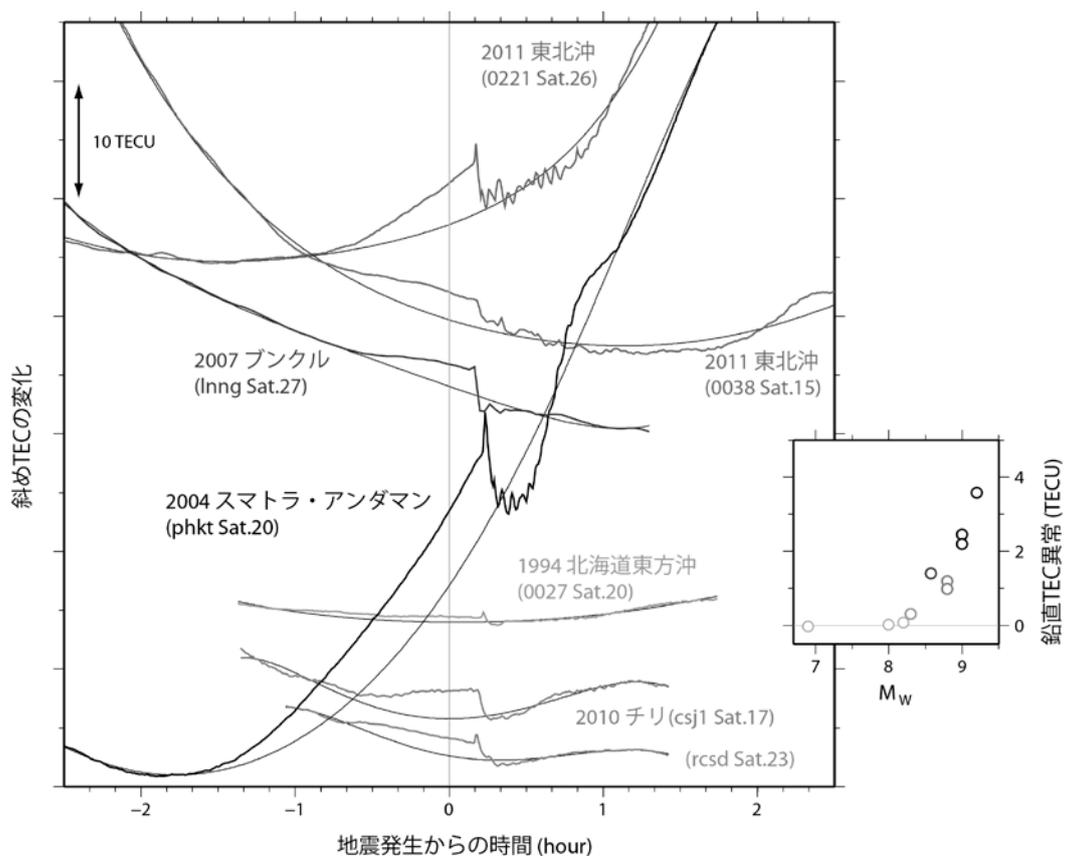


図5 様々な地震の前後に観測された斜めTECの時系列を、同一のスケールかつ地震発生時刻を共通にとって比較したもの。地震直前の異常を鉛直TECに換算したものを、モーメントマグニチュード M_w と比較した図を右に示す(異常が観測されなかった2003年十勝沖地震等も含まれる)。